



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO



**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE ARQUITECTO**

REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA FORJADOS DE MADERA EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES Y CONTEMPORÁNEAS

AUTOR:
DANIEL ERNESTO ENRÍQUEZ MOROCHO

DIRECTOR:
ING. HERNÁN ALFREDO GARCÍA ERAZO
CUENCA - ECUADOR , 2014

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA FORJADOS DE MADERA EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES Y CONTEMPORÁNEAS

AUTOR:
DANIEL ERNESTO ENRÍQUEZ MOROCHO

Cuenca, Julio del 2014

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA FORJADOS DE MADERA EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES Y CONTEMPORÁNEAS



AUTOR:
DANIEL ERNESTO ENRÍQUEZ MOROCHO

DIRECTOR:
ING. HERNÁN ALFREDO GARCÍA ERAZO

Cuenca, Julio del 2014



RESUMEN

El desarrollo de sistemas de reforzamiento estructural para madera contempla un amplio abanico de conocimientos y experticias, por tal motivo, el presente documento inicia con una breve reseña histórica acerca de la madera como elemento estructural; la cual ha sido protagonista en el campo de la construcción, a lo largo del tiempo y en diferentes épocas de la humanidad. Como complemento al estudio del material se han expuestos los principales aspectos que envuelve a la madera como elemento estructural.

Al referirse a la madera estructural, la disponibilidad de especies es muy variada, sin embargo, no todas han sido utilizadas con la misma demanda, por tal motivo, se ha seleccionado la especie más utilizada para la construcción en nuestro medio y, a partir de estadísticas y por sondeos aplicados a las viviendas del centro histórico de Cuenca, se ha determinado a la madera de eucalipto, como el material más utilizado en las estructuras de edificaciones antiguas.

Para proponer refuerzos estructurales, fundamentados con conceptos técnicos, fue necesario determinar la resistencia y comportamiento elástico de la madera en su estado inicial; por lo tanto, como parte de un adecuado análisis de los resultados, respecto a la resistencia del material, se ha logrado obtener muestras antiguas (vigas y columnas), de diferentes edificaciones, clasificando a las mismas según sus años de antigüedad, esto con la intención de definir sus capacidades resistentes y por ende sus respectivos deterioros según su edad. La división ha sido dispuesta para trabajar con probetas de madera entre 100, 50 y 0 años de antigüedad, utilizando al último

grupo de muestras nuevas, como referencia para la madera antigua y así definir los factores de deterioro a través de los años.

En consecuencia, se ha realizado ensayos de flexión y de compresión en el laboratorio, con el objetivo de definir la resistencia a esfuerzos y determinar las principales capacidades elásticas de cada grupo de madera. Las probetas utilizadas, han sido experimentadas de dos formas; unas han sido analizadas sin ningún tipo de refuerzo, y otras con refuerzos, aplicando varios tipos de reforzamientos, existentes y propuestos por este documento.

Finalmente, han sido expuestos los principales resultados obtenidos por cada sistema de reforzamiento, los cuales han sido validados por sus diferentes ventajas y aportes dirigidos a mejorar la resistencia de los componentes de una estructura de madera.

2014, Daniel Ernesto Enríquez Morochó

Impresión: Aula 0

Diagramación: Daniel Enríquez

Imagen de portada: Francisco de la Isla, "Sistemas constructivos en madera". Taller Max Cetto. UNAM. Sep 24, 2010

Revisión: Ing. Hernan García Erazo

Impreso en Cuenca-Ecuador

ABSTRACT

The development of systems for wood structural reinforcement includes a wide range of knowledge and expertise, for this reason, this thesis begins with a brief historical review about timber as a structural element. Through many different ages of mankind, timber has been a leader in the field of construction. When studying timber, it is also important to understand the features that makes it strong structural element. These features include the defects, physical and mechanical properties, and more.

Although there are many types of wood that are used for construction, some are simply better than others. Although there are many types of wood that are used for construction, some types of wood are simply better than others. Based on statistics put forward and a survey applied to the buildings of the historic center of Cuenca, it has been determined that wood from the eucalyptus tree is used in the construction of most traditional buildings in Cuenca.

In order to determine the structural capabilities of the eucalyptus wood, it was important to test many different samples. Samples were taken from the beams and columns of buildings ranging from 0 to 100 years in age. These samples were then taken to a laboratory, where they were bent and compressed in different ways to test their strength and elastic behavior. However, before these samples were tested, they were divided into 3 groups. One group, which consisted of new wood , served as a reference point for the results that would follow from within the other two groups. These other groups included wood ranging from 50 to 100 years old. In each of these three groups, some wood samples were reinforced, while others were not.

By compiling these results, it was found that the bearing capacity of the wood from the eucalyptus tree worsened as time went on. Therefore, a deterioration age of this type of wood was found. However, in all three groups that were tested, the samples of wood that were reinforced proved to have a higher bearing capacity than the other samples of wood. Still, some methods of reinforcement proved to be better than others. Because of this, the advantages and disadvantages of each type of reinforcement were explored, which led to the creation of a new type of reinforcement that proved to be even stronger than the existing.

ÍNDICE

PÁGINA

RESUMEN.....1

ABSTRACT 2

ÍNDICE.....3

ÍNDICE DE TABLAS.....8

ÍNDICE DE FIGURAS 9

DEDICATORIA..... 17

AGRADECIMIENTOS..... 19

OBJETIVOS 20

INTRODUCCIÓN 21

CAPÍTULO I: LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

1.1. LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL 24

1.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA MADERA EN ESTRUCTURAS 25

1.2.1. Introducción 25

1.2.2. Época Clásica..... 25

1.2.3. Época Medieval 26

1.2.4. Época del Renacimiento 27

1.2.5. Época Moderna 28

1.3. MADERA PARA LA CONSTRUCCIÓN 29

1.3.1. Recurso forestal en el Ecuador..... 30

1.3.2. Especies Maderables 30

1.3.2.1. Maderas Duras..... 30

1.3.2.2. Maderas Suaves 33

1.3.3. Construcciones de Madera 34

1.3.3.1. La madera en edificios patrimoniales locales 35

1.3.3.1.1. Iglesia de El Sagrario 35

1.3.3.1.2. Iglesia de Todos Santos 36

1.3.3.2. La madera en edificios contemporáneos..... 37

1.3.3.2.1. Parlamento de Escocia 37

1.3.3.2.2. Multihalle Manheim 37

1.4. LA MADERA ESTRUCTURAL 37

1.4.1. Requisitos generales 38

1.4.2. Características..... 38

1.4.3. Clasificación en Grupos Estructurales 39

1.4.4. Estructura y Composición 40

1.4.5. Durabilidad 41

1.4.5.1. Agentes abióticos..... 42

1.4.5.2. Agentes bióticos 42

1.4.6. Factores que alteran el comportamiento estructural de la madera 43

1.4.6.1. Defectos de crecimiento..... 43

1.4.6.2. Influencia del contenido de humedad 45

1.4.6.3. Influencia de la densidad	47
1.4.6.4. Influencia de la temperatura	47
1.4.6.5. Influencia por duración de carga.....	49
1.4.7. Consumo de Energía.....	49
1.4.8. Madera Aserrada Estructural.....	50
1.4.8.1. Elección de especie.....	50
1.4.8.2. Dimensiones	50
1.4.8.3. Clasificación visual por defectos.....	52
1.4.8.3.1. Tamaño y posición de nudos.....	52
1.4.8.3.2. Rapidez de crecimiento, considerando el tamaño de los anillos.....	53
1.4.8.3.3. Tamaño de grietas y rajaduras.....	53
1.4.8.3.4. Inclínación de la fibra.....	54
1.4.8.3.5. Tamaño de las gemas o cantos muertos	55
1.5. PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL.....	55
1.5.1. Propiedades físicas.....	56
1.5.1.1. Anisotropía	56
1.5.1.2. Humedad de la Madera.....	57
1.5.1.3. Densidad de la madera.....	58
1.5.1.4. Contracción de la madera	58
1.5.1.5. Tensiones de secado.....	59
1.5.2. Propiedades mecánicas	59
1.5.2.1. Resistencia a la flexión	60
1.5.2.2. Resistencia a la compresión	60
1.5.2.3. Resistencia a la Tracción	61
1.5.2.4. Resistencia al Corte.....	61
1.5.2.5. Elasticidad-Deformidad.....	61
1.5.2.5.1. Módulo de elasticidad (MOE)	62
1.5.2.5.2. Módulo de Corte	62
1.5.2.5.3. Módulo de Poisson	62
1.6. TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y ESTRUCTURALES.....	62
1.6.1. Uniones estructurales	62
1.6.1.1. Juntas o acoplamientos	63
1.6.1.2. Ensamblés	65
1.6.1.2.1. Ensamblés a compresión	66
1.6.1.2.2. Ensamblés a tracción	67
1.6.1.3. Empalmes.....	68
1.6.1.3.1. Empalmes a compresión	68
1.6.1.3.2. Empalmes a tracción	70
1.6.1.3.3. Empalmes tradicionales entre vigas.....	72
1.6.2. Sistemas de conexión	72
1.6.2.1. Conector tipo clavija.....	73
1.6.2.1.1. Dimensiones y espaciamientos de clavos y tornillos.....	75
1.6.2.2. Conector tipo superficial	75
1.6.3. Estructuras macizas	78
1.6.3.1. Tipologías constructivas.....	79
1.6.3.2. Ejemplos construidos.....	81
1.6.4. Estructuras con entramados.....	81
1.6.4.1. Sistema de Entramado Plataforma.....	82
1.6.4.2. Sistema de entramado global o continuo	83
1.6.4.3. Sistema Poste y Viga	84

1.6.5. Estructuras laminares.....	85
1.6.5.1. Introducción a la madera laminar.....	85
1.6.5.2. Ventajas de la madera laminada	88
1.6.5.3. Desventajas de la madera laminada.....	89
1.6.5.4. Ejemplos construidos.....	89

Referentes bibliográficos y linkografía I.....	92
--	----

CAPÍTULO II: PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES Y FACTORES DE DETERIORO EN LA MADERA

2.1. PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS DE MADERA.....	96
2.1.1. Introducción.....	96
2.1.2. Daños comunes en las estructuras de madera.....	98
2.1.3. Patologías de origen estructural.....	99
2.1.3.1. Sección insuficiente en elementos estructurales.....	99
2.1.3.2. Deformaciones causadas por el efecto de madera húmeda	100
2.1.3.3. Fallos en las uniones, ocasionadas por un mal diseño	100
2.1.3.4. Roturas locales, propias de la pieza afectada	101
2.1.3.5. Arriostamiento insuficiente que conduce a asentamientos diferenciales	101
2.1.3.6. Excentricidad por mala distribución de cargas	101
2.1.4. Causas principales para una falla estructural	102
2.1.4.1. Errores Tipo A	102
2.1.4.2. Errores Tipo B	103
2.1.4.3. Errores Tipo C	104
2.2. CRITERIOS PARA LA REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA.....	104
2.2.1. Esquema del funcionamiento estructural de la madera	105
2.2.2. Principios generales para intervenir una edificación	105
2.2.2.1. Adaptación al contexto tecnológico.....	106
2.2.2.2. Repercusiones de una intervención	107
2.2.2.3. Planteamiento mecánico-estructural	107
2.2.2.4. Singularidad de las intervenciones en edificios patrimoniales	107
2.2.3. Ductibilidad y rigidez en estructuras de madera.....	107
2.2.4. Cargas en Estructuras de Madera	109
2.3. DETERIORO Y AUMENTO DE LAS CAPACIDADES MECÁNICAS A TRAVÉS DE UN REFORZAMIENTO.....	111
2.3.1. Introducción.....	112
2.3.2. El Eucalipto, la especie más utilizada en la construcción.....	112
2.3.3. Obtención y clasificación de los elementos de madera antigua.....	114
2.3.3.1. Preparación de probetas para Ensayos Mecánicos	118
2.3.4. Ensayos mecánicos con madera sin reforzar	120
2.3.4.1. Ensayo a flexión estática	120
2.3.4.1.1. Tablas de datos y gráficas de esfuerzo-deformación	121
2.3.4.1.2. Fórmulas y obtención de resultados.....	127
2.3.4.1.3. Resultados del ensayo a flexión estática	131
2.3.4.2. Ensayo a compresión paralela	132
2.3.4.2.1. Tablas de datos y gráficas de esfuerzo-deformación	134
2.3.4.2.2. Fórmulas y obtención de resultados.....	138
2.3.4.2.3. Resultados del ensayo a compresión paralela	139

2.3.5. Ensayos mecánicos con madera reforzada	141
2.3.5.1. Ensayos a flexión estática	143
2.3.5.1.1. Tablas de Datos	144
2.3.5.2. Factor “n”. Método de Secciones Equivalentes	147
2.3.5.2.1. Obtención del Factor “n” y secciones equivalentes para las probetas reforzadas ..	149
2.3.5.2.2. Gráficas de probetas reforzadas	151
2.3.5.2.3. Resultados de probetas reforzadas	153
2.3.6. Factor de corrección “K”	154
2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES	156
2.4.1. Gráficas combinadas	157
2.4.2. Factores de Aumento de resistencia	160
2.4.3. Conclusiones generales	161
Referentes bibliográficos y linkografía II	162

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

3.1. SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES	166
3.1.1. Introducción	166
3.1.2. Métodos de reforzamiento estructural	166
3.1.2.1. Refuerzo mediante piezas de madera	169
3.1.2.2. Refuerzo mediante perfiles metálicos por la cara superior	170
3.1.2.3. Refuerzo mediante secciones de hormigón	172
3.1.2.4. Refuerzo mediante Fibras de carbono	174
3.2. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES	176
3.2.1. Análisis del reforzamiento mediante piezas de madera colocadas en las caras superior e inferior de la viga	177
3.2.2. Análisis del reforzamiento mediante perfil metálico colocado en su cara superior	181
3.2.3. Análisis del reforzamiento mediante secciones de hormigón	186
3.2.4. Análisis del reforzamiento mediante fibras de carbono	189
3.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	192
3.3.1. Reforzamientos existentes, aplicados a probetas de 100 años	193
3.3.2. Reforzamientos existentes, aplicados a probetas de 50 años	195
3.3.3. Resultados de Reforzamientos aplicados a madera nueva	197
3.3.4. Conclusiones	200
Referentes bibliográficos y linkografía III	204

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

4.1. DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL	208
4.1.1. Introducción	208
4.1.2. El material ideal para un sistema de reforzamiento eficaz y económico	210
4.1.3. Consideraciones para generar un sistema de reforzamiento estructural	213

4.1.4. Determinación de nuevos sistemas de reforzamiento estructural	214
4.1.4.1. Sistemas con acero	215
4.1.4.2. Sistemas mixtos	218
4.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DESARROLLADOS	221
4.2.1. Sistema con doble platina metálica tipo “T”, fijadas a las caras superior e inferior, del elemento	221
4.2.2. Sistema con perfil metálico “C”, fijado a la cara superior del elemento	224
4.2.3. Sistema mixto 1, refuerzo con pieza de madera, más un perfil metálico tipo “T”	227
4.2.4. Sistema mixto 2, refuerzo con pieza de madera, más fibras de carbono	229
4.2.5. Sistema mixto 3, refuerzo con perfil metálico tipo “T”, más fibras de carbono	231
4.3. ENSAYOS MECÁNICOS DE LOS SISTEMAS DESARROLLADOS	233
4.3.1. Ensayo a flexión estática. Sistema con doble platina metálica tipo “T”	233
4.3.1.1. Factor de corrección “K”, para el sistemas de platinas T	237
4.3.2. Ensayo a flexión estática. Sistema con perfil metálico “C”	238
4.3.2.1. Factor de corrección “K”, para el sistema con perfil C	242
4.3.3. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 1	243
4.4. SIMULACIÓN DIGITAL DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO MIXTO	248
4.4.1. Software utilizado para la modelación digital	249
4.4.2. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 2	249
4.4.3. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 3	253
4.5. RESULTADOS E INCREMENTOS DE TÉCNICAS DESARROLLADAS	256
4.5.1. Reforzamientos aplicados a muestras de 100 años	257
4.5.2. Reforzamientos aplicados a muestras de 50 años	258
4.5.3. Reforzamientos aplicados a muestras nuevas	260
4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS TÉCNICAS DESARROLLADAS	261
4.6.1. Conclusiones y recomendaciones respecto a la metodología	261
4.6.2. Conclusiones y recomendaciones respecto a la resistencia adquirida	262
4.6.3. Conclusiones y recomendaciones respecto a la aplicación de cada sistema	264
4.6.4. Conclusiones respecto al costo de fabricación e instalación por metro lineal de cada sistema	265
4.6.5. Líneas futuras de investigación	266
Referentes bibliográficos y Linkografía IV	268

ANEXO A1	271
ANEXO B1	275
ANEXO C1	286
ANEXO D1	290

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

CAPÍTULO I: LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

Tabla a1. Clasificación de las Especies Madereras según sus Propiedades Mecánicas 31

Tabla a2. Clasificación de Especies Madereras Estructurales para el Ecuador..... 39

Tabla a3. Esfuerzos Admisibles para los tres grupos de especies madereras estructurales 40

Tabla a4. Módulos de Elasticidad para los tres grupos de especies madereras estructurales 40

Tabla a5. Valores Experimentales para la Fórmula de Hankinson. 44

Tabla a6. Secciones preferenciales para madera aserrada 51

Tabla a7. Cargas admisibles y dimensión por clavo..... 75

Tabla a8. Espaciamientos mínimos para uniones clavadas desde un solo lado 75

Tabla a9. Espaciamientos mínimos para pernos..... 75

CAPÍTULO II: PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES Y FACTORES DE DETERIORO EN LA MADERA

Tabla b1. Esquema propuesto para la calificación de errores 103

Tabla b2. Fases del proceso de construcción..... 105

Tabla b3. Deformaciones Admisibles para vigas de madera..... 111

Tabla b4. Peso propio de materiales de construcción 111

Tabla b5. Sobrecargas de servicio. Cargas Vivas 111

Tabla b6. Peso de materiales almacenados..... 111

Tabla b7. Peso propio de materiales de construcción..... 111

Tabla b8. Metodología para llegar al sistema de reforzamiento estructural 112

Tabla b9. Grupo “I”. Características de las Muestras de Madera Antigua. 100 años..... 116

Tabla b10. Grupo “II”. Características de las Muestras de Madera Antigua. 50 años 117

Tabla b11. Probeta B1. Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación..... 123

Tabla b12. Probeta A3. Tabla de resultados Carga-Deformación 124

Tabla b13. Probeta F1. Tabla de resultados Carga-Deformación 125

Tabla b14. Probeta nueva L1. Tabla de resultados Carga-Deformación 126

Tabla b15. Resultados de muestras sin reforzar a flexión 130

Tabla b16. Probeta A1. Tabla de resultados Carga-Deformación. 135

Tabla b17. Probeta F2. Tabla de resultados Carga-Deformación 136

Tabla b18. Probeta L2. Tabla de resultados Carga-Deformación 137

Tabla b19. Resultados de muestras sin reforzar a compresión paralela..... 140

Tabla b20. Probeta B2. Tabla de resultados Carga-Deformación 145

Tabla b21. Probeta A2. Tabla de resultados Carga-Deformación 145

Tabla b22. Probeta F3. Tabla de resultados Carga-Deformación 147

Tabla b23. Probeta L3. Tabla de resultados Carga-Deformación 147

Tabla b24. Resultados de muestras reforzadas con platinas metálicas. Ensayo a flexión..... 154

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

Tabla c1. Probeta L4. Tabla de resultados Carga-Deformación 172

Tabla c2. Resultados del refuerzo mediante piezas de madera 180

Tabla c3. Probeta L5. Tabla de resultados Carga-Deformación 183

Tabla c4. Resultados del refuerzo mediante perfil metálico..... 185

Tabla c5. Probeta Nro.3 . Tabla de resultados Carga-Deformación 189

Tabla c6. Resultados del refuerzo mediante fibras de carbono..... 191

Tabla c7. Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes para maderas de 100 años 194

Tabla c8. Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes para maderas de 50 años..... 196

Tabla c9. Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes, aplicados a maderas nuevas..... 198

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

Tabla d1. Probeta L7. Tabla de resultados Carga-Deformación 235

Tabla d2. Probeta L7. Resultados del refuerzo mediante doble platina metálica tipo “T” 237

Tabla d3. Probeta L8. Tabla de resultados Carga-Deformación 239

Tabla d4. Probeta L8. Resultados del refuerzo mediante perfil metálico “C” 241

Tabla d5. Probeta C. Tabla de resultados Carga-Deformación 245

Tabla d6. Probeta C. Resultados del refuerzo mixto 1 247

Tabla d7. Probeta digital L9. Tabla de resultados Carga-Deformación 251

Tabla d8. Probeta L9. Resultados del refuerzo mixto 2, ... 252

Tabla d9. Probeta digital L10. Tabla de resultados Carga-Deformación 254

Tabla d10. Probeta L10. Resultados del refuerzo mixto 3 255

Tabla d11. Resultados de los sistemas de reforzamiento desarrollados, para maderas de 100 años..... 257

Tabla d12. Resultados de los sistemas de reforzamiento desarrollados, para maderas de 50 años..... 259

Tabla d13. Resultados de los sistemas de reforzamiento desarrollados, para maderas nuevas..... 260

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

CAPÍTULO I: LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

Figura 1.1. Casa Bethlehem (vista posterior) 24

Figura 1.2. Iglesia de Karelia norte de Rusia..... 24

Figura 1.3. Templos japoneses de Horyu-ji. Edificación del 607 a.C. 25

Figura 1.4. Tipología de Cubierta en Madera de los templos Griegos. 26

Figura 1.5. Estructura de madera tipo Cruck home. 26

Figura 1.6. Resolución de Cubiertas de Madera en Iglesia Gótica Inglesa..... 27

Figura 1.7. Cubiertas de Madera Ingleses. Opciones de Techos para la Arquitectura Gótica 27

Figura 1.8. Sala Botticelli en la Galería Uffizi de Florencia. Cerchas de Madera..... 27

Figura 1.9. Detalle de la Cercha de Madera de Vasari en Florencia	28
Figura 1.10. Puente degli Alpini en Bassano dil Grappa	28
Figura 1.11. Madera de Construcción Estructural	29
Figura 1.12. Vivienda prefabricada en madera. Comunidad de Buín-Chile	35
Figura 1.13. Iglesia del Sagrario, Fachada Exterior	36
Figura 1.14. Estructura de la nave central de la iglesia del Sagrario.....	36
Figura 1.15. Iglesia de Todosantos, fachada principal	36
Figura 1.16. Iglesia de Todosantos. Interior, estructura de la nave central.....	36
Figura 1.17. Salón principal del Parlamento de Escocia	37
Figura 1.18. Salón principal del Parlamento de Escocia	37
Figura 1.19. Estructura anatómica de las maderas latifoliadas	41
Figura 1.20. Estructura anatómica de las maderas coníferas	41
Figura 1.21. Nudo Sano en Madera Aserrada	43
Figura 1.22. Nudo Muerto o perforacion en Madera Aserrada.....	44
Figura 1.23. Médula Excéntrica.....	44
Figura 1.24. Influencia del contenido de humedad con respecto a la resistencia de la madera	45
Figura 1.25. Clases de Riesgo por presencia de Humedad.....	46
Figura 1.26. Columna de madera, después del flagelo del 2005. Iglesia Todos Santos.....	48
Figura 1.27. Gráfico de barras para el consumo de energía según el material	49
Figura 1.28. Tipo de cortes según su orientación en el tronco. Madera Aserrada	50
Figura 1.29. División de un elemento de Madera en zonas principales.....	52
Figura 1.30. Tipos de Nudos presentes en la Madera	53
Figura 1.31. Corte trasversal de un tronco de tejo común.....	53
Figura 1.32. Grietas en madera aserrada de pino.....	54
Figura 1.33. Rajadura en madera aserrada	54
Figura 1.34. Medición de la inclinación del grano usando el detector	55
Figura 1.35. Arista Faltante en Madera Aserrada.....	55
Figura 1.36. Contenido de humedad de equilibrio, en función de la humedad relativa	58
Figura 1.37. Direcciones ortogonales de la madera.....	60
Figura 1.38. Curva típica Carga-Deformación de un Material	60
Figura 1.39. Curvas esfuerzo - deformación para maderas latifoliadas	61
Figura 1.40. Junta a media madera con tarugos.....	63
Figura 1.41. Espesores mínimos y penetración de clavos	64
Figura 1.42. Junta a Tope: A. Ranura con lengüeta B. Doble ranura con lengüeta.....	64
Figura 1.43. Dimensiones mínimas de las lengüetas.....	64
Figura 1.44. Junta plana con refuerzo de espiga.	64
Figura 1.45. Junta plana con doble cola de milano	65
Figura 1.46. Ensamblés a Media Madera	65
Figura 1.47. Ensamble de Palma o entalladura.....	65
Figura 1.48. Dimensión de ángulo metálico para reforzar uniones.....	66

Figura 1.49. Ensamble de Caja y espiga. Encuentro de Columna y viga	66
Figura 1.50. Empalmes con barbilla, caja y espiga con barbilla.....	67
Figura 1.51. Ensamblés con Pendolón y Pares.....	67
Figura 1.52. Cercha de Madera	67
Figura 1.53. Ensamblés entallados, rectos y oblicuos	68
Figura 1.54. Cercha de Madera.	68
Figura 1.55. Cercha de Madera 2.....	68
Figura 1.56. Empalmes a tope con refuerzo metálico.....	69
Figura 1.57. Empalmes a Media Madera	69
Figura 1.58. Empalmes a Media Madera con sesgo a 45°	70
Figura 1.59. Empalmes con Doble Horquilla y Perno	70
Figura 1.60. Empalme con llave de cola de milano.....	70
Figura 1.61. Empalme con caja y espiga	71
Figura 1.62. Empalme con llave de madera.....	71
Figura 1.63. Empalme con Rayo de Jupiter y Clavijas.....	71
Figura 1.64. Opciones de empalmes con Rayo de Jupiter.....	71
Figura 1.65. Empalme a media madera con cola de milano	72
Figuras 1.66. Empalmesa Tradicionales	72
Figura 1.67. Perno metálico con tuerca y arandela	74
Figura 1.68. Tornillo Autorroscante para madera.....	74
Figura 1.69. Tirafondo.....	74
Figura 1.70. Pasadores metálicos	74
Figura 1.71. Uniones por conectores: a) de anillo, b) de placa. Dentados: e) con púas	76
Figura 1.72. Placa dentada galvanizada	76
Figura 1.73. Placa dentada circular tipo Bulldog	76
Figura 1.74. Placa dentada circular tipo Geka.....	76
Figura 1.75. Anillo tipo appel	77
Figura 1.76. Apoyo conector para vigas de madera	77
Figura 1.77.a Placa articulada para fijas elementos concéntricos	77
Figura 1.77.b Placa metalica para unión oculta entre vigas.....	77
Figura 1.77.c ETB. Conector mixto hembra-macho, metálico	77
Figura 1.78. Apoyos rígidos para madera.....	78
Figura 1.79. Apoyos Articulados para madera.....	78
Figura 1.80. Tabiques de madera en rollizo.....	78
Figura 1.81. Tipologías constructivas en madera en rollizo.....	79
Figuras 1.82. Uniones más comunes para madera aserrada en rollizo	80
Figura 1.83. Iglesia Vieja de Petäjävesi.....	81
Figura 1.84. Casa tipo del norte de Europa	81
Figura 1.85. Cabaña escocesa.....	81
Figura 1.86. Tabique de madera, Sistema Plataforma.....	82

Figura 1.87. Sistema Plataforma, sistema de anclaje al piso.....	83
Figura 1.88. Construcción con sistema Baloon Frame.....	83
Figura 1.89. Detalle del sistema continuo o Baloon Frame.....	84
Figura 1.90. Pórtico típico de una vivienda de adobe con estructura de madera.....	84
Figura 1.91. Ruinas de una vivienda vernacular con el sistema poste y viga. Cumbe-Azuay.....	84
Figura 1.92. Viga de madera laminada - Pino insigne.....	86
Figura 1.93. Estructura de madera laminada.....	86
Figura 1.94. Elaboración de una viga recta con madera laminada. Laminados villapol-España.....	86
Figura 1.95. Sistema de unión Finger-Joint.....	87
Figura 1.96.a Puente de Zapallar. Chile-Petorca.....	87
Figura 1.96.b Estructura del puente, sección constructiva.....	88
Figura 1.97.a Cubierta con vigas de forma irregular.....	90
Figura 1.97.b Vigas curvas de madera laminada. Acceso al gimnasio.....	90
Figura 1.97.c Cancha cubierta del gimnasio Regis Racine. Porticos cruzados.....	90
Figura 1.98. Polideportivo en Molina de Segura, Murcia, España.....	90
Figura 1.99. Centro comercial en Álava, España. Arcos biarticulados.....	91
Figura 1.100. Complejo termal Daymán, Salto, Uruguay. Pórticos triarticulados.....	91
Figura 1.101. Iglesia de Santa María del Redentor, Roma, Italia.....	91
Figura 1.102. Puente en Ciudad Real, España.....	91
Figura 1.103. Puente de madera lamina, España.....	91

CAPÍTULO II: PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES Y FACTORES DE DETERIORO EN LA MADERA

Figura 2.1. Fachada principal, Quinta Bolivar. 2004.....	96
Figura 2.2. Cubiertas sustituidas en la catedral de Burgos. Estado actual.....	97
Figura 2.3. Cubiertas sustituidas en el Monasterio Escorial en Madrid.....	97
Figura 2.4. Dintel de madera de Capulí, afectada superficialmente por xilófagos y hongos.....	98
Figura 2.5. Viga de madera debastada internamente por Comejen.....	98
Figura 2.6. Gráfico de porticos con cargas y sobrecargas.....	99
Figura 2.7. Flexión en viga de madera. Estado previo a la intervención de la capilla Susudel.....	100
Figura 2.8. Unión riostra-columna mediante monterilla en deterioro.....	101
Figura 2.9. Unión viga-par en deterioro y reforzada provisionalmente con platinas metálicas.....	101
Figura 2.10. Gráfica de porticos con cargas normales y excéntricas.....	102
Figura 2.11. Pórticos con problemas de excentricidad de cargas en columnas.....	102
Figura 2.12. Distribución de cargas para una vivienda.....	104
Figura 2.13. Pudrición y Deterioro en Solera y Viga.....	106
Figura 2.14. Tirantes deteriorados y presencia de xilófagos. Ermita de san Cristobal en Enguera.....	106
Figura 2.15. Esquema típico de ductilidad en componentes estructurales de madera.....	108
Figura 2.16. Cercha reforzada mediante hierros, refuerzos para la tracción de los tochos.....	108
Figura 2.17. Probeta de madera deformada más de 3cm.....	108

Figura 2.18. Volúmenes de Aprovechamiento de la Madera en el Ecuador.....	113
Figura 2.19. Centro Histórico de Cuenca-Ecuador. Calle Gran Colombia.....	113
Figura 2.20. Edificación de la Familia Lliguipuma. Cumbe-Azuay.....	114
Figura 2.21. Edificación de la Familia Espinoza. Susdel-Azuay.....	114
Figura 2.22. Vivienda Guzmán. Cuenca-Ecuador, ubicada en la calle Simón Bolívar.....	114
Figura 2.23. Viga A. Grupo "I", madera de 100 años.....	115
Figura 2.24. Viga B. Grupo "I", madera de 100 años.....	115
Figura 2.25. Grupo "I", madera de 100 años. / Fuente: Daniel Enríquez M.....	116
Figura 2.26. Vivienda Mogrovejo Lazo. Ubicación: Misicata-Cuenca.....	116
Figura 2.27. Viga F. Grupo "II", madera de 50 años.....	117
Figura 2.28. Viga G. Grupo "II", madera de 50 años.....	117
Figura 2.29. Almacenamiento de probetas para ensayos mecánicos.....	118
Figura 2.30. Curva típica de Esfuerzo-deformación de la madera.....	119
Figura 2.31. Replanteo del ensayo a Flexión estática.....	120
Figura 2.32. Probeta B1, muestra de madera desconocida, 100 años.....	121
Figura 2.33. Probeta A3, muestra de eucalipto antiguo, 100 años.....	121
Figura 2.34. Probeta F1, muestra de eucalipto antiguo, 50 años.....	121
Figura 2.35. Probeta Libre, muestra de eucalipto nuevo.....	121
Figura 2.36. Montaje para ensayo a flexión. Probeta B1. / Fuente: Daniel Enríquez M.....	123
Figura 2.37. Probeta B1. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas.....	123
Figura 2.38. Montaje para ensayo a flexión. Probeta A3.....	124
Figura 2.39. Probeta A3. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas.....	124
Figura 2.40. Montaje para ensayo a flexión. Probeta F1.....	125
Figura 2.41. Probeta F1. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas.....	125
Figura 2.42. Montaje para ensayo a flexión. Probeta nueva L1.....	126
Figura 2.43. Probeta nueva L1. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas.....	126
Figura 2.44. Sección transversal de la viga de madera a flexión.....	128
Figura 2.45. Representación del Cuerpo libre de las probetas.....	129
Figura 2.46. Gráfica de los módulos de elasticidad de las probetas a flexión.....	131
Figura 2.47. Replanteo del ensayo a compresión paralela.....	133
Figura 2.48. Probeta A1. Muestra de eucalipto antiguo 100 años.....	134
Figura 2.49. Probeta F2. Muestra de eucalipto antiguo 50 años.....	134
Figura 2.50. Probeta L2. Muestra de eucalipto nuevo.....	138
Figura 2.51. Estado de la probeta A1 después del ensayo a compresión.....	135
Figura 2.52. Probeta A1. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	135
Figura 2.53. Estado de la probeta F2 después del ensayo a compresión.....	136
Figura 2.54. Probeta F2. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos verticales.....	136
Figura 2.55. Estado de la probeta L2 después del ensayo a compresión.....	137
Figura 2.56. Probeta L2. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	137
Figura 2.57. Gráfica de los módulos de elasticidad de las probetas a compresión paralela.....	139

Figura 2.58. Sección de probeta con refuerzo metálico en su cara inferior.....	142
Figura 2.59. Disposición de los tirafondos y secuencia de apriete en zig-zag.....	142
Figura 2.60. Probeta B2 reforzada.....	143
Figura 2.61. Probeta A2 reforzada.....	143
Figura 2.62. Probeta L3 reforzada.....	144
Figura 2.63. Estado de la probeta B2 durante el ensayo a flexión.....	145
Figura 2.64. Estado de la probeta A2 después del ensayo a flexión.....	145
Figura 2.65. Estado de la probeta F3 después del ensayo a flexión.....	147
Figura 2.66. Estado de la probeta F3 después del ensayo a flexión.....	147
Figura 2.67. Sección equivalente en madera de una probeta reforzada.....	148
Figura 2.68. Probeta A2. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados.....	151
Figura 2.69. Probeta F3. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados.....	152
Figura 2.70. Probeta L3. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados.....	152
Figura 2.71. Definición del factor de corrección "K".....	155
Figura 2.72. Rangos elásticos para muestras nuevas, aplicando el factor de corrección.....	156
Figura 2.73. Probeta A3 y A2. Gráfica combinada de Esfuerzo-Deformación.....	157
Figura 2.74. Probeta F1 y F3. Gráfica combinada de Esfuerzo-Deformación.....	158
Figura 2.75. Probeta L1 y L3. Gráfica combinada de Esfuerzo-Deformación.....	159

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

Figura 3.1. Reforzamiento estructural mediante apeos.....	166
Figura 3.2. Reforzamiento estructural mediante cajas metálicas transversales.....	166
Figura 3.3. Reforzamiento estructural a partir de piezas de madera.....	167
Figura 3.4. Reforzamiento estructural mediante perfiles metálicos por su parte superior.....	167
Figura 3.5. Reforzamiento estructural mediante hormigón.....	168
Figura 3.6. Reforzamiento estructural mediante fibras de carbono.....	168
Figura 3.7. Reforzamiento estructural a partir de piezas de madera.....	169
Figura 3.8. Variante 1. Reforzamiento estructural a partir de piezas de madera.....	169
Figura 3.9. Variante 1. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico.....	170
Figura 3.10. Variante 2. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico.....	171
Figura 3.11. Variante 3. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico.....	171
Figura 3.12. Variantes. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico.....	172
Figura 3.13. Esfuerzos producidos en elementos reforzados con hormigón.....	173
Figura 3.14. Reforzamiento mediante hormigón adherido a la pieza de madera.....	174
Figura 3.15. Reforzamiento mediante fibras de carbono.....	174
Figura 3.16. Espesor de la fibra de carbono.....	174
Figura 3.17. Fibras de carbono aplicadas a vigas de madera de 7m. de longitud.....	175
Figura 3.18. Probeta de eucalipto reforzada mediante tabloncillos de madera.....	176
Figura 3.19. Probeta de eucalipto reforzada mediante perfil metálico.....	177

Figura 3.20. Probeta de eucalipto reforzada mediante hormigón.....	177
Figura 3.21. Sección de Probeta reforzada con piezas de madera.....	178
Figura 3.22. Estado de la probeta L4, con refuerzos de madera, después del ensayo.....	179
Figura 3.23. Probeta L4. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	180
Figura 3.24. Sección de Probeta reforzada con perfil metálico "C".....	182
Figura 3.25. Estado de la probeta L5, con refuerzos metálicos, después del ensayo.....	183
Figura 3.26. Determinación de la sección equivalente para la probeta L5.....	184
Figura 3.27. Probeta L5. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	185
Figura 3.28. Estado de la probeta L6, después de realizar el ensayo.....	186
Figura 3.29. Esfuerzos producidos en la sección del elemento reforzado con hormigón.....	186
Figura 3.30. Determinación de la sección equivalente para la probeta L6, reforzada con hormigón.....	187
Figura 3.31. Determinación de la sección equivalente para la probeta 3.....	190
Figura 3.32. Probeta 3. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	191
Figura 3.33. Esfuerzos máximos de muestras con 100 años de antigüedad.....	195
Figura 3.34. Esfuerzos máximos de muestras con 50 años de antigüedad.....	197
Figura 3.35. Esfuerzos máximos de muestras nuevas de eucalipto.....	199

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

Figura 4.1. Incremento de peso de los sistemas de reforzamiento existente.....	209
Figura 4.2. Sistemas de reforzamiento a través de elementos metálicos.....	211
Figura 4.3. Resistencias alcanzadas con elementos metálicos como refuerzos.....	212
Figura 4.4. Recuperación de secciones ausentes por deterioro de la madera.....	213
Figura 4.5. Fijación deficiente entre madera y platina metálica.....	215
Figura 4.6. Mejoramiento de platina metálica simple, mediante otra platina perpendicular.....	215
Figura 4.7. Defectos de pandeo lateral, en alas del perfil "C".....	216
Figura 4.8. Optimización de perfil "C", en una platina "T".....	216
Figura 4.9. Refuerzo con doble platina T, ubicadas en las caras inferior y superior.....	217
Figura 4.10. Variante 1 del refuerzo a través de perfiles C invertidos e incrustados.....	217
Figura 4.11. Variante 2 del refuerzo a través de perfiles C invertidos.....	218
Figura 4.12. 1° Reforzamiento estructural mixto.....	219
Figura 4.13. 2° Reforzamiento estructural mixto.....	219
Figura 4.14. 3° Reforzamiento estructural mixto.....	220
Figura 4.15. Descripción y dimensiones de la platina metálica tipo "T".....	221
Figura 4.16. Sistema con doble platina metálica tipo "T".....	223
Figura 4.17. Descripción y dimensiones de la platina metálica tipo "C".....	224
Figura 4.18. Descripción y dimensiones de la platina metálica tipo "C".....	225
Figura 4.19. Sistema con perfil metálico "C", fijado a la cara superior del elemento.....	226
Figura 4.20. Sistema mixto 1, refuerzo con pieza de madera, más un perfil metálico tipo "T".....	227
Figura 4.21. Sistema mixto 2, refuerzo con pieza de madera, más fibras de carbono.....	230

Figura 4.22. Sistema mixto 3, refuerzo con perfil metálico tipo "T", más fibras de carbono	232
Figura 4.23. Preparación de probetas, previo a los ensayos mecánicos.....	233
Figura 4.24. Dimensión de los componentes del sistema con doble perfil metálico tipo "T"	233
Figura 4.25. Probeta L7 reforzada con doble platina metálica tipo "T"	234
Figura 4.26. Montaje para ensayo a flexón de Probeta L7	235
Figura 4.27. Sección de la Probeta L7, después del ensayo	235
Figura 4.28. Probeta L7. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	236
Figura 4.29. Determinación de la sección equivalente para la probeta L7.....	236
Figura 4.30. Deformación de la probeta L7, después del ensayo.....	237
Figura 4.31. Definición del factor de corrección "K".	238
Figura 4.32. Rango elástico después de aplicar el factor de corrección "K".	238
Figura 4.33. Probeta L8 reforzada con un perfil metálico "C"	239
Figura 4.34. Montaje para ensayo a flexón de Probeta L8	240
Figura 4.35. Sección de la Probeta L8, antes del ensayo	240
Figura 4.36. Determinación de la sección equivalente para la probeta L8	240
Figura 4.37. Probeta L8. Curva de Esfuerzo-Deformación.....	241
Figura 4.38. Sección de la Probeta L8, después del ensayo.....	242
Figura 4.39. Deformación de la probeta L7, después del ensayo	242
Figura 4.40. Definición del factor de corrección "K", para el sistema de perfil C.....	243
Figura 4.41. Rango elástico después de aplicar el factor de corrección "K"	243
Figura 4.42. Madera con 100 años de antigüedad. Probeta "C"	244
Figura 4.43. Componentes y dimensiones del sistema de reforzamiento mixto 1	244
Figura 4.44. Montaje para ensayo a flexón de Probeta C	245
Figura 4.45. Sección de la Probeta C, después del ensayo.....	245
Figura 4.46. Probeta C. Curva de Esfuerzo-Deformación	246
Figura 4.47. Determinación de la sección equivalente para la probeta L8.....	247
Figura 4.48. Deformación permanente de la probet C	248
Figura 4.49. Hojas de cálculo del software "SeismoStruct"	249
Figura 4.50. Modelación digital de un elemento estructural, a través de "SeismoStruct".	249
Figura 4.51. Sección de la Probeta L9. Refuerzo mixto 2, ...	250
Figura 4.52. Modelación digital del sistema de reforzamiento mixto 2	250
Figura 4.53. Determinación de la sección equivalente para la probeta L9.....	251
Figura 4.54. Probeta L9. Curva de Carga-Deformación	252
Figura 4.55. Sección de la Probeta L10. Refuerzo mixto 3, ...	253
Figura 4.56. Modelación digital del sistema de reforzamiento mixto 3	253
Figura 4.57. Determinación de la sección equivalente para la probeta L9.....	254
Figura 4.58. Probeta L10. Curva de Carga-Deformación	255
Figura 4.59. Esfuerzos máximos de muestras con 100 años de antigüedad.....	257
Figura 4.60. Esfuerzos máximos de muestras con 50 años de antigüedad	259
Figura 4.61. Esfuerzos máximos de muestras nuevas	260



Yo, **Daniel Ernesto Enríquez Morocho** autor de la tesis "REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA FORJADOS DE MADERA EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES Y CONTEMPORÁNEAS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Arquitecto. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 25 de agosto del 2014

Daniel Ernesto Enríquez Morocho
 C.I: 0104944574



Yo, **Daniel Ernesto Enríquez Morocho** autor de la tesis "REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA FORJADOS DE MADERA EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES Y CONTEMPORÁNEAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 25 de agosto del 2014

Daniel Ernesto Enríquez Morocho
C.I: 0104944574

La familia siempre será lo más valioso que existe en mi vida, es por eso que el esfuerzo y trabajo expuesto en este documento se los dedico, con todo mi reconocimiento y gratitud, a ellos, especialmente a mi padre y madre, a mis hermanos y a mi novia, porque son quienes me han acompañado y respaldado con su cariño, comprensión a lo largo de mi vida, sin duda, la entrega y ahínco ha sido gracias a ellos.

Sin embargo, de manera más especial aún, quiero dedicar mi esfuerzo a mi madre querida, la única que siempre ha estado a mi lado, apoyándome de manera incondicional y dándome ese ánimo necesario para seguir adelante. *Mil Gracias madre hermosa!*

A todos y cada uno... Mi logro es de ustedes.

Primeramente agradezco a Dios por darme la fortaleza y la bendición para culminar con éxito otra gran etapa de mi vida.

Parte de la experiencia adquirida y los nuevos conocimientos alcanzados con el presente documento e investigación, procede en gran parte de la colaboración por parte del equipo que maneja el laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca, por lo tanto, es justa y merecida una mención de gratitud, por todo el aporte y facilidades brindadas para el desarrollo de los respectivos ensayos.

De la misma forma, resultó muy útil el asesoramiento de profesionales que con su conocimiento y experticia, aportaron para generar pautas en el desarrollo de esta tesis. También es grato mencionar a todas las personas que de manera directa e indirecta, brindaron su colaboración en el proceso de esta investigación.

A todos ellos anticipo mi agradecimiento por su colaboración, ayuda y amistad. Cada una de sus aportaciones, han resultado imprescindibles para el desarrollo y redacción de cada tema tratado en este documento.

De forma especial, un grato agradecimiento se lo contribuyo al director de tesis, Ing. Hernán Alfredo García Erazo, por su dedicación, apoyo constante y amistad. A pesar de la distancia e inconvenientes suscitados durante el desarrollo del documento, supo guiar de gran manera los diferentes puntos y temas investigativos, con su gran capacidad profesional.

Pero de manera más especial aun, con permiso de los anteriores, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi padre Clever Enríquez, mi mentor y amigo, el que siempre me ha instruido con su sabiduría y nobleza; y a mi madre Marlene Morocho, el ser más valioso que tengo en el mundo. Ellos han sido mi fundamento y mis guías, durante esta etapa de mi vida, y porque no decirlo, durante toda mi vida.

De la misma manera, agradezco a mis hermanos, Soledad, Sofía, Andrea y Damián, pues ellos han sido y serán siempre mi inspiración.

Finalmente, quiero expresar el más profundo e infinito agradecimiento a Silvana Vintimilla A., mi novia y mi mejor amiga, sin duda, el pilar fundamental de mi vida. Su ayuda fue clave en el desenlace de este trabajo. Además, con su carisma, afecto y dulzura supo apoyarme a cada momento, llenándome de fuerza para seguir adelante. Por todo esto, expreso mi gratitud y amor eterno, a quien siempre me ha apoyado incondicionalmente. *Gracias, mi chivisita!*

AGRADECIMIENTOS

OBJETIVOS GENERALES

La presente investigación busca solventar las principales vulnerabilidades de la madera en estructuras de edificaciones patrimoniales y contemporáneas, las cuales a través de los años han perdido resistencia por múltiples factores y agentes de deterioro. Por lo tanto, el objetivo primordial persigue:

- Realizar una investigación y análisis que permita proponer nuevas técnicas de reforzamiento estructural para forjados de madera y aplicarlas en edificaciones patrimoniales y contemporáneas, para mejorar los procesos de restauración y ayudar a economizar los mismos, a través de conocimientos adecuados y experticias adecuadas.
- Recuperar las estructuras de madera mediante la determinación de su vulnerabilidad, pero sin causar daños estéticos a la composición del edificio, es decir, no producir una contaminación visual con la mezcla de otros materiales en los procesos de rehabilitación y refuerzos.
- Exponer las principales ventajas que proporciona el material y demostrar, a través de ensayos de laboratorio, que la resistencia de la madera puede ser incrementada a valores similares a otros materiales como el hormigón o el acero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para determinar los principales factores que envuelven a la madera estructural, es necesario analizar y estudiar los diferentes comportamientos del material, a través de muestras de madera y documentación existente, por lo tanto, los objetivos específicos buscan:

- Realizar un análisis histórico acerca del uso de la madera como elemento estructural.
- Realizar experimentos de laboratorio y cálculos estructurales con probetas reales de madera, que puedan definir las principales características mecánicas del material en sus direcciones principales; esto para validar cada sistema generado.
- Determinar el factor de deterioro de la madera, es decir, calcular la pérdida de resistencia que alcanza el material con el pasar de los años.
- Abordar los temas de reforzamiento de manera sencilla, para que sirva como un manual guía a los principales procesos de recuperación de resistencia, en diferentes tipos de piezas de madera.

INTRODUCCIÓN

Durante siglos la madera ha formado parte de las estructuras en edificaciones alrededor del mundo, tanto por su fácil acceso, por su fácil manejo para elaborar piezas de diferentes dimensiones y, sobre todo, por poseer excelentes cualidades mecánicas. La madera ha formado parte de la cultura e identidad de las civilizaciones que durante largos períodos se han ido gestando. En nuestra cultura, el uso de la madera como elemento estructural y de soporte, data desde épocas anteriores a la colonia, tiempo en el que se han construido edificaciones de gran importancia, tanto a nivel local, como nacional, contribuyendo, en cierta medida, a nuestra identidad cultural y nacional.

La madera, elemento arquitectónico que da cuenta de nuestra historia y cultura patrimonial, se convierte en un documento que revela el paso del tiempo, cuyo transcurrir se ve plasmado en sus estructuras, las mismas que podrían continuar presentes en los monumentos, por ejemplo; si fueran entendidas desde su parte estructural y si se trabajara mediante métodos y técnicas que mejoren su comportamiento, sin alterar tanto su diseño inicial, como su originalidad, aún presente en cada una de ellas.

El paso de los años ha sido un factor determinante para el deterioro de las edificaciones de madera, a tal punto que su existencia misma se ha visto muchas veces comprometida, puesto que sus estructuras y en sí su forma original ha sufrido grandes cambios y, en algunos casos, estos han sido irreversibles. Esta situación obedece a saber que la madera es orgánica, proviene de un ser vivo, y sus deficiencias pueden ser afectadas por motivos físicos o mecánicos, consecuencia de ello, es la pérdida de sus capacidades estructurales que se hacen cada vez más evidentes.

Uno de los principales problemas que manifiesta la construcción con madera es que se la concibe como un material poco durable y poco resistente, debido a que no existe el suficiente conocimiento para su protección, mantenimiento y reforzamiento, en estructuras existentes.

Todos los aspectos antes mencionados, han contribuido para que las edificaciones en madera, con o sin valor histórico, hayan sido objeto de varios procesos de restauración, siendo muy cuestionados por las metodologías aplicadas, ya que éstas, en muchas ocasiones, han sido agresivas con la integridad y originalidad de los monumentos, en vista de que no se ha cumplido con las normas que demanda la restauración. El problema radica, como se puede deducir, en la falta de conocimiento acerca de las técnicas aplicables en la construcción para el reforzamiento estructural de elementos de madera, alterando así la concepción inicial del edificio.

A pesar de existir variadas intervenciones de restauración en el país, muy pocas han profundizado sobre la importancia del reforzamiento estructural de elementos de madera.

Otro factor de importancia a considerar, es que no se tiene conciencia ni experticia acerca del deterioro que pueden presentar los elementos de la madera, a través de los años, tanto por su uso como por su función estructural; por lo tanto, resulta un valioso aporte la determinación de factores deterioros, para estimar la resistencia de los principales componentes de una estructura de madera. Adicionalmente, los datos que determinen el deterioro de las piezas de madera, deben tener en cuenta los factores que provocan la pérdida de resistencias, ya sean por patologías de orden biológico o estructural.

CAPÍTULO I: LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

1.1. LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

1.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA MADERA EN ESTRUCTURAS

- 1.2.1. Introducción
- 1.2.2. Época Clásica
- 1.2.3. Época Medieval
- 1.2.4. Época del Renacimiento
- 1.2.5. Época Moderna

1.3. MADERA PARA LA CONSTRUCCIÓN

- 1.3.1. Recurso forestal en el Ecuador
- 1.3.2. Especies Maderables
- 1.3.3. Construcciones de Madera

1.4. LA MADERA ESTRUCTURAL

- 1.4.1. Requisitos generales
- 1.4.2. Características
- 1.4.3. Clasificación en Grupos Estructurales
- 1.4.4. Estructura y Composición
- 1.4.5. Durabilidad
- 1.4.6. Factores que alteran el comportamiento estructural de la madera
- 1.4.7. Consumo de Energía
- 1.4.8. Madera Aserrada Estructural

1.5. PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL

- 1.5.1. Propiedades físicas
- 1.5.2. Propiedades mecánicas

1.6. TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y ESTRUCTURALES

- 1.6.1. Uniones estructurales
- 1.6.2. Sistemas de conexión
- 1.6.3. Estructuras macizas
- 1.6.4. Estructuras con entramados
- 1.6.5. Estructuras laminares

1.1. LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

"La madera es el único material vivo que se emplea en la construcción y, como todo lo que proporciona la vida, es algo menos rígido que los otros. El atractivo que tiene la madera procede, en gran parte, de sus cualidades vitales."

Eduardo Torroja (1)

La madera es el recurso natural renovable más antiguo y además, ha sido utilizada por el hombre a lo largo de la historia. Es un material de excelentes características estructurales, por lo que su uso en la construcción, ha sido continuo desde la antigüedad. Uno de los primeros cobijos construidos por el hombre tuvo como materiales básicos: vegetales, ramajes, cañas, troncos, etc. Las diferentes culturas y las épocas han hecho que la madera se combine con otros materiales, tales como: la piedra, el adobe o el ladrillo, otorgando a cada material, su función constructiva más adecuada. La casa Bethlehem, (Figura 1.1.) ubicada en el centro de Suiza, da testimonio de la increíble capacidad de resistencia que puede presentar la madera a través de los años. Tiene más de 700 años y ha sobrevivido varios percances, además está considerada como una de las construcciones más antiguas del viejo continente.

Pese a la importancia e historia que encierra la madera, actualmente es considerada como un material muy poco analizado y estudiado, para quienes desarrollan su actividad profesional en el sector de la edificación. Este desconocimiento parcial del material podría responder a la falta de atención en la formación universitaria, puesto que las universidades y, en especial, la de Cuenca centran, más, su formación en el estudio de las estructuras de hormigón armado y de acero, por ser las más utilizadas actualmente.²

La madera posee un gran valor estético, presenta excelentes propiedades físico-mecánicas y,

además, por ser materia prima de fácil acceso y renovación, sus procesos de extracción y preparación son más rápidos y económicos comparados con los de otros materiales. La madera presenta características favorables para su aplicación en la construcción, tales como: menor densidad que otros materiales, excelente comportamiento ante el fuego, buenas propiedades térmicas y acústicas, rapidez de montaje y, sobre todo, un verosímil comportamiento estructural. Todo lo cual habla de la importancia del estudio acerca de este material como un elemento estructural para su aplicación,



Figura 1.1. Casa Bethlehem (vista posterior) de Schwyz tiene más de 700 años, está situada en Suiza central. Se conserva hasta hoy en buen estado. / Fuente: www.swissinfo.ch



Figura 1.2. Iglesia de Karelia norte de Rusia, construida en 1714 en madera de roble. / Fuente: www.karephoto.narod.ru

1. E. Torroja. "Razón y ser de los tipos estructurales". 2a edición, Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento. Madrid, 1960.

2. F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echineque. "Estructuras de Madera". editorial Limusa. México D.F., 1983.

como un refuerzo de estructuras antiguas.

"La madera es históricamente uno de los materiales más utilizados por el hombre. Actualmente, en la mayoría de los países desarrollados su uso como material estructural alcanza a más del 90% de la construcción habitacional de 1 a 4 pisos." ³(Figura 1.2.)

1.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA MADERA EN ESTRUCTURAS

1.2.1. Introducción

La madera ha formado parte, total o parcialmente, de las edificaciones construidas por el hombre, desde el mismo neolítico (8500 a. C.), hasta antes de que empezara a contar con herramientas capaces de realizar cortes para poder trabajar el material. Probablemente, uno de los primeros materiales utilizados en la elaboración de refugios fue las ramas de madera seca que recolectaban del suelo, junto con las ramas que desgajaban de los árboles. Con el transcurrir del tiempo, los materiales líticos como las hachas y cuchillos les permitían, a nuestros primeros aborígenes, cortar troncos, cada vez más gruesos, y desbastarlos hasta conseguir un material de construcción, cada vez más, aceptable y fácil para su uso.

Aunque la imagen que tenemos de las civilizaciones antiguas (griegos, romanos, egipcios, persas) evoque suntuosos edificios de ladrillo, piedra o mármol, en realidad, dentro de la arquitectura civil, las grandes ciudades de la antigüedad estaban formadas, sobre todo, por viviendas familiares de madera sin tratar. Fue la combustión, la causante de que, poco a poco, se fuera relegando su uso como material de construcción a favor del adobe, ladrillo, etc. y, en construcciones de mayor interés, la piedra y el mármol, más apreciados por su solidez y belleza. En relación a lo mencionado, vale la pena citar la frase de Cesar

Augusto, quien dijo que había encontrado Roma hecha de ladrillo y la había dejado de mármol. Pero la verdad olvidó mencionar que Roma, antes de ser de ladrillo, había sido de madera.⁴

Otro ejemplo del uso de la madera, a través del tiempo, está plasmado en el templo Horyuji en Japón (Figura 1.3.), fundado en 607 d.C. y con una estructura de ciprés que todavía se conserva en condiciones aceptables y una apariencia totalmente armónica entre sus componentes.

1.2.2. Época Clásica

Al referirnos a los materiales de construcción en la época clásica, la piedra sobresale entre los más utilizadas, debido a su imponente presencia en los grandes templos griegos y romanos. Pero, la verdad es que los primeros edificios en muchas regiones de los países mediterráneos y países escandinavos fueron hechas en madera, situación que se puede constatar entre los principales elementos constructivos: la columna, esencialmente, y el dintel, propios de las estructuras de madera.



Figura 1.3. Templos japoneses de Horyu-ji, localizados en Ikaruga, Nara. Edificación del 607 a.C., considerada la más antigua en el mundo. / Fuente: web-japan.org/factsheet/es/pdf/es25_architecture.pdf

3. F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echineque. "Estructuras de Madera". editorial Limusa. México D.F., 1983.

4. Urbán Brotóns, Pascual. " Construcción de Estructuras de Madera". Editorial Club Universitario. Alicante-España.

Aunque la piedra fue el material dominante de la época, la madera siempre estuvo presente en la construcción, siendo utilizada como estructura de las cubiertas de los monumentales edificios. Quizá el ejemplo más conocido lo tenemos en el templo del Arsenal de Pireo (Figura 1.4.), construido por el arquitecto Filón, cuyas especificaciones se conservan grabadas en una pieza de mármol.³

Los romanos también fueron adquiriendo conocimientos más técnicos. El arquitecto Vitrubio, en su tratado "De Architectura", considera el primer pre-dimensionamiento de la madera en la construcción, llegando a ser utilizada de manera intuitiva para armazones estructurales. Mientras que, entre los griegos, su aplicación fue más rígida y escueta, usando la madera sólo como columna y dintel.

En zonas escandinavas, el uso de la madera fue mayor ya que, a diferencia de los países mediterráneos, no contaban con grandes canteras de materiales pétreos, como sí fue el caso, en cambio, de Italia y Grecia.⁴

1.2.3. Época Medieval

Edad del florecimiento de uso de la madera como material estructural, ya que estuvo presente en la mayor parte de las viviendas construidas; mientras que la piedra se utilizó como material en edificios monumentales. Una de las primeras modalidades del uso de la madera fue las "crucks Houses", las cuales eran edificaciones construidas a base de "estructuras de madera curvada desde el piso hasta el tumbado y que soportan el techo del edificio. Este tipo de estructuras de madera se compone de largas vigas de madera, generalmente dobladas hacia adentro, formando el caballete del tejado, las cuales generalmente son aseguradas por una viga horizontal en la parte superior, logrando una forma similar a una "A". Varios de estos arcos se construyen en el suelo y luego se levantan en su respectiva posición." (Figura 1.5.)



Figura 1.4. Tipología de Cubierta en Madera de los templos Griegos. Cubierta del Arsenal de Atenas. / Fuente: mariafernandahappy.webnode.es/arquitectura-griega/periodos/periodo-arcaico/



Figura 1.5. Estructura de madera tipo Cruck home. Origenaria en el Medioevo, antes de la invención del sistema poste y viga. / Fuente: www.abandonedcommunities.co.uk/Cruck1.JPG

El sistema Cruck, Crook Frame o Marco Curvado en español, por su complejidad y alta demanda del uso de la madera, poco a poco fue remplazado por el uso de poste y viga; sistema que necesita menos madera y permite el uso de

3. F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echineque. "Estructuras de Madera", editorial Limusa. México D.F., 1983.

4. Urbán Brotóns, Pascual. "Construcción de Estructuras de Madera". Editorial Club Universitario. Alicante-España.

piezas de menor sección. Lo que dio inicio a las construcciones típicas medievales, con estructura de madera y rellenos de tabiques a base de tierra.

Al igual que en la época clásica, los grandes edificios medievales eran construidos con piedra, los cuales servían como apoyo a las magníficas estructuras o armazones de las cubiertas. En éstas, destacaba el gran esfuerzo artístico de los artesanos ingleses, puesto que los armazones de las cubiertas eran verdaderas obras de arte.³ (Figura1.6.)

A pesar del limitado conocimiento estructural de la madera durante la época, se construyeron muchos tipos de cubiertas que fueron empleadas en las grandes edificaciones góticas y románicas, lo que marcó un estilo propio en cubiertas con soluciones estructurales muy óptimas y acabados estéticamente incomparables a los de otras épocas. Las cubiertas de la Edad Media, sin duda, fueron un gran aporte para el desarrollo de la madera en estructuras de cubiertas. (Figura1.7.)

1.2.4. Época del Renacimiento

Al igual que las dos épocas antes mencionadas, en la mayor parte de los países del mediterráneo, la piedra continuó siendo el material predilecto para la construcción de grandes edificaciones; por ejemplo, los muros portantes de las cubiertas de madera. Pero es en esta época, cuando estas estructuras dejan de ser usadas de una manera artesanal y empírica, y se empieza a utilizar la madera en sistemas estructurales para salvar grandes luces.

Los arquitectos, Giorgio Vasari y Andrea Palladio, dieron un giro al uso de la madera en sistemas estructurales, proponiendo elementos que soporten esfuerzos de tensión y tracción. Por su lado, Vasari propuso una armadura para techar la galería *Uffizi de Florencia*. (Figura 1.8.) El prototipo de cercha de Vasari, quizás, sea uno de los mejores ejemplos de reforzamiento estructural para la época, puesto que, a través de grandes estructuras, logró cubrir luces superiores



Figura 1.6. Resolución de Cubiertas de Madera en Iglesia Gótica Inglesa. / Fuente: Cubierta de la Luz: El Gótico. <http://www.slideshare.net/rosarmer/arquitectura-del-gtico-en-europa-3411059>



Figura 1.7. Cubiertas de Madera Ingleses. Opciones de Techos para la Arquitectura Gótica / Fuente: F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echineque. "Estructuras de Madera", editorial Limusa. México D.F., 1983. pag.32



Figura 1.8. Sala Botticelli en la Galería Uffizi de Florencia. Cerchas de Madera elaboradas por G. Vasari / Fuente: www.erc.com/projects/museum/the-uffizi-3043/es/intro-1.php

3. F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echineque. "Estructuras de Madera", editorial Limusa. México D.F., 1983.

a cualquier edificación construida en ese tiempo (aproximadamente 12 m. entre apoyos). Pero el gran mérito de Vasari es el haber mejorado el sistema estructural, aumentando las secciones mediante refuerzos de madera en los puntos más críticos, es decir, se consideró los lugares donde existirían los mayores momentos flectores, por lo cual aumentó la sección de la pieza a flexión y de la misma forma, se realizó un adecuado refuerzo en los extremos de la cercha y en los soportes de los pares para ayudar a soportar los esfuerzos a tracción; todo esto con la ayuda de correas metálicas para lograr una mejor rigidez en las uniones. (Figura 1.9.)

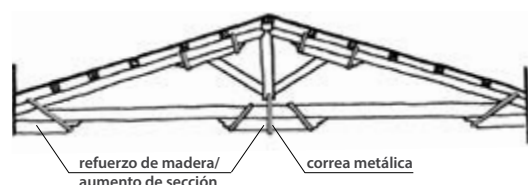


Figura 1.9. Detalle de la Cercha de Madera de Vasari en Florencia. / Fuente: F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echíneque, "Estructuras de Madera", editorial Limusa, México D.F., 1983, pag.36



Figura 1.10. Puente degli Alpini en Bassano del Grappa (Véneto). Construido en 1569 por el A. Palladio/ Fuente: www.epdlp.com/edificio.php?id=4011

Paladio, por otro lado, contribuyó a la construcción de madera con un tratado sobre arquitectura, en donde analizó el uso de los sistemas estructurales de madera y, además, propuso varios tipos de armaduras, las cuales fueron utilizadas en cubiertas y en puentes. La estructura más representativa fue la empleada en el Puente de los Alpinistas, que fue construido al norte de Italia en la provincia de Vicenza. Este puente contempla basamentos reticulados de madera dispuestos de tal forma que soporta cargas vivas muy elevadas, debido a cientos de turistas que acuden al lugar. (Figura 1.10.)

Sin embargo, los conocimientos adquiridos en esta época carecían de fundamentos científicos para comprobar los comportamientos estructurales. Los cambios en el uso de la madera estructural se inician pasado el Renacimiento, ya que personajes como Galileo, Coulomb, Euler, Newton y otros empezaron a formular principios científicos para el comportamiento estructural de armaduras de madera.

1.2.5. Época Moderna

La industrialización del siglo XIX colaboró, notablemente, con la optimización de las estructuras de madera en varios aspectos de funcionalidad y estética. La fabricación industrial de los clavos redujo las uniones

de madera: el hacha se vio reemplazada por la sierra, y esto llevó a que, la producción en serie de piezas estructurales, se estandarice mediante procesos mecánicos. Debido a estos adelantos tecnológicos y a la producción en serie de elementos para la construcción, surge a mediados de ese siglo el nuevo concepto de la prefabricación. Sin embargo, todo este adelanto tecnológico y de industrialización hizo también que el papel protagonista de la madera en la construcción se viera opacado por el surgimiento de otros materiales como el acero y el hormigón, así como también de los procesos industrializados de materiales tradicionales, como el ladrillo de barro.

Otro factor positivo para el desarrollo de la industrialización de la madera se dio gracias al Ingeniero Bernard Forest de Belidor [5], quizá sea el personaje más importante en el desarrollo de estructuras, debido a su publicación en el año de 1729 con

[5] Belidor, Bernard Forest. Sabio ingeniero francés, natural de Cataluña, inspector de artillería, miembro de la Academia de Ciencias de París. Nació en 1697 y murió en 1761. Hizo algunos descubrimientos en la rama de ingeniería.

el libro "La Science des ingénieurs": primer documento de Ingeniería con bases científicas en el cual Belidor propone nuevas reglas de dimensionamiento para piezas de madera. Llegado el siglo XIX, estas reglas se generalizan y los elementos estructurales adquieren dimensiones más esbeltas que las antiguamente utilizadas.

1.3. MADERA PARA LA CONSTRUCCIÓN

Las características que diferencian a la madera de los demás materiales para la construcción, hacen que se pueda construir una edificación, íntegramente, con este material. Obviamente, el desarrollo de materiales secundarios o complementarios hacen posible que dichas construcciones sean factibles e inclusive más económicas que con otros materiales.

La construcción de una vivienda sustentada en madera está caracterizada por categorizar el material en dos grupos: en el primero, se encuentran todas las piezas que están destinadas a funciones de resistencia, tales como: entramados, muros, pisos, techos, columnas, etc., esto es, toda la madera que constituyen la estructura de la edificación; (Figura 1.11.) en el segundo, está la madera que se utiliza para realizar los acabados de la edificación y que no están sometidas a esfuerzos o a resistir cargas importantes.

La madera al ser un material con diferentes resistencias, según la orientación de sus fibras (ORTOTRÓPICO), siempre debe considerarse la relación que existe entre, su posición y la capacidad de soportar cargas, puesto que la fibra puede estar paralela o perpendicular a la estructura.

Es necesario precisar que, la madera es utilizada en la producción intensiva de elementos estructurales, tales como: vigas, correas, cerchas, etc., o para la realización de estructuras portantes de un edificio, como por ejemplo: techos, paredes, escaleras, etc. Las maderas para ser utilizadas en la construcción deben ser de rápido

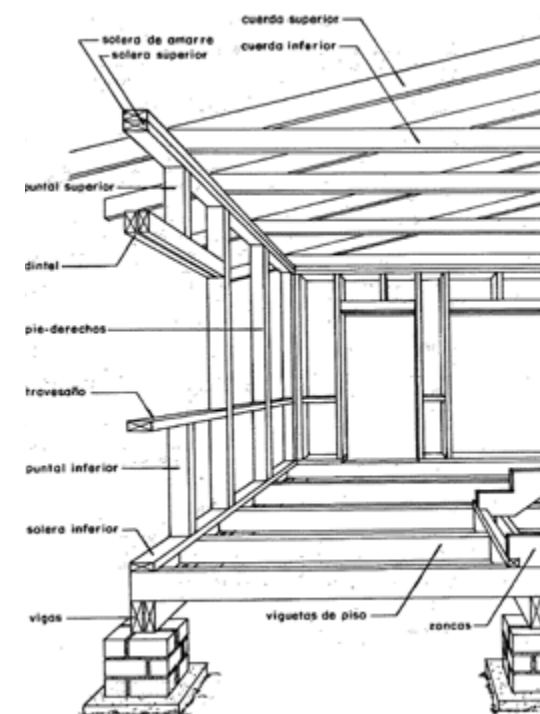


Figura 1.11. Madera de Construcción Estructural / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT), "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982, pag. 3-10

crecimiento (renovables), además, baratas y no necesariamente de una alta calidad o gran estética. La tendencia actual se orienta a la utilización de especies livianas, blandas y de baja densidad, es decir, maderas del tipo coníferas, muy favorables también por ser renovables. Esta especie, por presentar las cualidades mencionadas, deberán tener planes de conservación y estar protegidas, especialmente contra la humedad y xilófagos.

Con respecto al comportamiento estructural de la madera en la construcción, ésta no presenta los principios de elasticidad proporcionales a las cargas aplicadas; es decir, si la pieza de madera se le somete a una carga, su deformación dependerá de la orientación de sus fibras, sin embargo, para los niveles de sollicitación a los que normalmente se la utiliza, se puede asumir un comportamiento elástico-lineal.

6. Ortotrópico: material con propiedades diferentes en sus tres direcciones perpendiculares (axial, radial y circunferencial). En el caso de la madera respecto a sus fibras.

1.3.1. Recurso forestal en el Ecuador

En los años ochentas, se llevó a cabo “El Proyecto Andino de Desarrollo Tecnológico en el Área de los Recursos Forestales” (PADT-REFORT), presidido por los miembros de la junta del Acuerdo de Cartagena, conformada por Venezuela, Colombia, Bolivia, Perú y Ecuador. La finalidad del proyecto fue desarrollar el Estudio Integral de la Madera para la Construcción con características generales para los países sudamericanos y, así, generar publicaciones que aporten normas técnicas para el uso de este material en la construcción, puesto que estos mencionados documentos están basados en una serie de ensayos efectuados en laboratorios de países, tales como: Perú y Chile.

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), el país consume alrededor de 5 millones de metros cúbicos al año de madera rolliza, entre Latifoliadas y Coníferas -especies madereras que serán explicadas más adelante- que poseen fuentes de abastecimiento, en donde el 70% (3.5 millones de m³) son provenientes de bosques nativos y lo restante 30% pertenece a bosques renovables.

“En cuanto al aprovechamiento sostenible, se detalla que en el Ecuador existen alrededor de tres millones de hectáreas de bosques nativos, pero solamente se tiene acceso a un millón de ellas. En consecuencia, si de cada hectárea de bosque nativo se obtiene en promedio 1.5 m³ anuales de madera rolliza, la producción en promedio es de 1.5 millones de m³, con un déficit de 2 millones de m³, los cuales son compensados con madera producto de la tala ilegal.”,

En resumen, para un manejo adecuado y sustentable del uso de la madera en la construcción, se debe obtener materia prima, preferentemente, de bosques renovables través de volúmenes mínimos de 250 m³/ha. y de bosques nativos rangos de volúmenes entre 20 a 25 m³/ha.

1.3.2. Especies Maderables

Puesto que la madera es un material ortótropo proveniente del interior del tronco de los árboles y con distintas características, su resistencia dependerá de sus cualidades físicas, referidas a su densidad y dureza, lo cual obviamente estará dado por la especie de árbol del cual provenga el material. Según las normas técnicas como, la UNE (Una Norma Española), que rige la estandarización de normas para laboratorios y centros de investigación, o la NEC-11 (Norma Ecuatoriana de la Construcción), entre otras, la madera según sus cualidades físicas se dividen en dos grupos:

Maderas duras o frondosas, estas se subdividen en seis clases según sus capacidades resistentes (D30, D35, D40, D50, D60 y D70). La letra D está dada por el nombre de su grupo de origen, D= Deciduous (frondosas).

Maderas suaves o coníferas, las cuales se subdividen en doce clases resistentes (C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C 40, C45 y C50). La letra C está dada por el nombre de su grupo de origen, C: Coniferous (coníferas).

El número que acompaña a la letra “C o D” está referido a la resistencia característica de cada especie a flexión expresada en N/mm². (Tabla a1.)

1.3.2.1. Maderas Duras

Estas provienen de árboles nativos y de crecimiento lento. Este tipo de árboles presenta una frondosidad en sus copas por la abundancia de sus hojas. Su lento desarrollo hace que su composición celular presente una mayor densidad y, a su vez, tenga una capacidad portante mejor que las maderas suaves. Las células de las maderas duras, dependiendo de la especie, pueden llegar a medir hasta 1 mm. de largo.

7. Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). “Construcción con Madera”. Quito-Ecuador: 2011. Pág: 7-3

		Especies coníferas												Especies frondosas						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Propiedades resistentes en N/mm ²																				
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70	
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42	
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34	
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5	
Cortante	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0	
Propiedades de rigidez en kN/mm ²																				
Mód. elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20	
Mód. elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8	
Mód. elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33	
Módulo de cortante medio	G	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25	
Densidad en Kg/m ³																				
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900	
Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080	

Tabla a1. Clasificación de las Especies Madereras según sus Propiedades Mecánicas. / Fuente: Popol Vuh. “Madera Aserrada Estructural”. Pag: 292. www.cscae.com/area_tecnica/altim/actividades/act_paginas/libro/35%20Madera%20aserrada%20estructural.pdf

Como consecuencia del largo tiempo de espera para la utilización, se la considera como un material no renovable y costoso para su uso en la construcción. La obtención de estas especies madereras se va convirtiendo, cada vez más, en un atentado en contra del ecosistema, debido a la exigüidad y a la tala indiscriminada de bosques nativos.

Entre las variedades de maderas duras existentes en nuestro país y apropiadas para su uso en la construcción, se puede encontrar varias especies, que dependiendo de la zona forestal, se seleccionarán las más idoneas. A continuación se detalla las especies más comunes y utilizadas en el Ecuador:

a. Eucalipto

Nombre científico: Eucalyptus globulus

Nombre común: Eucalipto

Procedencia: Zonas rurales y periféricas de Cuenca.

Durabilidad: Moderadamente durable ya que es resistente a los hongos. Expuesta a la interperie puede sobrepasar los 10 años sin preservación.

Usos en la Construcción: Estructuras de pisos, columnas, pie derecho, vigas, soleras, cerchas, tablones, pisos, duelas y encofrados.



a. Madera de Eucalipto / Fuente: www.forestalmateriales.com

b. Chanúl

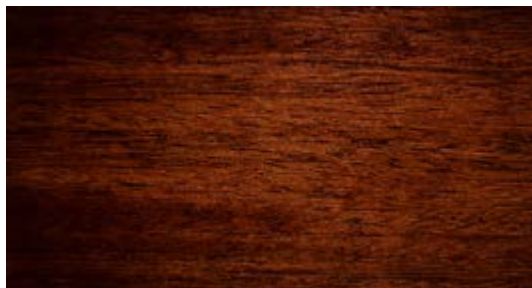
Nombre científico: Humiriastrum Procerum

Nombre común: Chanul, Batea (Colombia), Quinilla Colorada, Hispi (Perú), Corozo (Panamá y Costa Rica)

Procedencia: Oriente ecuatoriano (Méndez, Macas)

Durabilidad: Es una madera moderadamente resistente al ataque de hongos e insectos, con una duración en el uso exterior de 5 a 10 años.

Usos en la Construcción: Estructura de pisos, estructuras vistas, vigas, columnas, cerchas, pisos y estructura de cubiertas.



b. Madera de Chanúl / Fuente: Daniel Enríquez

c. Teca

Nombre Científico: Tectona grandis.

Nombre Común: Teca.

Procedencia: cantón Balzar, Guayas.

Durabilidad: Esta madera es anticorrosiva, tiene resistencia a los hongos y a la intemperie por su aceite antiséptico que la protege de diferentes organismos. Al exterior sin preservar puede durar hasta 10 años.

Usos en la construcción: Columnas, pie derecho, vigas, soleras, cerchas, tablones, pisos y estructuras de cubiertas.



c. Madera de Teca / Fuente: Daniel Enríquez

d. Yumbingue

Nombre Científico: Terminalia amazonia (J.F. Gmel.)

Nombre Común: Yumbingue

Procedencia: Oriente Ecuatoriano

Durabilidad: Esta madera presenta una resistente moderada expuesta al exterior, con una duración de 5 a 10 años.

Usos en la Construcción: Se usa en construcción pesada, como: pisos, muebles y armazones de barcos, elementos estructurales para puentes y durmientes para vías de ferrocarril.



d. Madera de Yumbingue / Fuente: Daniel Enríquez

e. Caoba

Nombre científico: swietenia macrophylla G. King.

Nombre Común: Caoba, tzutzul, Chiapas, cedro carmesí.

Procedencia: Oriente Ecuatoriano (Gualaquiza y Méndez)

Durabilidad: moderadamente resiste al ataque de hongos e insectos. Posee una duración de uso exterior de 5 a 10 años.

Usos en la Construcción: Conocida especialmente por su excelente terminado se utiliza en elementos vistos como columnas, vigas, pisos , etc.



c. Madera de Caoba / Fuente: Daniel Enríquez

f. Guayacán

Nombre Científico: Minquartia guianensis

Nombre Común: Guayacán pechiche

Procedencia: Oriente Ecuatoriano (Gualaquiza)

Durabilidad: En estado natural, esta madera es medianamente resistente al ataque de hongos e insectos y, en usos al exterior, su condición ofrece una resistencia que abarca entre 5 y



d. Madera de Guayacan / Fuente: Daniel Enríquez

10 años; además, como dato importante se recalca que su duramen es inmune a xilófagos. Usos en la Construcción: Columnas, vigas, soleras, cerchas, durmientes.

1.3.2.2. Maderas Suaves

Abarca a todas las maderas provenientes de árboles de orden de las Coníferas. Estas se caracterizan por tener hojas lineales, aciculares (como aguja) o con forma de punzón. Las células en las coníferas son homogéneas y pueden medir de 3 a 5 milímetros de largo, dependiendo de la especie. Como su nombre lo indica, son maderas con características contrarias a las llamadas Duras, pero esto no quiere decir que sean excluidas para su uso en la construcción; al contrario son maderas que presentan algunas ventajas, por ejemplo: las coníferas son de crecimiento y desarrollo rápido, por lo cual se las consideran como un recurso renovable y, a su vez, su costo es menor; la ligereza es otra de sus ventajas, debido a su baja densidad.

Las maderas suaves no tienen largos períodos de vida y su preservación deberá ser mucho más sigilosa y periódica. En cuanto a sus características, el término “suaves” no precisamente está referido a maderas de baja resistencia, por el contrario, éstas pueden tener la misma dureza que las llamadas Duras. No obstante, se debe tener claro que la densidad de éstas es menor a las antes mencionadas y, por lo tanto, su ligereza será mayor, facilitando así su manipulación, aunque tiene la desventaja de producir mayor cantidad de astillas, debido a que su composición celular es poco compacta.

La carencia de veteado le resta atractivo, por lo que siempre es necesario recubrirla con algún tipo de protección contra los agentes nocivos.

Entre las especies más comunes de coníferas utilizadas en el campo de la construcción ecuatoriana y especialmente en la zona austral, podemos encontrar al pino insigne, como el máximo exponente. Aunque el uso de las coníferas en el campo estructural no está lo suficientemente desarrollado; sin embargo, a continuación se detalla dos de las especies más conocidas y recomendadas para su uso en la construcción:

a. Pino

Nombre Científico: Pinus radiata

Nombre Común: Pino insigne

Durabilidad: No es resistente al ataque de hongos e insectos. Posee una duración en uso exterior menor a 1 año en estado natural.

Usos en la Construcción: Columnas, pies derechos, vigas, soleras, cerchas, tablones, duelas, molduras, chapas y muebles.



a. Madera de Pino Insigne / Fuente: Daniel Enríquez

b. Ciprés

Nombre Científico: Cupressus sempervirens

Nombre Común: Ciprés italiano

Durabilidad: No presenta ningún tipo de resinas y es inmune al ataque de insectos y tiene buena resistencia al agua.

Usos en la Construcción: Columnas, postes, vigas, soleras, tablones, postes de muelles, estructuras de barcos y muebles.



a. Madera de Ciprés / Fuente: Daniel Enríquez

1.3.3. Construcciones de Madera

Las construcciones de madera han sido, por miles de años, la forma más común de solventar la necesidad de vivienda en el mundo. Sin embargo, a pesar del desarrollo y evolución de otros materiales tales como: el cemento, acero, vidrio, yeso, etc., no han cesado en su uso dentro de la construcción; la madera, en algunos países, sigue siendo el material por excelencia, para la edificación.

Respecto a la forma de obtener madera, en particular, cabe citar que las técnicas antiguas de obtención distan bastante de las actuales. En primer lugar, por la disponibilidad de algunas especies de gran calidad que antiguamente se podía encontrar en el mercado maderero y que eran capaces de proporcionar piezas con características extraordinarias. La mayor parte de la madera utilizada en estructuras era de duramen, es decir, elementos generosos de dimensiones y con pocos defectos físicos. Localmente, para la construcción de edificaciones se disponía de madera con buenas cualidades, como: el roble, el cedro y el aliso, pero la tala indiscriminada de bosques nativos produjo que, a mediados del siglo XIX, se buscaran otras alternativas y una de ellas fue la de traer una nueva especie desde el extranjero; fue entonces cuando el eucalipto, originario de Australia, se insertó en el país y dio muy buenos resultados por sus excelentes características portantes.

En segundo lugar, la tecnología del aserrado, de antes, no disponía de los medios actuales para

optimizar el aprovechamiento del material; también las técnicas de secado, antiguamente, bastaban con dejar la madera al aire durante el tiempo que fuera necesario, permitiendo de esta manera reducir la presencia de rajaduras en las piezas de madera.

“Como consecuencia de todo ello, en la actualidad se dispone de madera de menores dimensiones y, en general, de menor calidad, por lo que aplicar a la madera antigua los criterios deducidos a partir de madera explotada y procesada con las técnicas actuales puede conducir a errores.”⁸

A pesar de estos argumentos citados, no se puede utilizar dichas consideraciones para determinar la capacidad resistente de los elementos de madera. Desde la perspectiva de esta tesis, el objetivo es el de desarrollar sistemas aplicables a cualquier tipo de obra para lograr el incremento de resistencias adecuadas.

Con respecto a la cantidad de viviendas construidas en madera alrededor del mundo, se puede encontrar construcciones muy antiguas en lugares donde el material no ha sido el más aceptable. Por ejemplo, en zonas mediorientales donde la tierra es el principal material se han levantado grandes edificaciones, y las áreas geográficas donde han tenido mayor implantación, están en: Japón, Rusia, Europa Central, Alemania, Austria, Suiza, países escandinavos, mientras que, en América su uso se lo puede encontrar en casi todos sus países.

También, cabe señalar que las viviendas de madera han contado con determinados inconvenientes desde el punto de vista de la percepción cultural de este tipo de construcciones. Por este motivo, en nuestro país, la madera no ha sido aceptada; de allí que un análisis y una propuesta para construir con este material, se ha visto rezagada hasta el momento.

8. Herrero, Miguel. “Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera conífera”. Universidad Politécnica de Madrid, 2003. Pág: 34.

Históricamente, en determinados lugares, la madera ha sido percibida como un material no apto para la construcción. Pero con el paso del tiempo, y con el resultado óptimo de este material, así como con los informes técnicos de arquitectos e ingenieros de renombre mundial (a favor de la elección de la madera, por encima de otros materiales), en los que afirman que a sus excelentes propiedades antisísmicas, se deberían sumar numerosas ventajas en el ámbito de la habitabilidad (térmica, acústica, de seguridad, etc.), esta percepción ha cambiado, hasta el punto de que en el Hemisferio Norte del continente americano, más del 80% de la construcción residencial, se basa en sistemas constructivos intensivos en madera; mientras que la mayor parte del sur de América, esta percepción se mantiene todavía en contra del material, debido a conceptos mal fundados acerca de la resistencia y durabilidad.

“Como un ejemplo de este cambio de percepción, podemos citar lo ocurrido en Buin (Chile), en el que los habitantes de un barrio protestaron por la construcción de 225 viviendas sociales en madera, ya que afirmaban que disminuirían la calidad social de todo el vecindario. (Figura 1.12.) Cuando estuvieron construidas y terminadas, los mismos vecinos protestaron de nuevo ya que las casas de madera presentaron mejores condiciones y estandares de vida, puesto que eran de varios pisos y con una superficie mayor, por lo que reivindicaron sus criterios y solicitaron que se construyeran más viviendas de madera.”,

1.3.3.1. La madera en edificios patrimoniales locales

El uso de la madera en Cuenca, siempre, ha sido parte de las construcciones, pese a todos los cambios de tipología arquitectónica que se dieron por motivos de la conquista española. En la actualidad podemos encontrar una variedad de inigualables edificaciones patrimoniales, cuyos sistemas estructurales han evolucionado a partir de la introducción de nuevas tecnologías en el manejo de la madera.



Figura 1.12. Vivienda prefabricada en madera. Comunidad de Buin-Chile / Fuente: www.casasbuin.cl

Cabe indicar que, un gran porcentaje de estas construcciones han sido producto de la experiencia adquirida desde nuestros antecesores.

Históricamente, la arquitectura cuencana siempre se ha visto enfocada en el diseño de sus fachadas, debido a que era percibida la decoración exterior como la más importante, dejando muchas veces de lado la autenticidad de la edificación. Por este motivo, la madera se ha visto rezagada en su uso y esto ha hecho que se la tome como uno más de los materiales para la construcción y ha dado paso para que muchas de las casas patrimoniales hayan sufrido erróneos procedimientos de restauración. Pese a todas las limitaciones dadas a la madera, en la ciudad, se puede encontrar muchas edificaciones que sustentan su estructura con elementos de madera y con alto valor histórico, entre ellos están:

1.3.3.1.1. Iglesia de El Sagrario

“Construida en 1557, con la fundación española de la ciudad. En la actualidad es conocida como la catedral vieja de Cuenca, que en sus inicios fue tan solo una ermita, es decir una pequeña capilla, pero con el tiempo fueron añadidos espacios que hicieron de ésta la principal iglesia de la ciudad.”¹⁰ En la actualidad el edificio se ha convertido en uno de los muros más importantes de la ciudad, puesto que guarda en su interior,

10. Pazán Claudia. “Catedral Vieja, historias que se construyen”. Diario El Tiempo. 04 abril. 2012

9. Historia de las casas de Madera. 27 Enero. 2013 <http://www.maderlandia.com/historia.php?&ancho=1366&altura=768>

una riqueza no sólo histórica, inigualable, sino también, social, cultural y arquitectónica.

La Iglesia de El Sagrario presenta una estructura mixta, ya que no es netamente de madera, sino de tierra aparajada con adobes. (Figura 1.13.) Lo realmente importante, desde un punto de vista estructural, es que la edificación tiene como elemento primordial en su configuración general, una nave central, constituida netamente de madera, con columnas forradas con tabloncillos del mismo material. La madera utilizada se ha logrado conservar por muchos años y sin presentar mayores daños, al igual que el resto de sus elementos estructurales cómo su cubierta y gran parte de las carpinterías. (Figura 1.14.) Esto se debe a los procesos de rehabilitación que fue sometida, puesto que el inmueble permaneció por muchos años en deplorables condiciones y, a pesar de aquello, la mayoría de sus elementos estructurales de madera se conservan y continúan cumpliendo sus funciones portantes.

1.3.3.1.2. Iglesia de Todos Santos

Según los historiadores, lo que hoy es iglesia fue, en un principio, un templo aborígen que se llamaba "UZNO" que servía como lugar de adoración al dios sol. Con el asentamiento español, a mediados del siglo XV, sobre esta ermita se realizó la construcción de la capilla de San Marcos. Esta capilla se desarrolla en diferentes épocas, ha pasado por veinte intervenciones desde el año 1895. (figura 1.15.)

Con el mismo principio constructivo, que la edificación anterior, la iglesia de Todo Santos fue levantada con estructuras mixtas, principalmente madera y tierra. Sus principales elementos estructurales, son las columnas de madera de la nave central, piezas que han sido forradas con tabloncillos del mismo material, pero que al interior guardan una resistencia única, puesto que soportan toda la cubierta principal.

Como muestra de las increíbles capacidades



Figura 1.13. Iglesia del Sagrario, Fachada Exterior. Ubicada en Cuenca-Ecuador / Fuente: www.cuencaecuador.com.



Figura 1.14. Estructura de la nave central de la iglesia del Sagrario. Cuenca-Ecuador / Fuente: Daniel Enríquez



Figura 1.15. Iglesia de Todosantos, fachada principal. Cuenca-Ecuador / Fuente: Revista "cuencamagazine.com" <http://www.cuencamagazine.com/sitios-de-interes/iglesias-de-cuenca/todos-santos/>



Figura 1.16. Iglesia de Todosantos. Interior, estructura de la nave central. Cuenca-Ecuador / Fuente: Daniel Enríquez M.

de resistencia de la madera empleada en la edificación, la estructura de la nave principal resistió a un incendio, afectando a varias columnas. Sin embargo, éstas continúan de pie, realizando su respectivo trabajo estructural. (Figura 1.16.)

1.3.3.2. La madera en edificios contemporáneos

1.3.3.2.1. Parlamento de Escocia

Edificio construido en julio de 1998 por el grupo de arquitectos EMBT de Barcelona, ganadores del concurso para diseñar el edificio nuevo para el Parlamento Escocés, en Holyrood. El equipo presentó una serie de esquemas en donde se mostraba la concepción del Parlamento: una hoja y sus ramas, con fuerte significado simbólico. Su principal atractivo, en el campo de construcciones de madera, se encuentra en la resolución de la cubierta principal, que contempla un complejo sistema de vigas de madera laminada. (Figura 1.17.)

1.3.3.2.2. Multihalle Mannheim

El Multihalle de Mannheim es una construcción realizada en el año 1975 en Mannheim, Alemania. El proyecto comenzó en 1973, pero por dificultades técnicas, debidas al cálculo (los sistemas informáticos no estaban lo suficientemente desarrollados como para tener eficacia), se retrasó el comienzo de las obras, hasta 1975. En este año, la gran malla espacial de madera se levantó, poco a poco, asumiendo ciertos problemas durante la obra, como la separación entre las dos direcciones de los listones de madera, que se vio reducida a 50x50 cm, no por circunstancias estructurales, sino por seguridad de la obra. (Figura 1.18.) La malla tiene 80 metros de largo, y para su desarrollo se realizó una maqueta de menor complejidad a escala 1/16, para comprobar así su estabilidad.¹¹



Figura 1.17. Salón principal del Parlamento de Escocia. Sistema de Vigas de Madera Laminada / Fuente: <http://www.epdlp.com/edificio.php?id=536>



Figura 1.18. Salón principal del Parlamento de Escocia. Sistema de Vigas de Madera Laminada / Fuente: <http://www.epdlp.com/edificio.php?id=536>

para fabricar elementos, que forme parte de los sistemas estructurales de una construcción, tales como: muros, pisos y cubiertas. La principal cualidad de esta madera es su resistencia, puesto que su función siempre será la de soportar cargas y esfuerzos producidos por agentes externos.

Según la norma vigente para la construcción en Ecuador, detalla que "la madera estructural es

1.4. LA MADERA ESTRUCTURAL

Se denomina así a toda la madera utilizada

11. Prieto Nuria. "Multihalle de Mannheim. Frei Otto". <http://tec-tonicablog.com/?p=9631>

aquella que en uso, a más de soportar su propio peso, estará sujeta a esfuerzos diversos. Por tal razón, deberá tener una densidad básica mínima de 0.4 gr/cm^3 ¹². Al ser un material de estructura compleja, de características anisótropicas y que está constituida por partes del tejido leñoso de los árboles, puede presentar varias aplicaciones, pero la más importante, sin duda, es la que presenta en la construcción como material estructural.

1.4.1. Requisitos generales

De acuerdo con el manual de diseño para maderas del grupo andino, la madera estructural debe cumplir con tres principios básicos que se describen a continuación:

1. Debe ser material clasificado y tener calidad estructural; es decir, cumplir con la norma de clasificación visual por defectos. La clasificación visual tiene como finalidad identificar cualquier defecto o imperfección que afecta a las propiedades físicas, químicas y mecánicas de una pieza de madera. El objetivo principal es obtener elementos con características garantizadas.

2. Provenir de las especies forestales, consideradas como adecuadas para construir, las cuales se presentan, más adelante, dentro de este capítulo.

3. Deben ser piezas de madera con dimensiones, de acuerdo a las secciones que la norma técnica exige y, en lo posible, que el material sea lo más homogéneo posible.

1.4.2. Características

La característica que más destaca en la madera estructural es, sin duda, su gran capacidad portante, la cual está relacionada con su funcionalidad y resistencia, propia de la madera. Sólo basta fijarse en la estructura de un árbol para comprender

cómo el tronco y las ramas han sido especialmente diseñados para resistir el peso propio y la acción del viento. De esta manera, se comprenderá, desde un punto de vista estructural que la madera, además de ser el producto de un proceso evolutivo de millones de años, ha servido como un elemento soportante de esfuerzos, a flexión y compresión, con el menor gasto energético posible.

La madera estructural posee varias ventajas, entre las cuales destaca su ligereza y la capacidad de desarrollar una mayor fuerza de tensión, flexión y compresión por unidad de peso. Otra ventaja es el gran aforo que tiene para absorber energía y resistir impactos, lo que le hace apropiada para un uso estructural. Además la madera al ser un producto biodegradable, no presenta los problemas de contaminación en una demolición que, por otra parte, sí presenta el hormigón o acero.

Como se mencionó, la madera como material de estructura fibrosa hace que sus capacidades portantes sean anisótropicas; es decir, que presenten diferentes capacidades portantes, según la dirección en las que sean examinadas, recordando que la madera posee tres direcciones.

Consecuentemente a esta característica, la madera presenta algunos inconvenientes para su uso como material estructural, por ejemplo, es hasta 30 veces más resistente a esfuerzos normales paralelos a la fibra, que a los esfuerzos perpendiculares a la misma. Al referirnos a esfuerzos cortantes paralelos a la fibra, su resistencia es baja con respecto a los esfuerzos perpendiculares a la misma. Con respecto a las grandes ventajas y aportes que tiene la madera para su uso, como material estructural, y proveniente de un organismo vivo, obviamente no será un material perfecto, sino que está sujeto a

12. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). "Construcción con Madera". Quito-Ecuador: 2011.

algunas desventajas propias de su naturaleza.

Quizá la desventaja frente los demás materiales estructurales, está referida al tamaño que puede alcanzar el material, en sus longitudes y secciones, es decir, las dimensiones de ancho y largo son limitadas, puesto que provienen del árbol, el cual muchas de las veces, no presenta regularidad en sus formas.

Otra desventaja de la madera estructural es la inminente tendencia a la variación volumétrica, debido a los diferentes porcentajes de humedad del ambiente. Otra de las desventajas de la madera como material estructural está su deformación, que sufre a lo largo del tiempo por causa de: una carga permanente, la vulnerabilidad que presentan algunas especies madereras ante el ataque de organismos vivos, de la pudrición de elementos expuestos al exterior, sin su debida preservación; y de la dificultad de realizar uniones, sin ayuda de conectores.

1.4.3. Clasificación en grupos estructurales

El comportamiento de la madera estructural se caracteriza por tener diferentes reacciones a esfuerzos admisibles, y al igual que otros materiales estructurales, ésta posee una fase elástica y una plástica. En la primera, el material se deforma de manera lineal, con respecto al esfuerzo aplicado, y una vez eliminado el esfuerzo, el material vuelve a su dimensión original.

Asimismo, la fase plástica se caracteriza porque la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación no es lineal, y al eliminar el esfuerzo, el material queda con una deformación permanente. Lógicamente, puesto que la madera puede presentar alteraciones en sus resultados, después de aplicados los esfuerzos y debido a su naturaleza de origen, se han realizado, por parte de la Junta de Cartagena, numerosos estudios e investigaciones, de los cuales se ha establecido que la relación existente

GRUPO	NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
A	- Caimitillo (Colorado)	- Chrysophy cainito
	- Guayacan Pechiche	- Miquartia guianensis
	- Balsamo Negro	- Myroxylon balsamum
	- Teca	- Tectona grandis
B	- Chanul	- Humiriastrum procerum
	- Moral Fino	- Cholorophora tinctoria
	- Pituca	- Clarisia racemosa
	- Eucalipto	- Eucaliptus globulus
C	- Fernansánchez	- Triplaris guayaquilensis
	- Mascarey	- Hieronyma chocoensis
	- Sande	- Brosimum utile

Tabla a2. Clasificación de Especies Madereras Estructurales para el Ecuador. / Fuente: JUNAC(PADT-REPORT): "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 3-25

entre la densidad básica y las resistencias a dichos esfuerzos, se encuentran fuertemente ligadas. Los valores obtenidos están respaldados por las repetidas prácticas de ensayos realizados en laboratorio y por la aplicación de normas técnicas de clasificación visual para elementos estructurales, que se encuentran en el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino.

Dadas las circunstancias de la relación entre densidad y resistencia, el número de especies madereras existentes, en nuestro país, y adecuadas para la construcción es muy grande; por ello, se ha considerado agrupar a la madera en tres grupos estructurales, según su densidad "A", "B" y "C", los cuales responden a alta, mediana y baja densidad, respectivamente.

- "A" densidad básica comprendida entre $0,71$ a $0,90 \text{ g/cm}^3$.
- "B" densidad básica comprendida entre $0,56$ a $0,70 \text{ g/cm}^3$.
- "C" densidad básica comprendida entre $0,40$ a $0,55 \text{ g/cm}^3$.

Como el número de especies de madera para la construcción, en las regiones andinas, es mucho mayor a las que actualmente se conocen, se ha considerado las más importantes y utilizadas en nuestro medio, las que muestra el estudio realizado por el PADT-REFORT para madera estructural en Ecuador. (Tabla a2.)

Para los tres grupos estructurales presentados, por ser objeto de varios estudios y ensayos en laboratorio, el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino ha estandarizado algunos de sus valores para el cálculo o diseño de estructuras como son: flexión, tracción, compresión paralela y perpendicular a la fibra y corte paralelo.

El módulo de Young, un referente para el cálculo estructural, también, ha sido estandarizado para cada grupo estructural. A continuación, se puede ver más claramente, los datos antes mencionados, en las tablas de Esfuerzos admisibles (Tabla a3.) y el Módulo de elasticidad (Tabla a4.), respectivamente, obtenidos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

1.4.4. Estructura y Composición

La madera, un material producto de organismos vivos, y por ende orgánico, quizá posee las cualidades más complejas y variables de entre todos los materiales estructurales, puesto que al derivar de los árboles sus características de resistencia y estructura tienen relación con las condiciones particulares del clima y del suelo, donde se desarrolló.

Su comportamiento depende de su estructura y composición frente a las distintas fuerzas a las que puede quedar sometido cuando se la utiliza como material estructural; es decir, la resistencia de la madera responderá proporcionalmente a su composición orgánica. Estructura y composición, a su vez, están íntimamente ligadas con el proceso de desarrollo y crecimientos de los árboles; es decir, con la configuración

TABLA a3. ESFUERZOS ADMISIBLES

Grupo	Flexión fm		Tracción Paralela ft	
	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²
A	21	210	14.5	145
B	15	150	10.5	105
C	10	100	7.5	75

Grupo	Compresión Paralela fc		Compresión Perpendicular fc_⊥		Corte Paralelo fv	
	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²
A	14.5	145	4.0	40	1.5	15
B	11.0	110	2.8	28	1.2	12
C	8.0	80	1.5	15	0.8	8

* Estos esfuerzos son para madera húmeda y pueden ser usados para madera seca.

Tabla a3. Esfuerzos Admisibles para los tres grupos de especies madereras estructurales. / Fuente: Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). "Construcción con Madera". Quito-Ecuador.

TABLA a4. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Grupo	E min		E promedio	
	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²
A	9500	95.000	13000	130.000
B	7500	75.000	10000	100.000
C	5500	55.000	9000	90.000

* Estos esfuerzos son para madera húmeda y pueden ser usados para madera seca.

Tabla a4. Módulos de Elasticidad para los tres grupos de especies madereras estructurales. / Fuente: Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). "Construcción con Madera". Quito-Ecuador.

celular que cada especie maderera presente.

Con respecto a la composición celular, toda especie se encuentra constituida por cientos de microscópicas unidades celulares cementadas entre sí, que varían en forma y tamaño según el árbol de origen. Las células o traqueidas son de forma aparentemente rectangular, y su tamaño dependerá de si la madera es tardía o temprana.

"Para el caso de la madera tardía, sus células poseen una longitud que no excede en muchos casos al 1.5 mm; mientras que las tempranas pueden llegar a medir hasta 5 mm. Asimismo, en cuanto al tamaño, las células tardías son más pequeñas y concentradas con una dimensión transversal que puede medir hasta 50 micrómetros (milésima de milímetro), y su pared celular presenta espesores que pueden variar entre 1 a 5 micrómetros, factor que depende de las capas de celulosa y lignina que tengan dichas paredes. La celulosa es un polímero lineal que forma una cadena y que constituye el esqueleto de las paredes de las células. La lignina por su parte actúa como un cementante que une los elementos de la estructura de celulosa y rigidiza el conjunto."

La madera está constituida con un 60-70% de celulosa; mientras que la lignina se encuentra en porciones de 15 a 35%. Estos dos componentes son fundamentales al momento de definir las características mecánicas de la madera. Las demás sustancias que puedan existir en la madera definirán características de apariencia como color: olor y sabor, factores que repercutirán en su permeabilidad. Según datos obtenidos, en un análisis típico de la composición de la madera destaca la siguiente composición: carbono 50%, hidrógeno 6%, oxígeno 43%, otros elementos 1%. Además de las células verticales o con orientación paralela al tronco, existen otras células llamadas rayos o células radiales que nacen de la médula y su orientación es perpendicular al tronco; su función consiste en la unión de diferentes partes del tronco para el movimiento transversal de las sustancias alimenticias. (Figura 1.19. y 1.20.)

Las células, que van formando el tronco y más específicamente el duramen, son el producto de la inactivación de las células vivas que se encuentran en la albura del tronco; por lo general, la región del duramen suele distinguirse por su color más oscuro. Las células vivas juegan un papel importante en el desarrollo del árbol, ya que su función es la de transportan los

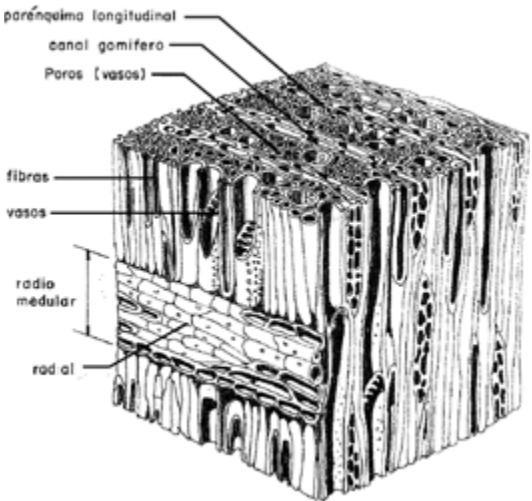


Figura 1.19. Estructura anatómica de las maderas latifoliadas / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT):"Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pág.: 1-11

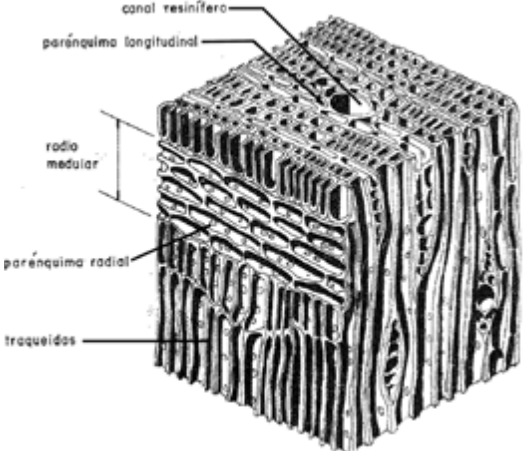


Figura 1.20. Estructura anatómica de las maderas coníferas / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT):"Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pág.: 1-12

nutrientes en forma ascendente: desde la raíz a través del tronco, a cada parte del árbol.

A medida que el árbol crece, como se mencionó, las células activas van perdiendo actividad y son reemplazadas por células jóvenes. Luego éstas pasan a ser parte de la región que brinda estabilidad estructural al árbol, formando la madera corazón del tronco. Desde un punto de vista estructural, la madera proveniente del duramen y albura poseen características similares; sin embargo, la madera

13. JUNAC(PADT-REFORT):"Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982.

del duramen presenta mejores condiciones de preservación, ya que es menos susceptible de agentes que provocan la putrefacción.

1.4.5. Durabilidad

La madera como elemento orgánico se encuentra sometida a una permanente interacción con todos los componentes del medio que la rodean; esto supone que la resistencia natural a ataques de agentes bióticos y abióticos, dependerá de la especie que sea cada madera.

Para el caso de la madera estructural, su durabilidad natural deberá ser adecuada para cada labor que vaya a tener el material, tanto en exteriores como para interiores. Los elementos que reducen la durabilidad y son, además, considerados destructores de la madera, se dividen en dos tipos: agentes no bióticos (no vivos) y agentes bióticos (vivos), que a continuación se describen:

1.4.5.1. Agentes abióticos

Son los que actúan directamente en la madera, causando daños leves; además, ejercen una acción previa de desgaste que facilita la actuación de los agentes abióticos. Exceptuando la exposición prolongada al fuego, entre los agentes bióticos podemos encontrar: la fotodegradación, consecuencia de la radiación ultravioleta de los rayos del sol; la erosión por arrastre físico de partículas, desgastando las superficies; el agua, ya que penetra en los huecos de la madera y satura los conductos tubulares, provocando hinchazón en la misma y facilitando la reproducción de hongos y demás xilófagos; la variación de temperatura, lo cual provoca, que a cambios bruscos de temperatura, aparezcan fendas superficiales que posibilitan la acción de hongos; finalmente, el fuego, aunque no deja de ser un agente abiótico, requiere un tratamiento especial, y la madera aun siendo un material combustible,

presenta un comportamiento único frente a éste, ya que su resistencia es mucho mejor, inclusive que la del acero, que en 15 minutos de iniciado el flagelo puede perder hasta la mitad de su resistencia, debido a su bajo coeficiente de dilatación.

Por su parte, en cambio, la madera se dilata lentamente por su desecación y por la acción protectora de la carbonización superficial. Además, es necesario citar un dato producto de la investigación realizada por el INIA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria), sobre el "Comportamiento de la madera y sus estructuras frente a las acciones del fuego":

*"El fuego ataca de forma relativamente lenta y progresiva a la madera. Por debajo de 275°C solo desprende vapor de agua, gases piroleñosos y CO₂, lo que dificulta el ataque del fuego. Por encima de los 275°C, la reacción es exotérmica y a partir de los 450°C, resta un residuo sólido (carbón de madera) susceptible de quemar y por tanto de causar daños estructurales y el colapso estructural".*¹⁴

1.4.5.2. Agentes bióticos

La variedad de agentes bióticos es más extensa y destructora que los abióticos, tanto para madera viva como para la madera puesta en obra. Si se toma en cuenta únicamente los agentes destructores que afectan a la madera puesta en obra, destacan dos grupos: los hongos e insectos, que se describen a continuación:

Los hongos cromógenos que decoloran las superficies de la madera e impiden su secado rápido.

Los hongos de pudrición se alimentan de los componentes de las paredes celulares, lo que provoca destrucción de la madera, por pérdida de densidad y resistencia.

14. INIA. "Comportamiento al fuego de la madera y sus estructuras". Blog de ingeniería civil. <http://estructuralia.wordpress.com>

Los hongos xilófagos son microorganismos que crean hifas¹⁵, que la atacan y forman una red llamada micelio¹⁶, la cual al introducirse en la madera la degrada en pequeñas porciones.

Los insectos xilófagos constituyen, quizás, el agente más común entre las maderas afectadas por degradación. Los daños ocasionados pueden ir desde pequeñas devastaciones de la madera hasta la destrucción total de la misma. Entre los xilófagos más comunes, en nuestro medio, podemos considerar dos tipos: los insectos que afectan a la madera previo a su uso y los que atacan después de ser puestos en una edificación. Los más dañinos son: comején, hormigas carpinteras y escarabajos lyctus o polillas.

Todos los ataques de los agentes, antes mencionados, están directamente relacionados con las condiciones ambientales en las que se encuentre la madera, sobre todo de humedad. Y, cuando las condiciones han sido favorables al material, los ataques no han causado mayor daño y así la madera se ha conservado por largo tiempo.

Entonces, la madera estructural deberá ser tratada para su preservación; y de esta forma podrá garantizar su durabilidad. Además, junto a cualquier método de preservaciones, que se piense utilizar, se deberá procurar la eliminación de cualquier grado de humedad, ya que este factor es el principal causante para que los agentes destructores permanezcan activos.

Así mismo, los agentes -bióticos o abióticos- no atacan con la misma intensidad a todas las especies de madera, ya que todo depende de su estructura interior; por ejemplo, la madera de albura es más rica en nutrientes y, por tal motivo, más blanda haciéndola atractiva a los insectos xilófagos, ya que éstos se alimentan de ella. Por el contrario, la madera de duramen es mucho más dura y difícil de penetrar, por lo que sólo algunos agentes son capaces de alterar su estructura.

Existe una gran variedad de métodos para

garantizar o aumentar la vida útil de una madera, puesta en obra. El método más importante a considerar siempre será la prevención; es decir, elegir la madera adecuada, según el uso que se la vaya a dar, y cuidar el diseño de los detalles constructivos para mantener un ambiente favorable para su conservación.

1.4.6. Factores que alteran el comportamiento estructural de la madera

1.4.6.1. Defectos de crecimiento

Los defectos de la madera dependen de las anomalías adquiridas por el árbol durante su crecimiento, los cuales modifican el aspecto del material y su comportamiento estructural. Los principales defectos de crecimiento son: nudos, inclinaciones del grano, fallas de compresión, perforaciones y medula excéntricas.

Los nudos son discontinuidades en la parte leñosa del tronco, producidas por el nacimiento y posterior desarrollo de las ramas, y constituyen el defecto más común e inevitable de la madera. Estos alteran su aspecto exterior, la homogeneidad de su estructura y, en ocasiones, la integridad de la misma. La presencia de nudos en la madera alterará



Figura 1.21. Nudo Sano en Madera Aserrada / Fuente: Daniel Enríquez M.

15. Las hifas, son elementos filamentosos cilíndricos característicos de la mayoría de los hongos.

16. El micelio, es la masa de hifas que constituye el cuerpo vegetativo de un hongo.

el comportamiento estructural, según la ubicación que estos tengan con respecto a la distribución de los esfuerzos. Por ejemplo, en zonas en tracción su influencia es muy importante, no así en zonas de compresión, ya que los nudos producen inclinaciones en la dirección del grano. (Figura 1.21.)

Las perforaciones no son más que nudos muertos que generan discontinuidades en la pieza al desprenderse de la madera por su nula adherencia (Figura 1.22.). Es importante considerar los diámetros admisibles, según la norma establecida para su uso estructural, puesto que este defecto puede debilitar la estructura o una parte de la misma. Y bajo ninguna condición, se deberá usar piezas con perforaciones y similares a esfuerzos de tracción; en caso de encontrar esta situación en algún elemento, lo recomendable será realizar una limpieza del agujero y dependiendo de sus dimensiones, proceder a sellarlo para impedir la invasión de agentes destructivos o en su defecto realizar un refuerzo de carácter puntual para la sección afectada.

La inclinación del grano con respecto a la dirección longitudinal del tronco presenta mayor alteración en el comportamiento de elementos estructurales y puede tener dos causantes principales: una inclinación que sigue la forma del espiral, según la dirección de las fibras, o por trozas mal aplicadas al momento de su aserrada. La resistencia de la madera estructural se verá afectada por presentar el grano inclinado, para ello el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino recomienda que la estimación de su resistencia se la podrá calcular mediante la fórmula de Hankinson¹⁷, la cual está en función de la resistencia paralela, resistencia perpendicular y en función del ángulo de inclinación del grano. A continuación se detalla la fórmula 1.1. para el cálculo de resistencia de elementos de madera con grano inclinado:

La médula excéntrica es un desplazamiento del corazón o médula del árbol, a consecuencia del crecimiento y desarrollo en condiciones adversas, tales como: la excesiva pendiente del terreno, la



Figura 1.22. Nudo Muerto o perforación en Madera Aserrada / Fuente: Defectos de la Madera. http://bricolaje.facilísimo.com/foros/restauracion/preparar-bancos-de-madera-para-el-exterior_775797_2.html



Figura 1.23. Médula Excéntrica / Fuente: "Cuidado: Estación en Curva". <http://warningcurvestation.blogspot.com/2012/04/los-anillos-de-los-arboles-ayudan.html>

$$N = \frac{P Q}{P \sin^n \theta + Q \cos^n \theta} \quad \text{fórmula (1.1.)}$$

En la tabla 5. se presentan valores de n y Q/P , que han sido encontrados experimentalmente según el PADT-REFORT.

Propiedades	n	Q/P
Tensión	1.5 - 2	0.04 - 0.07
Compresión	2 - 2.5	0.03 - 0.04
Flexión	1.5 - 2	0.04 - 0.10
Módulo de Elasticidad	2	0.04 - 0.12

Tabla a5. Valores Experimentales para la Fórmula de Hankinson. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT): "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 1-27

17. La ecuación de Hankinson provee una forma de cuantificar la diferencia en resistencia entre las diferentes direcciones y también se puede utilizar para calcular la resistencia en la fibra en función del ángulo del grano de la madera.

presencia de fuertes vientos en un solo sentido, luz intensa en un solo lado, etc. Este fenómeno obliga a que el tronco leñoso forme anillos más grandes, a un lado, y angostos al lado opuesto, produciendo tensiones internas, las cuales serán contraproducentes al momento del secado, agrietando y deformando a la madera. (figura 1.23.)

Otro término que suele familiarizarse con la médula excéntrica es la madera de reacción, pues ésta se forma a partir de las condiciones antes mencionadas; es decir, el tronco es el producto de un crecimiento forzado y este a su vez produce tensiones internas permanentes. Este tipo de madera, generalmente, presenta un comportamiento mecánico muy diferente a la madera en condiciones normales, y puede alterar la función estructural de una pieza, sensiblemente.

1.4.6.2. Influencia del contenido de humedad

El contenido de humedad es el principal factor para que la resistencia de la madera varíe de especie a especie, ya que todas las propiedades mecánicas de la madera están correlacionados con la presencia de humedad. En la figura 1.24. presenta una curva típica de variación de resistencia con respecto al contenido de humedad para probetas pequeñas y libres de anomalías. En esta se evidencia cómo la madera pierde resistencia cuando aumenta el contenido de humedad y, a su vez, la resistencia se mantiene constante, si el contenido de humedad supera el punto de saturación de las fibras.

Es necesario detallar que la madera en estado verde presenta un porcentaje de humedad que bordea el 30%, y la madera seca al aire libre está en el 12%. Entonces con esta premisa, se puede decir que el contenido de humedad tiene influencia sobre la durabilidad de la madera, puesto que ambas están directamente ligadas; es decir, el material puede llegar a tener un alto nivel de resistencia bajo condiciones buenas sin

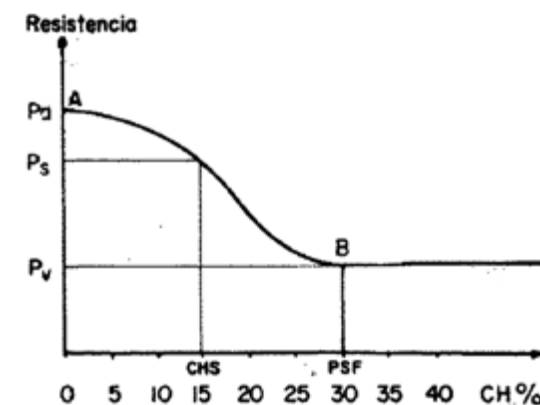


Figura 1.24. Influencia del contenido de humedad con respecto a la resistencia de la madera / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT): "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 1-29

en donde :

P = valor de la propiedad a un CH dado

P_s = valor de la propiedad a un CHs

P_v = valor de la propiedad en estado verde

CH = contenido de humedad

CHs= contenido de humedad en estado seco

PSF = punto de saturación de las fibras

humedad, y ,así mismo, puede sufrir un acelerado deterioro en condiciones adversas. En general, la mala respuesta de la madera está relacionada con el aumento del grado de humedad. Indudablemente, la resistencia que pueda presentar la madera frente a la humedad dependerá de la especie a la que pertenezca la muestra, o simplemente de la tala directa del tronco, bien de duramen, bien de albura.

A continuación, se expone un sistema de clasificación de riesgo biológico, según la situación de la madera en servicio. Es decir, se detalla las clases de riesgo que puede presentar una estructura de madera frente a un porcentaje de humedad. La asignación a cada clase se las realiza en función de sus diseños constructivos con la intención de brindar información para un adecuado manejo del contenido de humedad. (Figura 1.25.)

Clase Riesgo 1

A este grupo pertenecen las piezas de madera que están protegidas bajo cubierta, pero

expuestas al aire libre por sus extremos y por su parte inferior. Poseen un C.H. inferior al 20%. Con este porcentaje, dependiendo de la especie en uso, no existirá un riesgo de hongos; sin embargo, puede ser atacada por insectos.

Prevención:

Basta con aplicar preservantes mediante impregnación con brocha, directamente, y procurar sellar todos los orificios o aberturas que puedan presentar los elementos. El preservante que se utilice deberá tener un alto grado de toxicidad, penetrabilidad, no corrosivo y, sobretodo, no combustible.

Clase Riesgo 2

Dentro de este grupo están las piezas protegidas o bajo cubierta, las cuales pueden alcanzar un C.H. superior al 20% en esporádicos momentos. Naturalmente en este caso aumentará el riesgo de ataque de hongos. Por lo general, este caso suele darse en lugares con ambientes húmedos como piscinas cubiertas.

Prevención:

El procedimiento a seguir, lógicamente será el mismo que para las de clase Riesgo 1, pero ahora se deberá realizar un plan de mantenimiento para que la aplicación del preservante se realice periódicamente, cada 10 meses como mínimo.

Clase riesgo 3

Son todas las piezas de madera que se encuentran al exterior y con un C.H. superior al 20%, pero sin contacto directo al suelo. Sus riesgos por ataques de hongos y xilófagos son más altos que los dos grupos anteriores. Son piezas que se encuentran en portales o pérgolas las cuales descansan sobre basamentos.

Prevención:

Hoy en día, la disponibilidad de perseverantes es muy accesible, y la protección de los elementos de madera se facilita gracias a la amplia gama que existe. Para un adecuado cuidado de estas piezas es recomendable realizar una preservación mediante

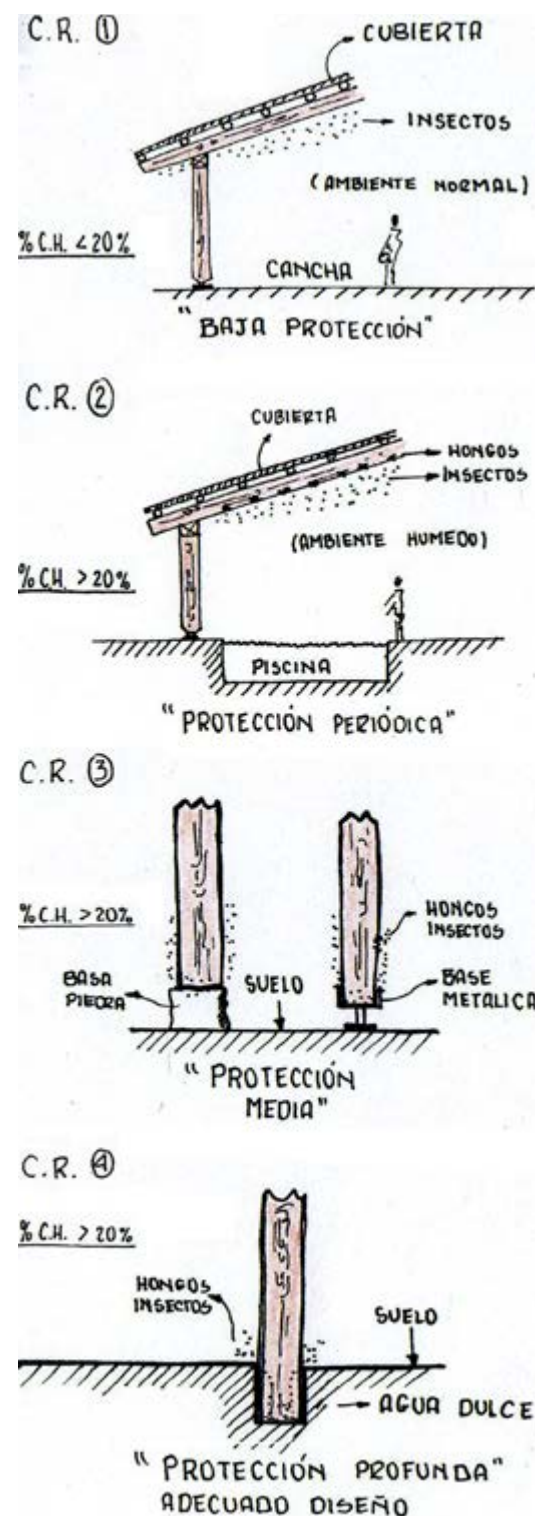


Figura 1.25. Clases de Riesgo por presencia de Humedad/ Fuente: Daniel Enríquez M.

inmersión. Este proceso, por lo general, se lo emplea en las estructuras que van a usarse a la intemperie y consiste en sumergir al elemento en grandes recipientes de perseverantes, durante algunas horas. Lo recomendable para una inmersión breve será de 20 a 30 minutos o una inmersión prolongada de 3 a 5 días, todo dependerá del tiempo que se disponga en el proceso de construcción.

Clase Riesgo 4

Cuando la pieza de madera toma contacto directo con el piso o con agua dulce, superando el C.H. de 20%, el riesgo de ataques se hace más evidente y existe el riesgo de producirse podredumbres. Los ejemplos más comunes de este caso, son todos los postes hincados al suelo, cualquiera que sea su uso estructural.

Prevención:

La preservación de la madera, indudablemente, estará presente en todos los casos de riesgo analizados; sin embargo, para este caso a más de realizar procesos de preservación, es fundamental que el diseño constructivo de la estructura sea el principal protector de la madera. Otro sistema de protección para la madera es aprovechar las propiedades higroscópicas que posee el material y proponer trabajar con el C.H. interno; es decir, utilizar madera con un contenido de humedad equivalente al contenido en el ambiente donde va a trabajar; esto equilibrará la pérdida y aumento de humedad interna.

Clase Riesgo 5

A este grupo pertenecen todas las piezas de madera que están en contacto con agua salada. Esto aumenta el riesgo de ser atacado por xilófagos de mar y así mismo aumenta las posibilidades de podredumbre en el material.

Prevención:

La presente investigación no contempla madera bajo las condiciones mencionadas, sin embargo, existen perseverantes para madera que trabajará bajo estas condiciones. Por lo demás, no podemos

realizar recomendaciones, debido a que no se encuentra dentro de nuestros objetivos.

1.4.6.3. Influencia de la densidad

La densidad de la madera expresa la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan. Como la madera es un material poroso, debe considerarse, a la densidad de la madera, el volumen interno de espacios vacíos existentes. Consecuentemente, la densidad mide la cantidad de materia sólida que posee la madera, lo cual influirá directamente en la resistencia mecánica de la misma, ya que las cantidades serán proporcionales.

Respecto a la madera frente a situaciones de ignición, la densidad también juega un papel importante, ya que cuanto más elevada sea la densidad de la madera, la capacidad de combustión será menor y más lenta aunque podría existir variaciones de especie a especie.

Además, la densidad de la madera se puede emplear como elemento de juicio, para estimar la cantidad de material leñoso de una especie y como estimador de trabajabilidad: cortar, cepillar, moldurar, etc.

1.4.6.4. Influencia de la temperatura

Quizá la temperatura sea el factor que más altera el comportamiento estructural de la madera, puesto que las propiedades mecánicas de la misma disminuyen cuando la temperatura aumenta. Los efectos producidos serán inmediatos, ya que si la madera es expuesta a altas temperaturas por un tiempo prolongado, se producirán cambios irreversibles en sus propiedades.

Respecto al fuego propiamente dicho, en condiciones normales como ya se mencionó, el contenido de humedad de la madera seca al aire libre, oscila entre 8 y 15 %; lo que significa que por cada tonelada de material deberán evaporarse de 80 a 150L de agua, antes de entrar en ignición. Dicho proceso de combustión depende de la velocidad con que aumenta la temperatura. Si ésta es muy rápida, el desprendimiento de gases es mayor que la formación de carbón, por lo que los gases se inflaman y se produce la combustión con llama y si por el contrario, el aumento de temperatura es lento, la producción de carbón es mayor que el desprendimiento de gases y el carbón formado arde sin llama en presencia de O₂ (reacción incandescente).

En relación a la presencia de llama, la madera necesita una temperatura, en su superficie, superior a 400 °C para comenzar a arder en un lapso de tiempo corto o medio; e incluso con la presencia de llama, se necesita una temperatura superficial de unos 300 °C durante un cierto tiempo, antes de que se produzca la ignición. Por lo tanto, la madera reúne suficientes características favorables por ejemplo, su gran capacidad de aislamiento térmico, lo que supone una ventaja importante en caso de incendio.

“En coeficiente de conductividad térmica de las coníferas en la dirección perpendicular a la fibra, varía aproximadamente de 0.09 a 0.12 kcal/m.h.°C₁₈ (en las maderas muy livianas se sitúa en 0.005 y en las pesadas puede llegar a 0.30).”¹⁹

Con respecto a la capa carbonizada, es seis veces más aislante que la propia madera. Esto permite que el interior de la pieza se mantenga frío y con sus propiedades físicas y mecánicas inalteradas. La pérdida de la capacidad portante de la estructura se debe a una simple reducción de la sección, más que a una pérdida de resistencia del material. Un claro ejemplo de lo antes mencionado lo podemos encontrar en la estructura de la iglesia de Todos Santos (figura 1.26.), la cual sufrió un grave daño por consecuencia de dos incendios, el primero



Figura 1.26. Columna de madera, después del flagelo del 2005. Iglesia Todos Santos, Cuenca-Ecuador / Fuente: Daniel Enríquez M.

en Octubre del 2005 y el otro en Abril del 2007.

Dicho flagelo afectó a las columnas principales de la nave central, pese a ello, la estructura todavía se conserva en el interior del templo. Si bien, la madera sin ignifugar tiene mala reacción al fuego, su resistencia es alta, pudiendo contener el incendio y mantener estable la estructura del edificio, mientras se desaloja. En efecto, la carbonización exterior de la madera y su baja conductibilidad térmica, no permite arder en la parte interna de las piezas estructurales de secciones grandes; *“la velocidad de penetración del fuego en la madera es de 0.67 mm/minuto en las coníferas y de 0.54mm /minuto en las frondosas, despreciando los 3mm primeros de formación de carbón”¹⁹*.

Así mismo, la pérdida de resistencia originada por la disminución de sección, al quedar la superficie carbonizada, es en parte compensada por el hecho de que al deshidratarse la madera por

18. kcal/m.h.°C, es la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área.

19. E. Zanni. “Patología de la Madera”: degradación y rehabilitación de estructuras de madera. Argentina-Córdoba:editorial bruja, 2004.

motivo del aumento de temperatura, aumenta proporcionalmente su resistencia a la flexión y a la compresión. Por esta razón, las estructuras de madera son consideradas más confiables durante un incendio que las de acero, ya que éstas pueden derrumbarse total e inesperadamente.

Para concluir con este factor de degradación, resta mencionar, simplemente, las consecuencias que por lo general suceden luego de un incendio: generalmente las tareas de reconstrucción y recuperación suelen demorar un tiempo -meses e incluso años- en comenzar tal proceso. Durante todo este tiempo, la madera sobreviviente ha quedado absolutamente saturada, a raíz del agua vertida, durante la extinción del fuego. A esto hay que considerar que muchas veces dicha estructura puede estar a la intemperie, a causa del derrumbe o desaparición de la cubierta, por lo que aumenta aún más la absorción de agua. Todo esto puede acarrear la presencia de hongos de pudrición u otro tipo de agresión.

1.4.6.5. Influencia por duración de carga

Un elemento de madera al ser cargado por primera vez, por un lapso no prolongado, se deformará elásticamente, pero si dicha carga se mantiene, se presenta una deformación adicional. Este hecho es conocido como flujo plástico, el cual dependerá del tiempo en que se encuentre actuando la carga sobre el material. Para el caso de algunas especies de maderas duras estructurales, el incremento de deformación puede alcanzar, en promedio, dos a tres veces la deformación inicial y su resistencia cuando la carga es permanente puede estar en un 60% de las cargas de duración corta.

1.4.7. Consumo de Energía

La madera, a pesar de los inconvenientes que pueda presentar, es sin duda, un material de gran interés e importancia por su versatilidad estructural, su atractivo estético, su bajo

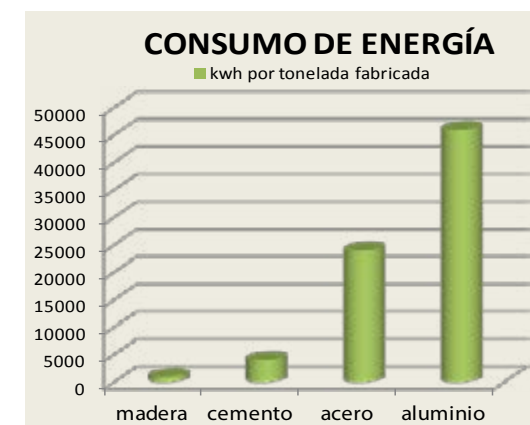


Figura 1.27. Gráfico de barras para el consumo de energía según el material / Fuente: Daniel Enríquez M.

costo y, sobre todo, su principal característica: de material de bajo consumo de energéticos, al momento de producir elementos estructurales de un elemento natural, a mejorar su rendimiento con respecto al consumo de energía para la obtención de elementos estructurales.

Por ejemplo, al momento de procesar una cantidad determinada de elemento estructural, en condiciones normales de trabajabilidad, el consumo de energía necesario para su proceso dependerá de cada material, siendo la unidad un indicador del gasto energético (1-4-24-126), sin embargo, *podemos considerar que cada unidad es igual a un gasto de 1000 kwh por cada tonelada de material fabricado²⁰*, según el gráfico 1.27. La madera es el material que menos energía consume en su fabricación, al contrario del hormigón que puede llegar a ser en proporción, hasta 4 veces mayor en gastos energéticos;

- En madera, será 1.
- En Hormigón Armado, será 4.
- En Acero, será 24.
- En Aluminio, será 126.

Los datos expuestos arriba, nos dan una clara visión de que la madera, a diferencia de los demás

20. Arriaga, Francisco. “Eficacia estructural y energética de la madera como material de la construcción”. AITIM(Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera). Madrid-España.

materiales utilizados en la construcción, posee un comportamiento medioambiental único, ya que es un elemento que demanda un bajo consumo de energía y, por ende, será biodegradable, reciclable y además su producción y eliminación no es tóxica. Todas estas cualidades lo convierten en un recurso renovable y favorable a la preservación del medio ambiente, si consideramos que también es un fijador de CO₂ en su etapa de crecimiento.

En cuanto a costos de producción global, conviene tener en cuenta que éstos no sólo son monetarios. Para la economía de un material, hoy en día, se considera otros factores como: los medioambientales, calidad de vida de las personas, y otros tangibles e intangibles. Como ya se ha mencionado, el uso de la madera como material para la construcción, posee un gran rendimiento medioambiental y además una ventaja única sobre cualquier otro material al momento de su producción. En resumen, el aprovechamiento racional de la madera proporciona beneficios sociales y medioambientales, cosa que no ocurre con los demás materiales para la construcción.

1.4.8. Madera aserrada estructural

El término de madera aserrada estructural hace referencia a aquella madera clasificada, especialmente, para ser usada en el campo estructural, cuyas especies y origen tienen sus propiedades mecánicas determinadas por los ensayos y pruebas pertinentes, según exige la norma vigente. Es la que se obtiene de cortar los grandes troncos longitudinalmente. Este proceso puede realizarse manual o mecánicamente. (figura 1.28.) Las primeras referencias que se tiene de la madera aserrada a nivel mundial se remontan a las reglas de clasificación decorativa escandinava, realizadas en 1754. Pero sería hasta 1880 cuando se implantan las primeras reglas de clasificación para madera aserrada para al norte del continente americano.

La mayor parte de madera aserrada está

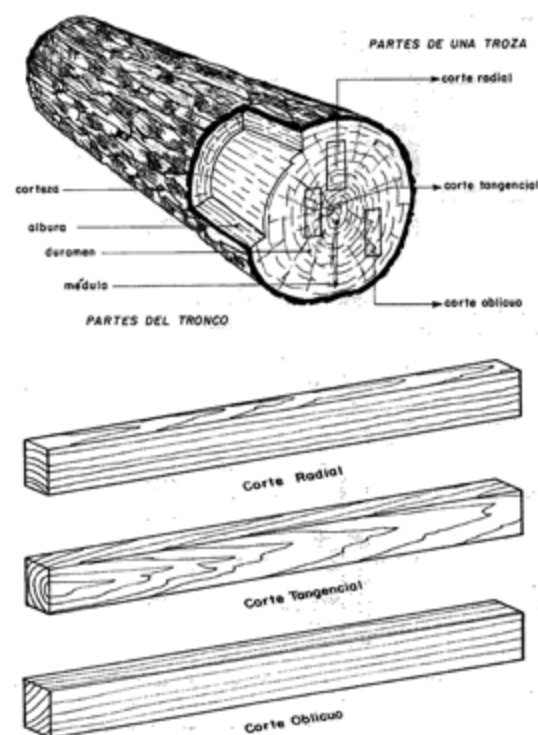


Figura 1.28. Tipo de cortes según su orientación en el tronco. Madera Aserrada / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 2-3

destinada a obras de construcción, por lo cual su análisis debe ser riguroso en el sentido del tipo de material a usarse para cada situación que se presente en el momento de utilizarlo.

1.4.8.1. Elección de especie

La elección de especies de madera aserrada estructural dependerá de muchos factores que se describen a continuación, pero, será responsabilidad del profesional hacer que la especie de madera seleccionada cumpla con la mayoría de los requerimientos para lograr dos puntos importantes en la construcción: la seguridad de su estructura y el confort de la edificación; todo lo cual será consecuente con los factores descritos:

- **Durabilidad requerida.**
- **Disponibilidad en el mercado**

- **Resistencia y rigidez requerida**
- **Estética y congruencia con otros materiales**
- **Aspectos medioambientales**
- **Valor económico**

Otros factores tecnológicos como la estabilidad dimensional, secado y trabajabilidad son importantes y deberían ser considerados al momento de seleccionar especies. Todo dependerá de la fusión que vaya a tener el material, para una adecuada elección.

1.4.8.2. Dimensiones

Las dimensiones de piezas de madera, según normas técnicas, resultan de considerar, en orden: el grueso por ancho y por la longitud, o de manera técnica, b x h x L. situando a las dimensiones para madera aserrada en un rango relativo de secciones máximas de 150 x 300 mm., con longitudes máximas que oscilan entre 7 y 8 metros.

Las clases resistentes de madera están dispuestas según normas de cada país, en el caso del Ecuador, las dimensiones están sujetas a la NEC-11, que está basada en el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino. Cabe recordar que, la construcción de madera en el país no ha sido desarrollada como en otros países; por ello, muchas de las normas de dimensiones no han sabido ser utilizadas y, por el contrario, se ha utilizado medidas según trozas obtenidas y bajo ninguna revisión técnica; inclusive, muchas de ellas realizadas de manera empírica.

Para facilitar el uso de elementos de madera aserrada, el PADT-REFORT (Proyectos Andinos de Desarrollo Tecnológico en el Área de Recurso Forestales Tropicales) ha proporcionado una estandarización de medidas para dichas piezas, las cuales están fundamentadas en factores como: la eficiencia de las formas estructurales, adaptabilidad al mercado actual y la facilidad para obtener piezas a partir de otras de mayor dimensión.

En la tabla 6a., se detallan las dimensiones preferenciales y el uso más frecuente en la

Dimensiones b x h (centímetros)	Uso frecuente
4 x 4	pie derecho
4 x 6.5	pie derecho, viguetas
4 x 9	Viguetas, vigas
4 x 14	Viguetas, vigas
4 x 16.5	Viguetas, vigas
4 x 19	Viguetas, vigas
4 x 24	Columnas
6.5 x 6.5	Columnas-Vigas
6.5 x 9	Columnas
9 x 9	Columnas-Vigas
9 x 14	Columnas
9 x 19	Vigas
9 x 24	Vigas
9 x 29	Vigas
14 x 14	Columnas
14 x 19	Vigas-Columnas
14 x 24	Vigas
14 x 29	Vigas

Tabla 6a. Secciones preferenciales para madera aserrada./ Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 3-4

construcción. Las dimensiones propuestas en la tabla 6a. son las recomendadas para ayudar a que los procesos constructivos logren mayor eficacia y economía. Sin embargo, como la madera es un material altamente cambiante en sus dimensiones, el proyectista debe considerar que el material puede contraerse o expandirse.

Para evitar errores, en las dimensiones de las piezas, por cualquier factor que las altere es válido aplicar las siguientes tolerancias:

- **En secciones transversales:**
 - a) -1mm, +2mm en dimensiones menores a 150mm.
 - b) -2mm, + 4mm en dimensiones mayores a 150mm.

- En longitudes:

- a) $-1\text{mm}, +3\text{mm}$ en todas las piezas.

1.4.8.3. Clasificación visual por defectos

La clasificación visual es el método más extenso para determinar o catalogar a una madera, según sus condiciones naturales, tales como: nudos, desviación de la fibra, fendas, acebolladuras, anillos de crecimiento, gemas, deformaciones, etc., a fin de distinguir singularidades y defectos de las piezas, para luego obtener elementos de madera con características mínimas garantizadas según las tolerancias impuestas por la NEC-11.

La clasificación de tipo visual es realizada por personal humano calificado, que se rige por las normas vigentes, para aplicar a las cuatro caras de la pieza y subdividir al elemento (Figura 1.29.) y para clasificar las zonas de riesgo se puede considerar los siguientes defectos:

- Tamaño y posición de nudos

- Rapidez de crecimiento, considerando el tamaño de los anillos

- Tamaño de Grietas y Rajaduras

- Inclínación de la fibra

- Tamaño de las gemas o cantos muertos

1.4.8.3.1. Tamaño y posición de nudos

Los nudos es el defecto más común e inevitable que se presenta en la madera, el cual altera su aspecto, homogeneidad y, ocasionalmente, puede variar sus capacidades portantes. Su origen es causado por la inserción y desarrollo de las ramas, cuyas características y propiedades son diferentes a las de la madera circundante. Los nudos presentes en la madera pueden manifestarse de diferentes maneras; en algunos casos perjudicial para la estructura o, por el contrario, pueden ser inofensivos. Se considera 4 tipos de nudos que pueden estar presentes en la madera estructural (Figura 1.30.):

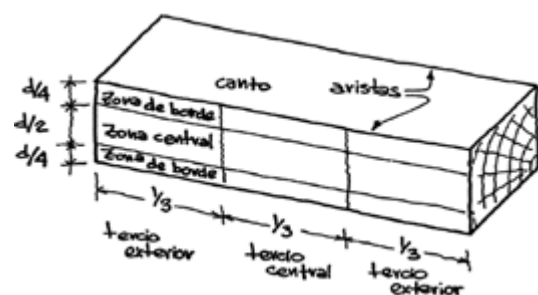


Figura 1.29. División de un elemento de Madera en Zonas Principales. Madera Aserrada / Fuente: F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echique. "Estructuras de Madera", editorial Limusa. México D.F., 1983. pag.157

a. Nudo sano

Es el resto de la rama entrecruzada con la madera y que no se aflojará durante el proceso del secado, conocido como nudo adherente y, además, no presenta deterioro ni pudrición. **Tolerancia:** Según normas establecidas, se permite nudos con diámetros de $\frac{1}{4}$ del ancho de la cara, con un máximo de 4cm y una distancia entre nudos, no menor a la de 1 metro.

b. Nudo hueco

Como su nombre lo indica, son agujeros dejados por nudos ya muertos, los cuales se desprenden de las piezas de madera por no presentar adhesión alguna, después del proceso de secado. En caso de que el nudo continúe en el elemento, lo recomendable será retirarlo, ya que éste saldrá sin ningún problema. **Tolerancia:** Según normas establecidas, se permite huecos con diámetros máximos de $\frac{1}{8}$ del ancho de la cara, con un máximo de 2cm y evitar en cantos sometidos a tracción.

c. Nudo enfermo

Es el más perjudicial para la madera, en cualquier condición de uso que ésta tenga, puesto que éste inicia un proceso de putrefacción para la madera. **Tolerancia:** Se debe remover el nudo y aplicar los mismos criterios que se lo hizo para el nudo hueco, ya que al remover el mismo, presentará similares condiciones.

d. Nudos arracimados

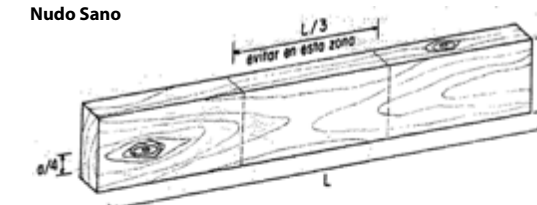
Son un conjunto de nudos agrupados que van desde dos o más unidades; encontrarlos no es muy común en la madera; sin embargo, no se recomienda el uso de este elemento defectuoso en la construcción, ya que sus fibras son desviadas y sus propiedades mecánicas pueden variar notoriamente. **Tolerancia:** No se admite elementos con tal defecto para un uso estructural.

1.4.8.3.2. Rapidez de crecimiento, considerando el tamaño de los anillos

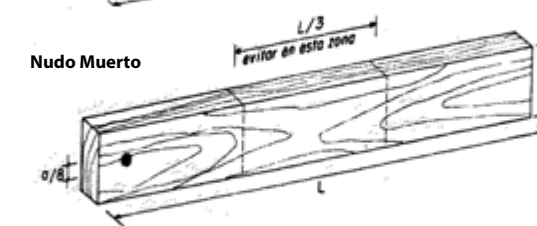
Los anillos de crecimiento son capas de tejido leñoso que se superponen, sucesivamente, en el tronco del árbol. Se inician en la médula del árbol y cada año surgen nuevas capas, definiendo al tronco con dos tipos de tejido leñoso. La madera más antigua es la que comúnmente se la conoce como Duramen, y la más temprana como la Albura. (Figura 1.31.) Por lo tanto, el crecimiento de los árboles dependerá del desarrollo de las capas de tejido leñoso a lo largo de la vida del árbol, las cuales también están íntimamente relacionadas con la resistencia que la madera presente estructuralmente.

La rapidez con lo que crece un árbol se ve reflejada en la forma y tamaño que ha adquirido cada anillo de crecimiento a lo largo del período de estrés fisiológico²¹. Consecuentemente con el desarrollo del árbol, se pueden tener varias posibilidades de forma y tamaño de un anillo de crecimiento, esto dependerá de las condiciones climáticas a las que haya estado sometido el árbol en sus etapas de crecimiento. Por lo tanto, si la resistencia de la madera está dada principalmente por la especie a la que pertenece, dependerá también de la regularidad que tengan sus anillos de crecimiento; es decir, una madera en condiciones excelentes y libre de defectos -difícil de encontrarla en el medio- presentará 16 anillos en 5cm. de tronco. Esto quiere decir que, mientras exista mayor

Nudo Sano



Nudo Muerto



Nudos Arracimados

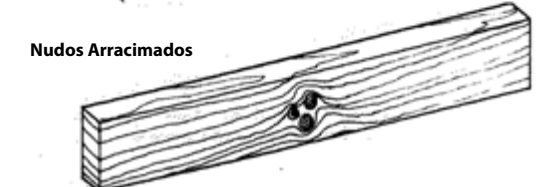


Figura 1.30. Tipos de Nudos presentes en la Madera / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT): "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 3-22

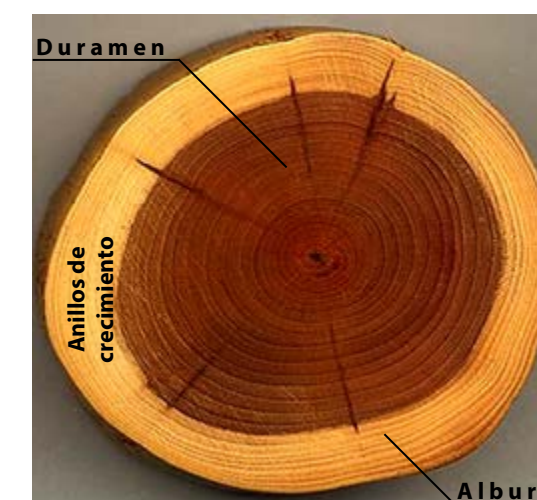


Figura 1.31. Corte transversal de un tronco de tejo común, en el que se pueden ver muy bien 27 anillos de crecimientos. / Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Albura>

número de anillos en una determinada distancia radial, mayor será la compactación y, obviamente, presentará mejores condiciones. Sin embargo, la madera en condiciones naturales puede presentar varios defectos en su período de crecimiento; por tal motivo, se puede encontrar en algunos casos especies con 8 anillos en 5cm de tronco, que

21. Estrés fisiológico: es un efecto desfavorable de los factores ambientales (estresantes) en las funciones fisiológicas de un organismo.

en contraposición, al ejemplo antes expuesto, posee un tejido leñoso menos compacto.

1.4.8.3.3. Tamaño de grietas y rajaduras

Durante el período de crecimiento del árbol, en la mayoría de casos, se van creando estados de esfuerzo interno que ocasionan grietas y rajaduras. Para un mejor entendimiento debemos definir los dos conceptos, antes mencionados, ya que éstos pueden ser confundidos entre sí.

Grieta.- Hendidura alargada y poco profunda que surge de forma natural en alguna superficie.
Rajadura.- abertura de tamaño considerable.

En correspondencia con las definiciones, se considera la grieta como una separación de elementos constitutivos de la madera, cuya profundidad es despreciable y no atraviesa el canto de una pieza: profundidad que oscila alrededor de 2 y 3 mm. y 1 mm. de separación; mientras que la rajadura es la separación entre fibras de la madera, que afecta totalmente el espesor del elemento. También pueden presentarse contra la dirección de las mismas, pudiendo ser tangenciales, radiales u oblicuas.

Con respecto a las tolerancias admisibles para la madera aserrada, se permite grietas moderadas, y la suma de sus profundidades, medidas desde ambos lados, no debe exceder el $\frac{1}{4}$ del espesor de la pieza. (Figura 1.32.)

Mientras tanto las rajaduras, por su parte, se permiten sólo en uno de los extremos de la pieza y, además, que tengan una longitud no mayor a la cara de la pieza. (Figura 1.33.)

1.4.8.3.4. Inclinación de la fibra

La orientación de las fibras de la madera, con frecuencia, suelen ser paralelas a la troza que se aplica al momento de obtener las piezas. Pero debemos recordar que, la madera proviene de un organismo vivo y, por tal razón, puede



Figura 1.32. Grietas en Madera Aserrada de Pino / Fuente: Maderas Planes. Blog: http://www.maderasplanes.com/productos/cubiertas_tejado/vigas_madera/macizas.html

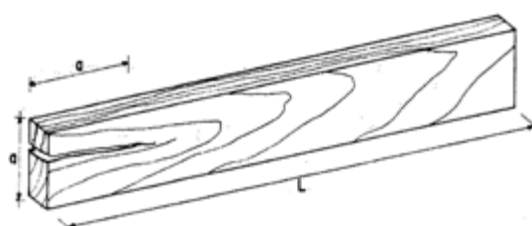


Figura 1.33. Rajadura en Madera Aserrada / Fuente: JUNAC(PADT-REPORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 3-24

presentar variaciones en dichas orientaciones. La inclinación de la fibra es el caso más común que los elementos de madera poseen, ya que sus fibras manifiestan una desviación angular con respecto al eje longitudinal de la pieza. Este fenómeno puede ser causado por varios motivos, sean éstos por consecuencia del período de crecimiento del árbol o por un mal corte aplicado al momento de aserrar.

La inclinación de la fibra, por lo general, se presenta a lo largo de la pieza por malos procesos de aserrado. Esto se debe a que las piezas no son cortadas en forma paralela al eje que definen las fibras. Para detectar la inclinación del grano, se debe identificar la línea de la fibra respecto al borde del elemento, luego se traza el triángulo que dibujan las dos líneas y finalmente se mide la relación entre un centímetro de desviación, tal como se detalla en la figura 1.34.

La desviación puede alterar considerablemente el comportamiento mecánico del elemento de madera, debido a sus características

anisótropas. Por ejemplo, una desviación de $\frac{1}{20}$ puede reducir el módulo de ruptura en un 7% y el módulo de elasticidad en un 4%. La resistencia puede ser también medida con la ya mencionada fórmula de Hankinson; sin embargo, la relación de desviación es la más adecuada para el efecto de la Clasificación Visual por Defectos.

1.4.8.3.5. Tamaño de las gemas o cantos muertos

El término gema no debe ser confundido en el campo de la madera con el de canto muerto, ya que una gema es el producto de una mala troza, pues ésta aparece cuando la pieza es cortada de manera que una de sus aristas queda sin arista, debido al defecto propio del tronco; es decir, el aserrado alcanzó la superficie del tronco y es notoria la ausencia de madera en dicha parte surgiendo una arista redondeada. En la mayoría de casos, la presencia de la gema no altera las capacidades mecánicas de la madera y, dependiendo del tamaño del defecto, se puede hacer uso de la misma. El defecto no supone una rotura en la continuidad de las fibras, y su falta de material, en esa zona, sólo se considera como una modificación de su geometría en sección. Si se ejemplifica sus efectos, una gema, que ocupa el $\frac{1}{3}$ de la cara o canto de la pieza, producirá una reducción de su resistencia a flexión entre un 40% y el 20%, cuando existen en las cuatro aristas y cuando están sólo en las dos aristas laterales, respectivamente.

Con similar apariencia pero diferentes causas, el defecto por arista faltante o canto muerto se distingue por la falta de madera en una o más aristas de una pieza, pero a diferencia de la gema, ésta puede ser producida por otros factores, tales como: rajaduras, bolsas de resina, médula, etc. Las piezas de madera con este defecto son admisibles para uso estructural cuando se encuentra sólo en una arista del elemento y las dimensiones de la cara y canto resultantes deben ser los $\frac{3}{4}$ de dimensión total de la respectiva sección (Figura 1.35.); es decir, si el canto de un

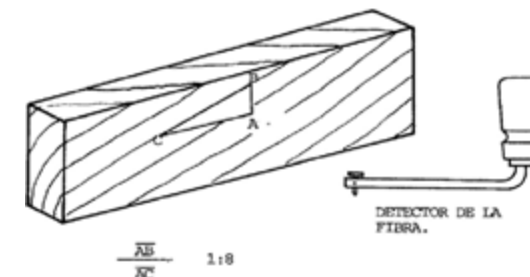


Figura 1.34. Medición de la inclinación del grano usando el detector. Madera Aserrada / Fuente: M. Chan Martín. "Los Defectos de la Madera Aserrada". Ingeniería Revista Académica, enero-abril, 2002. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida-México.

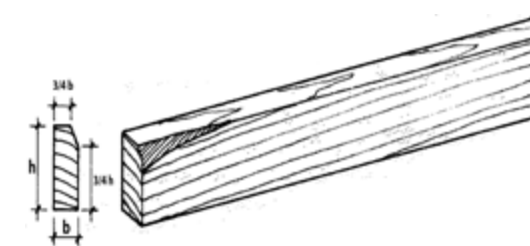


Figura 1.35. Arista Faltante en Madera Aserrada / Fuente: JUNAC(PADT-REPORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 3-19

tablón mide 5cm. y su cara 20cm, pero presenta una ausencia de arista, las dimensiones mínimas que deberán tener: el canto 3,75 cm. y la cara 15cm.

1.5. PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL

Las propiedades de la madera por sus diferentes reacciones y, obviamente, por su condición orgánico-vegetal, podrán ser altamente variables, aún siendo de la misma especie, e inclusive del mismo árbol. Las propiedades generales de la madera dependerán de factores como: crecimiento, edad, contenido de humedad, tipo de terreno en el que creció y distintas partes del tronco. Se debe recordar que un árbol cumple con funciones estructurales intrínsecas, pues todos sus componentes se desarrollan en función de su posición de crecimiento; es decir, cada elemento del árbol ayuda a que éste se

mantenga de pie, soportando fenómenos naturales propios o externos. A causa de esta situación, dichas propiedades se dividen en dos grupos principales: las físicas y las mecánicas.

Con respecto al origen de las propiedades mecánicas, éstas son el resultado de aplicar esfuerzos de carga sobre el material; es decir, la respuesta que la madera posee ante fuerzas aplicadas, ya sean estas paralelas o perpendiculares a su eje axial.

Las propiedades físicas, generalmente, no son producidas por fuerzas exteriores que actúan sobre el elemento; son factores propios de cada material. Todo dependerá de la estructura y el procesamiento que haya tenido en su periodo de vida.

1.5.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera dependen, fundamentalmente, de los factores propios de la naturaleza que envuelve a la madera y, sobre todo, de su especie. Para el caso de la madera estructural, las propiedades físicas relacionan la humedad y su efecto con el comportamiento estructural y con cambios dimensionales y de densidad que este factor pueda producir en las piezas de madera. A continuación, se detallan los factores que inciden en las características físicas del material:

- La cantidad de elemento básico que forma las paredes celulares de la madera.
- La disposición y orientación de los materiales que forman las paredes celulares.
- La composición química del elemento básico, que explica muchas diferencias cuantitativas respecto al comportamiento de la madera.

Por un lado, se describirá las principales propiedades físicas que influyen en el

comportamiento de la madera. Por otro lado, las propiedades mecánicas serán tratadas, más adelante, y por separado, ya que dichas propiedades son las que abordan aspectos estructurales de la madera y, por lo tanto, serán de mayor utilidad para la continuidad del presente documento.

1.5.1.1. Anisotropía

La definición de esta propiedad ha sido ya mencionada en el presente documento; sin embargo, es necesario esclarecer ciertos detalles específicos. La madera quizá sea el mejor exponente con esta propiedad, ya que su condición orgánica hará que ésta responda de diferente manera, según su posición ante esfuerzos aplicados. Entonces, la anisotropía se refiere a las diferentes propiedades que tiene la madera según la orientación de su estructura fibrosa, es decir, sus propiedades no se distribuyen de la misma forma, en todas sus direcciones, ya que intrínsecamente el árbol posee dos ejes principales que son: paralelo a la fibra (paralelo al eje del tronco) y la perpendicular a la fibra (perpendicular al eje del árbol, en dirección tangencial o radial).

Por lo tanto, es lógico que las propiedades en dirección paralela a la fibra, que vayan a ser mucho más favorables, puesto que en este eje se orienta la mayoría de tensiones generadas en el interior del árbol y que utiliza para cumplir su función estructural. Sin embargo, el árbol no tiene por qué soportar grandes esfuerzos en dirección perpendicular a su eje y, por lo tanto, no ha desarrollado mecanismos para resolverlos. Además, esta propiedad puede ayudar a determinar otras propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, etc.

Este fenómeno, siempre debe ser considerado para interpretar el comportamiento estructural

de la madera, pues es uno de los aspectos más importantes con respecto a otros materiales. Como dato estructural, se puede estimar que el comportamiento de la madera para cualquier propiedad física o mecánica en dirección de la fibra, está en el orden de 10 a 30 veces más resistente que en dirección perpendicular.

Para una mejor asimilación de la propiedad anisotrópica en la madera, se propone un ejemplo muy común en la construcción: si se considera una pieza de madera maciza de sección constante, y se le aplica una carga axial al eje del tronco -paralelo a la fibra-, el elemento presentará una resistencia superior a la que pueda tener si el esfuerzo fuera aplicado perpendicular a la fibra. La situación expuesta, ha citado el caso común de una columna y viga de madera, las cuales poseen diferentes tipos de resistencia.

1.5.1.2. Humedad de la Madera

Unas de las características especiales de la madera como material es su capacidad higroscópica, ya que tiende a absorber o perder humedad relativa, dependiendo del medio en el que se encuentre. La cantidad de agua en la madera podemos encontrarla en tres tipos diferentes: agua libre, agua higroscópica, y agua de constitución. El agua libre es la que se encuentra llenando las cavidades celulares. El agua higroscópica es la que podemos encontrarla dentro de las paredes celulares, y el agua de constitución se encuentra formando parte integrante de la estructura molecular.

La madera después de su respectivo proceso de aserrado y exposición al medio ambiente, empieza a perder agua dando inicio al proceso de secado que se divide en tres etapas. En el transcurso de dicho proceso, en primer lugar, pierde el agua libre contenida y, después, en un proceso más lento, el agua higroscópica va disminuyendo su contenido de las paredes celulares del material, dejando únicamente el agua de constitución en el interior, la cual se

llega a perder sólo en el caso de combustión.

Según el contenido de agua que una pieza de madera puede contener se clasifica en tres estados: verde, seco y anhidro. Madera verde se considera cuando ha perdido una pequeña cantidad de agua libre, Madera seca, en cambio, cuando haya perdido totalmente el agua libre y empiece a perder agua higroscópica, finalmente, será madera anhidra cuando haya perdido toda el agua libre e higroscópica.

Con respecto al tiempo en el que la madera pueda perder o ganar humedad, se debe considerar dos aspectos importantes:

- Las propiedades mecánicas podrán variar, significativamente, según la cantidad de agua presente o contenida en la madera.

- La variación de volumen en las piezas, ocasiona serios problemas en aplicaciones estructurales. También se debe recalcar, en cuestiones de durabilidad, que si el nivel de agua es alto y variable, el material se vuelve susceptible al ataque de xilófagos y a factores de podredumbre.

Para motivos de análisis de la madera, el contenido de humedad (CH%) se define como: el porcentaje en peso, que tiene el agua libre más el agua higroscópica con respecto al peso de la madera anhidra, la expresión citada es la siguiente:

$$CH\% = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{peso anhidro}}{\text{Peso anhidro}} \times 100$$

fórmula (1.2.)

*El peso anhidro es conseguido mediante el uso de hornos.

Para la obtención de valores anhidros se debe recurrir a la norma existente para su aplicación.

"Existen valores del contenido de humedad que son particularmente importantes, al primero se le llama Punto de Saturación de las fibras (PSF) y es el contenido de humedad que tiene la madera cuando ha perdido la totalidad de agua libre y comienza a perder el agua higroscópica. Al segundo contenido de humedad se le llama Contenido de humedad de Equilibrio (CHE) cuando la madera expuesta al aire libre, pierde parte del agua higroscópica hasta alcanzar un CH en equilibrio con la humedad relativa del aire, siendo este CH el más conveniente para aplicaciones estructurales de la madera."²² (Figura 1.36.)

1.5.1.3. Densidad de la madera

La densidad es la relación existente entre la masa y el volumen de un cuerpo. Para cuestiones de cálculo se toma la masa como el peso del cuerpo: el peso de la madera es el resultado de sumar el peso de la parte sólida, más el peso del agua. El volumen de un elemento de madera se puede considerar constante cuando se encuentra en estado verde; este volumen puede ir disminuyendo cuando el CH. se encuentra por debajo del PSF; finalmente, cuando la madera en cuestión alcanza un estado anhidro o seco, su volumen volverá a ser constante.

Es importante considerar que para una misma especie, los valores de densidad pueden variar, considerablemente, según las condiciones en que se hagan las mediciones de peso y volumen. Adicionalmente, a estos criterios de valores de densidades entre especies, existen variaciones, inclusive, entre las partes de un mismo árbol; por ejemplo, la madera de la parte inferior de un árbol es más densa que la parte superior.

Entre las especies madereras existentes, en los valores de las densidades o pesos volumétricos se puede encontrar una gran gama de resultados, los cuales varían desde los 100 Kg/m³, como es el caso de la balsa hasta valores del orden de 1000 Kg/m³, para la mayoría de especies tropicales.²²

Como consecuencia de las diferentes posibilidades que puede presentar una especie, al momento

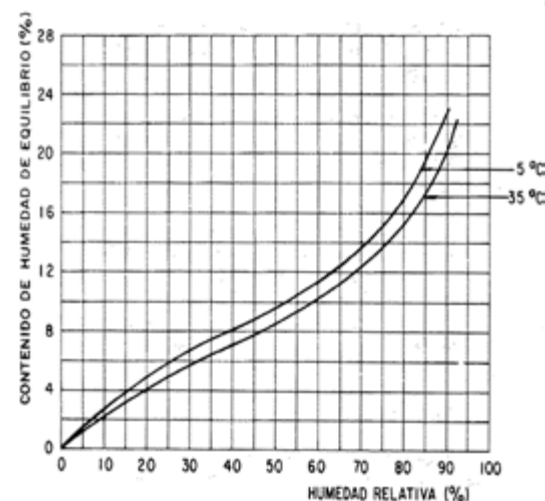


Figura 1.36. Contenido de humedad de equilibrio, en función de la humedad relativa y la temperatura / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT); "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 2-5

de realizar las mediciones para la obtención de sus respectivas densidades, se han considerado las cuatro más importantes, según el estado en el que se encuentre la madera, las cuales se detallan a continuación:

La densidad verde (DV) es la relación que existe entre el peso verde (PV) y el volumen verde (VV).

La densidad seca al aire (DSA) es el resultado de la relación que existe entre el peso seco al aire (PSA), y el volumen seco al aire (VSA).

La densidad anhidra (DA) es la relación que existe entre el peso seco al horno (PSH) y el volumen seco al horno (VSH).

La densidad básica (DB) es la relación entre el peso seco al horno (PSH) y el volumen verde (VV). Este es el menor de los cuatro.

1.5.1.4. Contracción de la madera

La contracción hace referencia a las variaciones dimensionales que sufre una pieza de madera,

²² JUNAC(PADT-REFORT); "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pag. 1-15

debido al intercambio de humedad entre las paredes celulares y, de igual manera, la pérdida de humedad por estar expuesta al aire libre. La cantidad de agua que contiene la madera, como ya se mencionó anteriormente, está depositada en los lúmenes y paredes celulares de la fibra. Estas cantidades normalmente son intercambiadas entre sí.

De la misma manera que la madera pierde humedad puede ganarla, produciendo un fenómeno similar a la contracción, pero con resultados opuestos ya que se da un hinchamiento en la pieza. Como ya se mencionó, la madera al poseer un comportamiento anisotrópico, los cambios dimensionales normales son de diferente magnitud en las direcciones tangenciales, radiales y longitudinales. Entonces, como resultados ya predeterminados, tenemos como promedio: la contracción tangencial es 1.5 a 3 veces mayor que la contracción radial, y la contracción longitudinal es normalmente despreciable en la madera estructural. La gran diferencia entre contracción tangencial y radial se debe al gran potencial de cambio que tiene la madera en el sentido tangencial. Con respecto a la contracción longitudinal, cuando ésta es excesiva puede ocasionar defectos conocidos como encurvadura y arqueadura.

1.5.1.5. Tensiones de secado

Cuando la madera entra en un proceso de secado, permite que se desarrollen esfuerzos mecánicos a través de su estructura, estos esfuerzos pueden verse afectados por algunos factores, entre los más comunes encontramos: el cambio de humedad, las restricciones mecánicas y la anisotropía.

Cuando la madera entra en proceso de secado se puede distinguir dos etapas. La primera etapa de secado se manifiesta cuando la superficie de una pieza de madera mantiene un CH por debajo del PSF; esto es, cuando la superficie mantiene un CH en equilibrio y el interior, todavía, está sobre PSF; por lo tanto, no existirá contracción interior. La madera es un material que actúa como un solo

cuerpo, ella podrá reaccionar; de tal forma que, cuando una parte de ella presente evidencias de contracción, la parte que no sufre contracciones recibirá esfuerzos internos de compresión; es decir, si la superficie sufre contracciones emitirá esfuerzos de compresión sobre el interior y ésta, a su vez, reaccionará de manera opuesta a la contracción de la superficie.

La principal consecuencia, en esta primera etapa de secado, es la generación de grietas superficiales; esto ocurre cuando los esfuerzos de tensión son mayores a la resistencia en tensión perpendicular a la fibra, y si los esfuerzos de compresión en el interior superan la resistencia permisible de la madera perpendicular a las fibras, éstos pueden contribuir al colapso de la madera.

La segunda etapa de secado es la producida por la inversión de esfuerzos; es decir, en el interior de la pieza de madera, la pérdida del CH está por debajo del PSF y comienza un proceso de contracción. Por su parte, la superficie recibe esfuerzos de compresión. En consecuencia, si las tensiones producidas en el interior superan la resistencia perpendicular a la fibra, pueden producir grietas internas, alterando el comportamiento estructural de las piezas.

1.5.2. Propiedades mecánicas

La madera puede ser considerada en tres direcciones principales y ortogonales entre sí, las cuales son: la longitudinal, la tangencial, y la radial. Las direcciones radial y tangencial, como se puede ver en la Figura 1.37., son perpendiculares a la longitudinal y, obviamente, al grano. Entonces, para la práctica se consideran sólo dos direcciones: la dirección longitudinal y la dirección perpendicular al grano. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las propiedades en los sentidos tangencial y radial,

no difieren significativamente; de manera que, al momento de realizar diseños estructurales de madera basta con distinguir propiedades paralelas a la fibra y propiedades perpendiculares a éstas.

Las principales propiedades mecánicas o propiedades resistentes de la madera son: resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y corte paralelo.

1.5.2.1. Resistencia a la flexión

La flexión perpendicular a la fibra es un esfuerzo característico de las vigas de madera. En la gráfica 1.38. de Carga-Deformación, se puede apreciar los diferentes estados que atraviesa la pieza previa a su ruptura. Como primera fase, está el rango elástico, el cual se encuentra definido por la recta inicial de dicho gráfico, seguido del límite proporcional, el cual está claramente definido, puesto que allí se encuentra el mayor esfuerzo admisible, y es donde la línea recta cambia su pendiente y la curva empieza a deformarse, definiendo un primer punto de inflexión "p".

Después de sobrepasar, el límite proporcional, el material pasa a un estado plástico, en donde, cada deformación producida, se hace de forma permanente. Como última etapa, dentro del comportamiento a flexión del material, está el punto de ruptura, el cual refleja la máxima capacidad de carga, que puede soportar un elemento. Una de las características especiales de la madera expuesta a flexión, es que la fractura no es repentina, ya que el elemento se manifiesta previa a un colapso y el proceso responde a una separación de fibras muy lenta, dependiendo de las cargas.

Con respecto al diseño estructural para vigas de madera, los valores de la carga perpendicular a la fibra deberán estar por debajo del límite proporcional, así la madera se comportará, en flexión, como material elástico. Y a medida que la carga va aproximándose a su valor máximo, la distribución de los esfuerzos transversales

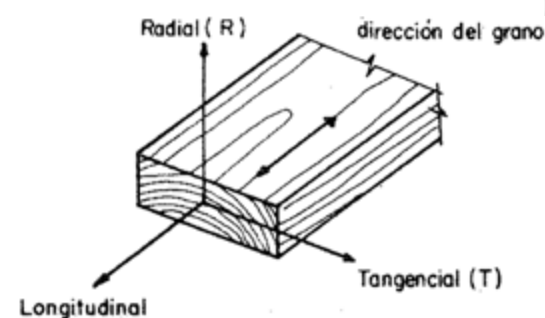


Figura 1.37. Direcciones ortogonales de la madera / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982, pag. 1-21

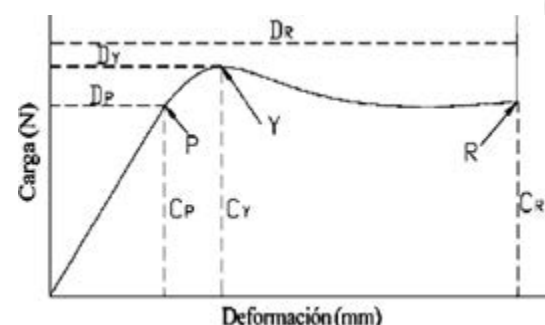


Figura 1.38. Curva típica Carga-Deformación de un Material / Fuente: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662004000100015&script=sci_arttext

dejan de ser lineales y la posición del eje neutro cambia. Este comportamiento se debe a la diferencia entre la relación esfuerzo-deformación de la madera sometida a compresión o a tensión, es decir, como consecuencia de estos comportamientos la falla en la madera a flexión inicia con el aplastamiento de las fibras extremas sometidas a compresión y, esto a su vez, deriva en la rotura de las fibras a tensión. Sin embargo, esta regla puede variar para algunas especies de Latifoliadas ya que el comportamiento puede ser inverso, iniciando la falla en las fibras extremas sometidas a tensión.

1.5.2.2. Resistencia a la compresión

Con algunas excepciones entre las maderas duras, las resistencias en tensión y compresión pueden ser consideradas esfuerzos del mismo orden. Sin embargo, la resistencia a compresión de

la madera, en dirección paralela a las fibras, puede variar aproximadamente a la mitad de su resistencia a tensión en la misma dirección. Los motivos de esta diferencia obedecen a la influencia de fenómenos de pandeo.

La resistencia de la madera sometida a compresión, paralela a la fibra, es un claro ejemplo de una columna de madera. (Figura 1.39.a) Su gran resistencia se debe porque las fibras están orientadas con la dirección al eje longitudinal y, en la mayoría de casos, coinciden con la orientación de las microfibrillas que constituyen la capa media de la pared celular; esta es la capa de mayor espesor de las fibras. La capacidad de esta resistencia está limitada por el pandeo de las fibras más que su propia resistencia al aplastamiento. Cuando se trata de columnas a escala real, solamente aquellas que poseen una esbeltez (longitud/ancho) menor a 10, desarrollan toda su resistencia al esforzar la sección a su máxima capacidad.

Otra posibilidad de resistencia a compresión, según la orientación de las fibras, es la compresión perpendicular a las mismas. Bajo este tipo de carga, las fibras están bajo esfuerzos perpendiculares a su eje longitudinal y tienden a comprimir las pequeñas cavidades contenidas entre ellas. Esta capacidad nos brinda la posibilidad de cargar a la pieza, sin que ocurra una falla distinguible. Al incrementar la carga, la pieza va comprimiéndose cada vez más (se aplastan los pequeños cilindros que poseen las fibras), aumentando la densidad y la capacidad para resistir mayor carga. (Figura 1.39.b)

1.5.2.3. Resistencia a la Tracción

La tracción en dirección paralela a la fibra suele ser la mayor resistencia que presenta la madera ante las demás acciones mecánicas. Según la Figura 1.39.c, se puede observar el comportamiento lineal y elástico de la curva esfuerzo-deformación. Además, se distingue lo rápido que puede fallar una pieza bajo estos esfuerzos.

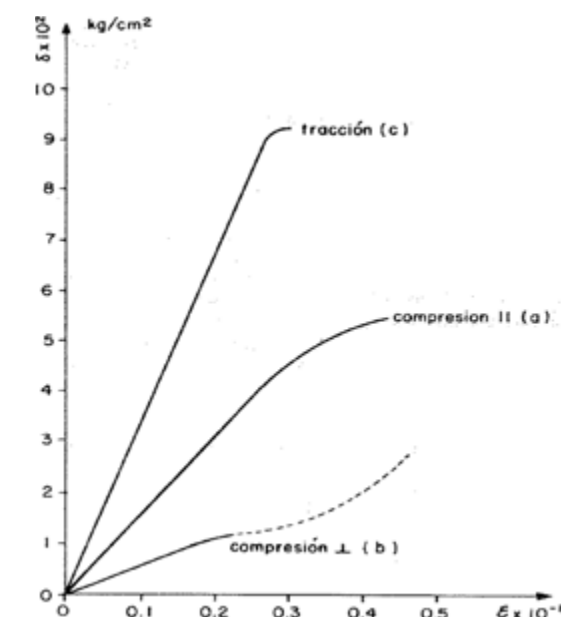


Figura 1.39. Curvas esfuerzo - deformación para maderas latifoliadas. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982, pag. 1-23

La resistencia que presenta la madera a la tracción paralela es afectada por la inclinación del grano. La influencia de otros defectos característicos de la madera hace que la resistencia a la tracción puede llegar hasta un 15% del esfuerzo de rotura.

1.5.2.4. Resistencia al Corte

En la madera podemos distinguir varios tipos de esfuerzo cortante. El más importante para elementos estructurales es el esfuerzo paralelo a las fibras. La determinación de este esfuerzo es complicado, ya que los resultados se ven afectados e influenciados por los esfuerzos de tracción perpendicular a las fibras que se generan simultáneamente. Aproximadamente, puede estimarse que la resistencia al esfuerzo cortante paralelo es de 10 a 15% de la resistencia a tracción paralela a las fibras.

Las causantes para que la resistencia al corte presente capacidades distintas, se debe, en primera instancia, a la característica cementante de las fibras; es decir, la cantidad de lignina

que posea la madera en su estructura celular. Mientras que la resistencia al corte perpendicular a la fibra puede llegar a ser de tres a cuatro veces mayor que en la dirección paralela.

1.5.2.5. Elasticidad-Deformidad

El módulo de elasticidad, el módulo de corte y el módulo de Poisson representan las características elásticas de un material; de allí que se pueda considerar a la madera como un elemento estructural que posee considerables ventajas gracias a sus condiciones ortotrópicas. Según la orientación de sus tres ejes principales y ortogonales, existen: tres módulos de elasticidad, tres de corte y seis módulos de Poisson. Pero desde el punto de vista ingenieril puede suponerse que el material es homogéneo, lo que permite considerar sólo tres módulos de los antes mencionados.

1.5.2.5.1. Módulo de elasticidad (MOE)

Este módulo es un parámetro que nos indica la capacidad de la madera para resistir deformaciones; es decir, entre más alto el valor del MOE, más rígida será la madera. El módulo de elasticidad puede ser obtenido directamente de una curva de esfuerzo-deformación en un ensayo de compresión paralela a la fibra. También puede ser encontrado de manera indirecta en los ensayos a flexión. Sin embargo, según resultados obtenidos en madera tropicales estructurales, el MOE a compresión paralela, es mayor que el MOE obtenido de ensayos en flexión estática.

Para cálculos de elementos individuales, tales como: vigas o columnas, el valor promedio de su MOE está predeterminado para los tres diferentes grupos estructurales, según datos obtenidos en el Manual de Diseño para Maderas de Grupo Andino. (Tabla a4. Módulo de Elasticidad, pág: 18)

1.5.2.5.2. Módulo de Corte

El módulo de corte o rigidez es el que relaciona las deformaciones con los esfuerzos de corte; es

decir, se considera como una constante elástica que caracteriza el cambio de forma de un cuerpo elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.

El módulo de rigidez puede ser expresado en función del módulo de elasticidad en dirección longitudinal, puesto que los valores reportados para esta propiedad varían entre 1/16 y 1/25 del MOE.

1.5.2.5.3. Módulo de Poisson

El módulo de Poisson es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación línea, por ejemplo, si una pieza de madera se encuentra sometida a un esfuerzo axial experimenta una deformación no sólo en el sentido axial, sino también en sentido perpendicular a la fibra. Para la madera se consideran seis módulos de Poisson ya que se relaciona las deformaciones en sus tres direcciones, longitudinal, radial y tangencial. Si existe una tracción longitudinal con alargamiento de las fibras, esto implicará una contracción en sentido transversal.

La madera presenta diferentes valores según las direcciones que se consideren. Para maderas coníferas, los valores están en un rango de 0.325 a 0.40 para densidades de 0.5 gr/cm³.

1.6. TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y ESTRUCTURALES

1.6.1. Uniones estructurales

Las técnicas para unir piezas de madera son parte primordial en el diseño estructural, ya que constituyen uno de los puntos cruciales con respecto a la resistencia de las estructuras de madera y, por ello, es

necesario conocer sus alcances y limitaciones. El objetivo de los sistemas de unión es la de ensanchar y prolongar a las piezas de madera debido a la limitada sección y longitud que puede presentar una tabla o tablón existentes en el mercado como consecuencia del tamaño de los árboles, aserrados, transporte, etc. Las uniones pueden ser realizadas de varias formas, todo dependerá de la situación o trabajo que realice la pieza de madera en uso.

Al momento de diseñar una estructura de madera, las piezas pueden ser unidas entre sí de varias maneras, cada método de unión deberá responder a las situaciones que presente dicho diseño y dará lugar a sistemas más o menos económicos o costosos y también a soluciones complejas, las cuales pueden cambiar el diseño original de una estructura.

Las limitaciones que puedan darse en las uniones están relacionadas con las características anisótropicas del material. Entonces, una unión entre piezas de madera deberá ser, en su mayoría, articulada o semirígida ya que resulta difícil, dependiendo el caso, alcanzar una unión perfectamente rígida. Por la importancia y complejidad de los sistemas de unión estructural, entre piezas de madera, se consideran tres:

- Juntas o acoplamientos
- Ensamblés
- Empalmes

1.6.1.1. Juntas o acoplamientos

Son también llamadas acoplamientos y consisten en la unión de dos o más maderas por sus caras o cantos respectivos. Su objetivo es la de ensanchar la madera para conseguir dimensiones inalcanzables para una pieza única.

Los acoplamientos pueden ser variados y pueden ser realizados mediante piezas solamente cepilladas y encoladas, en la cuales se debe considerar la especie de

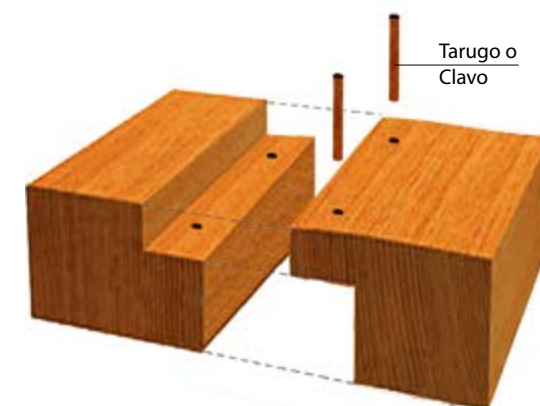


Figura 1.40. Junta a media madera con tarugos/Fuente: Daniel Enríquez M.

la madera, ya que podrá variar su unión por la reacción que presente el material. Por ejemplo, si es una madera que gana humedad, fácilmente, puede llegar a encorvarse. Para mejorar la junta de piezas se puede recurrir al uso de ranuras, lengüetas o demás fijadores.

- Junta a media madera

Este tipo de junta consiste en unir piezas mediante el corte seccional de una de sus caras, lo cual permite una mejor superficie, posibilitando el refuerzo mediante conectores, tales como: tornillos, clavos o tarugos. (Figura 1.40.)

Estas piezas, por lo general, son unidas mediante tarugos, lo cual garantiza una mejor adherencia debido a la naturaleza del material. Para una mejor sujeción entre las superficies a unir, se puede recurrir al método de caras texturadas; es decir, con un cepillo de dientes se realiza ranuras en las caras que al momento de ser pegadas, mediante resinas o cola simplemente, mejorarán su adherencia cuando actúen fuerzas sobre ellas. No se recomienda el uso de este método cuando las piezas van a trabajar a tracción individualmente, para este caso se puede recurrir a otras opciones que están desarrolladas más adelante.

Espesores mínimos y penetración de los clavos

Al momento de unir dos piezas mediante el sistema de media madera, los elementos que fijan la unión (clavos) se encuentran sometidos a esfuerzos de cizallamiento simple, por lo que se recomienda que la pieza que contiene la cabeza del clavo tenga un espesor mínimo de 6 veces el diámetro del clavo. En cuanto a la penetración con el otro elemento, éste deberá tener como mínimo 11 diámetros del clavo. (Figura 1.41.) En caso de no llegar cumplir con los espesores de clavos y penetraciones indicadas, es recomendable reducir las cargas admisibles en el diseño estructural o, a la vez, realizar refuerzos o cambio de los elementos por otros más rígidos.

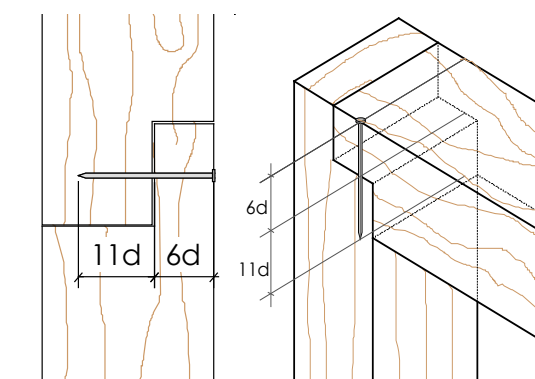


Figura 1.41. Espesores mínimos y penetración de clavos. /Fuente: Daniel Enríquez M.

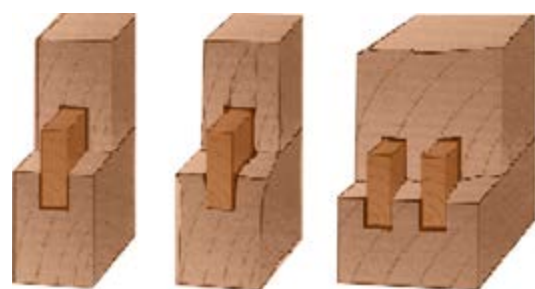


Figura 1.42. Junta a Tope: A. Ranura con lengüeta B. Doble Ranura con Lengüeta / Fuente: I.E.S. Azcona."Técnicas para unir piezas de madera". Almería-España. Pag: 2.

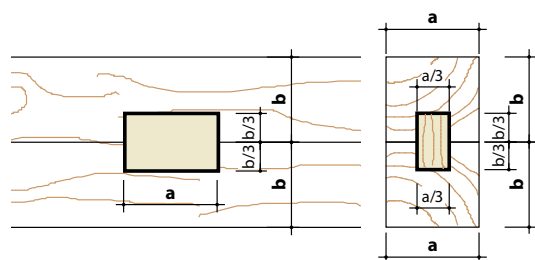


Figura 1.43. Dimensiones mínimas de las lengüetas. /Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 1.44. Junta plana con refuerzo de espiga. / Fuente: I.E.S. Azcona."Técnicas para unir piezas de madera". Almería-España. Pag: 2.

- Junta con ranura y lengüeta

Este acoplamiento consiste en acanalar las dos piezas a ser unidas y en el medio colocar una lengüeta, la cual deberá ser insertada a presión y encolada. Para obtener una buena resistencia con esta unión las superficies deberán ser planas y la lengüeta deberá ser de madera dura y con las fibras en sentido transversal, para contrarrestar el esfuerzo por cizallamiento. Se debe considerar que la lengüeta puede variar tanto en sus dimensiones como en número (puede ir dos lengüetas); esto dependerá de la función que vaya a cumplir y además del cálculo respectivo. (Figura 1.42.)

Espesores mínimos para lengüetas

La unión entre dos elementos de madera con este método, hará que la lengüeta trabaje a esfuerzos de cizallamiento. Precisamente, para evitar cualquier fracaso de ese tipo, las dimensiones adecuadas de la pieza deberán tener un ancho igual a 1/3 del ancho de la pieza a unir, asimismo con su altura y, en cuanto a su longitud, deberá ser igual a la dimensión más grande de la sección transversal. (Figura 1.43.)

- Junta a media madera con refuerzo de espiga

Este tipo de junta se realiza para obtener mayor resistencia a la rotura de la madera, es decir, a lo largo del elemento se realiza una

ranura y en ella se realizan agujeros o cajas a una distancia prudencial, para evitar que la madera se resquebraje. En las cajas realizadas, se colocan espigas postizas que permitan a la junta resistir esfuerzos considerables. (Figura 1.44)

-Junta plana unida con doble cola de milano

Esta junta consiste en insertar una llave de madera dura que unirá dos piezas de madera por las testas o cantos. Este sistema permite ensanchar las piezas y es uno de los sistemas más antiguos. De igual manera que una lengüeta, la llave deberá tener sus fibras en sentido transversal a las fibras de las piezas a unir. (Figura 1.45)

1.6.1.2. Ensamblajes

El ensamble de piezas de madera permite formar conjuntos estructurales, los cuales cumplen la función complementaria, entre sí, de soportar cargas que incidan sobre la estructura.

En conclusión, podemos entender un sistema de ensamble, como la unión entre dos elementos para aumentar la forma del conjunto a formar y, así, lograr un cambio de direcciones entre dichas piezas.

Entre los sistemas de ensamblaje existentes, a continuación se citan los más importantes, dentro del campo estructural:

- Ensamble a media madera

Este ha sido uno de los sistemas más utilizados a lo largo del tiempo, debido a su versatilidad y simpleza de forma. Consiste en realizar un corte en ambas piezas a unir, pero esto sólo se realiza hasta la mitad de la madera; de tal forma que, al unirlos quedarán completamente acopladas. (Figura 1.46.A.)

Un ejemplo muy común en las viviendas antiguas es la unión viga-solera. Estos dos elementos son cortados a media madera, una vez unidos se evita movimientos inadecuados entre las piezas. (Figura 1.46.B.)

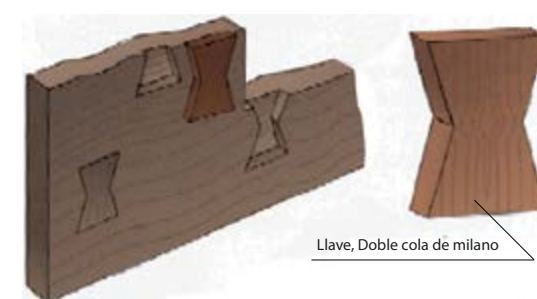


Figura 1.45. Junta plana con doble cola de milano. / Fuente: I.E.S. Azcona."Técnicas para unir piezas de madera". Almería-España. Pag: 2.

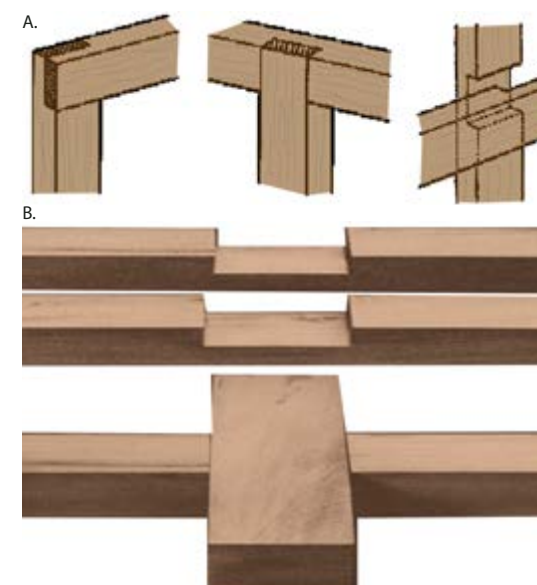


Figura 1.46. Ensamblajes a Media Madera / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. http://dc303.4shared.com/doc/A_BAFU/preview.html

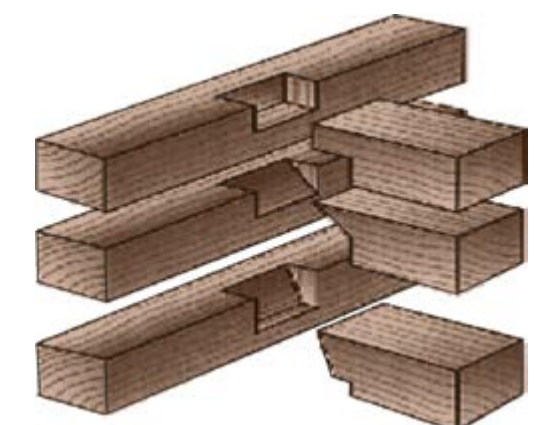


Figura 1.47. Ensamble de Palma o entalladura. / Fuente: I.E.S. Azcona."Técnicas para unir piezas de madera". Almería-España. Pág: 5.

- Ensamble de palma o entalladura

Esta opción es considerada como una variante del sistema a media madera, con la diferencia de que en el lugar de contacto se realiza una especie de entalle, el cual fija la unión entre piezas.

Esta alternativa no debilita sensiblemente la resistencia de las piezas sometidas a flexión, puesto que su sistema consiste en realizar un espaldonado, en el cual descansa la media madera de la otra pieza. (Figura 1.47)

Este sistema de unión puede presentar algunas deficiencias frente a movimientos sísmicos, por lo que se recomienda el uso de ángulos metálicos con espesores mínimos de 4mm. y con dimensiones no menores al 1/3 de sus lados, con conectores que pueden ser clavos o tornillos, los cuales también deben penetrar como mínimo el 1/3 de la sección en la cual se inserta el conector. (Figura 1.48.)

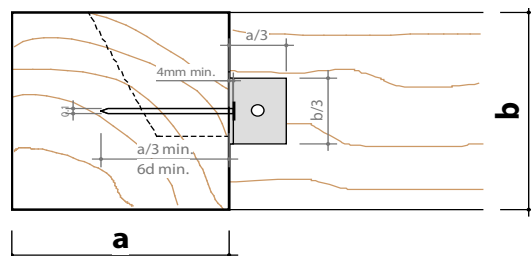


Figura 1.48. Dimensión de ángulo metálico para reforzar uniones. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 1.49. Ensamble de Caja y espiga. Encuentro de Columna y viga. / Fuente: M. Herrero y otros: "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España. Pág.: 2

- Ensamblajes a inglete y refuerzo independiente

Este ensamblaje se obtiene una vez cortado los extremos de las piezas a ser unidas a 45°. Se debe tomar en cuenta que esta unión no garantiza una buena resistencia ante esfuerzos externos.

Para mejorar la fijación entre estas dos piezas, se puede recurrir a un refuerzo tipo espiga el cual se penetrará en las piezas a unir; es decir, consiste en vaciar la parte central de los dos elementos, para luego reemplazar con el refuerzo o espiga independiente. La dimensión de esta espiga debe ser 1/3 del ancho de las piezas, y siempre, se debe orientar las fibras de la espiga, transversales a las fibras de las piezas.

1.6.1.2.1. Ensamblajes a compresión

- Ensamble con caja y espiga

Al igual que el sistema a media madera, este método de ensamblaje es muy habitual y está entre los más antiguos, ya que las viviendas vernáculas han utilizado este sistema por años, para resolver detalles

constructivos entre vigas y columnas.

Para realizar este sistema, se procede a cortar parcialmente un extremo de la pieza, formando una espiga lo suficientemente ancha para evitar una ruptura. Esta espiga ingresará en un agujero que debe ser realizado en la otra pieza, es decir, se genera un especie de caja para allí introducir la espiga y así lograr una fijación en forma de T. (Figura 1.49.) Es necesario indicar que, las posibilidades del sistema en mención es diversa y puede ser objeto de mejoras, todo depende del trabajo específico que se realice. Entre las opciones más comunes tenemos: ensamblaje a caja y espiga con retalón, sin retalón, con retalón y calce, con ranura y moldura o contra moldura, etc.

- Ensamble con barbilla

Este sistema es comúnmente utilizado en la construcción de cubiertas y consiste en realizar destajes en el elemento horizontal o viga para que el par inclinado encaje perfectamente. La barbilla o doble barbilla que se utiliza es para realizar la labor de tope del par y así contrarrestar el esfuerzo puntual. (Figura 1.50.)

Existen algunas variedades para mejorar este sistema, podemos reforzarlo mediante una doble barbilla o también con doble barbilla más auxiliar recto u oblicuo.

- Ensamble de pendolón con pares

El sistema pendolón con pares o con tornapuntas, al igual que el sistema de barbilla, es utilizado para la estructuración de cubiertas. Su principio es el mismo que los ensamblajes con barbilla, la diferencia radica en su orientación, ya que es empleado en elementos verticales y su efecto es para contrarrestar todos los esfuerzos traccionantes, los mismos que pueden ser reforzados con el material que mejor trabaja a tracción; el hierro ayudará a que dichos esfuerzos se distribuyan de mejor manera. (Figura 1.51.)

1.6.1.2.2. Ensamblajes a tracción

- Ensamble a cola de milano

Es utilizado para uniones que estén sometidas a esfuerzos de tracción; su principio de funcionamiento es básicamente el mismo que el de caja y espiga, a diferencia de este presenta una forma trapezoidal en su espiga y en su caja. (Figura 1.52.)

Su objetivo es el de impedir un deslizamiento en su unión y su separación resulta casi nula ante la tracción y con un buen comportamiento frente a la compresión.

Al igual que los ejemplos antes mencionados, este método presenta muchas variantes, destacando; el ensamblaje a media madera con cola de milano, unión en T a cola de milano;

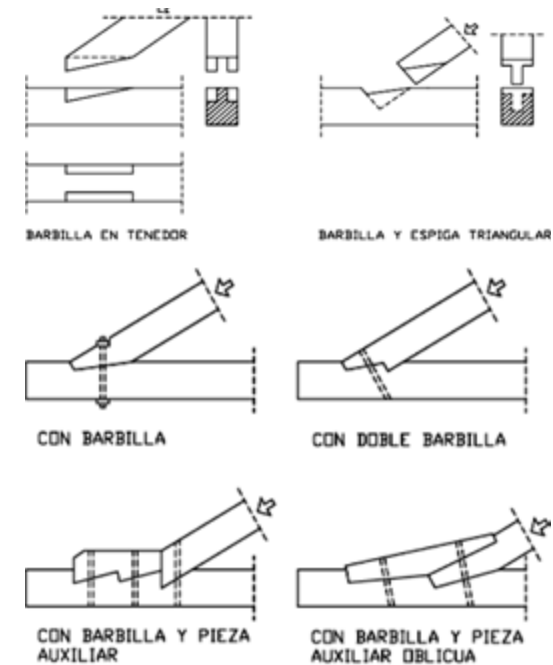


Figura 1.50. Empalmes con barbilla, caja y espiga con barbilla. / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. <http://dc303.4shared.com/doc/A-BAFAU/preview.html>

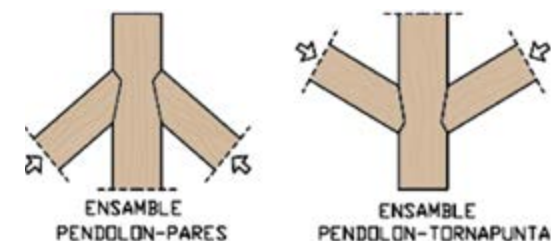


Figura 1.51. Ensamblajes con Pendolon y Pares / Fuente: M. Herrero y otros: "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España.

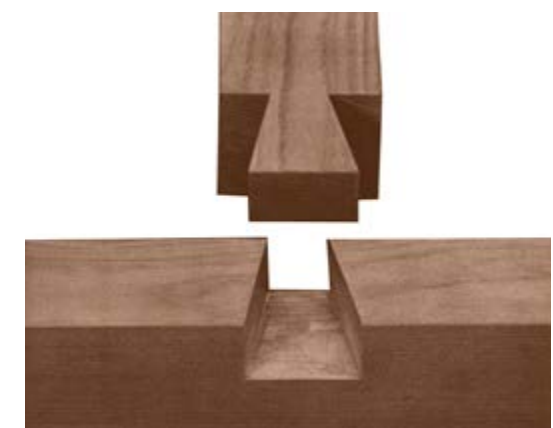


Figura 1.52. Cercha de Madera. / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. <http://dc303.4shared.com/doc/A-BAFAU/preview.html>

ensamble a cola de milano en ángulo abierto;
y ensamble a cola de milano solapada.

- Ensamble entallado

Este sistema puede ser considerado como variante de algunos ensambles ya mencionados. El objetivo de este método es reforzar elementos horizontales mediante piezas verticales, por lo general para la construcción de cubiertas. (Figura 1.53.)

- Ensamble con cuelgue de tirante de una cercha

El principio de este sistema está fundamentado en la combinación de ensambles a tracción y compresión, y con la ayuda de pletinas metálicas. (Figura 1.54.)

El objetivo que cumple el ensamble con cuelgue es el mismo que presenta el ensamble entallado, pero este depende de un auxiliar metálico. Su empleo es, principalmente, para la elaboración de cerchas de madera para cubiertas. El término de ensamble quizá no sea el preciso para este sistema, debido a que no se involucra a los elementos mediante cortes de material; sin embargo, su uso ha ayudado a solventar muchos sistemas constructivos. (Figura 1.55.)

1.6.1.3. Empalmes

Los empalmes son uniones, que al igual que los ensambles, ayudan a aumentar las dimensiones de un elemento. La diferencia es que un empalme sirve para prolongar el sentido longitudinal de una pieza de madera, mientras que, los ensambles cambian la dirección del elemento.

Estos tipos de unión se utilizan con mayor frecuencia, para la construcción de pies derechos (tochos) o piezas colocadas en sentido horizontal, como es el caso de las vigas de madera para cubrir pórticos.

Por lo antes mencionado, se debe considerar al momento de seleccionar un empalme, la posición de las piezas, ya que pueden trabajar de varias maneras, bien de cara o de canto, bien

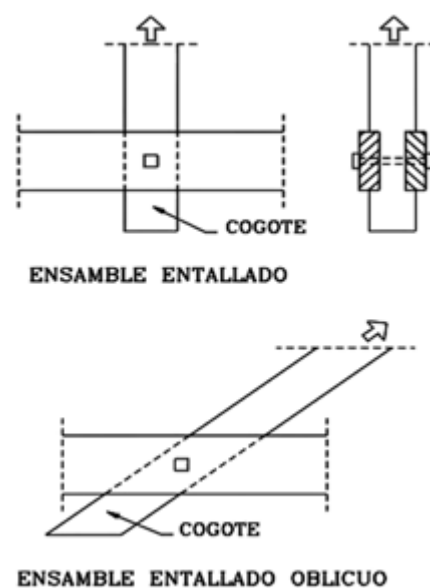


Figura 1.53. Ensamblados entallados, rectos y oblicuos. / Fuente: M. Herrero y otros. "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España.

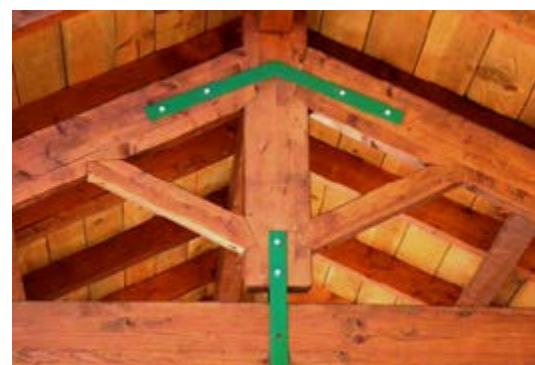


Figura 1.54. Cercha de Madera. / Fuente: M. Herrero y otros. "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España.

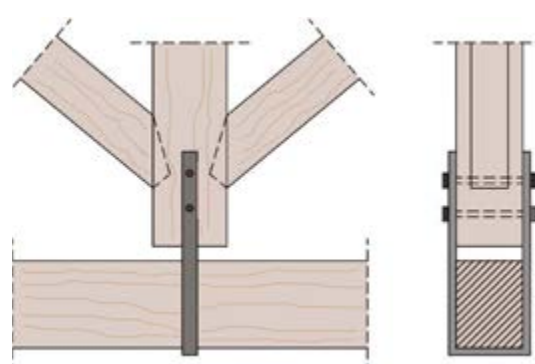


Figura 1.55. Cercha de Madera. / Fuente: M. Herrero y otros. "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España.

vertical u horizontal, pues sus comportamientos serán diferentes según el esfuerzo que soporte.

A continuación se describen los empalmes más utilizados en estructuras de madera, según el esfuerzo a que se encuentren sometidos:

1.6.1.3.1. Empalmes a compresión

- Empalme o tope con brida de refuerzo

Se considera como uno de los empalmes más fáciles y resistentes a tope, ya que su función depende de la rectitud de sus caras, y sobre todo, del número de bridas de refuerzo que se coloquen. Las bridas pueden colocarse dos o cuatro según la resistencia que se desee llegar, además están dobladas en los extremos, en forma de ángulos rectos y penetran en pequeñas ranuras realizadas en las piezas a empalmar.

La sujeción de las bridas están de par en par, mediante los tornillo o pernos que atraviesan la pieza y su resistencia depende mucho del grosor del hierro de que esté fabricada la brida. (Figura 1.56.)

Recomendaciones para el uso de pernos con bridas metálicas

El uso de pernos con platinas metálicas son eficientes con los grupos de maderas pertenecientes a los grupos A y B, debido a su alta resistencia; sin embargo, el uso en maderas del grupo C pueden utilizarse pero con diámetros restringidos de los pernos. En cuanto a los refuerzos metálicos, éstos deben ser de acero estructural con una fluencia no menor a 2.300 kg/cm² y siempre hay que implementar tratamientos anticorrosivos. Además, será necesario el uso de arandelas metálicas entre la cabeza del perno y la pletina para evitar esfuerzos de aplastamiento excesivos.

- Empalme a media madera

El principio del empalme a media madera es básicamente lo que ya se mencionó. El procedimiento es el mismo, pero al tratarse de una prolongación longitudinal de una pieza,

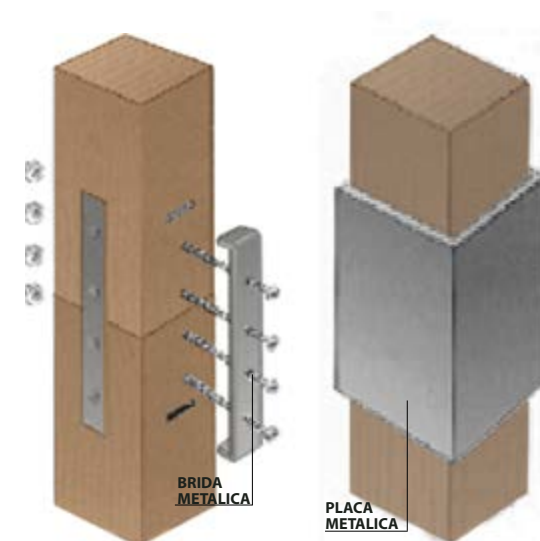


Figura 1.56. Empalmes a tope con refuerzo metálico. / Fuente: I.E.S. Azcona. "Técnicas para unir piezas de madera", Almería-España. Pág. 2.

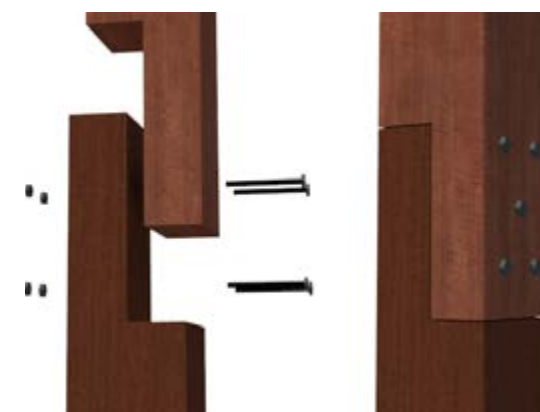


Figura 1.57. Empalmes a Media Madera / Fuente: Daniel Enríquez M.

es posible que el deslizamiento entre piezas se presente y debilite la unión. Para subsanar dicho desplazamiento, se debe aplicar el encaje a media madera, el cual se debe fijar con auxiliares, como son: tornillos o pernos metálicos. (Figura 1.57.)

Con respecto a resistencia de esfuerzos, esta unión actúa bien frente a acciones de compresión y, contradictoriamente, son poco efectivos ante trabajos de flexión.

* Para realizar cálculos estructurales para las uniones empernadas, consultar la tabla 12.7 de la Junta del Acuerdo de Cartagena. Pág.: 12-14

- Empalme a media madera con testa en sesgo

Este empalme no es más que una variante mejorada del sistema anterior. Se funda en los mismo principios, pero agrega detalles que lo hacen mejor. Alarga las medidas de sus extremos a media madera; esto a su vez permite que la superficie aloje más pernos o tornillos. Además, las dos testas son cortadas en bisel, esto hace que la unión mejore su resistencia ante una flexión lateral. (Figura 1.58.)

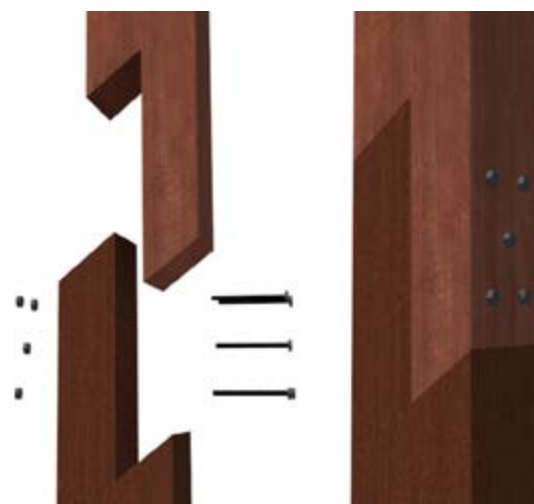


Figura 1.58. Empalmes a Media Madera con sesgo a 45° / Fuente: Daniel Enríquez M.

- Empalme a horquilla

En este tipo de unión, las piezas de madera presentan un corte a manera de doble espiga llamado horquilla, y en la otra pieza ranuras para encajarlas entre sí. El sistema es considerado como un empalme de mayor resistencia que el realizado a media madera y además presenta refuerzos metálicos como pasadores, tornillos o pernos. (Figuras 1.59.)

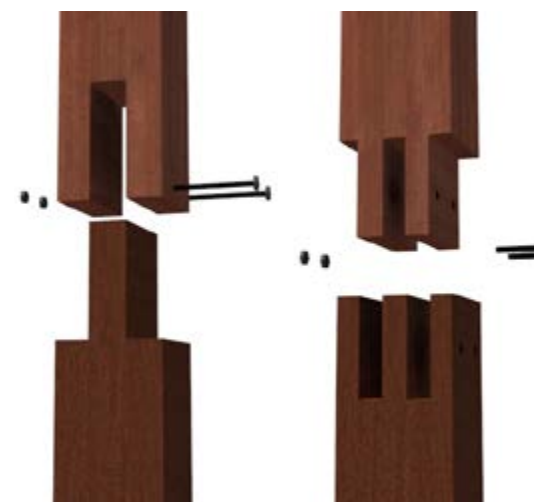


Figura 1.59. Empalmes con Doble Horquilla y Perno. / Fuente: Daniel Enríquez M.

- Empalme a tope con llave en cola de milano

Este tipo de empalme requiere de mayor cuidado al momento de su elaboración. La llave de cola de milano debe tener sus extremos más alargados, en sentido paralelo a, las piezas de madera a unir, pues esto evitará un posible desgarramiento de las fibras de la madera, ante esfuerzos de tracción. (Figura 1.60.)



Figura 1.60. Empalme con llave de cola de milano. / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. http://dc303.4shared.com/doc/A-_BAFAU/preview.html

- Empalme a caja y espiga

Se realiza una caja en cada testa de las piezas a ser unidas y, por otra parte, se realiza una espiga postiza, la cual se introducirá en las cajas realizadas. Este empalme se utiliza en piezas sometidas a compresión y dan buen resultado ante esfuerzos de torsión.

La longitud de la espiga debe ponerse en consideración, ya que si ésta es muy corta, el empalme será deficiente a la flexión; por tal motivo, se recomienda que la profundidad de la espiga sea mínimo 1/3 de la testa. (Figura 1.61.)

1.6.1.3.2. Empalmes a tracción

Los empalmes que se enumeran a continuación son de gran interés para el caso de vigas o elementos de madera que trabajan horizontalmente.

- Empalme de llave

Es un tipo de unión en el cual se traban las dos piezas de madera mediante un corte aparentemente a media madera, pero con destajes a diferente nivel para garantizar una mejor sujeción, al momento de presentarse esfuerzos de tracción. Además se recurre a una llave individual para mejorar la rigidez del empalme, esta llave irá en la mitad de la unión y deberá ser de madera dura con sus fibras en lo posible direccionadas paralelamente a las fibras de los elementos en unión. Siempre se deberá procurar que la llave ingrese a presión. (Figura 1.62.)

En cuanto a las dimensiones recomendables para el tamaño de la llave, se deberá utilizar piezas no menores al 1/5 de la sección del elemento de madera; es decir, si el ancho total de la pieza es 12 cm, la llave no podrá ser menor a 2.4 cm. Este sistema se puede mejorar con la ayuda de pletinas metálicas, las cuales deben colocarse a los lados de la unión. Estos ayudarán a distribuir los esfuerzos a tracción y, a su vez, a rigidizar de manera más óptima el empalme. No debemos olvidar que los elementos metálicos deben poseer todas las características estructurales antes mencionadas y de la misma forma sus conectores como clavos o tronillos.

- Empalme con rayo de Júpiter

Es considerada como una mejora del empalme de llave, pues su principio de corte es similar, la diferencia está en que el corte gira un ángulo de 30° aproximadamente y la llave se podría o no mantener entre las dos piezas. (Figura 1.63.)

El rayo de Júpiter ha sido muy utilizado para el empalme de vigas o pares que trabajan ante esfuerzos de tracción, dentro del campo de la construcción. Una manera de garantizar

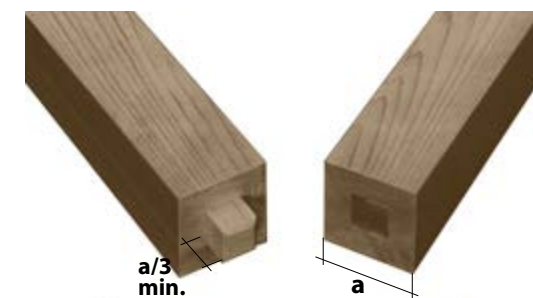


Figura 1.61. Empalme con caja y espiga. / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. http://dc303.4shared.com/doc/A-_BAFAU/preview.html



Figura 1.62. Empalme con llave de madera. / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. http://dc303.4shared.com/doc/A-_BAFAU/preview.html



Figura 1.63. Empalme con Rayo de Júpiter y Clavijas. / Fuente: M. Herrero y otros. "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España.

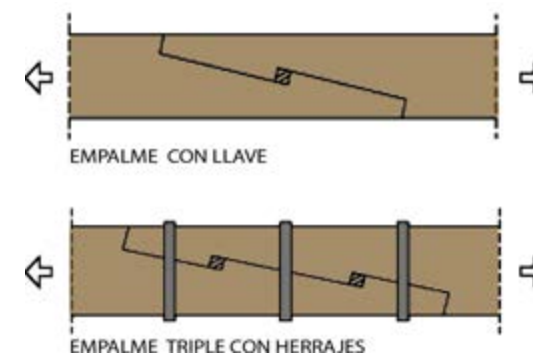


Figura 1.64. Opciones de empalmes con Rayo de Júpiter. / Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. http://dc303.4shared.com/doc/A-_BAFAU/preview.html

la unión, puede lograrse con el uso de bridas de refuerzo. Dependiendo del tamaño de la unión, puede colocarse como mínimo dos bridas metálicas. (Figura 1.64.)

- Empalme a media madera con cola de milano

Este empalme es una variante más del tipo de unión con cola de milano. Su uso no es común para estructuras, debido a su baja resistencia y con el riesgo de que pueda rasgarse ante un esfuerzo muy grande. Sin embargo, este sistema puede ser reforzado y mejorado para su uso en la construcción. La utilización de anillos metálicos, tarugos de madera o tornillos, ayuda a una mejor fijación del sistema. (Figura 1.65.)

1.6.1.3.3. Empalmes tradicionales entre vigas

De generación en generación se han transmitido conocimientos dentro del campo de la construcción y, específicamente, en la unión de elementos horizontales como es el caso de las vigas de madera. Debido a sus limitadas longitudes se han realizado un sin número de empalmes para cubrir luces mayores.

Una viga de madera cuando se encuentra sometida a esfuerzos de compresión es muy buena su reacción y resistencia, pero al momento de realizar un empalme, su condición de resistencia cambia radicalmente, es decir, un empalme de entre vigas necesariamente necesita ser realizado en un punto de apoyo común. En consecuencia, los empalmes tradicionales entre vigas siempre dependerán de los puntos de apoyo.

A continuación se exponen los empalmes más comunes que han sido utilizados en viviendas tradicionales y que aún siguen siendo parte de una identidad de construcciones en madera: (Figuras 1.66.)

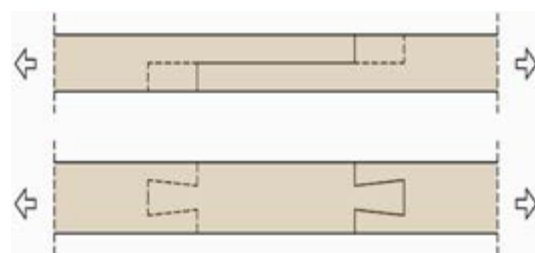


Figura 1.65. Empalme a media madera con cola de milano./ Fuente: ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. <http://dc303.4shared.com/doc/A-BAFAU/preview.html>

- Empalme a tope



- Empalme oblicuo a 45°



- Empalme a media madera



- Empalme oblicuo a 45° con tope



Figuras 1.66. Empalmes Tradicionales / Fuente: M. Herrero y otros: "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España.

1.6.2. Sistemas de conexión

La madera, pese a sus variadas cualidades como material estructural y sus propiedades mecánicas, puede presentar comportamientos frágiles; es decir, tiene poca capacidad de almacenar energía y, por ello, la importancia de los sistemas de conexión.

Los sistemas de conexión más que un complemento son una necesidad para las uniones estructurales, ya que brindan un gran aporte a la fijación entre piezas, sea este una junta, ensamble o empalme. Sobre todo ayudan a distribuir de mejor manera la transmisión de esfuerzos, debido a que dichos conectores son metálicos y sus dimensiones y espesores dependan de los cálculos previos a un diseño estructural.

En concordancia con las uniones estructurales, los conectores pueden y deben ser utilizados con cualquier tipo de unión, ya que todo dependerá de la resistencia que se quiera alcanzar en la junta, ensamble o empalme. Por consiguiente, los tipos de conectores serán considerados en dos grupos, los de tipo clavija, como son: clavos, tirafondos, pernos, tornillos, pasadores, grapas; y los del tipo superficial, como son: conectores placa-clavo, de anillo, de placa única y dentados.

1.6.2.1. Conector tipo clavija

Dentro de esta denominación podemos encontrar una extensa diversidad de piezas con diferentes dimensiones y calibres, según demande el cálculo.

Las uniones con conectores tipo clavija aportan una docilidad al conjunto de la estructura; de tal manera que, el comportamiento general compensa la fragilidad que puede presentar el material, debido a la capacidad de plastificación que tienen los elementos metálicos.

- Clavos

Estos son los más comunes y usados en la construcción en madera. Son cuerpos cilíndricos lisos que ingresan en las piezas con la ayuda de un martillo y su resistencia es aceptable en estructuras menores. Para que un clavo pueda ser usado dentro de estructuras, este debe reunir varias características. Un conector tipo clavija debe presentar una resistencia a la tracción mínima de 372 MPa y un límite elástico de 0.5%. El material de fabricación debe tener una resistencia a la tracción sobre los 340 Mpa. y, además, su cuerpo deberá soportar un doblez de 100° sobre sí mismo, y sin agrietarse.

Consecuentemente a las características que debe cumplir un clavo para ser considerado estructural, está también la profundidad de penetración que debe cumplir, ya que si no alcanza lo establecido, no aportará la resistencia suficiente a la unión que se realice. Para que un clavo trabaje perfectamente deberá ingresar sobre el elemento a penetrar mínimo 1/3 de su longitud. Para madera muy densa, es conveniente realizar agujeros por donde irán los clavos, obviamente, de un calibre más pequeño. Esto evitará que el clavo se doble al momento de ingresar.

Conviene siempre quitarle el filo a la punta del clavo (con martillo), esto hará que al momento de clavarlo la punta ingrese aplastando las fibras y no se transforme en un elemento separador que puede rajar la madera.

La utilización de clavos, al momento de unir directamente piezas de madera o tableros, suele limitarse a las piezas cuando son de espesores muy grandes. Con respecto a resistencias, el clavo es el que menor carga admite frente a un tornillo o perno y para una mejor eficacia en su resistencia, la clavija necesita mayores

superficies y con espesores delgados.

- Pernos o Bulones

Son piezas cilíndricas que presentan un fuste liso en sus 2/3 y en 1/3 restante una zona roscada para la tuerca, además de tener cabeza, se recomienda siempre ser usada con arandelas.

Se pueden realizar uniones directas entre madera o con acero, también con madera combinada, entre otros elementos. Los pernos por ser más grandes tienen una mayor transmisión de esfuerzos que un clavo. Su uso es necesario en madera aserrada, con anchos mínimos de 35 mm y en madera laminada. (Figura 1.67.)

- Tornillos autorroscantes

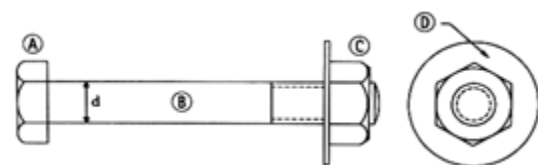
Son elementos con fuste cilíndrico liso y una parte roscada. A diferencia de un perno, el tornillo presenta punta y su parte roscada es mayor a la parte lisa; además, carece de tuerca, ya que éste ingresa directamente en los elementos a manera de un clavo pero con mejores resultados.

Al momento de ser colocado, el tornillo va haciendo una rosca al introducirse. Esto hace que la fijación del conector sea eficaz y casi imposible de retirarlo tirando de él. Es importante que previo a colocar los tornillos, se realicen agujeros guías para evitar que la madera se raje. (Figura 1.68.)

- Tirafondos

Es un elemento de unión, por lo general de acero. Es considerado como un tipo intermedio, entre tornillo y perno para madera, consta de rosca cónica, generalmente de mayor dimensión que la parte libre y con la cabeza cuadrada o hexagonal.

Se usa en donde no sea necesaria la utilización de pernos pero sobre todo donde existan esfuerzos oblicuos, ya que su alta resistencia y tamaño trabajan bien, ante tales esfuerzos. (Figura 1.69.)



Los bulones tienen un fuste o vástago cilíndrico (B) con cabeza (A), arandela(D) y tuerca (C).

Figura 1.67. Perno metálico con tuerca y arandela./ Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f. Pág.:44



Figura 1.68. Tornillo Autorroscante para madera./ Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f. Pág.:45

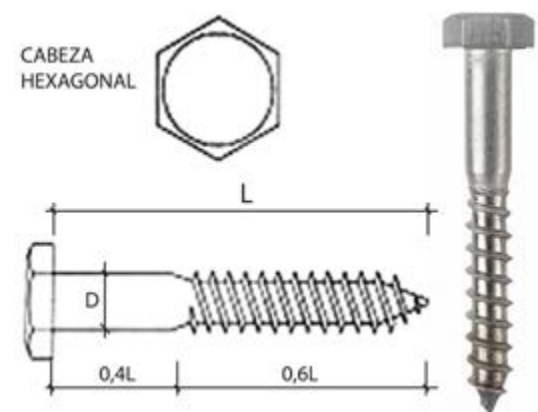


Figura 1.69. Tirafondo./ Fuente: Daniel Enríquez M.

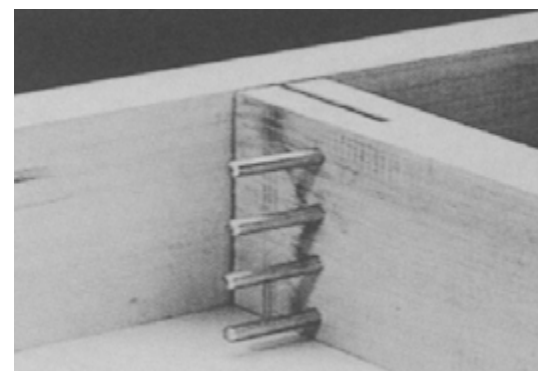


Figura 1.70. Pasadores metálicos./ Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f. Pág.:47

- Pasadores

Son elementos de acero con apariencia similar a la de un perno, su fuste es circular, su diámetro deberá ser mínimo de 16mm. para un uso estructural, sus extremos presentan una embocadura biselada. A diferencia de los pernos, no tienen cabeza, tuerca ni arandelas, lo que aporta una estética más limpia. (Figura 1.70.)

Con respecto a la colocación de los pasadores, éstos deben ingresar a presión, ya que su diámetro será igual ligeramente superior al agujero. Por este motivo, la unión realizada con pasadores será más rígida que la unión mediante pernos. La utilización de pasadores exige una mayor presión al momento de montar una estructura. En cuanto a la ocultación de los pasadores es sencilla e inmediata, y en caso de incendio presenta mejores condiciones de resistencia.

1.6.2.1.1. Dimensiones y espaciamientos de clavos y tornillos

En la construcción, el uso de clavos no ha presentado un adecuado uso en cuanto a sus dimensiones; sin embargo, el PADT - REFORT ha desarrollado útiles tablas con información para el diseño de estructuras, especialmente en las uniones clavadas, para lo cual han considerado los siguientes factores:

- tipo y condición de la madera.

- calidad, longitud y diámetro de los clavos.

- Numero de clavos.

- espesores de los elementos de penetración.

A continuación en la tabla a8. se detalla las dimensiones de los clavos, según el tipo de madera y las cargas admisibles. Mientras que la distancia entre clavos, bordes y extremos de las piezas de madera, deberá ser mayor o igual a los expuestos en la siguiente tabla de espaciamientos mínimos. (Tabla a9.)

Las uniones empernadas también son de gran interés en las construcciones de madera, por lo cual citamos de la misma manera que

Longitud (L)	d	Carga Admisible, kg		
		Grupo A**	Grupo B	Grupo C
51	2.4	36	28	20
	2.6	40	31	22
	2.9	46	36	25
	3.3	53	42	30
63	2.6	40	31	22
	2.9	46	36	25
	3.3	53	42	30
	3.7	61	48	35
76	3.3	53	42	30
	3.7	61	48	35
	4.1	70	54	39
89	3.7	61	48	35
	4.1	70	54	39
	4.5	78	61	44
102	4.1	70	54	39
	4.5	78	61	44
	4.9	87	68	49

(**) Para clavar maderas del Grupo A se requiere pre taladrado.

Tabla a7. Cargas admisibles y dimensión por clavo./Fuente: JUNAC(PADT-REFORT)."Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino" . Lima-Perú:1982. pag. 12-4

Elementos cargados paralelamente al grano (Fig. 12.5a)	A lo largo del grano	Espaciamiento entre clavos	16 d
		Distancia al extremo	20 d
	Perpendicular a la dirección del grano	Espaciamiento entre líneas de clavos	8 d
		Distancia a los bordes	5 d
Elementos cargados perpendicularmente al grano (Fig. 12.5b)	A lo largo del grano	Espaciamiento entre clavos	16 d
	Perpendicularmente a la dirección del grano	Espaciamiento entre líneas de clavos	8 d
		Distancia al borde cargado	10 d
		Distancia al borde no cargado	5 d

* d= diámetro del clavo.

Tabla a8. Espaciamientos mínimos para uniones clavadas desde un solo lado. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT)."Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino" . Lima-Perú:1982. pag. 12-8

Elementos cargados paralelamente al grano (Fig. 12.17)	A lo largo del grano	Espaciamiento entre pernos	4 d
		Distancia al extremo en tracción	5 d
		Distancia al extremo en compresión	4 d
	Perpendicularmente a la dirección del grano	Espaciamiento entre líneas de pernos	2 d
		Distancia a los bordes	2 d
Elementos cargados perpendicularmente al grano (Fig. 12.18)	A lo largo del grano	Espaciamiento entre líneas de pernos, s:	
		para $\frac{L}{d} \leq 2$	s = 2.5 d
		para $\frac{L}{d} > 6$	s = 5 d
		para $2 < \frac{L}{d} < 6$	2.5 d < s < 5 d
	Perpendicularmente a la dirección del grano	Espaciamiento entre pernos	4 d
		Distancia al borde cargado	4 d
	Distancia al borde no cargado	2 d	

Tabla a9. Espaciamientos mínimos para pernos. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT)."Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino" . Lima-Perú:1982. pag. 12-20

para los clavos, el espaciamiento mínimo que deben tener entre sí los elementos. (Tabla a10.)

Las tablas expuestas han sido citadas desde el documento técnico de Diseño para Maderas del Grupo Andino, esto con la intención de fomentar el uso de estas normas para que se las utilice con mayor frecuencia en el país, pues el desarrollo del uso de la madera estructural no es precisamente la más completa a nivel de la construcción.

1.6.2.2. Conector tipo superficial

Un conector de tipo superficial es un elemento de fijación metálico que transmite los esfuerzos a través de una superficie mayor que los de tipo clavija; esto se debe porque son placas con dimensiones mayores a las de una clavija y, por supuesto, ocupará mayor superficie.

Una placa conectora puede tener forma circular o rectangular, ésta se introduce entre las superficies de las piezas de madera. Se debe considerar que para una mejor fijación, a través del conector y los elementos a unir, debe colocarse un perno que fije mejor a la unión. Los conectores pueden ser de diferentes tipos: de anillo, de placa, dentado y de madera. (Figura 1.71.)

- Placas clavo

Son también conocidas como placas dentadas y sirven para la unión de piezas de madera con espesores muy delgados que estén comprendidos de 35 a 70 mm. Su colocación es recomendada para la unión de cerchas de cubiertas o en estructuras con entramados ligeros. (Figura 1.72.)

- Placas circulares dentadas

Son elementos cilíndricos metálicos, los cuales ayudan a realizar juntas entre piezas de madera y así reducir los esfuerzos horizontales que se puedan presentar en dicha unión. (Figura 1.73.)

Su colocación precisa la realización de agujeros en las piezas donde ingresará el conector, se debe tomar también en cuenta, que el espesor

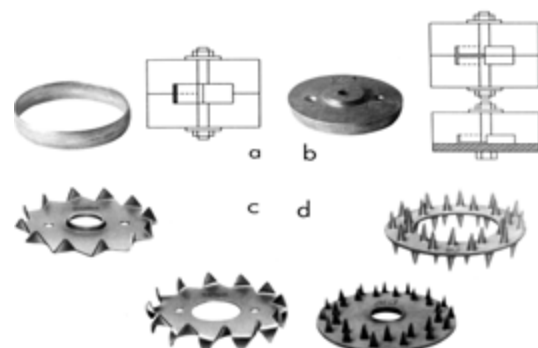


Figura 1.71. Uniones por conectores: a) de anillo, b) de placa. Dentados: c) con púas; d) con dientes troncocónicos/ Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.L., s.e., s.f. Pág.:48



Figura 1.72. Placa dentada galvanizada/ Fuente: Refuerzos de armazones empernados. <http://www.foerch.es/product.aspx?p=87885e01-7b03-4174-bfd7-5a7d11dbbe27&g=a77bc033-92c5-4097-b2cc-1f565e0d4a9e>



Figura 1.73. Placa dentada circular tipo Bulldog/ Fuente: A. Angeli. "Cálculo de estructuras de madeira". Sistemas de conexión. S.L. Octubre, 2008.

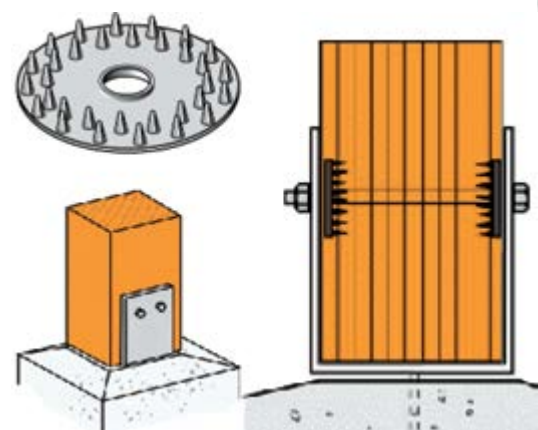


Figura 1.74. Placa dentada circular tipo Geka/ Fuente: <http://www.simpson.fr/catalogue/categorie.php?fam=27&cat=125&chglg=es>

del mismo, debe procurar una superficie totalmente plana después de ser colocada. Al momento de la unión, se recomienda el uso de prensas para garantizar el cierre de la conexión, tal como se ve en la figura 1.74.

- Anillo Appel

Este elemento al igual que una placa dentada, tiene como objetivo principal evitar el movimiento horizontal entre piezas. Su colocación básicamente se procede mediante la realización de agujeros en las piezas de madera, los cuales alojarán al anillo y este, a su vez, será atornillado a una pieza. Para mejorar el sistema de unión se debe colocar un perno que atraviesa las piezas de madera y obviamente al anillo, para luego cerrar la conexión. (Figura 1.75.)

- Conectores metálicos mixtos

La variedad de conectores que disponemos en el mercado es diversa, existen conectores para fijar vigas principales o secundarias, pares en cubiertas y entramados horizontales. (Figura 1.76.)

Todos los tipos de conectores existentes pueden ser empleados en los sistemas de unión estructural para mejorar sus resistencias ante esfuerzos incidentes. El uso de un conector específico dependerá del uso que este vaya a desempeñar. Por ejemplo, para el encuentro viga-columna se pueden utilizar platinas, ángulos o soportes galvanizados. (Figura 1.77.a)

Para conectar correas o tirantes con las vigas principales o secundarias, sean éstas de madera u hormigón, lo tradicional es realizar ensambles (uniones estructurales) los cuales transmiten sus esfuerzos a través de los cortes que se realizan a la pieza secundaria. (Figura 1.77.b) Por consiguiente, un conector metálico ayudará a una mejor distribución de los esfuerzos, además de garantizar la posición correcta de las piezas de madera. Sin embargo, la realización de conexiones mediante conectores atornillados o pernos, podrían presentar dificultades por separación entre elementos de fijación. (Figura 1.77.c)

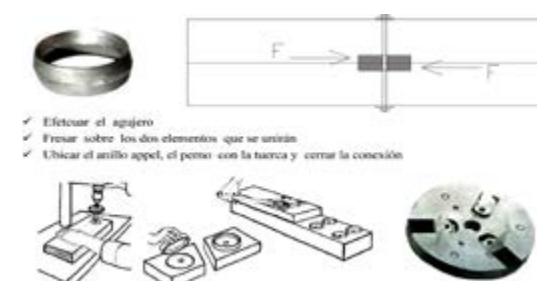


Figura 1.75. Anillo tipo appel/ Fuente: A. Angeli. "Cálculo de estructuras de madeira". Sistemas de conexión. S.L. Octubre, 2008.



Figura 1.76. Apoyo conector para vigas de madera. / Fuente: <http://www.simpson.fr/contenu/?idRub=44&idF=209>



Figura 1.77.a Placa articulada para fijar elementos concéntricos. Gran torre Lazce en Rep.Checa./ Fuente: http://jdlavicka.rajce.idnes.cz/Velky_Zvon_v_Ceskem_lese_a_rozhledna_Lazce_DO/#nova_rozhledna_u_obce_Lazce_u_Horsovskeho_Tyna_-4.JPG

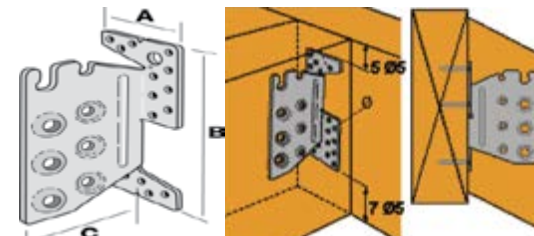


Figura 1.77.b Placa metálica para unión oculta entre vigas./ Fuente: <http://www.simpson.fr/catalogue/categorie.php?fam=31&cat=190>



Figura 1.77.c ETB. Conector mixto hembra-macho, metálico./ Fuente: A. Angeli. "Cálculo de estructuras de madeira". Sistemas de conexión. S.L. Octubre, 2008.

- Bases metálicas para pilares

Con respecto a los pilares de madera, los esfuerzos incidentes obligan y hacen necesario anclarlos a una fundición de hormigón o piso duro consolidado. De igual manera que los conectores, existen diversas opciones en bases metálicas para anclar; todo dependerá de la situación o condición de la estructura. (Figura 1.78.)

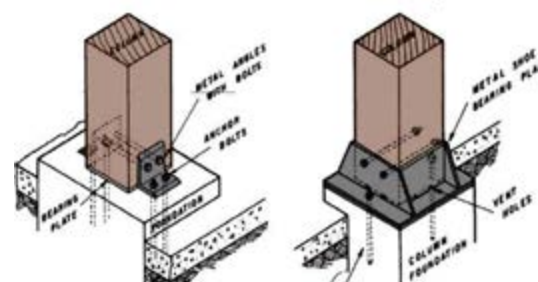


Figura 1.78. Apoyos rígidos para madera./ Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f. Pág: 52

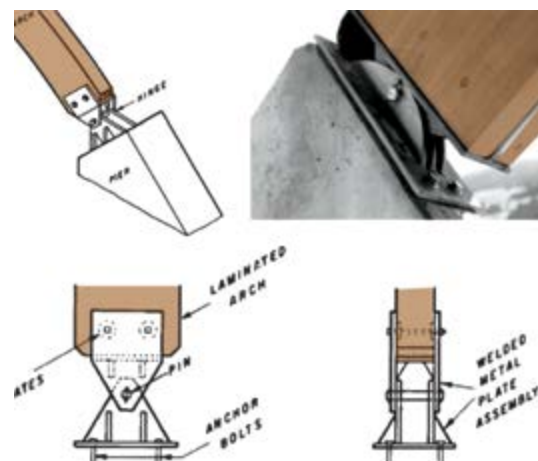


Figura 1.79. Apoyos Articulados para madera./ Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f. Pág.: 53

1.6.3. Estructuras macizas

Esta tipología presenta un intensivo uso de la madera como tal, es decir, prescinde de cortes y prefabricación compleja, salvo las realizadas en el aserrado de las piezas. Su uso hoy en día es poco común, ya que la utilización de nuevos sistemas, como el de entramados o estructuras laminares están reemplazando a las de tabique lleno, debido a la ligereza que éstos presentan frente a las pesadas formas de un elemento macizo.

El hecho de emplear madera maciza para una estructura reúne y brinda muchas ventajas en lo ambiental. Su uso aumenta sus principales propiedades, como son: las acústicas, térmicas y ecológicas. Sin embargo, estructuralmente no presenta una solución eficaz, ya que por la disposición de las piezas, no responden a esfuerzos como si lo hacen las piezas verticales o con la fibra perpendicular al piso. De otra parte, su condición de conicidad, a lo largo de los elementos, hacen un tanto difícil que su unión sea eficaz.

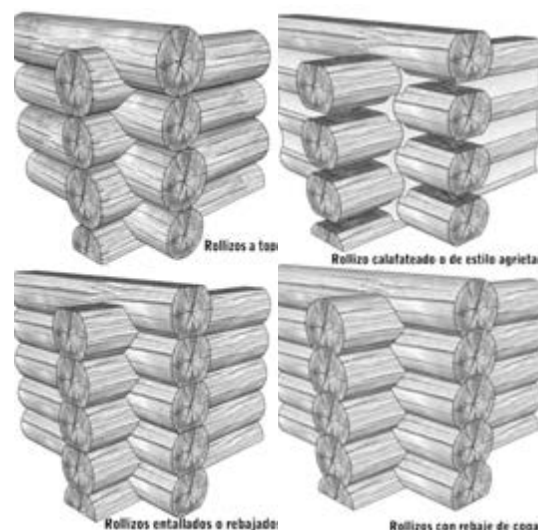


Figura 1.80. Tabiques de madera en rollizo. / Fuente: M. Panes Roco. "Sistema constructivo de tabique lleno en Madera con rollizos horizontales elaborados industrialmente". Universidad del Bio Bio, Chile, Concepción.2009.

Gracias a la industrialización y a los avances tecnológicos, el sistema de tabique lleno puede ser mejorado para así responder ante falencias que pudieran haber tenido los primeros sistemas. Por ejemplo, al momento de colocar cada tronco uno sobre otro, se van amarrado los elementos en su interior con fierros verticales de diámetro de 8 mm, previamente fundidos al piso, el cual deberá ser impermeabilizado en las partes donde van los muros o tabiques llenos. Además, se debe ir sellando, longitudinalmente, el encuentro entre éstos con espuma de poliuretano, como protección a la infiltración de aire del exterior y salida de calor del interior. (Figura 1.80.)

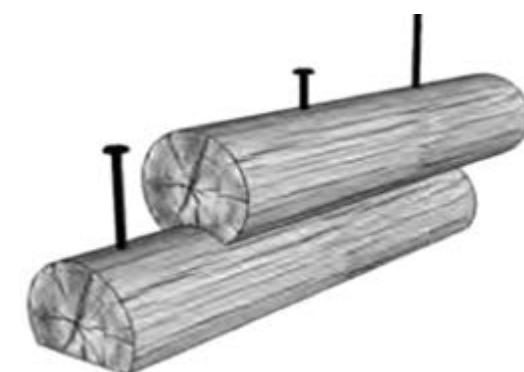
Dentro del campo constructivo de estructuras macizas, podemos encontrar dos alternativas en cuanto a su estética: tabiques de tronco rollizo y tabiques con troncos aserrados. El tronco rollizo es más fácil y ha sido el más comúnmente utilizado, ya que antiguamente sólo se retiraba ramas y cortezas y se lo colocaba directamente; mientras tanto, como su nombre lo indica, un tabique de madera aserrada es el que utiliza elementos escuadrados y con forma ortogonal.

Con respecto a las uniones entre elementos, de igual manera se consideran algunas opciones, entre ellas tenemos: las que son unidas a tope, con caja y espiga, o con canal semicircular. (Figura 1.81.)

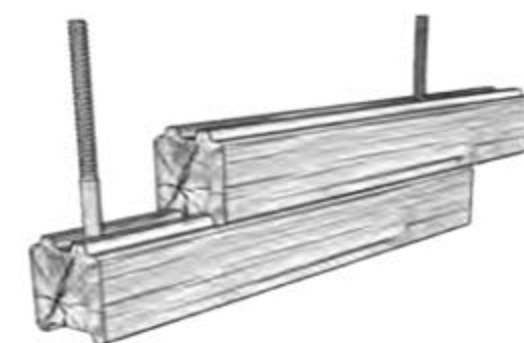
1.6.3.1. Tipologías constructivas

Actualmente existen diversas formas de construir en rollizos, de manera artesanal e industrializada. La primera tiene como principio básico el labrar la madera y mantener viva la tradición del sistema constructivo original. La segunda posee ventajas tecnológicas que mejoran las soluciones de los detalles constructivos, dando al sistema un acabado final de mayor calidad. A continuación, se clasifican algunas tipologías constructivas del sistema de rollizo horizontal, según:

a. Unión mediante elementos de fijación:

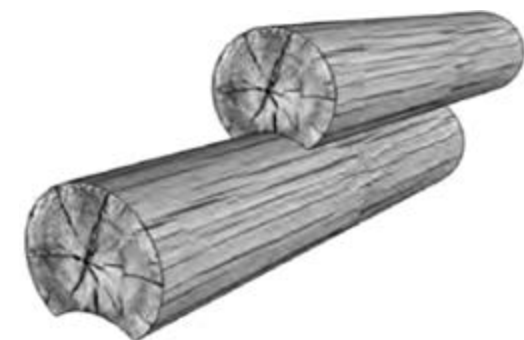


- Fijación mediante clavijas (Figura 1.81.a)

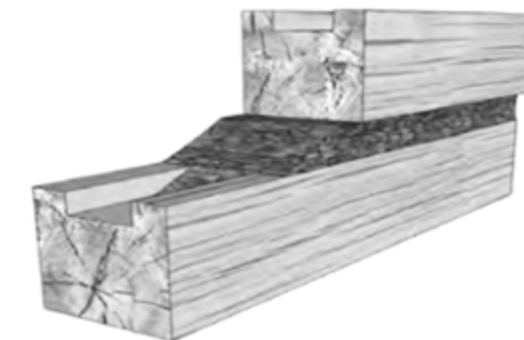


- Fijación mediante pasadores (Figura 1.81.b)

b. Uniones longitudinales:



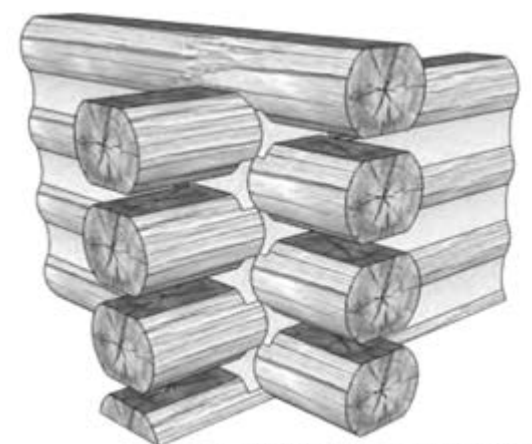
- Simplemente apoyados (Figura 1.81.c)



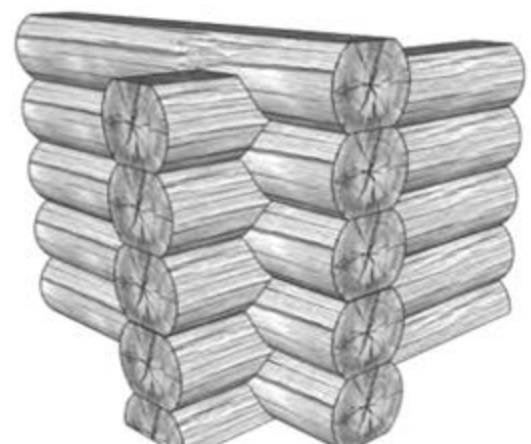
- Por medio de áridos (Figura 1.81.d)

Figura 1.81. Tipologías constructivas en madera en rollizo. / Fuente: M. Panes Roco. "Sistema constructivo de tabique lleno en Madera con rollizos horizontales elaborados industrialmente". Universidad del Bio Bio, Chile, Concepción.2009.

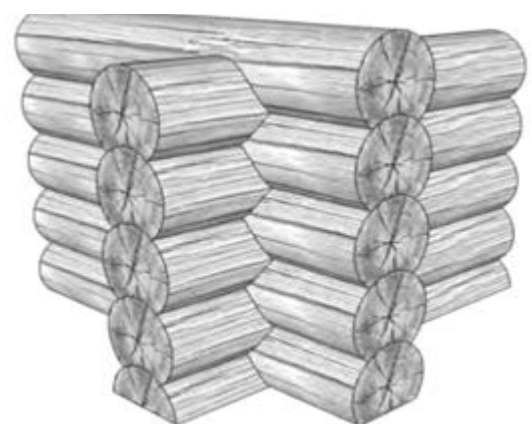
c. Unión de esquinas:



(Figura 1.82.a)



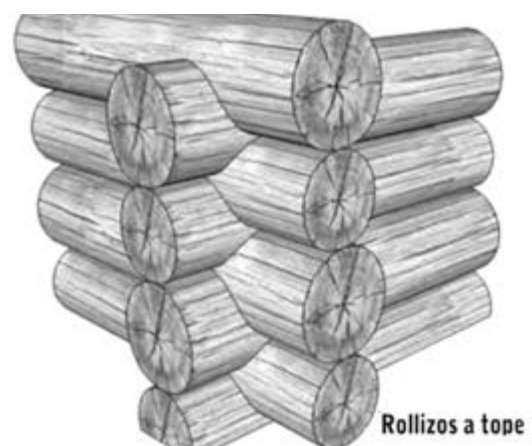
(Figura 1.82.d)



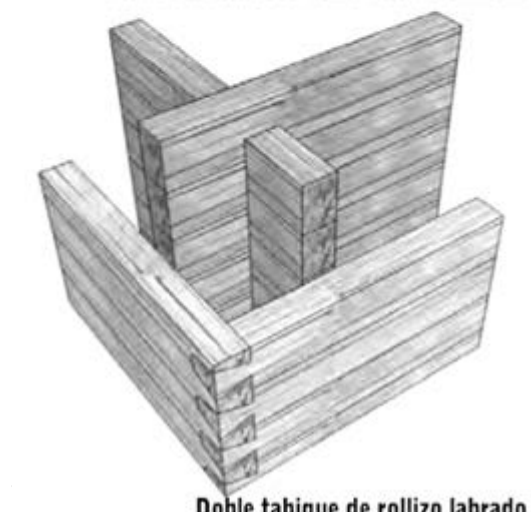
(Figura 1.82.b)



Rollizo labrado con unión cola de milano



(Figura 1.82.c)



(Figura 1.82.e)

Figuras 1.82. Uniones más comunes para madera aserrada en rolizo.
/ Fuente: M. Panes Roco, "Sistema constructivo de tabique lleno en Madera con rollizos horizontales elaborados industrialmente". Universidad del Bio Bio, Chile, Concepción.2009.

1.6.3.2. Ejemplos construidos



Figura 1.83. Iglesia Vieja de Petäjävesi. Fuente: <http://www.panoramio.com/photo/46118480>

Iglesia Vieja de Petäjävesi: la arquitectura en madera del norte de Europa tiene un relevante exponente en esta iglesia luterana, construida sobre 1764. Como homenaje a estas edificaciones fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1994.



Figura 1.84. Casa tipo del norte de Europa. Fuente: <http://www.casamadera.info/historia/>

Vivienda tipo, construida en el 700 a.c. en el sur de Europa. Las casas se construían en pocos días y se resolvían, con materiales normalizados, de montaje simple. Debido a su éxito, el sistema ha permanecido inalterable hasta nuestros días.



Figura 1.85. Cabaña escocesa. Fuente: <http://www.tsarina-imperial-dacha.com/>

1.6.4. Estructuras con entramados

Este sistema involucra a elementos relativamente pequeños con respecto a su sección transversal, pero muy esbeltos longitudinalmente. Su estructuración es simple ya que están dispuestos a cortas distancias entre ellos. Generalmente, presentan espesores similares pero pueden variar en ancho y longitud. Con ellos se puede resolver pisos, cubiertas, muros, entrepisos, pero siempre arriostrados entre sí.

El sistema de entramados, como ya se mencionó, comprende elementos unidos entre sí, los cuales conforman pórticos. La unificación de todos los pórticos forma volúmenes arriostrados que resulta de una rigidez, donde las cargas se transmiten en forma repartida. Existen dos variantes principales dentro del sistema de entramados: el sistema Plataforma y el sistema de entramado global.

- Ventajas y desventajas del sistema entramado

En lo concerniente a la construcción de viviendas con el sistema de entramados, puede ofrecer muchas más ventajas que desventajas, a continuación se enumera las ventajas que conlleva la utilización de este sistema:

1. Menores costos de construcción, puede significar entre un 5 a 15% menor con relación a la construcción tradicional de ladrillo.
2. Mejores condiciones de confort, ya que es un buen aislante térmico y acústico.
3. Una gran flexibilidad al momento de diseño.
4. Alta productividad en la mano de obra.
5. Bajo nivel de mecanización, en fabricación y montaje.
6. Buena durabilidad, si se tiene en cuenta la

preservación por diseño.

7. El tiempo de construcción es corto, pudiendo quedar terminada una vivienda en ocho semanas.
8. No requiere mano de obra mayormente calificada.

A pesar de que el sistema brinda numerosas ventajas en varios ámbitos para la construcción, existen algunas desventajas en su uso, pues naturalmente el manejo del material puede presentar complicaciones, pero sin mayores sucesos:

1. Dependiendo del diseño, el sistema plataforma puede requerir gran cantidad de detalles constructivos para un adecuado funcionamiento en la construcción.
2. En vista de que los entramados utilizan piezas relativamente pequeñas, se podría hacer presente variaciones en las dimensiones de sus componentes.
3. Si no existe una previa coordinación modular en su fabricación, este sistema puede producir un mayor desperdicio y, por ende, un gasto superior a otros sistemas.

1.6.4.1. Sistema de Entramado Plataforma

Es el método más utilizado en la construcción de viviendas con estructura en madera; sin embargo, en nuestro medio ha sido muy poco desarrollado.

Este sistema consiste en la configuración de tabiques soportantes, los cuales deben resistir cargas estáticas y dinámicas producidas por el propio peso, cubiertas, pisos, viento o sismos, etc.

Su principal ventaja es que cada piso (primero y segundo nivel) permite la construcción independiente de los tabiques soportantes y auto soportante, a la vez provee de una plataforma o superficie de trabajo, sobre la cual se pueden armar y levantar.

Los tabiques están formados por elementos

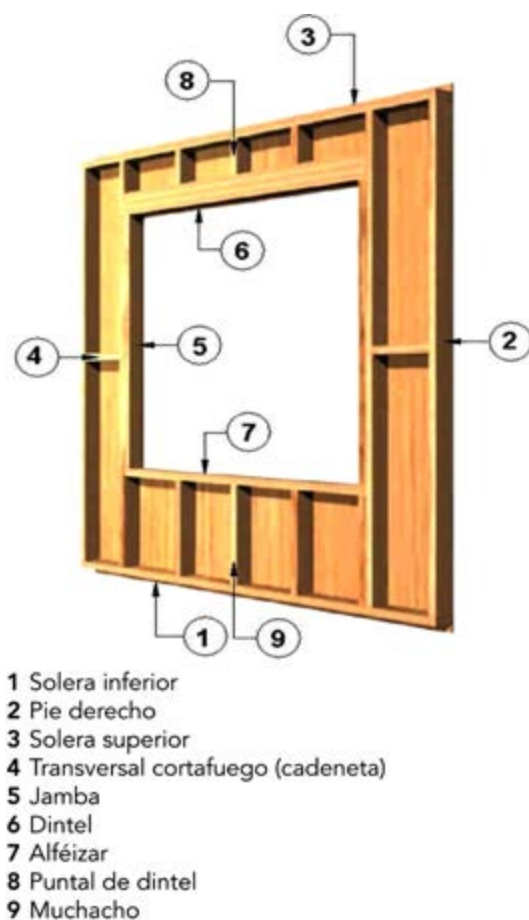


Figura 1.86. Tabique de madera, Sistema Plataforma. / Fuente: CORMA(Corporación chilena de la madera). "La construcción de vivienda de madera". Chile. S.f.

horizontales y verticales, calvados entre sí. Entre los elementos más importantes tenemos a las piezas horizontales conocidas como riostras o soleras y los elementos verticales llamados pies derechos; todos estos unidos mediante clavos o también se puede empelar sistemas de ensamblaje según el nivel de unión que se desee alcanzar. Obviamente un tabique de sistema plataforma posee un entramado con elementos que lo configuran. (Figura 1.86.)

Para este sistema el piso debe ser construido a modo de una plataforma, sobre una cimentación con zapatas o corrida, pero con una estricta impermeabilización, para evitar que las piezas

se pudran por la humedad. (Figura 1.87.) Los tabiques, a su vez, reciben a la plataforma del piso superior o directamente a la cubierta. Para recubrir los tabiques se utiliza tableros estructurales, ya sean éstos de tipo contrachapado (plywood) o de fibras orientadas (OSB), clavadas a los pies derechos. Adicionalmente a la formación del muro, se debe colocar al interior de los tabiques, material de aislante térmico para mejorar las condiciones térmicas de la vivienda, entre estos tenemos: lana de vidrio o poliestireno expandido.

1.6.4.2. Sistema de entramado global o continuo

Este sistema constructivo contempla la realización de pies derechos directos, desde el primer piso hasta la cubierta; es decir, los elementos verticales conforman tabiques estructurales perimetrales e interiores continuos.

Las vigas del primer piso se fijan al pie derecho por el costado de éste, y se apoyan sobre la solera inferior del piso. Las vigas del entepiso también se fijan a los pies derechos por el costado y se apoyan sobre una viga, la cual está encastrada y clavada a los pies derechos. Los sistemas de unión pueden ser considerados para la fijación de las vigas. La unión de piezas horizontales con los elementos verticales permite una conformación de un marco, cuyas uniones presentan cierto grado de empotramiento y, de igual manera, pueden ser mejoradas con conectores metálicos.

La secuencia constructiva, que por lo general se sigue, tiene la ventaja que después de fijar los entramados estructurales se puede colocar la cubierta, lo que genera un área protegida de lluvia o sol para trabajar en casi todas las etapas del proceso constructivo y terminaciones. (Figura 1.88.)

Este sistema presenta algunas desventajas para poder considerarlo como un método común. Es poco conocido y difundido en nuestro medio.

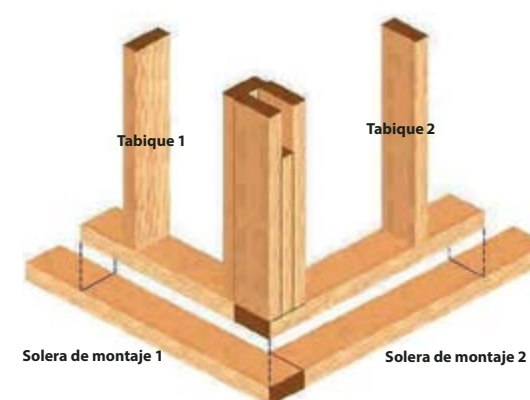


Figura 1.87. Sistema Plataforma, sistema de anclaje al piso. / Fuente: CORMA(Corporación chilena de la madera). "La construcción de vivienda de madera". Chile. S.f.

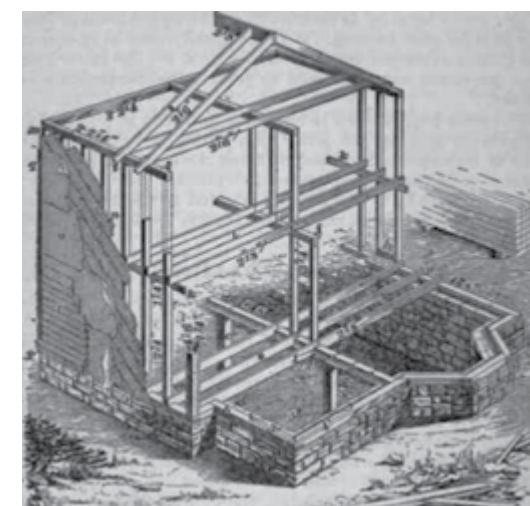


Figura 1.88. Construcción con sistema Balloon Frame. / Fuente: http://chestofbooks.com/architecture/Building-Trades-Pocketbook/Balloon-Framing.html#_UblrEAz3ol

Su prefabricación no es factible desde el punto de vista del sistema americano, tanto por el tamaño como por la fabricación de sus componentes.

En cuanto a los detalles constructivos no son convenientes cuando se utiliza madera húmeda, ya que por la dimensión de las piezas éstas pueden cambiar de forma, al momento de perder humedad, y pueden perder precisión en sus juntas especialmente en sus uniones. Sin embargo, este sistema brinda la posibilidad de realizar un tendido de

redes eléctricas y sanitarias muy fácil, así como la colocación de aislamiento. (Figura 1.89.)

1.6.4.3. Sistema Poste y Viga

El sistema poste y viga ha sido por muchos años la tipología principal al momento de construir. Como su nombre lo indica, está constituido por vigas y columnas que se disponen a modo de pórticos estructurales. De acuerdo con los conocimientos ancestrales y empíricos, el espaciado entre éstos han mantenido una constante aproximada de 1.5 m, si están unidos por entablonados; o alrededor de 3.00 m, si van unidos con viguetas, más tiras y entablado. Estructuralmente, el sistema poste y viga transmite las cargas al nivel inferior inmediato de manera concentrada, es decir, sus fuerzas se transmiten puntualmente, ya que los postes o columnas son sus apoyos únicos.

En nuestro medio, esta manera de construir ha sido un tanto mezclada con otros materiales, en especial con la tierra, por ejemplo, un claro ejemplo de este método es el sistema de bahareque y, de manera muy sutil, el sistema de bloques de adobe, que si bien es cierto sus muros son portantes. Sin embargo, hay casos en los cuales sólo han sido utilizados como relleno de tabiques. Por lo tanto, el sistema poste y viga puede ser utilizado tanto para construcciones livianas de un piso, como para pesadas de más de dos pisos. (Figura 1.90.)

Con respecto a la mano de obra, el sistema puede economizarla frente a una construcción de ladrillo o bloque. Generalmente, no requiere de dinteles para los vanos de puertas y ventanas, ya que éstas son colocadas entre las columnas y pueden tener toda la dimensión del vano. El terminado del entrepiso y cubierta no necesita de cielo raso total, pues sus vigas pueden quedar vistas al interior. La gran ventaja que se tiene es la estética que brinda la madera. En cuanto a la implantación, ésta puede ser realizada en cualquier tipo de terreno,

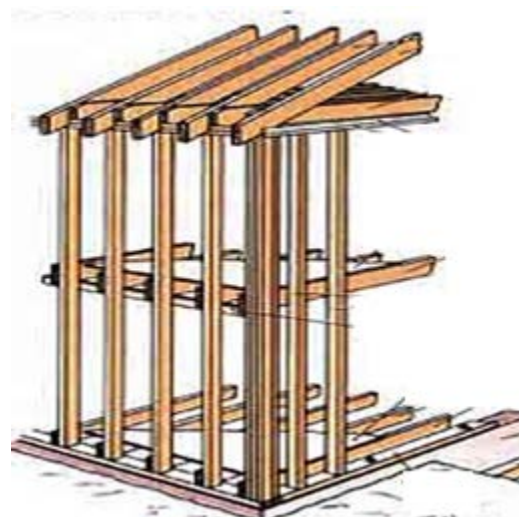


Figura 1.89. Detalle del sistema continuo o Baloon Framing. / Fuente: CORMA(Corporación chilena de la madera). "La construcción de vivienda de madera". Chile. S.f.



Figura 1.90. Pórtico típico de una vivienda de adobe con estructura de madera. Casa en Susudel-Azuay / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 1.91. Ruinas de una vivienda vernacular con el sistema poste y viga. Cumbe-Azuay / Fuente: Daniel Enríquez M.

sobre todo en los terrenos con pendientes pronunciadas o anegadizos. (Figura 1.91.)

El adecuado diseño de este sistema evita complicaciones al momento de erigir una construcción, por ejemplo, la estabilidad lateral en muros puede ser mejorada con elementos diagonales de amarre. El relleno de tabiques puede ser realizado de varias maneras o también se puede obtener espacios abiertos o libres, debido a las grandes luces que puede guardar el sistema. Sin embargo, el tener grandes vanos dificulta ocultar el tendido de redes de instalaciones, para ello se recomienda el uso de ductos.

Al momento de emplear este sistema, podemos encontrar y aprovechar las ventajas que brinda el uso del sistema poste y viga:

1. En cuanto a lo estético, el sistema poste y viga contempla acabados confortables y naturales quedan mayor valor a una vivienda.
2. Permite libertad al momento de diseñar, debido a las aéreas libres generadas por los pórticos interiores.
3. Velocidad en la construcción, ahorro en mano de obra, siempre y cuando se apliquen detalles arquitectónicos adecuados.
4. Reducción en alturas de piso a piso; esto hace posible el ahorro en revestimientos interiores y exteriores, así como en la fabricación de escaleras.

En cuanto a las desventajas que presenta el sistema poste y viga pueden ser consideradas relativamente fáciles de resolver:

1. Debido a que las fuerzas que se transmiten entre columna y viga son puntuales, la sobrecarga puede alterar el piso que está diseñado para soportar cargas uniformes. Cuando esto sucede, es necesario reforzar

el piso por debajo para transmitir las cargas a las vigas. Este procedimiento debe ser tratado, cuidadosamente, desde el punto de vista estético, ya que el reforzamiento puede alterar el diseño de la edificación.

2. El aislamiento térmico puede ser solventado con los espesores dados; sin embargo, el implantar una vivienda en lugares de extremo frío hace necesario el uso de aislantes más eficaces y esto puede encarecer la obra.
3. La centralización de los sistemas de distribución eléctrica y sanitaria pueden presentar problemas, especialmente, en los entrepisos, debido a la reducida altura que existe.
4. Se debe tener mucho cuidado al momento de trasladar, manipular y montar las piezas pues su nivel de acabado debe ser alto. Así mismo, debe tratarse la madera para evitar descoloraciones por el clima al que está expuesto.

1.6.5. Estructuras laminares

La Madera laminar es un componente estructural industrializado y está compuesta por piezas laminas escuadradas unidas entre sí mediante adhesivos de alta resistencia; sin embargo, la madera laminada, a pesar de su poco desarrollo en el campo de la construcción nacional, es considerada como un material versátil y con la capacidad de formar elementos libres de limitaciones como: su sección transversal, longitud o diseño.

1.6.5.1. Introducción a la madera laminar

El uso de la madera laminada se remonta a

muchos años atrás (siglo IX), cuando con poco conocimiento científico se la empleaba en la carpintería y, esporádicamente, en la construcción. Sin embargo, a inicios del siglo XX, de la mano del carpintero alemán Friedrich Otto, aparece como un material propio para la construcción, ya que este artesano obtiene su primera patente para vigas rectas en 1901, obteniendo resultados excelentes con respecto a la resistencia, y superiores a los de la madera natural.

El enorme desarrollo y avance que tuvieron las estructuras laminares radicó en dos situaciones fundamentales. La primera obedeció a la estrategia que utilizó el sistema laminar, disponiendo de piezas pequeñas y escuadradas, las cuales, tienen alta disponibilidad en el mercado maderero, con lo cual se pueden fabricar piezas de toda dimensión. La segunda, obedeció a las restricciones que existieron para el acero durante la Segunda Guerra Mundial, esto hizo que la madera constituya una alternativa óptima para la construcción de edificios, estructuras de gran tamaño, como para almacenar aviones, entre otros. Se estima que a mediados del siglo XX, se logró ahorrar alrededor de 360.000 toneladas de acero estructural y, a cambio, se utilizó madera laminada.

Las dimensiones de las piezas laminares han sido objeto de varias consideraciones a lo largo de su uso. Sin embargo, por razones de secado y economía fundamentalmente se ha establecido que el espesor adecuado de las láminas debe estar entre 20 y 50mm. Si las láminas están dispuestas de forma paralela al plano de flexión, la laminación es considerada como horizontal, y si las piezas están colocadas de forma perpendicular al mismo plano de flexión, se dice que la laminación es vertical. La altura puede variar entre 20 y 200 cm, según indique el diseño estructural para las vigas. (Figura 1.92.)

Las uniones entre piezas para formar un elemento laminado, por lo general, se las realiza mediante resinas de alta resistencia, tanto para interiores como para exteriores.

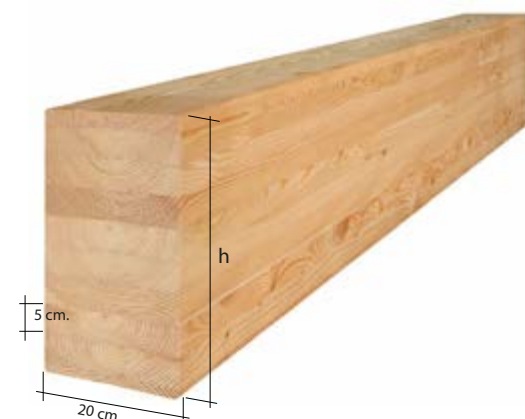


Figura 1.92. Viga de madera laminada - Pino insignie / Fuente: Viga de madera laminada encolada. <http://www.archiexpo.es/prod/holzwerk-gebrschneider/vigas-de-madera-laminada-encolada-55688-147278.html>



Figura 1.93. Estructura de madera laminada. / Fuente: PABST. <http://www.pabst-holz.com/es/productos/madera-laminada>



Figura 1.94. Elaboración de una viga recta con madera laminada. Laminados villapol-España/ Fuente: <http://www.cismadeira.com/castelan/proyectos/perfiles.htm>

Cabe recordar que, las uniones pueden ser reforzadas mediante clavos o pernos, lo cual brindará mayor rigidez al sistema. (Figura 1.93.) Entre los adhesivos más típicos para la fabricación de madera laminada podemos encontrar resinas de formaldehído o metanal, un químico altamente volátil e inflamable, cuya eficacia, ante situaciones climáticas e ignifugas, son muy elevadas. Sin embargo, la utilización de esta resina ha generado mucha controversia por los componentes químicos emitidos, los cuales tienen incidencia negativa en el medio ambiente; por tal motivo, se han generado variables a este pegante, las cuales son menos agresivas con el ambiente. (Figura 1.94.)

Independientemente del tipo de productos que se utilice como adhesivo, el sistema nos da libertad para utilizar varios tipos de madera en una misma pieza, según requerimientos estructurales; es decir, se puede utilizar madera dura y de alta densidad en los extremos del elemento y hacia el interior, madera menos densa o de menor calidad, disminuyendo, además, costos en el producto.

En cuanto a los empalmes entre elementos laminares, el sistema más utilizado por las industrias de madera laminada es el finger-joint o también conocido como unión dentada, que constituye un medio de gran potencial para mejorar el rendimiento del elemento laminar. La unión está formada por una serie de dientes trapezoidales equidistantes dispuestos en los extremos de cada elemento. Es necesario indicar que la madera laminada, desde siempre, ha tenido una alta aplicación y aceptación en construcciones de sociedades desarrolladas; por este motivo, la introducción de este sistema hacia nuestro medio ha sido mínima y poco próspera, a pesar del escaso conocimiento y la falta de maquinaria para su elaboración. Se expone en la Figura 1.95. los dos métodos de unión para elementos longitudinales, es decir, un ensamble mediante denticúlos.

Normalmente, para cuestiones de cálculos y aproximaciones podemos destacar que la madera

Sistema de unión entre vigas

de madera laminada:

a. Denticúlos rectos

b. Denticúlos piramidales



Figura 1.95. Sistema de unión Finger-Joint./ Fuente: J. Aucancela. "Madera Laminada". Abril 2013. <http://es.scribd.com/doc/130215123/madera-laminada-pptx>

laminada por ser fabricada con maderas de peso específico alto y bajo, su peso volumétrico es de 500kg/m³. Si consideramos que el peso específico de una estructura de eucalipto puede fácilmente superar los 900 kg/m³, un conjunto laminado adquirirá una ventaja más con respecto a su peso, puesto que a menor peso, mejora sus condiciones de trabajabilidad e instalación en obra. Otro detalle a tomar en cuenta es su contenido de humedad, pues las piezas deben ser utilizadas con un contenido de humedad inferior al 15%.

Un ejemplo de la favorable liviandad de la madera laminada, la podemos observar en el puente peatonal de la comunidad de Zallapar, en Chile.



Figura 1.96.a Puente de Zapallar. Chile-Petorca / Fuente:<http://www.plataformaarquitectura.cl/2009/01/19/puente-peatonal-en-zapallar-enrique-browne/>

La construcción supera los 30 metros de luz y, además, funciona como un transportador de agua y energía mediante ductos colocados en su interior. (Figura 1.96.a)

En cuanto a su estructura, el puente se encuentra soportado por una viga madre en su parte inferior que trabaja a flexión; mientras, que los elementos interiores trabajan a compresión y flexión. (Figura 1.96.b)

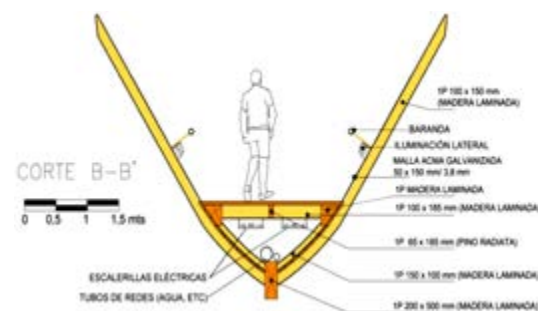


Figura 1.96.b Estructura del puente, sección constructiva. / Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2009/01/19/puente-peatonal-en-zapallar-enrique-browne/>

1.6.5.2. Ventajas de la madera laminada

La madera laminada a más de sus características naturales ofrece muchas ventajas con respecto a otro tipo de estructuras como las de acero u hormigón, tales como:

- Liviandad

Se puede lograr elementos de gran tamaño y pesos muy reducidos, por lo cual pueden ser levantadas y/o montadas a bajo costo. Además, son elementos plásticos y de apariencias únicas.

- Flexibilidad

Se pueden conformar estructuras con diferentes formas y no necesariamente rectas. La posibilidad de curvar las láminas individuales, previas a su unión, permite la fabricación de vigas atractivas estéticamente. Estructuralmente, hace posible también la imposición de la contra flecha en las vigas, es decir, contrarresta las deformaciones producidas por su propio peso.

Como resultado de la producción de láminas continuas, las dimensiones no estarían limitadas en su largo y ancho. Es así que, en países con un gran desarrollo en la construcción con estructuras laminadas han llegado a producir, en casos extremos, vigas de madera laminada de hasta 2.0 m y largos de 20 y 30m. El principal problema de tener vigas con dimensiones muy grandes es el traslado de éstas, ya que su fabricación no puede ser realizada en obra.

- Resistencia

Las vigas rectas laminadas presentan una mayor resistencia que las vigas de madera aserrada como consecuencia del proceso productivo; es decir, todas las imperfecciones que tiene una pieza de madera son: nudos, rajaduras o fisuras que se distribuyen de forma más pareja, dentro del volumen del elemento estructural, lo que nos da como resultado un material más homogéneo y resistente.

Una disposición estratégica de las láminas hace posible que la viga o elemento laminar responda, adecuadamente, ante esfuerzos o cargas incidentes. Por ejemplo, para una viga flexionada, se debería ubicar láminas de madera dura y resistente a los extremos, donde se generan tensiones altas; mientras tanto, las láminas de menor resistencia y calidad irán al interior de la viga. Esto permite economizar el uso de la madera disponible.

- Contenido de Humedad

El contenido de humedad adecuado para las piezas de madera tiene, aproximadamente, de 10 a 15%, ya que dentro de este rango la madera llega a un equilibrio y consecuentemente el riesgo de deformaciones que se producen queda prácticamente eliminado.

Lo recomendable es realizar el secado de las láminas en cámaras especiales. Debido a las

secciones de las piezas que no superar los 50mm, el proceso es más rápido y fácil. Adicionalmente, el secado de las láminas y el proceso de fabricación permiten que las vigas de madera laminada lleguen a obtener dimensiones muy precisas con respecto a los diseños estructurales que se realicen.

- Producción

El proceso de fabricación de la madera laminada facilita la industrialización en la producción y, por ende, la prefabricación. No se debe olvidar que el sistema de laminación puede presentar costos muy elevados dentro de nuestro medio, ya que no se ha desarrollado, totalmente, esta metodología de construcción.

- Resistencia al fuego

Las estructuras laminadas poseen una alta resistencia al fuego con respecto a las estructuras de madera laminada. La madera se quema más lentamente y resiste a la penetración del calor por la cantidad de capas que contiene. Esto no significa que la madera no sea combustible, de hecho, dependiendo de la velocidad de propagación de las llamas y el volumen de la mismas, una estructura podrá debilitarse en un tiempo determinado, si no es controlada rápidamente; sin embargo, la madera laminada presenta un avance de combustión muy lento el cual está al rededor de 0,6 mm/min, inferior a lo que la madera aserrada puede resistir.

- Resina adhesiva

El adhesivo permite el uso de tablas de diferentes tamaños ya que, unidas eficientemente, pueden llegar a conformar piezas estructurales de cualquier espesor, ancho, largo y forma.

1.6.5.3. Desventajas de la madera laminada

En general, el sistema de madera laminada presenta un panorama favorable para la construcción, en especial para grandes edificaciones, debido a la alta resistencia, resultado de las estructuras laminadas; sin embargo, presenta algunas desventajas ante los otros sistemas contractivos

(acero y hormigón), descritos a continuación:

- Comparada con la madera sin aserrar, los elementos laminados son más costosos, especialmente en vigas rectas. Pero, debido a las exigencias medio ambientales que ahora existen y en especial para el bosque nativo, esta situación se ha ido aminorando en especial para estructuras mayores. El factor económico, al momento de la producción de madera laminada, comprende tres rubros: resinas adhesivas, mano de obra y madera, siendo esta última la más costosa, seguida por la mano de obra y, finalmente, el adhesivo.

- Durante su producción se produce mucho desperdicio de madera y resinas, debido a los procesos de cepillado y terminaciones de los elementos.

- Para su fabricación es necesario equipos especializados y costosos tales como: cámara de secado, sierra cinta, cepilladora, prensadora, entre otras, además de técnicas especiales para su unión y precisión, las cuales no podrían realizarse, si no se tiene mano de obra especializada.

- No se puede fabricarlos en obra, ya que su elaboración se la realiza en plantas industriales, y en los casos de elementos de gran longitud y exageradas formas, existen dificultades de manipulación, embarque y transporte, lo que incide en el costo final de la madera laminada.

- El uso del adhesivo debe ser específico, dependiendo del uso que se va a dar al elemento; es decir, las resinas que se requieran para elementos expuestos al exterior serán más costosas que las de uso interior. Para el caso de nuestro país, las resinas para exterior son muy escasas y se pueden obtener mediante importación.

- La producción de vigas curvas requiere

de equipos guías y dispositivos prensos para cada tipo de forma nueva, por lo que su tiempo de elaboración resulta mayor que el correspondiente a vigas rectas.

1.6.5.4. Ejemplos construidos

- GIMNASIO RÉGIS RACINE

El gimnasio Regis Racine se encuentra en Drancy, al noreste de París. El programa de este edificio cuenta con una sala de deportes bajo techo de 22 metros de largo y 44 metros de ancho. Fue diseñado con un sistema



Figura 1.97.a Cubierta con vigas de forma irregular. / Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2012/12/29/gimnasio-regis-racine-atelier-darchitecture-alexandre-dreysse/>



Figura 1.97.b Vigas curvas de madera laminada. Acceso al gimnasio / Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2012/12/29/gimnasio-regis-racine-atelier-darchitecture-alexandre-dreysse/>



Figura 1.97.c Cancha cubierta del gimnasio Regis Racine. Porticos cruzados. / Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2012/12/29/gimnasio-regis-racine-atelier-darchitecture-alexandre-dreysse/>

de pórticos cruzados entre sí con madera laminada y conectores metálicos. (Figuras 1.97.)

- Edificaciones para espacios deportivos

A través del sistema laminar, el uso de elementos de gran escuadría ha hecho posible la construcción de estructuras con grandes luces; ideales para cubrir superficies que demandan áreas considerables, como es el caso de: polideportivos, piscinas, edificaciones con alta concurrencia de gente, inclusive, se ha aprovechado su utilización, en templos religiosos como iglesias. A continuación se describe de manera gráfica, los principales ejemplos construidos:



Figura 1.98. Polideportivo en Molina de Segura, Murcia, España. Vigas curvas biarticuladas de sección variable. Luz libre: 38 metros. Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f.



Figura 1.99. Centro comercial en Álava, España. Arcos biarticulados. Luz: 15 metros. Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f.



Figura 1.100. Complejo termal Daymán, Salto, Uruguay. Pórticos triarticulados. Luz libre: 18 metros. / Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f.



Figura 1.101. Iglesia de Santa María del Redentor, Roma, Italia. Vigas curvas biarticuladas. Luz máxima: 28 metros. / Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f.

- Construcción de puentes

Sin duda alguna, el obtener elementos de gran resistencia y tamaño como, los elementos laminares, brindó un gran aporte, en el campo ingenieril, de construcción de puentes, logrando levantar plataformas con luces de hasta 30m y con acabados estéticamente, inigualables para otros materiales. A continuación se detalla algunos ejemplos de puentes edificados:



Figura 1.102. Puente en Ciudad Real, España. Luz: 33 metros. / Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f.



Figura 1.103. Puente, España. Luz: 25 metros. / Fuente: EDEM. "Tecnologías De La Madera Aplicadas Al Diseño De Estructuras". S.I.,s.e.,s.f.

01

Referentes bibliográficos y linkografía

1. E. Torroja. "Razón y ser de los tipos estructurales". 2a edición, Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento. Madrid, 1960.
2. F. Robles Fernandez-Villegas y R. Echineque. "Estructuras de Madera". editorial Limusa. México D.F., 1983.
3. CORMA (Corporación chilena de la madera). "La construcción de vivienda de madera". Centro de Transferencia tecnológica. Chile: S.f.
4. Junta del acuerdo de Cartagena(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982.
5. Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). "Construcción con Madera". Quito-Ecuador: 2011.
6. Enrique Zanni. "Patología de la Madera": degradación y rehabilitación de estructuras de madera. Argentina-Córdoba:editorial brujas,2004.
7. Rubén Ananías. "Física de la Madera". Universidad del Bio Bio. Concepción-Chile.
8. Instituto de Enseñanza Secundaria Azcona. "Técnicas para unir piezas de madera". Almería-España. S.f.
9. M. Herrero y otros. "Construcción con Madera", uniones tradicionales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España. S.f.
10. EDEM. "Tecnologías de la Madera Aplicadas al diseño de Estructuras". S.l., s.e., s.f.
11. Ana Loreto y otros. "La madera como material de construcción". La madera una línea de Investigación. Venezuela:2000.
12. M. Panes Roco. "Sistema constructivo de tabique lleno en Madera con rollos horizontales elaborados industrialmente". Universidad del Bio Bio, Concepción-Chile:2009.
13. Pazán Claudia. " Catedral Vieja, historias que se construyen".Diario El Tiempo. 04 abril. 2012
14. Barragán, Antonio. "RESTAURAMADERA". Proyecto de Investigación. Cuenca. S.F.
15. Urbán Brotóns, Pascual. " Construcción de Estructuras de Madera". Editorial Club Universitario. Alicante-España.
16. Arriaga, Francisco. "Eficacia estructural y energética de la madera como material de la construcción". AITIM(Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera). Madrid-España.
17. Popol Vuh. "Madera Aserrada Estructural". S.l., S.f. Enero 2013. http://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/actividades/act_paginas/libro/35%20Madera%20aserrada%20estructural.pdf
18. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria."Comportamiento al fuego de la madera y sus estructuras". Marzo 2013. <http://estructuralia.wordpress.com/2011/12/23/destructores-de-la-madera-agentes-aboticos/>
19. M. Chan Martín. "Los Defectos de la Madera Aserrada". Ingeniería Revista Académica, enero-abril, 2002. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida-México. <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen6/losdefectos.pdf>
20. A. Angeli. "Cálculo de estructuras de madeira". Sistemas de conexión. S.l. Octubre 2008. <http://www.cismadeira.com/construccion/downloads/11.unionesmet.pdf>
21. R. Martinez y otros. "La madera como material de construcción". Febrero 2013. <http://www.herrera.unt.edu.ar>
22. Laboratorio de Investigación de Materiales Universidad de Santiago. "Madera Laminada". Abril 2013. http://web.usach.cl/~lab_made/MaderaLaminada1.htm
23. Historia de las casas de Madera. 27 Enero. 2013 <http://www.maderlandia.com/historia.php?ancho=1366&altura=768>
24. ENSAMBLES, EMPALMES y ACOPLAMIENTOS. <http://dc303.4shared.com/doc/A-BAFAU/preview.html>
25. Fernando Santín Luna. "Ethnobotany of the Communities of the upper Rio Nangaritzá". Noviembre 2012. http://www.lyonia.org/articles/rbussmann/article_316/html/pdfArticle.html
26. Popol Vuh. "estructuras de madera". Diciembre 2012. <http://es.scribd.com/doc/33958254/Estructuras-de-madera>
27. J. Aucancela. "Madera Laminada". Abril 2013. <http://es.scribd.com/doc/130215123/madera-laminada-pptx>
- 28 Prieto Nuria. " Multihalle de Mannheim. Frei Otto". Abril 2013. <http://tectonicablog.com/?p=9631>

CAPÍTULO II: PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES Y FACTORES DE DETERIORO EN LA MADERA

2.1. PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS DE MADERA

- 2.1.1. Introducción
- 2.1.2. Daños comunes en las estructuras de madera
- 2.1.3. Patologías de origen estructural
- 2.1.4. Causas principales para una falla estructural

2.2. CRITERIOS PARA LA REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA

- 2.2.1. Esquema del funcionamiento estructural de la madera
- 2.2.2. Principios generales para intervenir una edificación
- 2.2.3. Ductibilidad y rigidez en estructuras de madera
- 2.2.4. Cargas en Estructuras de Madera

2.3. DETERIORO Y AUMENTO DE LAS CAPACIDADES MECÁNICAS A TRAVÉS DE UN REFORZAMIENTO

- 2.3.1. Introducción
- 2.3.2. El Eucalipto, la especie más utilizada en la construcción
- 2.3.3. Obtención y clasificación de los elementos de madera antigua
- 2.3.4. Ensayos mecánicos con madera sin reforzar
- 2.3.5. Ensayos mecánicos con madera reforzada

2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES

- 2.4.1. Gráficas combinadas
- 2.4.2. Factores de Aumento de resistencia
- 2.4.3. Conclusiones generales

2.1. PATOLOGÍAS EN ESTRUCTURAS DE MADERA

2.1.1. Introducción

Desde un punto de vista técnico, en el momento de la restauración o rehabilitación de estructuras de madera, no debería haber diferencia entre las intervenciones en obras monumentales o edificaciones con luces menores, ya que la recuperación estructural deberá cumplir o solventar todas las lesiones que presente el inmueble. Sin embargo, las únicas diferencias que puede presentar la restauración de bienes inmuebles estará de acuerdo a los criterios concretos que establece los principios de la conservación patrimonial.

Consecuentemente, la presente investigación está dirigida, en especial, a estructuras de madera en inmuebles patrimoniales, pero deja abierta la opción para que en algunos casos, los sistemas propuestos, pueda aplicarse en obras nuevas. **El objetivo primordial es la recuperación de las estructuras pero sin causar un daño a la estética o a la composición del edificio; es decir, no producir una contaminación visual con la mezcla de otros materiales en los procesos de rehabilitación y refuerzo.**

Los sistemas de recuperación de estructuras de madera se puede considerar que son nuevas opciones en el campo de la restauración, ya que, no hace mucho tiempo, la reparación de elementos estructurales de madera no tenía otra opción que la de ser sustituidos por acero u hormigón, fundamentalmente por la desconfianza de la capacidad resistente del material, dejando muchas incógnitas en los procesos de restauración.

Dada la revolución industrial y, por ende, la evolución de nuevos materiales para la construcción, la madera se vio rezagada en dicha actividad y durante todo el siglo XX, el acero y el hormigón fueron las alternativas por excelencia al momento de sustituir

o rehabilitar edificaciones con estructuras de madera. Ha pasado todo ese tiempo y la ideología de la gente no logra entender y convencerse que, ni el acero ni el hormigón son las mejores alternativas para sustituir parcial o completamente a la madera, ya que directa o indirectamente dichos materiales pueden causar problemas al ser aplicados en una intervención, o sencillamente no pueden llegar a ser tan duraderas como lo es la madera.

Lo antes mencionado, puede confirmarse con lo ocurrido en algunas intervenciones, tanto locales como extranjeras. En cuanto a lo local, la edificación denominada: "Quinta Bolívar", es un ejemplo de sustituciones aplicadas, pues la estructura de su cubierta fue reemplazada por una de acero, la cual hasta la fecha viene cumpliendo su función adecuadamente. Sin embargo, hay que considerar que el tiempo que ha transcurrido desde su sustitución no supera los diez años. De todas maneras, dicho proceso no fue bien visto debido a que la estructura de madera pudo haberse recuperado y conservado su identidad. (Figura 2.1.)



Figura 2.1. Fachada principal, Quinta Bolívar. Estado previo a la intervención realizada en el 2004. / Fuente: archivo fotográfico del Banco Central, años 80's aprox.

Con respecto a sustituciones en edificios extranjeros, podemos citar lo ocurrido en la catedral de Burgos-España, que tras la guerra civil se sustituyó estructura de su cubierta por una de acero. La penuria de la guerra hizo que la sustitución no se completara, dejando a una obra mixta

de acero y madera que al cabo de 40 años se comprobó la necesidad de reparar la estructura metálica; mientras que, la de madera continuó cumpliendo su función. (Figura 2.2.)

Similar fue el caso de las cubiertas de madera del monasterio El Escorial de Madrid, que a mediados del siglo XX fueron sustituidas por estructuras de aceros, las mismas que antes de finalizar el siglo, ya generaron serios problemas. (Figura 2.3.)

Entonces, frente a todos estos sucesos **¿Queda duda sobre lo conveniente que resulta mantener la madera?** La respuesta a esta pregunta obviamente está contrapuesta a todos los procesos de sustitución que se han realizado, pero el hecho de mantener una estructura con sus elementos originales no quiere decir que se puedan prescindir de ellos, ya que son auxiliares indispensables para los métodos de refuerzo.

Es evidente que cada material tiene sus propias características; por tal motivo, las estructuras se sustentan de diferentes formas, por ejemplo, con respecto al peso, la diferencia entre una estructura de madera frente a una de hormigón, está en el orden de seis veces menos. Por eso, el cambio en algunos casos de armaduras de cubiertas de madera por otras de hormigón, producen asentamientos diferenciales en la estructura que lo sustenta.

Con respecto a las causas de las lesiones dentro de estructuras de madera, casi siempre son de carácter intrínseco, producido por fallos durante el proceso de ejecución de la obra. Sin embargo, la causa directa del fallo en la mayoría de los casos es por fenómenos extrínsecos, por ejemplo, por un aumento en la carga que soporta.

Los problemas, dentro de una estructura rehabilitada, presentan dos situaciones contrapuestas. Pueden ser muy complejos en el momento de su intervención o, a la vez, pueden ser tan sencillos que se encuentran de manera puntual en los elementos y, a la vez, de poca importancia



Figura 2.2. Cubiertas sustituidas en la catedral de Burgos. Estado actual / Fuente: <http://www.cpas.es/burgos>



Figura 2.3. Cubiertas sustituidas en el Monasterio Escorial en Madrid. Estado actual / Fuente: <http://www.monasteriodelescorial.com>

para el resto de la edificación, ya que no la alteran. Así mismo, podemos encontrar lesiones de una complejidad tal que es indispensable el estudio previo del mínimo detalle de la estructura.

Dentro de las soluciones tentativas, para el primer caso. La reparación no exige mayores problemas y su recuperación puede ser de forma inmediata. Por el contrario, en el segundo caso será necesario conocer todas las causas que produjeron la lesión, como el historial del edificio, las sobre cargas, patologías, etc., esto con la intención de que el reforzamiento a aplicar sea el más adecuado.

Para los análisis previos a los sistemas de reforzamiento estructural, será necesaria la

aplicación de ensayos destructivos (flexión estática y compresión paralela) realizados en laboratorio. De esta forma, se podrá estudiar y analizar técnicamente el comportamiento y respuesta de las piezas de madera que recurrieron a un reforzamiento.

2.1.2. Daños comunes en las estructuras de madera

La mayoría de las estructuras deterioradas presentan un similar problema que es causado por xilófagos, los cuales encuentran en la madera su principal alimento. Sin embargo, aunque el peligro es real y muy común, no es tan grave como se suele suponer. En primer lugar, los insectos u hongos necesitan que la madera esté con un porcentaje de humedad superior al 20%, algo que siempre depende de una exposición al exterior o ambientes húmedos, así como fallos de las instalaciones internas de suministros y evacuaciones de aguas de las edificaciones, etc.

Aunque la erradicación de los xilófagos es necesario e indispensable, también hay que considerar primordial, el corregir las causas que provocan el aumento de humedad contenida en la madera, y permitir que los elementos se sequen de manera natural para que los xilófagos no puedan reproducirse y desaparezcan. En ocasiones, cuando el daño es producido por la presencia de humedad, será suficiente corregir el problema. Sin embargo, para mayor tranquilidad es conveniente aplicar productos fungicidas e insecticidas, obviamente considerando si el ataque es menor y no existe daño estructural.

Debemos recordar que, toda intervención debe programar ciclos de labores de mantenimiento periódicas, de esto dependerá su duración y su correcta adaptación a la edificación. En relación a lo anterior, el presente documento no ahondará en las posibles formas de actuar frente a xilófagos, ya que para estos procesos existen especialistas y, así mismo, normas de actuación establecidas para su eliminación.

Dentro de las principales acciones para rehabilitar estructuras, evidentemente la reparación de piezas ocultas será más permisiva que una estructura de madera vista, dado que las cuestiones estéticas pasan a ser secundarias, pero, generalmente, sucede que en las edificaciones patrimoniales o simplemente antiguas, sus elementos son en gran número vistos, tal es el caso de entramados, forjados de pisos o armaduras de cubiertas, y para el caso específico de nuestro documento la mayoría de sistemas a proponer serán para estructuras vistas.

El daño producido por xilófagos puede presentarse a través de dos formas, con un causante común y, por lo general, será siempre el mismo problema: la pérdida de sección original. Mientras los insectos y hongos de ciclo larvario devastan a la madera superficialmente y los daños son evidentes (Figura 2.4.), no ocurre lo mismo con las termitas o comején, pues éstas ocasionan grandes destrozos al interior del elemento y pueden pasar totalmente ocultos, pues la superficie



Figura 2.4. Dintel de madera de Capulí, afectada superficialmente por xilófagos y hongos. / Fuente: Daniel Enriquez M.



Figura 2.5. Viga de madera debastada internamente por Comején. Superficie aparentemente buena. / Fuente: Daniel Enriquez M.

en muchos casos no se ve afectada. (Figura 2.5.) Para constatar la presencia de xilófagos y, en especial, de las termitas se debe seguir un método simple pero muy eficaz. En primer lugar, se debe realizar en las piezas a recuperar un análisis tanto de las zonas húmedas, como de los lugares donde la luz solar es nula. Todo esto con la finalidad de encontrar los puntos exactos donde, por lo general, habitan dichos insectos. En algunos casos, se puede encontrar rastros de xilófagos a simple vista; sin embargo, los daños internos, muchas de las veces, no son divisorios. Identificadas dichas zonas, se procede a perforar la pieza de madera con una broca de entre 6 a 8 mm de diámetro y a una profundidad promedio de 10 a 15cm, dependiendo de la envergadura del elemento.

Este procedimiento se debe aplicar a todas las piezas de madera, en donde la presencia de termitas se torna difícil de percibir, pero sobre todo en las zonas donde el contenido de humedad está por encima del 20%. En el caso de las polillas es muy frecuente encontrarlas en las cabezas de las vigas embebidas en los muros, vigas de cubiertas en mal estado, etc.

Después de realizar la respectiva revisión a cada pieza, se procede a considerar los daños ocasionados, los cuales pueden ser estructurales o superficiales. En caso de que el daño implique una posible falla estructural, se deberá proceder con los refuerzos estructurales (sistemas expuestos en los siguientes capítulos). Puede darse el caso de que la pérdida de material no afecte a su resistencia: esto es frecuente en el caso de las cabezas de vigas de ciertas luces, menores a 3 metros, dado que la sección necesaria para resistir al momento flector, en el centro del vano, puede llegar a ser doble o incluso triple que la necesaria para absorber el esfuerzo cortante en el apoyo.

2.1.3. Patologías de origen estructural

Como se mencionó, las principales afecciones

que pueda sufrir un elemento de madera es por la interacción directa que tiene el material, con su ubicación y los agentes de deterioro incidentes. Desde el punto de vista patológico, cada problemática que pueden presentar las estructuras de madera, requiere como punto previo el conocimiento de la madera a proteger, su contexto (humedad, temperatura, insolación, etc.), agentes patológicos y, además, los factores propios de la madera que son de gran interés tales como: estructura de la madera, composición, contenido de humedad y durabilidad.

Cada uno de los puntos expuestos deriva en el deterioro de una estructura de madera, sin embargo, debido a causas relacionadas con la estabilidad y resistencia, se pueden resumir los defectos patológicos de origen estructural en los siguientes grupos:

2.1.3.1. Sección insuficiente en elementos estructurales

Normalmente son ocasionadas por el aumento de cargas con respecto al origen de la estructura, provocando una deformación muy notoria en la pieza. Las flechas en las vigas suelen ser más apreciables que otros sistemas constructivos. (Figura 2.6.) Como aproximación a un pandeo aceptable, la deformación de una viga de madera, correctamente dimensionada está alrededor de $L/400$, para condiciones de carga total.

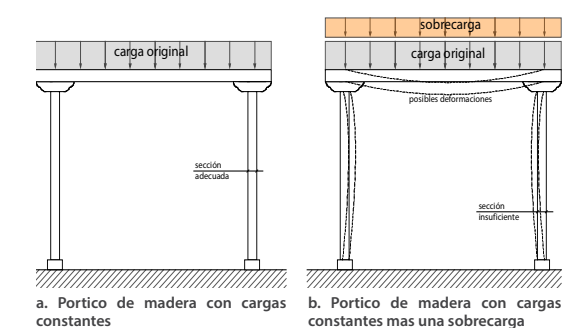


Figura 2.6. Gráfico de porticos con cargas y sobrecargas. / Fuente: Daniel Enriquez M.

Para el caso de las columnas de madera, la falta de sección puede hacer que el elemento se pandee horizontalmente. También puede fallar por aplastamiento o una combinación de las dos; todo esto dependerá de la esbeltez de la pieza. Así mismo, dependiendo de la sección que pueda tener una columna, el fenómeno de inestabilidad estará sujeto al momento flector que actúe sobre la pieza.

Con respecto a la esbeltez de una columna de madera, se la puede dividir en tres grupos, según la relación que exista entre su longitud y sección:

formula 2.1.

$$\lambda = L / d$$

λ esbeltez
 L Longitud
 d Menor dimension menor de la sección

- **Columna Corta:** será considerade corta cuando su esbeltez sea menor a 10.

- **Columna Intermedia:** será considera intermedia cuando su esbeltez sea mayor a 10, pero menor al coeficiente C_k (18,34).

- **Columna Larga:** será considera larga cuando su esbeltez sea mayor al coeficiente C_k (18,34).

2.1.3.2. Deformaciones causadas por el efecto de madera húmeda

La deformación puede variar según la cantidad de humedad que pueda presentar la madera, como ya se ha enunciado en este documento. Unos de los principales factores para una deformación es la cantidad de agua que pueda ganar o perder el elemento; por ello, es importante acotar que las piezas a utilizar deben alcanzar una estabilidad del 12% de CH, de esta manera, se está garantizando que las piezas no presenten deformaciones exageradas y que, a su vez, no repercutan en la resistencia de todo el conjunto estructural. (Figura 2.7.)

La recomendación general que se manejan en la mayoría de normas para el CH. de la madera está determinada entre 12 y 15%, sin embargo, no siempre resulta adecuada esta aplicación, puesto



Figura 2.7. Flexión en viga de madera. Estado previo a la intervención de la capilla Susudel. Azuay-Ecuador. / Fuente: Daniel Enríquez M.

que la madera por ser un material proveniente de un organismo vivo e higroscópico, adaptará su C.H. al medio en el que se encuentre actuando. Por ejemplo, en el complejo natural de las Termas Geométricas de Chile, fueron construidos puentes, caminerías y cabañas de madera, a lo largo de aproximadamente 450m. de la quebrada del parque nacional de Villarrica-Coñaripe, en el cual la temperatura del agua puede llegar a alcanzar los 80° C de temperatura. Entonces, la madera que allí está colocada, indudablemente, no podrá tener un porcentaje de CH. menor a un 20%. Esto debido a que el contenido de humedad llega a estabilizarse según el contexto.

2.1.3.3. Fallos en las uniones, ocasionadas por un mal diseño

A pesar de que el tema de las uniones ya fue tratado con anterioridad (1.6.), este apartado se encuentra como un apoyo fundamental al problema que puede conllevar un mal diseño de las uniones, ya que éstas constituyen puntos críticos en las estructuras de madera.

Al momento de realizar un análisis previo a una rehabilitación, es necesario prestar mayor atención a los detalles constructivos de las

uniones, pues, de esta manera, se detectará si existen aplastamientos, fisuras, roturas o simples aberturas en los ensambles y uniones de las estructuras de las construcciones. (Figura 2.8.)

El caso típico de uniones defectuosas se presenta entre una columna y una viga de madera, la cual ha sido resuelta, tradicionalmente, mediante caja y espiga. Con el pasar del tiempo esta unión se vuelve deficiente debido a la escasa dimensión que pueda presentar la espiga. Entonces parte de una adecuada rehabilitación, está en corregir todas las uniones o ensambles deficientes. (Figura 2.9.)

2.1.3.4. Roturas locales, propias de la pieza afectada

Este factor está relacionado con la pérdida de resistencia por la presencia de nudos o grupos nudos, de los cuales ya se detalló sus características y admisibilidades en el capítulo anterior (1.4.6.) Ahora, el objetivo es la consideración del defecto cuando se lo encuentra en obra, pues es muy normal encontrar en las estructuras nudos que han provocado, en algunos casos, deformaciones o roturas. Así mismo, este defecto puede ser imperceptible y no causar daño alguno a la estructura; sin embargo, cuando se presenta esta situación en donde la deformación es exagerada la intervención deberá ser necesaria.

En caso de que una viga presente nudos en las partes más críticas, es decir, en las zonas donde los momentos son mayores, la actuación deberá consistir en mejorar al elemento en dicha zona; recuerde que los nudos disminuyen, notablemente, la resistencia de la madera y, mucho más, si el nudo está muerto.

2.1.3.5. Arriostramiento insuficiente que conduce a asentamientos diferenciales

Este defecto se hace más relevante, cuando las estructuras componen más de una planta de viviendas con pilares y cubiertas de madera. Una



Figura 2.8. Unión riostra-columna mediante monterilla en deterioro. Vivienda vernacula de adobe y madera Madrid-España. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.9. Unión viga-par en deterioro y reforzada provisionalmente con platinas metálicas. / Fuente: Zamperini, Emanuele. "Corso de recupero e conservazione degli edifici". Le strutture in legno. A.A. 2010-2011. S.I. Pág.:13

construcción que no cuente con un sistema de arriostramiento de resistencia eficiente, podrá producir un asentamiento notorio de no encontrar elementos que le sirvan de apoyo.

Para el caso de la madera, los sistemas de riostras deben ser correctamente dimensionadas; sin embargo, puede darse el caso de que exista un sistema de riostras lo suficientemente resistentes pero con una rigidez escasa, lo que hace prácticamente nula o inútil su acción. Entendamos que la rigidez es parte fundamental en la resistencia de una estructura, pues de esto dependerá la fuerza que soporte el conjunto.

2.1.3.6. Excentricidad por mala distribución de cargas

El término excentricidad hace referencia a la distancia o desplazamiento que existe entre las fuerzas con respecto a los apoyos, ya sean éstas de compresión o de tracción, es decir, cuando una carga no es aplicada directamente sobre el centro de una columna, existe excentricidad.

El efecto de dicho desplazamiento entre cargas puede generar complicaciones en la estructura, dependiendo de la magnitud de la excentricidad; por ejemplo, en el punto donde se produce la excentricidad, se genera un momento adicional y dichos esfuerzos debilita al elemento. (Figura 2.10.) En consecuencia, el hecho de que en uno de sus extremos existe un momento flector más, hará que la carga total no actúe en el centro de la columna.

Cabe recalcar que, cuando la excentricidad es pequeña, la flexión que puede presentar el elemento es prácticamente despreciable; mientras que, si ésta crece, los efectos de flexión serán mayores y más notorios. (Figura 2.11.)

2.1.4. Causas principales para una falla estructural

Una forma común de reducir posibles fallas es identificar, analizar y evitar sus correspondientes causas, ya que para cada falla, en principio, se podría identificar varias causas. Una forma natural de reducir la frecuencia de fallos es identificar, analizar y evitar las causas correspondientes. Por cada fracaso, en principio, podría ser identificado una multitud de causas, pero no es ni posible ni razonable describir las complejas relaciones de causa-efecto a detalle de todos los fracasos que se analiza. Por lo tanto, es importante centrarse en las causas principales que pueden ser controlados durante la fase de planificación, diseño, construcción y uso de la estructura.

Para una mejor asimilación sobre las causas

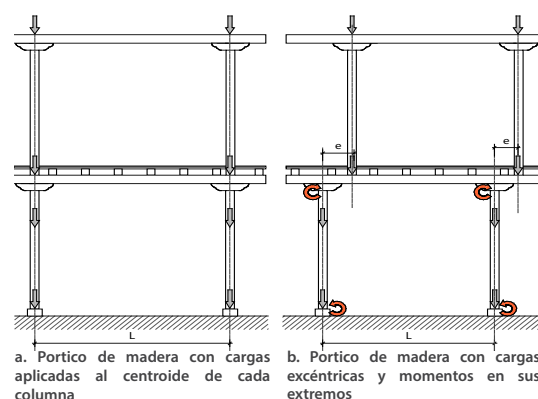


Figura 2.10.a Gráfica de pórticos con cargas normales y excentricas. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.11. Porticos con problemas de excentricidad de cargas en columnas. Vivienda Guzman, Cuenca-Ecuador. / Fuente: Daniel Enríquez M.

de fallas y malfuncionamientos de estructuras en madera, se las ha dividido en tres grupos causales, que están referidos a los principales factores que inciden en las fallas estructurales:

2.1.4.1. Errores Tipo A

Referido principalmente a fallas provocadas por errores humanos; es decir, consecuencia de inexperiencias por parte del profesional, negligencia o mala interpretación en las normas técnicas, o a través de errores simples; sin embargo, este número de errores puede ser reducido, mediante la prevención, la detección y la corrección del error. Los errores humanos pueden evitarse mediante procedimientos bien dirigidos en las siguientes áreas:

- Proceso técnico: Los errores se pueden prevenir, definiendo con precisión todos los procesos constructivos, analizando cada punto a ser abordado en una construcción.

- Organización del trabajo: Los errores se pueden prevenir mediante una precisa especificación de esquemas, lo suficientemente completos para la realización de una obra, detallando hasta el último sistema para una correcta compresión del obrero.

- Área de comportamiento humano: Los errores se pueden prevenir con la optimización de la interacción entre el cliente y el contratista en lo que respecta al potencial y a la disposición correspondiente. Además, esta relación permitirá una plena ejecución de la obra y significará intervenciones correctas.

El objetivo de las tres áreas descritas es lograr identificar mejoras conforme se desarrolle cada punto; es decir, mientras se describe las fallas, calificar e identificar posibles soluciones. El identificar dentro de un proceso constructivo, dónde se produjo el error y de qué tipo es el mismo, será de gran interés. En la tabla b1. se comparte un esquema sobre una clasificación de errores, el cual está basado en la información del error obtenido, las posibles mejoras para prevenir el error, y los procesos de construcción. Los grupos de trabajo: ingenieros, arquitectos, albañiles, peones, etc., están directamente relacionados con un eficiente control de calidad, que está dentro de todos los procesos de construcción.

2.1.4.2. Errores Tipo B

Estos tipos de errores pueden ser entendidos como el resultado de un inadecuado conocimiento o una inapropiada aplicación dentro de una obra. Entonces el análisis de cada error será indispensable para exponer posibles soluciones. Por lo tanto, para prevenir y detectar estos errores, debemos basarnos en mejores conocimientos sobre la vulnerabilidad de

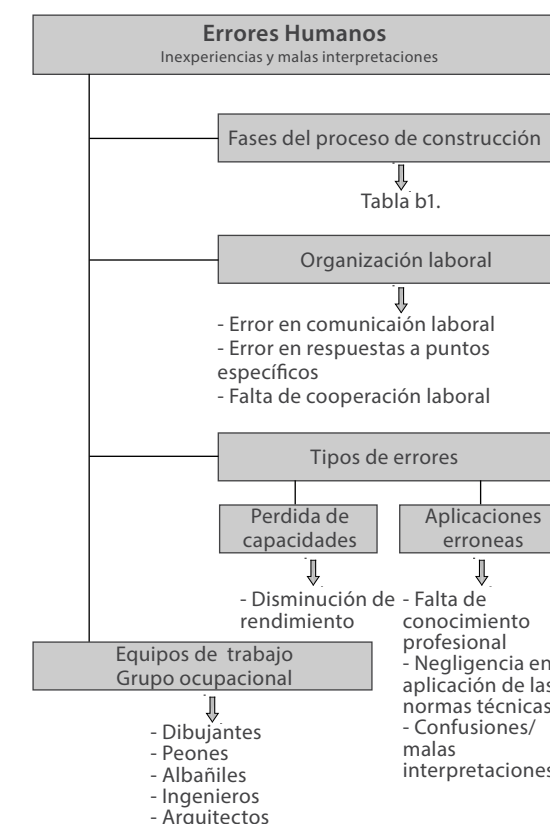


Tabla b1. Esquema propuesto para la clasificación de errores / Fuente: Gerhard Fink. "A scheme for the evaluation of experience of the performance of timber structures". Zurich. 2010. pág:2966

componentes y la rigidez del sistema estructural.

Para detallar el total de consecuencias debido a los errores, todo el sistema estructural, así como la relación correspondiente de la estructura con las actividades de uso, tienen que ser descritas. Indudablemente la descripción de todos los aspectos demanda mucho tiempo y lo aconsejable es realizar una clasificación del sistema estructural en subsistemas, clases de consecuencias e información acerca del daño.

Por citar un ejemplo: en una galería con pórticos de madera encontramos elementos verticales y horizontales que vendrían siendo, en conjunto, el sistema estructural, se lo subdivide a un subsistema conformado por las dos columnas

donde se apoya la viga, y hay que trabajar sobre las consecuencias que puede conllevar el daño principal. El sistema puede ser interpretado como una aplicación de fichas técnicas de daños, pero encaminadas hacia lo estructural de la edificación.

2.1.4.3. Errores Tipo C

Los siguientes errores se refieren a las causas en donde el fracaso se origina por una resistencia baja de los elementos estructurales, junto con un efecto de carga grande o sobre carga a lo largo plazo. Los errores tipo A y B están referidos a los errores producidos al momento de la construcción, ya sea éstos por negligencia, desconocimiento de algunos temas o simplemente una mala aplicación de los sistemas; mientras que, los errores Tipo C, adquieren el fallo después de realizada la construcción; es decir, se puede producir por cargas altamente variantes dentro de un rango de tiempo a largo plazo.

En relación a lo descrito y como sugerencia: un diseño estructural para edificaciones de gran magnitud o de grandes luces (distancia entre apoyos) deberá ser realizado con cargas superiores a las admisibles, pues la madera por ser un material con características cambiantes puede ser altamente variable en sus capacidades portantes y, así mismo, puede presentar cambios notorios después de algún tiempo.

Este tipo de error se presenta, comúnmente, cuando existe un cambio de uso de la edificación. Por ejemplo: si la construcción fue diseñada para ser una vivienda unifamiliar y con el pasar de los años fue cambiada a un negocio altamente transitado -caso particular de las viviendas del centro histórico de Cuenca- su estructura va a ser más exigida, debido al sobrepeso de las nuevas cargas vivas.

Se puede afirmar que no es necesario que una estructura se encuentre bajo condiciones deplorables para considerar una intervención de refuerzos estructurales. Cuando se presente estos casos, la disminución de peso en las plantas superiores ayudará a disminuir las fuerzas



Figura 2.12. Distribución de cargas para una vivienda. / Fuente: AIS (Asociación colombiana de ingeniería sísmica). "Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada". S.f. Colombia. Pág.:5-4

inerciales de los elementos estructurales, inclusive frente a la acción de un sismo. (figura 2.12.)

2.2. CRITERIOS PARA LA REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA

El proceso que involucra la rehabilitación de una construcción puede llegar a ser quizá más complejo que realizar una construcción nueva. Sin embargo, dependerá del estado en que se encuentre la edificación y sobre todo de los criterios que se apliquen. Resultaría fácil pero, a la vez, inútil realizar una restauración sin aplicar conceptos básicos de conservación.

Los procesos sustitutivos son, quizá, el principal problema que debe afrontar una rehabilitación, ya que las piezas son reemplazadas por nuevas y en ocasiones simplemente son eliminadas para colocar materiales diferentes. Quizá el reemplazar o sustituir elementos sea el sistema más viable estética o económicamente y, en algunas ocasiones, así lo es. Sin embargo, no debemos olvidar de la composición original del bien, y pretender guardar la misma armonía entre todas las piezas del conjunto. Está

comprobado, con hechos reales, las consecuencias que puede conllevar una mixtura mal aplicada de materiales dentro de la construcción.

2.2.1. Esquema del funcionamiento estructural de la madera

Para un correcto desarrollo de estructuras seguras y eficientes, es importante centrar el aprendizaje de experiencias pasadas, es decir, aprender de fallas y disfuncionalidades de estructuras de madera ya construidas. Además se debe destacar que la mejor manera de analizar una falla estructural es aprendiendo de ella.

Durante décadas, los métodos de rehabilitación de estructuras han venido desarrollándose de tal forma que han logrado en muchos casos una gran adaptación a estructuras en deterioro. Sin embargo, se continúa en una etapa, en la que, no es común o natural su uso y en vez de recuperar un elemento de madera se opta por una sustitución del mismo, sin ningún criterio de conservación. Un refuerzo estructural debe estar directamente relacionado con la salvaguarda de los elementos estructurales y solventar cualquier deficiencia de resistencia.

En contraste, la mayoría de fallas estructurales que se produce es el resultado de errores en la planificación, diseño estructural, construcción y mal empleo de los sistemas. El principal problema radica al momento de la rehabilitación, pues estos errores no son analizados específicamente y, por el contrario, son solucionados con procedimientos ya estandarizados. Otra razón de los errores al momento de intervenir es la carente información acerca del tipo de falla que pudiera ocurrir en la estructura.

El estudio de fallas estructurales en edificaciones es parte de la experiencia del rendimiento de una estructura a través del tiempo, pues la experiencia es una valiosa fuente de información para ganar perspicacia frente a una extensa galería de fallas que puede presentar una estructura.

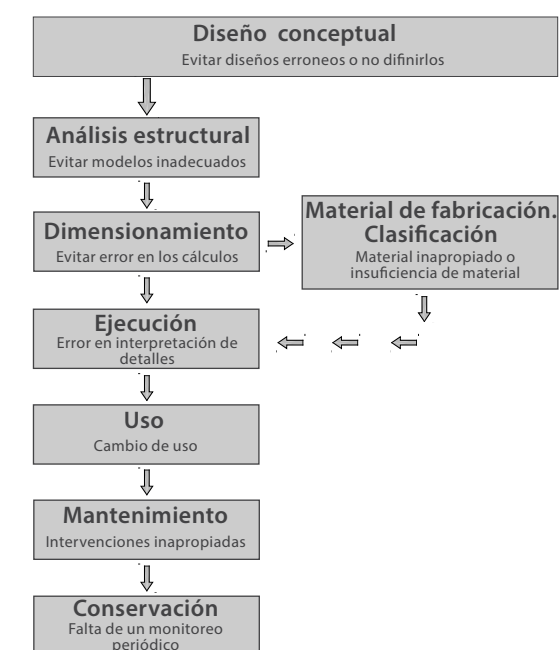


Tabla b2. Fases del proceso de construcción. / Fuente: Gerhard Fink. "A scheme for the evaluation of experience of the performance of timber structures". Zurich. 2010

"La información sobre las causas de fracasos estructurales debería ser usada continuamente para diseñar, pues, esto ayudaría a reducir el índice de errores y consecuencias conexas",

La mayoría de las estructuras de madera ha presentado excelentes rendimientos dentro de su tiempo de servicio, pero estas estructuras no brindan la información necesaria para nuestros propósitos; por esta razón, debemos centrar nuestro análisis en las estructuras que no han logrado cumplir sus funciones dentro de su tiempo de servicio, por ejemplo; estructuras con componentes en deterioro, fallas de sus elementos o un sistema estructural colapsado.

A continuación se indica, cómo un simple esquema común para la evaluación de la experiencia adquirida a través de fallos y averías de estructuras, puede ayudar a planificar de mejor manera la concepción de una edificación: (Tabla b.2.)

1. Gerhard Fink. "A scheme for the evaluation of experience of the performance of timber structures". Engineering Structures [Institute of Structural Engineering, ETH Zurich. Zurich] Nro33. (2010); pag. 2963.

2.2.2. Principios generales para intervenir una edificación

En rehabilitación, una de las primeras opciones y quizá la más importante es la de saber hasta qué punto se va a mantener la estructura existente.

Para el caso de edificaciones patrimoniales, este tema se torna de vital importancia ya que según conceptos de conservación se deberá en lo posible mantener la originalidad del bien a intervenir.

El deterioro de los elementos estructurales de madera o la poca capacidad para soportar cargas de los mismos elementos de una estructura, hace necesario y válida la aparición de sistemas de reforzamiento estructural para elementos de madera. Por lo tanto, se debe empezar por conocer cuándo una estructura pasa por un proceso de deterioro, el cual se debe a un desarrollo patológico, a lo largo del tiempo, en el cual los elementos estructurales manifiestan sus síntomas a través de lesiones. Las lesiones más frecuentes que surgen de una estructura son las fisuras, deformaciones y pudrición de elementos. (Figura 2.13.) Sin embargo, en otras ocasiones el deterioro puede ser causado por agentes externos como la presencia de xilófagos o degradación por la misma luz solar. (Figura 2.14.)

Para una correcta actuación sobre una estructura con lesiones de diferente nivel de gravedad, se debe tener en cuenta dos criterios básicos:

El primero se refiere a un análisis total de las propiedades mecánicas de la estructura en su estado actual; mientras que, el segundo está referido al correcto conocimiento de técnicas de reforzamiento, para la reparación de los elementos dañados. El conocimiento de las técnicas de refuerzo es fundamental en el momento de tomar decisiones sobre la rehabilitación, ya que los casos que puedan presentar una estructura dañada es altamente variable; mientras que, para obra nueva se puede recurrir a una estandarización de refuerzos, pero sin dejar de lado el factor de variabilidad.



Figura 2.13. Pudrición y Deterioro en Solera y Viga. Estado actual de la vivienda Guzmán. Cuenca-Ecuador. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.14. Tirantes deteriorados y presencia de xilófagos. Ermita de san Cristobal en Enguera, del siglo XVI. / Fuente: <http://www.hazmeprecio.com/rehabilitacion-de-edificios/valencia>

Dentro del amplio campo de técnicas existentes para reforzar estructuras, se sugiere cuatro aspectos previos y fundamentales, los cuales orientaran una selección adecuada de un refuerzo frente a cada situación que se presente. Es por eso que, antes de enunciar cualquier sistema de reforzamiento estructural, se deberá abordar dichos aspectos de manera breve, que enmarcan las situaciones de una intervención:

2.2.2.1. Adaptación al contexto tecnológico

Está referido a la factibilidad de aplicar una técnica de reforzamiento, con los recursos disponibles, en el lugar requerido, de la forma más simple y natural posible, aprovechando conocimientos y experiencias de operarios propios del medio.

Todos estos factores serán claves al momento de elegir un método adecuado de intervención, y que represente una mayor economía en relación a otras soluciones posibles y con una compatibilidad y adaptación a la estructura original idónea.

2.2.2.2. Repercusiones de una intervención

Es importante acotar que toda intervención, por más específica que ésta sea, trae consigo efectos complementarios variados. Entonces, se recomienda la elección adecuada de un método según el caso.

Los efectos posteriores a una recuperación estructural pueden ser positivos o negativos. Sin embargo, el objetivo de este documento y de la mayoría de los estudios para refuerzo estructural apunta para que las intervenciones no tengan efectos negativos bajo ningún concepto; por el contrario, generar refuerzos eficaces y en lo posible imperceptibles.

2.2.2.3. Planteamiento mecánico-estructural

Toda intervención debe tener presente que previo a su accionar, deberá cumplir un esquema básico para que sea considerado válido, es decir, debe seguir un planteamiento que se realiza antes de la ejecución.

Como primer punto, el refuerzo debe llevar a que el elemento estructural recupere su capacidad portante inicial, indispensable al momento de recuperar una estructura. El Segundo planteamiento está referido a que un refuerzo debe ser capaz de superar la resistencia que

el elemento estructural poseía originalmente.

Finalmente, en cuanto a la sustitución funcional no debe ser entendida como la extracción del elemento dañado y la colocación de un nuevo, sino que debe ser consecuencia del análisis previo del elemento dañado y la consideración del mismo desde diferentes puntos de vista.

2.2.2.4. Singularidad de las intervenciones en edificios patrimoniales

La intervención en un edificio patrimonial posee varias restricciones y aspectos específicos, pues su alto valor histórico hace fundamental una rehabilitación que asegure la conservación de sus elementos a lo largo del tiempo con sus genuinas cualidades. Esta exigencia puede verse forzada por el hecho de que muchos casos se prefiere otros materiales para sustituir en el momento de una restauración. Pero parte de una correcta actuación y de la ética profesional, está el salvaguardar la edificación. Para el arquitecto César Díaz [2], los procesos de restauración pueden tener varias posibilidades y puntos de vista, por lo cual, él hace referencia a:

“En otro ámbito de decisiones más esencial, la opción por la restauración de lo existente con las técnicas originales, siempre que la prestación funcional de dichas técnicas se avenga a las exigencias de la intervención, puede no requerir de otros argumentos para decidir su elección”₃

2.2.3. Ductibilidad y rigidez en estructuras de madera

El término dúctil hace referencia a la capacidad que posee un material para deformarse bajo la acción de una fuerza, pero sin romperse. Indudablemente, la madera aunque posee

3. Díaz Gómez, César. “La rehabilitación de los elementos estructurales de la arquitectura tradicional mediterránea”. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona-España. S.f.

[2] César Díaz Gómez / Doctor arquitecto
Profesor Titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad Politécnica de Cataluña.

características de ductilidad, no debemos olvidar que es un material anisotrópico por lo cual puede ser frágil y dúctil a la vez. (figura 2.15.)

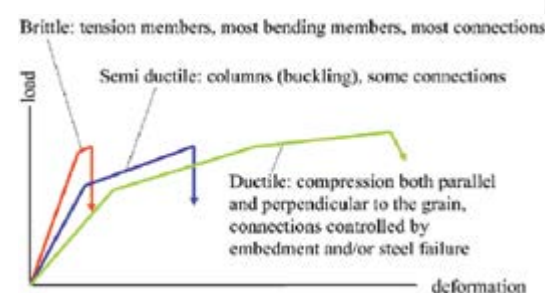
La madera puede ser considerada un material relativamente frágil en tensión y tracción, pero aceptablemente dúctil a compresión, paralela o perpendicular a su grano, esto se debe a las diferentes capacidades que presentan sus fibras.

El hecho de que sean frágiles, en determinadas direcciones, con respecto a sus ejes, no las hace vulnerables ante esfuerzos mayores y, por el contrario, se puede solventar estas deficiencias con refuerzos más dúctiles; es decir, podemos ayudar a que una estructura en tracción mejore sus condiciones de ductilidad, mediante hierros que trabajen paralelo al esfuerzo traccionante. (figura 2.16.)

Por otro lado, la rigidez también forma parte importante en el comportamiento de las estructuras de madera. Su concepto general determina que la rigidez es la fuerza mínima necesaria para producir una deformación unitaria. Entonces, si la ductilidad es la capacidad para la deformación de un material, la rigidez será el complemento que deberá ayudar a soportar cargas y aumentar su resistencia.

Es necesario recordar que, toda madera posee una ductilidad considerablemente buena y puede soportar altas deformaciones, pero a su vez el material es poco rígido, pues se deforma fácilmente al ser aplicado un esfuerzo. Por lo tanto, estos conceptos serán fundamentales al momento de analizar una estructura. (Figura 2.17.)

Entonces, la ductilidad, por un lado, es la capacidad que tiene el material para deformarse y regresar a su estado normal después de retirar la carga; mientras que, la rigidez es la fuerza que limita a la deformación, impidiendo que el material se deforme o fracase; por lo tanto, consideremos que la madera es un material dúctil pero poco rígido, pues sus capacidades hacen que se deforme con facilidad, pero a la vez resista altos niveles de



Brittle: Quebradizo o frágil ante tracciones y flexiones.
Semi ductile: Semidúctil, en columnas con pandeo.
Ductile: Dúctil, ante esfuerzos de compresión paralela o perpendicular al grano.

Figura 2.15. Esquema típico de ductilidad en componentes estructurales de madera. / Fuente: André Jorissen. "General notes on ductility in timber structures". Engineering Structures [Institute of Structural Engineering, ETH Zurich. Zurich] Nro33.(2011). pag: 2988.



Figura 2.16. Cercha reforzada mediante hierros, refuerzos para la tracción de los tochos. / Fuente: Documentación Arq. Gustavo Lloret.2004.



Figura 2.17. Probeta de madera deformada más de 3cm., después de realizar un ensayo a flexión. / Fuente: Daniel Enríquez M.

carga sin llegar a romperse precipitadamente.

Para proceder con un adecuado diseño estructural, el cálculo de refuerzos debe aumentar

la ductilidad de la madera. Esto permitirá que las estructuras actúen de mejor manera a lo largo del tiempo e inclusive, respondan con mejor capacidad ante fuerzas sísmicas. Por ejemplo, parte de la regulación europea para construcciones en madera, describen, claramente, la relevancia de la ductilidad para un mejor comportamiento estructural bajo acciones sísmicas. Varios estudios detallan que la ductilidad contribuye a una disipación de energía considerable. Según el artículo científico sobre ductilidad en estructuras de madera, a cargo de André Jorissen -universidad de Tecnología de Eindhoven y SHR, Wageningen, Países Bajos-, detalla cuatro razones para diseñar estructuras dúctiles:

1. To ensure the failure will occur with large deformations, so as to warn the occupants in the case of an unexpected load: static ductility.
2. To allow stress redistribution within a cross-section and force redistribution among different cross-sections in statically indeterminate structures (plastic analysis), so as to increase the load-carrying capacity of the structure with respect to the value calculated in elastic analysis. Plastic analysis, however, can only be carried out for structures which exhibit a minimum amount of ductility: static ductility.
3. To allow energy dissipation under seismic loading. Energy dissipation reduces the effect of the earthquake on a structure, leading to an overall better behavior. Roughly speaking, the larger the ductility, the lower the seismic action that has to be considered in design. The seismic actions considered in design are therefore related to the ductility of the structure: dynamic ductility.
4. To increase structural robustness. Ductile behavior is a possible way to ensure the structure can accommodate large displacement and rotation demands caused by sudden failure of a single member within the whole structural system.

André Jorissen [4]

Los cuatro enunciados citados han sido textualmente transcritos desde su fuente para evitar cualquier tipo de omisión de sus detalles,

pero para complementar lo descrito, a continuación se detalla una breve explicación de los mismos, los cuales están referidos a la ductilidad estática y ductilidad dinámica.

1. Garantizar que la falla será producida por grandes deformaciones, a fin de advertir a tiempo, a los ocupantes de la edificación, en el caso de una carga inesperada.
2. Permitir una redistribución de la tensión, dentro de una sección transversal de un elemento y la redistribución de una fuerza entre diferentes secciones en forma estática dentro de las estructuras (análisis plástico), a fin de aumentar la capacidad de carga de la misma, con respecto al valor calculado en el análisis elástico.
3. Permitir la disipación de energía bajo cargas sísmicas. En términos generales, a mayor ductilidad, menor es la acción sísmica que tiene que ser considerada en el diseño.
4. Aumentar la robustez estructural. Comportamiento dúctil es una posible manera de asegurar la estructura que tiene capacidad para grandes desplazamientos y las demandas de rotación causada por la insuficiencia repentina de un sólo miembro, en el conjunto del sistema estructural.

Al referirnos a los términos estática y dinámica, debemos considerar que todo dependerá de las fuerzas que actúen sobre la estructura para deducir si la capacidad de ductilidad es estática o dinámica, es decir, todas las acciones producidas por la misma estructura, sean éstas por cargas vivas o muertas, producirán una ductilidad estática; mientras que, fuerzas producidas por los sismos serán las responsables de producir una ductilidad dinámica.

2.2.4. Cargas en estructuras de madera

Para un correcto análisis de estructuras de madera,

[4]. André Jorissen. "General notes on ductility in timber structures". Engineering Structures [Institute of Structural Engineering, ETH Zurich. Zurich] Nro33.(2011):pag. 2988.

siempre se debe considerar el principal factor que influye en su rendimiento a lo largo de sus funciones; es decir, las cargas de servicio incidentes de estas dependerá del comportamiento estructural de las piezas de madera en conjunto.

Únicamente el análisis de las cargas hará posible solventar los sistemas de refuerzo estructural, pues las piezas actúan en función de las cargas de servicio o mejor conocidas como esfuerzos admisibles.

En el momento de analizar cargas, será importante considerar características especiales como la ductilidad y la rigidez de cada pieza, pues estos dos términos son fundamentales en el momento de intervenir la madera.

Dadas las principales condiciones de la madera, es importante que, al momento de realizar diseños para recuperación de estructuras, todos los esfuerzos aplicados sean menor que los esfuerzos admisibles y, de la misma manera, las deformaciones deberán ser menor a las deformaciones admisibles. Esto para asegurar una correcta función del conjunto.

En cuanto a la división de cargas que actúan sobre estructuras de madera, es común considerar tres categorías que son: cargas muertas, cargas vivas y cargas ambientales.

Las cargas muertas son también llamadas cargas permanentes, son aquellas que mantienen su magnitud y posición a lo largo de la vida útil de la estructura. De esta categoría provienen, generalmente, cargas como el peso propio de la estructura: losas de piso, columnas, techos, muros y demás elementos que pueden o no ser estructurales como ventanas, plomería e instalaciones; pues como ya se mencionó provienen de todo cuerpo, cuyo volumen se mantiene permanente unido a la estructura.

Las cargas vivas o sobrecargas de servicio son aquellas que no forman parte de la estructura y provienen de fuerzas gravitacionales y, además,

no tienen carácter permanente. Estas pueden estar total o parcialmente en un sitio, además no están en posiciones fijas, por ello su magnitud y distribución son inciertas; sin embargo, la estructura debe soportar perfectamente tales cargas. El peso de las cargas vivas puede presentar problemas al momento de su cálculo, por las condiciones antes mencionadas; sin embargo, muchos análisis realizados para estructuras con cargas vivas, han estandarizado el peso por metro cuadrado para su diseño; esto no quiere decir que sea una constante a seguir, todo dependerá de la función que vaya a tener la estructura.

Las cargas ambientales son las producidas por sismos (cargas inerciales), vientos, nieve, presiones del suelo e inclusive las producidas por cambios de temperatura, igual que las cargas vivas están son inciertas, tanto en magnitud como en distribución pero con mayor complejidad. Es sugerible adaptar estrictamente, los reglamentos y códigos vigentes de construcción de la zona en donde se vaya a trabajar.

Cuando una carga viva sea de aplicación continua en una edificación y de magnitud considerable, será conveniente categorizarla como una carga muerta, pues su peso permanente producirá deformaciones a largo plazo o deformaciones diferidas. El caso más común es el que ocurre con bibliotecas o almacenes, en donde sus elementos como anaqueles y estantes producirán pesos puntales muy grandes.

Quizá el mejor exponente en análisis y cálculos de cargas es la Ciudad de México, ya que a partir de la catástrofe del 85, sus normas para la construcción dieron un giro total, pues se reestructuró el REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL (RCDF), del cual se ha aprovechado para citar el art.163 referente a cargas vivas, en donde se detalla que: *“las cargas vivas transitorias que puedan*

5. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF). “Art.163 De las cargas vivas.” Capítulo V. Enero 2004.

*producirse, no serán menores a 1.5 KN/m² (150 kg/m²), además se considera una concentración de 1.5 KN (150 kg) en el lugar más desfavorable.”*⁵

A continuación se ha tomado tablas de gran utilidad para el diseño de estructuras, desde la cartilla del Acuerdo de Cartagena, la que posee datos técnicos sobre las cargas máximas y admisibles, producidas por varios elementos que actúan en una construcción y, posteriormente, en una edificación:

*** Deformaciones Admisibles para vigas de madera**

Carga de servicio	Con cielo raso falso	Sin cielo raso falso
C. Muerta + C. Viva	L / 300	L / 250
C. Viva	L / 350	L / 350

- Cargas ambientales son de complejo análisis y actúan sobre toda la estructura.
- Cuando existe cielo raso falso colgando de la estructura de madera, es importante considerar en el diseño estructural a la carga muerta 30 kg/m² más.

Tabla b3. Deformaciones Admisibles para vigas de madera. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). “Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú:1982.

*** Peso propio de materiales de construcción**

Descripción	Kg/m ³
Madera tropical al 30% de C.H. - Grupo A - Grupo B - Grupo C	1100 1000 900
Acero de construcción	7850
Aluminio	2750
Hierro colocado	7250
Muros de adobe	1600
Muros de ladrillo	1800
Morteros	2100
Hormigón simple no armado	2300

Tabla b4. Peso propio de materiales de construcción. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). “Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú:1982, pág.: 13-6

*** Sobrecargas de servicio para Cargas Vivas**

Ocupación Uso	Kg/m ²
Azoteas planas	100
Bibliotecas, salas de lectura	300
Archivos	750
Colegios	350
Corredores Públicos	500
Graderios y tribunas	500
Oficinas	250
salones	500
Viviendas unifamiliares	200

Tabla b5. Sobrecargas de servicio. Cargas Vivas / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). “Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú:1982, pág.: 13-4

*** Peso de objetos varios almacenados**

Descripción	Kg/m ³
Estanterías con libros	600
Libros y papeles apilados	850
Cereales almacenados	150
Vidrio en laminadas	2600
Cemento en sacos	1600

Tabla b6. Peso de materiales almacenados. / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). “Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú:1982, pág.: 13-5

*** Cargas Muertas por Unidad de Área**

Descripción	Kg/m ²
Pisos de baldosa de cemento	100
Entrepisos de madera	120
Cielorrasos de mortero	80 a 100
Cielorrasos de madera	10 a 50
Teja de barro con mortero	75
Placa ondulada a-c	18

Tabla b7. Jaramillo, José. “Ingeniería Estructural I”. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%202/Cargas%20muertas.htm>

***Tablas de Cargas.** JUNAC(PADT-REFORT). “Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú:1982.

2.3. DETERIORO Y AUMENTO DE LAS CAPACIDADES MECÁNICAS A TRAVÉS DE UN REFORZAMIENTO SIMPLE

Las estructuras de madera han sido desde la prehistoria, empleadas en construcciones de todo tipo y por diferentes civilizaciones. La madera, sin duda, es y será el material más noble que ha existido para la construcción y es la simplicidad de su naturaleza la que ha permitido que sobreviva como elemento estructural, a través de los años. La evolución del ser humano ha hecho que surjan nuevos materiales estructurales como el hormigón y el acero; sin embargo, la madera ha sabido competir estructuralmente con estos elementos, ya que siempre ha resuelto las más elementales necesidades de soporte, pero sus características orgánicas la hacen vulnerable ante algunos factores.

El paso del tiempo, sin duda, ha sido el principal factor para que los elementos estructurales pierdan sus características y cualidades mecánicas. Por ello, el tema principal de este documento está direccionado a la recuperación y refuerzo de estructuras de madera, mediante diferentes sistemas, sean éstos existentes o nuevos métodos por desarrollar. Hay que tener en cuenta que, un elemento estructural resulta esencial para la seguridad del edificio, por tal motivo su reforzamiento deberá ser estrictamente analizado para su aplicación; es decir, se debe partir desde la patología que originó el deterioro y finalizar en el refuerzo que devolverá la capacidad portante al elemento.

2.3.1. Introducción

La propuesta del presente documento para un adecuado diseño de métodos de reforzamiento en madera partirá de un minucioso análisis del comportamiento y estado que presenten las estructuras de madera antiguas después de ser rehabilitadas, pues éstas ya han cumplido

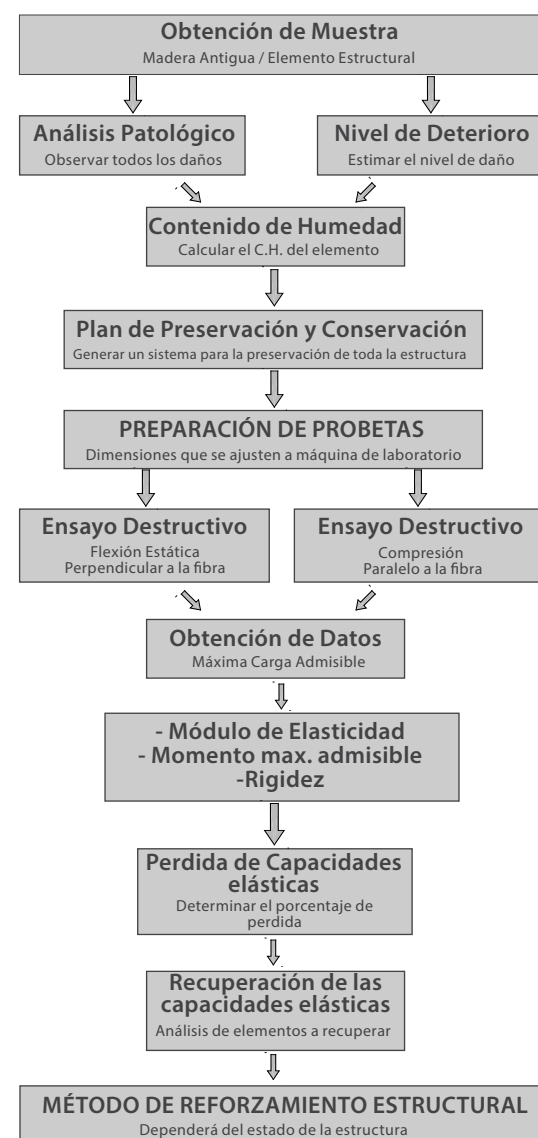


Tabla b8. Metodología para llegar al sistema de reforzamiento estructural.
/ Fuente: Daniel Enríquez M.

varios años de servicio estructural dentro de una edificación. Entonces se partirá de casos existentes para estudiarlos, validarlos o rechazar los procesos de reforzamiento existentes.

Para poder obtener datos más técnicos y reales, todos los análisis fueron realizados con piezas de madera antigua y con un nivel de degradación que sobrepasa los 50 y 100 años de uso por pieza. El empleo de madera antigua ayudará para que el

resultado final del documento, sea lo más fidedigno posible, puesto que al usar madera nueva, la resistencia general de las piezas será, lógicamente superior a la de una madera ya utilizada, aunque podría variar según la especie.

Con respecto al número de especies a estudiar, únicamente se enfocará el análisis en una sola especie, pues el pretender revisar cada una de las maderas que se utiliza en la construcción sería excesivamente extenso y podría resultar en cierto modo inútil. Lo que se recomienda es seleccionar la especie más utilizada en la construcción de nuestra región y generar una metodología para que cualquier otra especie sea analizada de la misma manera. (Tabla b8.)

2.3.2. El Eucalipto, la especie más utilizada en la construcción

Quizá el desarrollo de la construcción en madera para nuestro entorno no se ha desarrollado de una manera técnica o industrializada y, por el contrario, ha sido producto de una evolutiva experticia que se ha transmitido de generación en generación. Sin embargo, gracias a este proceso se ha logrado mantener como una constante, el uso del material en la mayoría de las construcciones antiguas; es decir, la presencia de madera y tierra han sido los predominantes al construir y son considerados materiales ancestrales por excelencia.

Si recurrimos a datos estadísticos de construcciones en nuestra ciudad en cuanto a materiales, todas van a preferir a la madera como el principal elemento estructural, pero el hecho de utilizar la madera no implica precisamente una utilización de la misma especie. Sin embargo, dentro de nuestra urbe ocurrió una gran aceptación y una tendencia por el uso de una especie generalizada.

Al referirnos a la especie común, estamos hablando del Eucalipto, madera que fue introducida al país a mediados del siglo XIX, durante la presidencia de Gabriel García Moreno.

Volumenes de Aprovechamiento de la Madera en el Ecuador (2009)

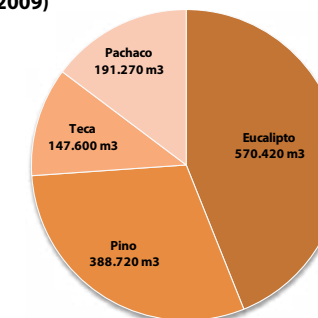


Figura 2.18. Volumenes de Aprovechamiento de la Madera en el Ecuador.
/ Fuente: Ministerio del Ambiente. Año 2011.

“La escasez de recursos madereros y otros factores hicieron que desde Australia y por medio de científicos europeos arriban al país dos cajas llenas de semillas de eucalipto, el cual tuvo una adaptación extraordinaria al medio y fue en mayo de 1865 cuando empezó la siembra de este espécimen en territorios de la serranía ecuatoriana. Entre los lugares elegidos para la plantación estuvo Cuenca, por ello hoy podemos encontrar al eucalipto en las riberas de los ríos y en la mayoría de zonas rurales de la ciudad”.

La demanda de esta especie en toda la serranía ecuatoriana ha sido elevada, pues las cadenas productivas de madera apuntan al eucalipto como la principal especie utilizada en la construcción. Según datos emitidos por el Ministerio del Ambiente, en el 2009 se permitió la corta de aproximadamente 570.420,00 m³ de madera rolliza de eucalipto, siendo la especie más utilizada en el Ecuador, por encima de especies conocidas y, además, con alta demanda. (Figura 2.18.)

Los datos citados, anteriormente, respaldan el masivo uso que se le da al eucalipto, ya sea dentro o fuera de nuestra provincia del Azuay. De la misma manera, se puede encontrar edificaciones en madera de eucalipto que fueron construidas en la primera mitad del siglo pasado y especialmente en el Centro Histórico de Cuenca. (Figura 2.19. y 2.20.)

6. Cuví, Nicolas. “Dos cajas con semillas de eucalipto”. Terra Incognita. [Quito] Revistas Nro. 37.(2005)= s/pág.

7. Romero, Marco y otros. “Descripción de las Cadenas Productivas de Madera en el Ecuador”. Informe Técnico, Ministerio del Ambiente. Quito, 2011.

En la parroquia de Susudel-Azuay, se encuentra un claro ejemplo, pues al igual que en muchas zonas rurales, existen viviendas que datan de más de 80 años y casi todas presentan eucalipto en sus estructuras. La casa de la Familia Espinoza es muestra de aquello, pues la vivienda es considerada la más antigua del lugar aun en pie y en condiciones aceptables para vivir. Fue construida, hace aproximadamente 130 años, con madera y tierra; sus columnas, dinteles riostras y cubierta fueron resueltas con eucalipto y otras especies propias de la zona. (Figura 2.21.)

Cabe anotar que el eucalipto no ha sido el único material leñoso para la construcción, la variedad de madera que posee nuestro país es extensa. Sin embargo, para el desarrollo de técnicas de reforzamiento, se utilizó a la madera de eucalipto como base para todas las pruebas y análisis técnicos, puesto que brinda muchas ventajas para la construcción, tales como: la excelente manejabilidad para elaborar piezas, la facilidad para su obtención, la disponibilidad en el mercado, entre otros.

Obviamente, los aspectos físicos y mecánicos no fueron los únicos factores que aportaron para la elección de la madera, sino que se lo consideró entre las principales, por el uso mayoritario que presentó en la construcción de edificaciones antiguas. Una aproximación por las visitas in situ, se deduce que de cada 10 edificaciones dentro y fuera del casco urbano, 8 poseen al menos un elemento de eucalipto y 2 poseen estructuras con diferentes tipos de madera. Contrastando con las ventajas que presenta el eucalipto, es también importante saber que su uso puede conllevar algunas desventajas, pero totalmente controlables. Entre los principales problemas tenemos que es una madera con muchas rajaduras y esto en ocasiones puede alterar a un elemento en función o en estética, también, es considerada una especie con mucho contenido de humedad, por lo que el proceso de secado al aire libre demora un poco más que otras especies.



Figura 2.19. Centro Histórico de Cuenca-Ecuador, Calle Gran Colombia. Casas con estructuras internas y cubiertas de Madera./ Fuente: Daniel Enríquez M. 2012.



Figura 2.20. Edificación de la Familia Lliguipuma. Cumbe-Azuay. / Fuente: Daniel Enríquez M. Año 2009.



Figura 2.21. Edificación de la Familia Espinoza. Susdel-Azuay. Casa con estructura de Eucalipto./ Fuente: Daniel Enríquez M. Año 2011.

2.3.3. Obtención y clasificación de los elementos de madera antigua

El propósito de trabajar con muestras de madera antigua es proporcionar datos reales y aproximados de la resistencia que puede alcanzar una pieza de madera, después de años de uso, con rangos de entre 50 y 100 años, aproximadamente.

Para mantener datos eficientes y comunes entre sí, se ha recurrido a la obtención de muestras de una misma especie. Como ya se explicó, nuestra selección estará encaminada a trabajar con **Eucalipto**. Sin embargo, una de las muestras seleccionadas fue de diferente especie; esto con el objetivo de poder obtener conclusiones acerca

del uso de la madera en la construcción de manera global. La especie de la muestra en cuestión fue difícil de definir, ya que pertenece a madera local, utilizada antiguamente en la construcción.

Las muestras fueron obtenidas de tres viviendas diferentes: el primero grupo "I" son vigas con aproximadamente 100 años de antigüedad, el segundo grupo "II" son vigas con más de 50 años de antigüedad y un grupo "III" con elementos de eucalipto nuevo, los cuales servirán de referencia para estimar el estado de la madera antigua, respecto a uno de buenas condiciones. A continuación, se detalla los grupos de muestras de madera y las viviendas de las cuales se obtuvo los elementos:

Muestras de madera antigua 100 años (Grupo "I")

El primer Grupo de muestras de eucalipto antiguo, se obtuvo de una edificación del Centro Histórico de Cuenca; construcción que se encuentra en rehabilitación y en proceso de sustitución de piezas. El inmueble presenta más de 90 años de existencia y pertenece actualmente a la Sra. Rosario Guzmán. La edificación se encuentra ubicada en la calle Simón Bolívar 8-86 y Padre Aguirre. (Figura 2.22.)

El estado del grupo de piezas obtenidas son las adecuadas para alcanzar el objetivo propuesto, pues cada una presenta un deterioro de sus propiedades tanto físicas y mecánicas, consecuencia de más de 90 años de antigüedad, así como de factores incidentes tales como: humedad y xilófagos. Entre las especie obtenidas destacada una muestra de madera desconocida (Viga B), pese a ello, fue fácil la identificación de sus características, pues pertenece al grupo C y, por lo tanto, pasa a ser una madera suave en condiciones pobres para ser utilizada en la construcción. En la Tabla b9. se detalla las características de todas las piezas obtenidas en la edificación 1.

Viga "A", estructuralmente trabajaba a flexión, simplemente apoyada sobre una riostra de madera por el un costado, y por el otro extremo,



Figura 2.22. Vivienda Guzmán. Cuenca-Ecuador, ubicada en la calle Simón Bolívar/ Fuente: Daniel Enríquez M. Septiembre 2013.



Figura 2.23. Viga A. Grupo "I", madera de 100 años./ Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.24. Viga B. Grupo "I", madera de 100 años. / Fuente: Daniel Enríquez M.

se empotraba a un muro de adobe y así mismo sobre una riostra. Las condiciones de la muestra son buenas, pese a sus daños y deterioros producidos por el paso de los años. (Figura 2.23.)

Viga "B" de especie de madera desconocida, pero con características fácilmente identificables, a partir del análisis de su densidad. Respecto a su ubicación,

Grupo “I”

Elementos de Madera Antigua. 100 años de antigüedad aproximada.
Características básicas y dimensiones previas a la preparación de probetas para ensayos.

DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN (cm)	TIPO DE MADERA	AÑOS DE USO	DEFORM. (mm)	PATOLOGÍA	C.H. %	CARGA QUE SOPORTA C.M.	DENSIDAD BÁSICA
Viga de entrepiso exterior (Viga A)	10x12.5x330	Eucalipto	90	25	Polilla en albura, humedad en extremos y rajaduras paralelas	12%	80 Kg/m ²	0.72 g/cm ³
Viga de entrepiso interior (Viga B)	15.8x13.7x380	Especie desconocida	90	7	Polilla excesiva en albura y duramen, humedad en extremos y rajaduras paralelas	9%	110 Kg/m ²	0.5 g/cm ³
Dintel de ventana (Dintel E)	28x12x90	Eucalipto	90	-	Polilla en albura, fendas de secado	12%	200 Kg/m ²	0.70 g/cm ³
Dintel de ventana (Dintel C)	25x12x135	Eucalipto	90	-	Polilla en albura, en cantidades mínimas, Rajaduras paralelas	12%	200 Kg/m ²	0.70 g/cm ³

Tabla b9. Grupo “I”. Características de las Muestras de Madera Antigua.100 años. / Fuente: Daniel Enriquez M.

fue encontrada en el entrepiso de la edificación; simplemente apoyada, sobre riostras del mismo material. El deterioro de este elemento fue muy notorio, pues la presencia de xilófagos y hongos se evidenciaron en toda la pieza. (Figura 2.24.)

Dintel “C” y “E”, su función estructural fue la de servir como dinteles de ventanas con vanos no mayores a 60 cm. de longitud. Sobre las pieza se apoyaban bloques de adobe de 30 cm de espesor. La condición del primer dintel “C” es buena, existe una presencia de polilla muy baja, mientras que el dintel “E” sólo presentó una rajadura longitudinal en la mitad de toda la pieza. La ausencia de marcas de xilófagos y hongos hace ver que la pieza se mantuvo en un ambiente adecuado. (Figura 2.25.)

Muestras de madera antigua 50 años (Grupo “II”)

Las muestras de madera antigua del segundo grupo fueron obtenidas de una vivienda tradicional (adobe y madera), ubicada en la zona de Misicata propiedad de la familia Mogrovejo Lazo. La edad de las piezas sobrepasan los 50 años de antigüedad y sus condiciones se mantienen regularmente buenas. (Figura 2.26.)



Figura 2.25. Grupo “I”, madera de 100 años. / Fuente: Daniel Enriquez M.



Figura 2.26. Vivienda Mogrovejo Lazo. Ubicación: Misicata-Cuenca./ Fuente: Daniel Enriquez M. Enero 2014

Grupo “II”

Elementos de Madera Antigua. 50 años de antigüedad aproximada.
Características básicas y dimensiones previas a la preparación de probetas para ensayos.

DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN (cm)	TIPO DE MADERA	AÑOS DE USO	DEFORM. (mm)	PATOLOGÍA	C.H. %	CARGA QUE SOPORTA C.M.	DENSIDAD BÁSICA
Viga de Cubierta(Par) (Viga F)	12x12x300	Eucalipto	50	-	Humedad en extremos y rajaduras paralelas	14%	120 Kg/m ²	0.75 g/cm ³
Viga de Cubierta (Viga G)	13x12.5x320	Eucalipto	50	-	Polilla excesiva en albura y duramen, humedad en extremos y rajaduras paralelas	13%	120 Kg/m ²	0.73 g/cm ³

Tabla b10. Grupo “II”. Características de las Muestras de Madera Antigua. 50 años. / Fuente: Daniel Enriquez M.

Los elementos fueron parte de la cubierta del inmueble, los cuales fueron sustituidos por madera nueva. Entre la principales defectos de las muestras está la presencia de xilófagos y hongos, pero solo a nivel de albura; la presencia de humedad es normal ya que no existe señales de hongos. Las piezas seleccionadas son de eucalipto, y al igual que el Grupo “I” sus condiciones son las ideales para poder analizar sus factores principales para proponer nuevos sistemas de refuerzo.

En la siguiente tabla b10. se detallan las características básicas de las muestras obtenidas en la mencionada edificación vernácula. Cabe recalcar que, a diferencia del primer grupo, la condición de estas vigas son mejores, pues sus años de antigüedad son de 50, aproximadamente y, por lo tanto, su deterioro se presenta en menor porcentaje; sin embargo, el objetivo de esta tesis estará en analizar las capacidades portantes del material, bajo los condicionantes expuestos.

Las vigas “F” y “G”, estructuralmente presentan similares características, pues su función fue la de sustentar una cubierta como elementos principales de la estructura. (Figura 2.27. y 2.28.) Los elementos presentaron ligeras rajaduras longitudinales, propias de la especie y, además, su contenido de humedad fuemenor al 15%. La presencia de insectos fue prácticamente despreciable, ya que sólo se constató marcas a nivel de corteza y casi nulas en albura.



Figura 2.27. Viga F. Grupo“II”, madera de 50 años. / Fuente: Daniel Enriquez M.



Figura 2.28. Viga G. Grupo“II”, madera de 50 años. / Fuente: Daniel Enriquez M.

Muestras de madera nueva (Grupo III)

A este grupo de muestras pertenecen elementos de eucalipto nuevo, son vigas de madera aserrada obtenidas en los depósitos de la ciudad y con características visualmente buenas. Cada pieza, al igual que las muestras de madera antigua, serán técnicamente analizadas para obtener las principales propiedades mecánicas pero en un estado original; es decir, las muestras expresarán datos reales de los módulos, pero sin antes haber experimentado alguna carga. El obtener datos de una muestra nueva ayudará a calcular la pérdida de propiedades que puede presentar una especie a lo largo del tiempo, puesto que los datos obtenidos estarán relacionados con el análisis de las maderas de los grupos I y II. Los únicos defectos que presentan las muestras son rajaduras longitudinales, propias de la especie, y no serán influyentes al momento de realizar los ensayos de laboratorio.

2.3.3.1. Preparación de probetas para Ensayos Mecánicos

Después de obtener las piezas antiguas de madera, cada una fue procesada para regular dimensiones de sección y longitudes, ya que las piezas deben tener sus superficies planas, para no alterar los resultados de los ensayos realizados en laboratorio.

Los ensayos a realizarse tienen como objetivo principal la obtención de parámetros fundamentales para el análisis técnico de las capacidades portantes que posee una pieza de madera, después de años de función estructural. Cada muestra obtenida, se la fragmentó en pequeñas probetas con longitudes de 60, 90 y 100cm. (Figura 2.29.)

La longitud de cada probeta está en función del ensayo a realizar y, por supuesto, de la dimensión de la máquina disponible en los laboratorios de la universidad, que posee capacidades para ensayos a flexión estática



Figura 2.29. Almacenamiento de probetas para ensayos mecánicos. / Fuente: Daniel Enriquez M. / Diciembre 2013.

perpendicular a la fibra, con probetas de longitudes no mayor a 100cm., y para pruebas de compresión paralela a la fibra no mayor a 60cm.

Aunque la longitud de las probetas haya sido desproporcional a sus secciones y la distancia entre apoyos al momento de realizar los ensayos sea menor a las de una viga de escala normal, el fundamento de realizar dichos ensayos estuvo en la obtención de parámetros que aporten al análisis de los refuerzos a aplicar; es decir, si consideramos una pieza de 100cm. de longitud y sección constante de 10x10 cm. en un ensayo a flexión estática, su resistencia será mayor a una pieza que posea 300 cm de longitud y con la misma sección, pues sus apoyos se encuentran más distantes al centro del elemento; entonces los momentos de inercia serán mayores a los de la probeta. Sin embargo, sea cual sea el resultado, nuestro objetivo estará en analizar e interpretar los datos que posee cada probeta, con respecto a sus capacidades resistentes.

Con respecto a las capacidades mecánicas de la madera, es necesario señalar que el análisis se sustenta dentro de los límites elásticos del material; es decir, todas las capacidades a analizar estarán dentro del límite elástico, puesto que la madera debería trabajarse específicamente en esta etapa, por motivos de seguridad.

Es importante recordar que el límite elástico esta en la zona que cubre la línea recta en la gráfica Esfuerzo-Deformación (Figura 2.30.) y determina la capacidad que tienen los materiales para deformarse frente a un esfuerzo pero no de manera permanente; es decir, si a una viga de madera se le aplica un esfuerzo, que esté dentro del rango elástico, producirá una deformación, pero si la carga es retirada la viga, nuevamente, volverá a su estado original.

Contrapuesto a este fenómeno está la etapa plástica del material, en la que el material adquiere una deformación frente a un esfuerzo, pero de manera permanente, puesto que todas las fibras del material fueron sobre-esforzadas. El diseño de piezas de madera bajo condiciones plásticas requiere de un minucioso estudio y con resultados un tanto alejados de la realidad; sin embargo, su consideración puede resultar fundamental frente a esfuerzos producidos por sismos, debido a que solo allí la madera podría superar los límites plásticos y llegar a puntos de ruptura o fallo estructural.

Entonces, la importancia de los ensayos radica en la determinación de parámetros elásticos, necesarios para el análisis de cada sistema y para el posterior desarrollo del documento. A continuación se detalla cada factor a ser determinado:

- Módulo de elasticidad

Determina la elasticidad del material, es decir, define la ductilidad que puede llegar a tener la madera, antes de deformarse permanentemente. Para el Eucalipto existen valores del Módulo de Elasticidad, previamente definidos, los cuales varía entre 75.000 y 100.000 Kg/cm².

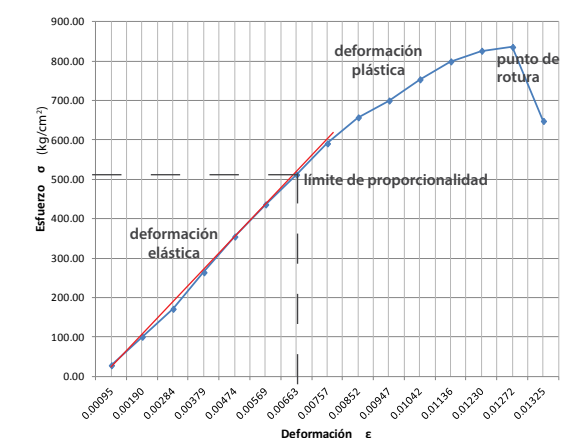


Figura 2.30. Curva típica de Esfuerzo-deformación de la madera. / Fuente: Daniel Enriquez M.

- Rigidez

Determina la fuerza mínima que necesita un elemento para ser deformado; es decir, especifica la resistencia que tiene un material frente a deformaciones, ya sea en flexión o compresión.

- Esfuerzo máximo admisible

Determina la resistencia que puede alcanzar un elemento cuando es aplicado una carga, dependiendo del área de su sección transversal; es decir, el esfuerzo máximo es la capacidad que tiene un material para resistir cargas antes de llegar a una deformación permanentemente de la pieza.

- Momento máximo

Determina el máximo momento flector que puede resistir el material en el límite proporcional. Este factor es importante para el diseño de estructuras donde cambie de uso o función, ya que determina cargas máximas admisibles.

Después de haber descrito los factores a determinar, es necesario indicar qué ensayos de laboratorio será, siempre, recomendable. Además de que cada probeta sea rectificadas para regular y nivelar sus caras debido a que las formas irregulares pueden alterar resultados o, simplemente, presentar fallas al momento de las pruebas

debido a un mal asentamiento en los apoyos. Para optimizar los procesos de análisis, no hay que olvidar asignar códigos a cada probeta para identificar más fácilmente su grupo y, por ende, sus características. De esta manera, se pueden llevar un proceso sistematizado y ordenado.

2.3.4. Ensayos mecánicos con madera sin reforzar

Los ensayos en laboratorio tienen como objetivo general, determinar el comportamiento elástico que la madera tiene en su estado natural (sin reforzar), respecto a los años que se mantuvo en función.

El módulo de elasticidad será el principal factor a considerar entre las capacidades resistentes de cada muestra; sin embargo, la determinación de otros factores, como el esfuerzo máximo, serán indispensables para el análisis técnico de cada muestra.

Al determinar el módulo elástico de cada probeta, estamos definiendo las capacidades portantes que posee la madera, pero bajo condiciones determinadas; es decir, obtenemos propiedades mecánicas de la madera pero con diferentes años de antigüedad; recordemos que cada muestra pertenece a un grupo según sus años en función (100 y 50 años).

Los ensayos realizados en laboratorio fueron básicamente dos: compresión paralela y flexión estática, de los cuales obtuvimos una tabla de resultados para cada muestra, la cual está en función de deformación - carga.

Para las pruebas a flexión se utilizaron probetas no mayores a 100cm. de longitud y con una distancia entre apoyos de 75 cm. Mientras que para las pruebas a compresión paralela a la fibra, la probeta fue de 60 cm de longitud. Para verificar la deformación de las probetas se implementó a la máquina un deformímetro, el cual midió

la deformación según la carga que se aplique.

Aunque en la actualidad existe una norma para la determinación de módulos de elasticidad a partir de probetas de madera a escala real (Norma UNE 408). La aplicación para nuestro medio estuvo limitada, pues el laboratorio no cuenta con la máquina adecuada para trabajar con vigas a escala real. Sin embargo, los ensayos fueron realizados en la prensa disponible y omitiendo la norma de longitudes de probetas; se obtuvo datos con márgenes de error mínimos.

2.3.4.1. Ensayo a flexión estática

En el siguiente ensayo se utilizaron probetas de 3 grupos diferentes, divididos según sus años de antigüedad. Para cada muestra, el procedimiento fue idéntico, desde su montaje hasta la minuciosa lectura de sus resultados. Para el montaje de cada pieza, se utilizó una base metálica, la cual sirvió de apoyo para las muestras. Estos apoyos ayudaron a simular que el elemento se encuentre simplemente apoyado en ambos extremos y distantes 75cm.

La carga fue aplicada mediante dos puntos de presión, los cuales equidistan de los apoyos o

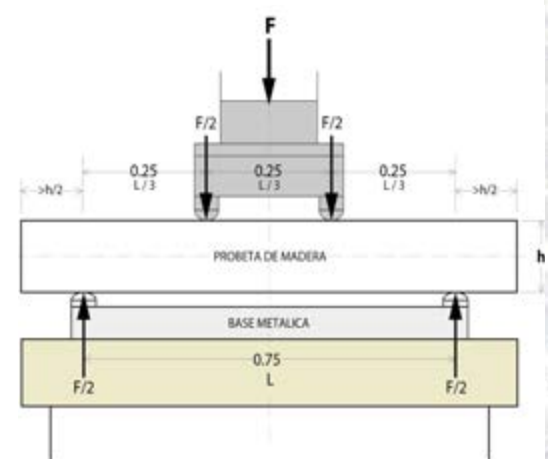


Figura 2.31. Replanteo del ensayo a Flexión estática para determinar las propiedades mecánicas. / Fuente: Daniel Enríquez M.

reacciones dividiendo a la probeta en tres partes aparentemente iguales. En la siguiente gráfica, se detalla el montaje que se realizó en todas las probetas para el ensayo a flexión: (Figura 2.31.)

Dentro del Grupo "I" de maderas con 100 años de antigüedad, existió dos tipos de análisis, debido a la presencia de otra especie de madera diferente a la de eucalipto.

La Viga "B" del Grupo "I" proporcionó la primera probeta para la determinación de las capacidades portantes de la madera. (Figura 2.32.) Mientras que de la Viga "A" se obtuvo la probeta de eucalipto para el respectivo ensayo. (Figura 2.33.)

Los elementos del Grupo "II" pertenecen a vigas con 50 años de antigüedad. A diferencia del grupo anterior, el ensayo realizado en esta ocasión fue solo con una probeta de eucalipto, proveniente de la Viga "F". (Figura 2.34.) Todo el proceso realizado contó con las mismas acciones aplicadas para las demás probetas; de esta forma, se aseguró una equidad para la lectura y toma de datos.

Para definir las propiedades iniciales de la madera se utilizó probetas provenientes de vigas de eucalipto nuevo, pertenecientes al Grupo "III" (Figura 2.35.). Los datos obtenidos bajo estas condiciones serán fundamentales para la recuperación de estructuras, pues serán datos referenciales para las muestras de madera antigua.

En consecuencia, con los años que posea un elemento de madera, las capacidades o propiedades mecánicas disminuirán según factores de tiempo, lugar y función de cada muestra. De allí la importancia de realizar ensayos con maderas de diferentes años de antigüedad.

2.3.4.1.1. Tablas de datos y gráficas de esfuerzo-deformación

Las tablas de resultados y gráficas fueron obtenidas en una misma secuencia según sus



Figura 2.32. Probeta B1, muestra de madera desconocida, 100 años. Izq.: Sección transversal. Der.: Longitud total. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.33. Probeta A3, muestra de eucalipto antiguo, 100 años. Izq.: Sección transversal. Der.: Longitud total. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.34. Probeta F1, muestra de eucalipto antiguo, 50 años. Izq.: Sección transversal. Der.: Longitud total. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.35. Probeta Libre, muestra de eucalipto nuevo. Izq.: Sección transversal. Der.: Longitud total. / Fuente: Daniel Enríquez M.

años de antigüedad. A continuación se detalla la información de cada probeta, según su grupo. Primero se encuentra la tabla de valores, obtenida directamente desde la máquina de laboratorio y, luego, la gráfica respectiva.

Es importante destacar que los resultados variaron, notablemente, según el grupo de muestras analizadas, debido a los años de existencia. Sin embargo, se debe determinar los parámetros antes descritos para aproximarse a dar criterios más técnicos y con bases lógicamente sustentadas.

La lectura de datos para cada probeta no tuvo inconvenientes ni fallas de tipo mecánico, más bien, la presencia de errores pudo ser mínima, con rangos despreciables al momento de lectura de cargas y de calibrar el deformímetro.

- Madera Antigua de 100 años

La primera muestra para el ensayo a flexión fue la Probeta B1 (Figura 2.36.), la cual provino del elemento más deteriorado de todos los grupos de madera, aunque sus resultados fueron técnicamente inaceptables desde un punto de vista técnico y estructural -aparte de que su especie es desconocida y sus capacidades fueron muy inferiores a las del eucalipto-, el objetivo fue el generar recomendaciones adicionales para el uso de maderas de baja densidad en la construcción, para así generar una conciencia de la importancia que puede tener un análisis previo del uso de la madera estructural.

Como parte fundamental, para el análisis de los comportamientos de cada probeta, se detalla las diferentes etapas elásticas y plásticas en la curva de esfuerzo-deformación, expuesta en la figura 2.37., la cual fue obtenida de los datos que determinó la máquina de laboratorio y han sido expresadas en la tabla b11.

La probeta A3 fue la segunda muestra para realizar el ensayo, pero la primera proveniente de una viga de eucalipto. Esta no presentó ninguna contrariedad en el momento de ejecutar el ensayo. (Figura 2.38.) Los resultados obtenidos fueron muy superiores a la muestra anterior (probeta B1), pero, así mismo, no superaron a las probetas con menos años de uso. En cuanto a la ductilidad que presentaron las muestras en los ensayos, se pudo ver claramente, la extraordinaria capacidad que tiene

el material para deformarse; pues así lo confirman la gráfica de esfuerzo-deformación (Figura 2.39.), y los datos determinados por la máquina de laboratorio. Esta característica, se podrá observar en los resultados de cada probeta, ya que es una propiedad que distingue a la madera de los demás materiales.

Otra capacidad que será fundamental en el presente análisis, es la rigidez a flexión de cada muestra. Como se dijo, anteriormente, esta característica se encuentra directamente relacionada con la ductilidad, pues recuerde que la rigidez es la fuerza mínima que se necesita para producir una deformación unitaria; por lo tanto, si se aumenta la rigidez del material, aumenta también su capacidad elástica y, por supuesto, su capacidad portante.

- Madera Antigua de 50 años

Los resultados del siguiente ensayo resultaron según los cálculos anticipados, debido a que los datos de la probeta F1 (Figura 2.40.) lograron superar a los obtenidos con la muestra de 100 años; pero, estos resultados no son lo suficientemente válidos para hacer conclusiones técnicas del deterioro de la madera, a través de los años. Los años en función del elemento no causaron limitaciones durante el proceso, pues la probeta F1, no manifestó problema alguno y tanto los resultados como la lectura de sus datos fueron totalmente normales.

Es apreciable, también, el cambio de los resultados a partir de esta probeta, pues los años en función se van reduciendo y esto repercute en los procesos y, obviamente, en el comportamiento al momento de los ensayos; es decir, las cargas aplicadas son cada vez más grandes y, por ende, sus propiedades mecánicas mejoran y se acercan más a rangos ya establecidos. Sin embargo, todavía continúa una gran interrogante sobre el factor de deterioro que presentan las muestras según los años de antigüedad. De allí la importancia de

Datos generales del ensayo a flexión de la "PROBETA B1". (Madera con 100 años de antigüedad)

Tabla de Resultados. "Probeta B1"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
220	50
676	100
1250	150
1703	200
2056	250
2196	300
1162	350

* Carga máxima= 2.196,00 kgf.

Tabla b11. Probeta B1. Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación./
Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca



Figura 2.36. Montaje para ensayo a flexión. Probeta B1. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Carga-deformación. "Probeta B1"

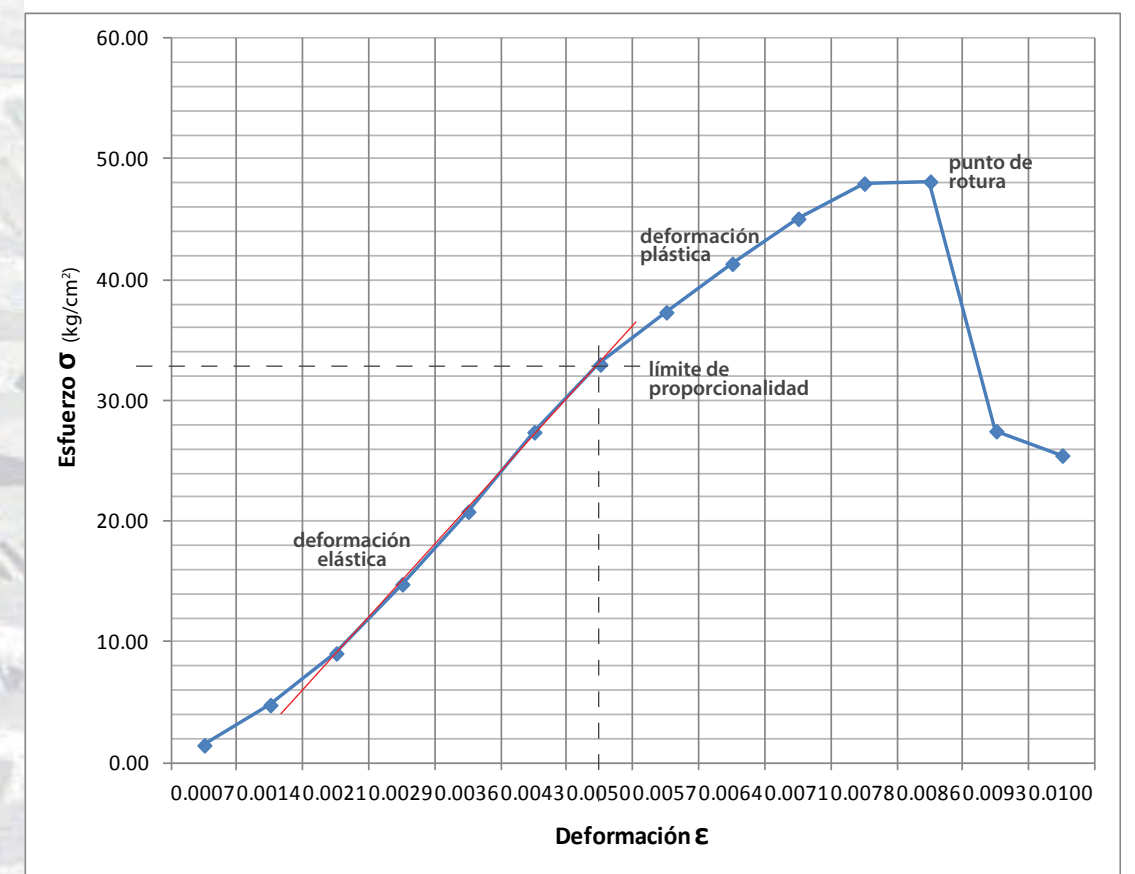


Figura 2.37. Probeta B1. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Datos generales del ensayo a flexión de la “PROBETA A3”. (Madera con 100 años de antigüedad)

Tabla de Resultados. “Probeta A3”

CARGAS kg	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
479	50
1581	100
2226	150
2845	200
3493	250
4075	300
4620	350
5126	400
5590	450
6020	500
6360	550
6567	600
6808	650
7077	700
6795	750

* Carga máxima= 7.077,00 kgf.

Tabla b12. Probeta A3. Tabla de resultados Carga-Deformación / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca



Figura 2.38. Montaje para ensayo a flexión. Probeta A3. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. “Probeta A3”

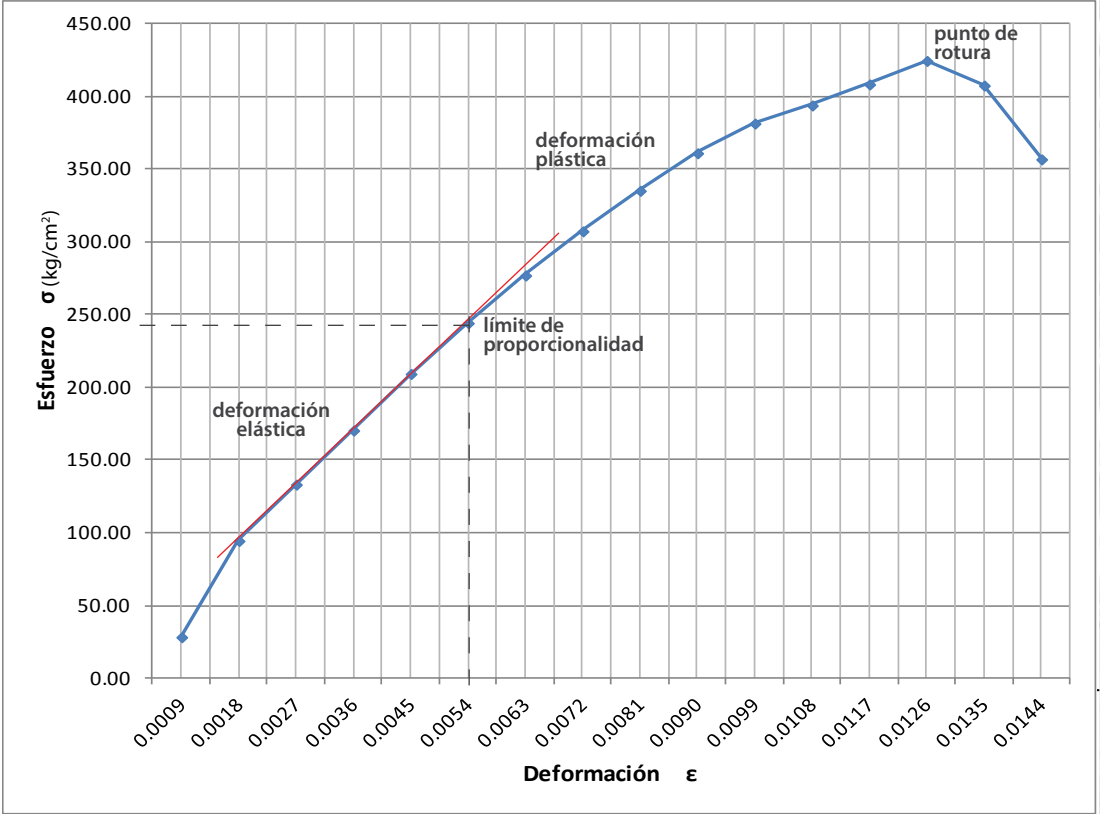


Figura 2.39. Probeta A3. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Datos generales del ensayo a flexión de la “PROBETA F1”. (Madera con 50 años de antigüedad)

Tabla de Resultados. “Probeta F1”

CARGAS kg	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
560	50
2060	100
3025	150
4070	200
4900	250
5850	300
6600	350
7390	400
8060	450
8730	500
9260	550
9700	600
10230	650
10629	700
10900	750



Figura 2.40. Montaje para ensayo a flexión. Probeta F1. / Fuente: Daniel Enríquez M.

11057	800
11092	850
11370	900

* Carga máxima= 11.468,00 kgf.

Tabla b13. Probeta F1. Tabla de resultados Carga-Deformación / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Curva de Esfuerzo-Deformación. “Probeta F1”

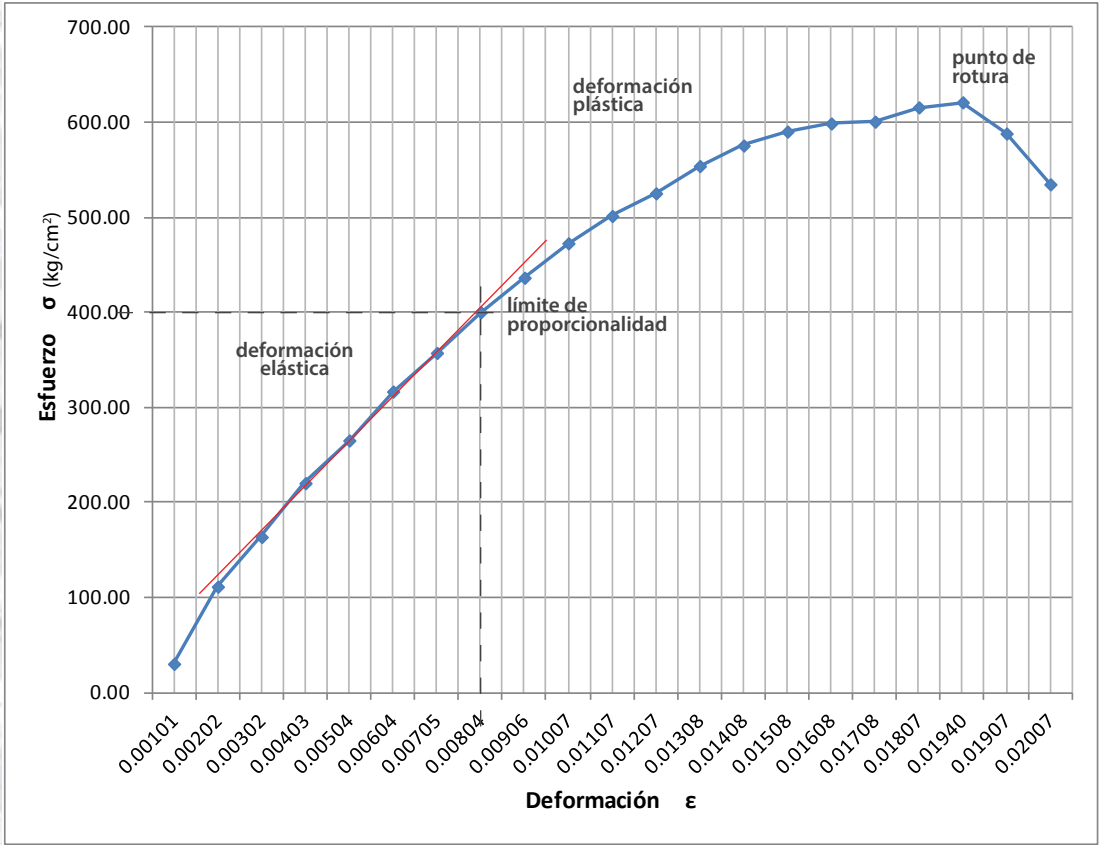


Figura 2.41. Probeta F1. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Datos generales del ensayo a flexión de la "PROBETA L1". (Madera nueva)

Tabla de Resultados. "Probeta nueva L1"

CARGAS kg	DEFORMACIÓN 50×10^{-3} pulg.
428	50
1545	100
2640	150
4070	200
5470	250
6730	300
7900	350
9120	400
10140	450
10800	500
11630	550
12333	600
12750	650
10000	700
5950	800



Figura 2.42. Montaje para ensayo a flexión. Probeta nueva L1. / Fuente: Daniel Enríquez M.

* Carga máxima= 12.910,00 kgf.

Tabla b14. Probeta nueva L1. Tabla de resultados Carga-Deformación ./
Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Curva de Esfuerzo-Deformación."Probeta nueva L1"

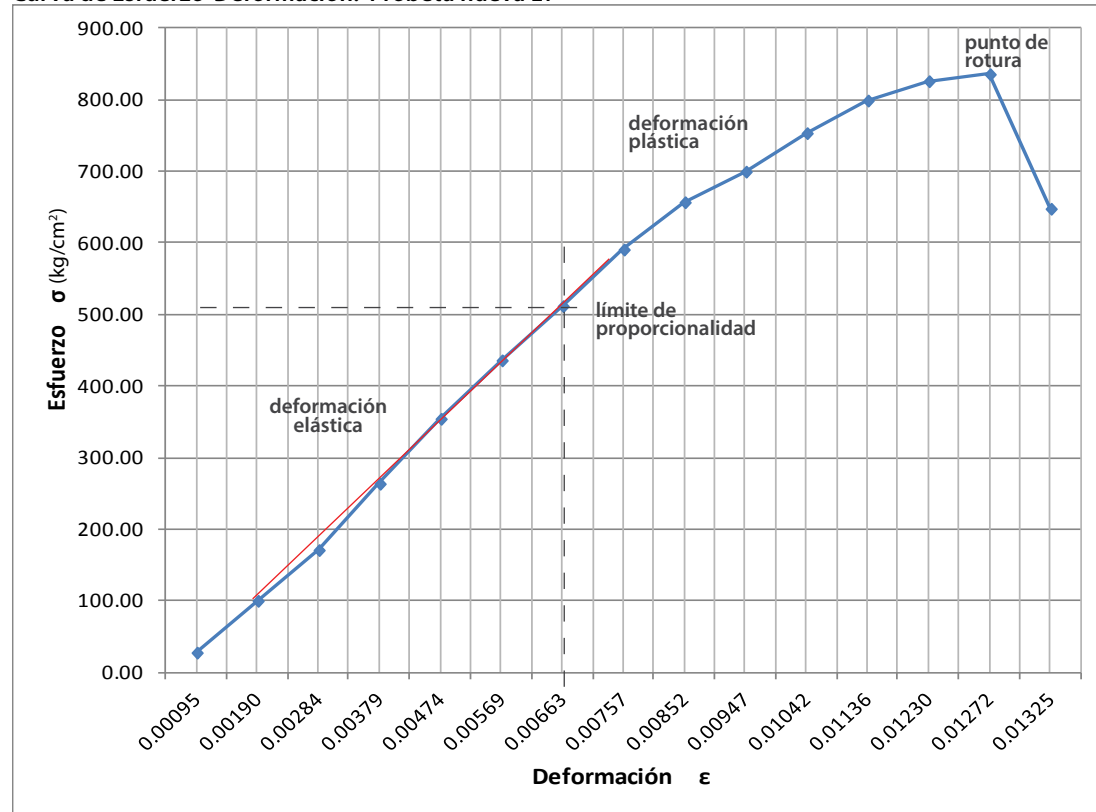


Figura 2.43. Probeta nueva L1. Curva de Esfuerzo-Deformación para vigas. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

obtener un factor de deterioro para la madera. La tabla b13. detalla tanto los datos obtenidos en el ensayo, y como la respectiva figura 2.41.

- Madera Nueva

Los resultados obtenidos en el presente ensayo quizá sean los más importantes debido al estado en que la madera se encuentra, puesto que todas sus capacidades no han sido alteradas. El ensayo ha sido realizado con madera de excelentes condiciones, es decir, un material con mínimas fallas estructurales y evitando las más comunes, como pueden ser: gemas, rajaduras, nudos muertos, fendas, etc.

La importancia radica en que todos los datos tomados, anteriormente, con madera antigua deberán aproximar su resistencia a los de la madera nueva. Es decir, la madera antigua deberá alcanzar mediante reforzamientos, al menos el 80% de su capacidad origina, y con una proyección a superar dichas propiedades.

Como se mencionó, el último ensayo con madera sin reforzar fue realizado con la probeta L1, la misma que presentó condiciones excepcionales para garantizar los resultados de una muestra nueva. (Figura 2.42.) De acuerdo a todos los datos expresados en las tabla b14. y la figura 2.43., se pudo realizar una aproximación del comportamiento de la madera, según sus años de antigüedad.

El resultado de este ensayo, como es lógico, superó a todas las muestras realizadas con madera antigua, sin embargo, analizar el material por rangos de edad será indispensable para poder obtener un factor de deterioro general, y así poder valorar las capacidades de las piezas de madera, con una gran proximidad a la realidad.

En cuanto a las cargas máximas de cada muestra, fue lógico pensar que la madera nueva tendría la máxima capacidad, pero el hecho de determinar un esfuerzo máximo no nos garantiza el análisis completo para realizar un reforzamiento estructural.

Para ello, será necesario establecer una base común de referencias, determinando los principales factores de elasticidad, y a partir de los resultados obtenidos, conceptualizar coeficientes de deterioro, según los años de antigüedad de la madera y, finalmente, proceder a las propuestas de recuperación estructural.

Como ya se mencionó, la importancia de la rigidez en el diseño de piezas de madera será indispensable. Es frecuente, sin lugar a dudas, que el diseño de un elemento de madera quede definido, más por su rigidez que por su resistencia. Esto se debe a que las deformaciones de la madera son altas, debido a las características del material; por esta razón, los datos deben permanecer por debajo de las tolerancias admisibles.

2.3.4.1.2. Fórmulas y obtención de resultados

Después de haber realizado los ensayos en el laboratorio con todos los datos obtenidos, se procedió a determinar las principales propiedades mecánicas de cada muestra, según sus años de antigüedad.

Para cada probeta, se procedió de la misma manera, aplicando un procedimiento similar para la obtención de su módulo de elasticidad, y para las propiedades elásticas de la madera en su estado natural; es decir, sin aplicar ningún refuerzo.

Con respecto al módulo de elasticidad, la expresión general, que determinó su resultado, fue obtenida después de igualar la ecuación de Hooke con la expresión para la obtener el esfuerzo crítico.⁸ A continuación, se detalla el proceso para la obtención de la fórmula 2.2. la misma que determina el Módulo de elasticidad de manera general; es decir, define los módulos elásticos a flexión o compresión:

8. Pytel, A. y Singer F. "Resistencia de Materiales". Cuarta Edición. Mexico D.F. 1995.

Ley de Hooke
fórmula (2.2.)
 $\sigma = E \cdot \epsilon$

Esfuerzo crítico
fórmula (2.3.)
 $\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$

$E \cdot \epsilon = \frac{M \cdot c}{I}$

$E = \frac{M \cdot y}{I \cdot \epsilon}$ → **Radio de curvatura(ρ)**
fórmula (2.4.)

$E = \frac{M \cdot \rho}{I}$
fórmula (2.5.)

donde:

E= Módulo de elasticidad

M= Momento flector

ρ = Radio de curvatura

I = Inercia de la sección

Todo el procedimiento descrito, anteriormente, es una alternativa muy fácil y práctica para la obtención del módulo de elasticidad; lo hemos utilizado porque dicha expresión maneja datos reales como la deformación unitaria (ϵ) de una viga a flexión; también está el momento flector, dato importante para medir la capacidad resistente de la madera y, por último, la inercia que es la que establece la relación entre la resistencia y la sección utilizada.

Parte fundamental para la fórmula 2.3. es la obtención del radio de curvatura (ρ), ya que su determinación está sustentada en la deformación unitaria y la sección de la viga. El radio de curvatura es la representación directa de la deformada en una viga a flexión y se la puede encontrar mediante simples procesos de geometría analítica; es decir, mediante la expresión de la circunferencia, puesto que en una viga siempre serán conocidos tres puntos, que pueden ser utilizados en dicha expresión, para así obtener el dato deseado.

Es importante recordar que, la deformación unitaria (ϵ) en flexión no es la que obtenemos directamente del ensayo en laboratorio,

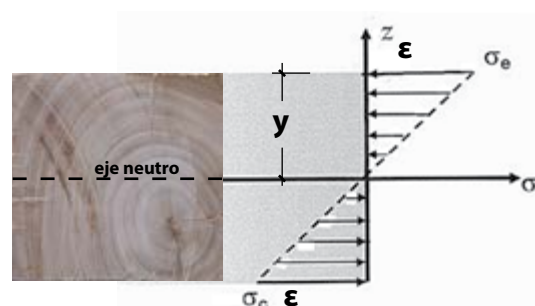


Figura 2.44. Sección transversal de la viga de madera a flexión./ Fuente: Daniel Enríquez M.

sino que es parte de un análisis y de una detallada interpretación de las fibras deformadas en la sección de la viga con respecto al eje neutro.

Si se observa la figura 2.44., es claramente distinguible que las fibras superiores están sometidas a compresión; mientras que, las fibras inferiores lo están a tracción; esas magnitudes son los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas. Entonces la deformación unitaria estará en el máximo esfuerzo que se produzca en los extremos de la sección. Por lo tanto, el hecho de considerar a la deformación directamente con datos de las tablas de resultados es incorrecto, puesto que esa deformación no guarda ninguna relación con las deformaciones de sus fibras y con el radio de curvatura.

Para la obtención de la rigidez, el proceso se fundamentó en diferentes términos: esta vez se recurrió a las fórmulas de cortante, momento y deformada, obtenidas a través del método de la doble integración para una viga, y a partir de la expresión de la deformada, se pueda obtener la fórmula de la rigidez.

Se debe tomar en cuenta que el procedimiento no puede ser utilizado en forma general, pues, a pesar de que la rigidez esté en base del módulo de elasticidad y de su inercia, interfieren otros factores, de igual manera, importantes.

Las cargas y la distancia entre apoyos serán los factores que ayuden a determinar exactamente la rigidez de un elemento; por ejemplo, si tenemos una viga de 10x10 cm. que cubre una luz de 150 cm, su rigidez será diferente que si la misma viga cubriera una luz de 300 cm. No es difícil darse cuenta, qué elemento se deformaría más rápido; si nos cuestionamos de esta manera podremos darnos cuenta que en la determinación de la rigidez se deberá realizar un análisis para cada caso.

Para obtener la fórmula para la rigidez, es conveniente detallar el cuerpo libre de la viga con todos sus datos; se debe recordar que la expresión de rigidez no será la misma para cualquier madera, puesto que dependerá del tipo de cargas. (Figura 2.45.) Una vez obtenido el diagrama de cuerpo libre, procedemos a obtener la ecuación general de momentos, luego, mediante el sistema de doble integración, se podrá encontrar las expresiones de pendiente y la deformada:

Obtención de la rigidez

$$EI M(x) = Px - P\langle x-L/3 \rangle - P\langle x-2L/3 \rangle \quad \text{fórmula (2.6.)}$$

$$EI \theta(x) = \frac{Px^2}{2} - \frac{P\langle x-L/3 \rangle^2}{2} - \frac{P\langle x-2L/3 \rangle^2}{2} + C_1 \quad \text{fórmula (2.7.)}$$

$$EI y(x) = \frac{Px^3}{6} - \frac{P\langle x-L/3 \rangle^3}{6} - \frac{P\langle x-2L/3 \rangle^3}{6} + C_1 x + C_2 \quad \text{fórmula (2.8.)}$$

Las tres expresiones anteriores, son fórmulas básicas para encontrar datos generales de una viga a flexión en cualquier punto del elemento; de éstas, la última expresión nos servirá para la determinación de la rigidez, no hay que olvidar que dicho dato está en función de las deformaciones de un elemento a flexión.

Esto es posible, ya que si previamente analizamos la figura 2.41, se podrá ver que la deformación en los apoyos es infinita; es decir, equivale a 0; por lo tanto, podemos deducir que: cuando $x=0$, la deformada=0 y también la constante $C_2=0$.

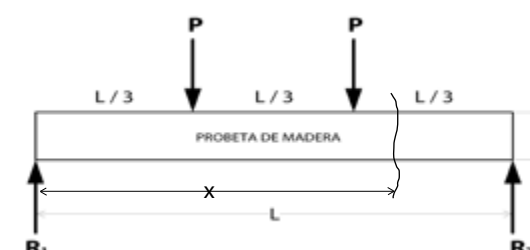


Figura 2.45. Representación del cuerpo libre de las probetas./ Fuente: Daniel Enríquez M.

Mientras que en el otro apoyo: cuando $x=L$, la deformada también será 0 y si la constante $C_2=0$, podemos obtener C_1 :

Desde la fórmula (2.8.), reemplazando $x=L$:

$$0 = \frac{P(L)^3}{6} - \frac{P(L-L/3)^3}{6} - \frac{P(L-2L/3)^3}{6} + C_1(L) + 0$$

$$0 = \frac{PL^3}{3} - \frac{2PL^3}{81} - \frac{PL^3}{162} + C_1 L$$

$$C_1 = \frac{-149 PL^2}{162} \quad \text{CONSTANTE } C_1$$

Finalmente, obtenida la constante C_1 , se puede obtener la rigidez, y de la ecuación de deformada (fórmula 2.8.) encontrar la máxima flexión, la cual se producirá en la mitad de la luz ($L/2$). Entonces, se podrá reemplazar $x=L/2$, para luego sustituir de la expresión de la deformada " $Ely(x)$ ", a $y=1$, y la carga por su similar K_f . Esto se debe a la definición de la rigidez, que la determina como la mínima fuerza para producir una deformación. A continuación, se detalla el proceso para la obtención de la expresión de rigidez:

Desde la fórmula (2.8.), reemplazando $x=L/2$:

$$EI y(x) = \frac{P \cdot L^3}{6 \cdot 8} - \frac{P \cdot L^3}{6 \cdot 216} - \frac{49 \cdot PL^3}{162 \cdot 2}$$

$$EI y(x) = \frac{PL^3}{48} - \frac{PL^3}{1296} - \frac{49PL^3}{324}$$

$$EI y(x) = \frac{85 PL^3}{648}$$

Entonces, reemplazamos, $y=1$ $P=K_f$

$$K_f = \frac{648 EI}{85 L^3} \quad \text{fórmula (2.9.)}$$

donde:

k = Rigidez a flexión

E= Módulo de elasticidad

I = Inercia de la sección

L = Luz entre apoyos

Tabla b15.
Resultados principales de muestras sin reforzar. Grupos I,II y III.
Módulo de elasticidad, esfuerzo max. admisible, momento max. y rigidez
de cada probeta según años de antigüedad.

GRUPO	DESCRIPCIÓN	SECCIÓN b x h (cm)	DEFORM. MÁXIMA (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kgf/cm²)	ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm2)	MOMENTO MAX. (Kgf.m)	RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)
Madera antigua de 100 años (Grupo I)	Probeta B1	13,7 x 15,8	7,62	6.613	33	18.825	538,10
	Probeta A3	12,5 x 10	17,72	46.426	170,00	50.905	873,35
Madera antigua de 50 años (Grupo II)	Probeta F1	11,15 x 11,15	23,6	54.680	221,00	82.500	1.272,70
Madera Nueva (Grupo III)	Probeta L1	10,5 x 10,5	17,14	78.663	263,85	98.750	1.439,80

Tabla b15. Resultados de muestras sin reforzar a flexión perpendicular. Módulo de elasticidad, esfuerzo máximo, momento máximo y rigidez. / Fuente: Daniel Enríquez M.

En cuanto a la obtención del máximo momento flector, bastará con reemplazar en la fórmula general de momentos “El M(x)”, a, x= L/2, puesto que el momento máximo se dará a la mitad de la luz. Esta expresión también será útil para la determinación de la carga P que actúa en el momento máximo admisible.

Obtención de momento flector

M(x)= Px - P<x-L/3>

M(L/2)= P (L/2) - P<(L/2) -L/3>

M(L/2)= $\frac{PL - PL}{2} - \frac{PL}{6}$

M= $\frac{PL}{3}$ fórmula (2.10.)

Es necesario recalcar, nuevamente, que todos los datos obtenidos están por debajo del límite de elasticidad, es decir, son datos que determinan las capacidades máximas a las que puede trabajar la madera de forma elástica. Para ello, es muy importante la correcta interpretación y graficación de la curva de Esfuerzo-Deformación.

Para la determinación del esfuerzo máximo admisible, primero se debe recordar que este esfuerzo es el que lleva a la sección del elemento de madera a su límite de elasticidad; es decir, en donde empieza el comportamiento plástico.

Para su obtención se puede aplicar dos expresiones, la ya mencionada ley de

Hooke (Fórmula 2.2.) y la expresión para el esfuerzo crítico (Fórmula 2.3.). Todo dependerá de los datos que se conozcan, pero siempre bajo el criterio del límite de elasticidad; es decir, el esfuerzo máximo admisible deberá ser obtenido en el punto de inflexión, donde termina la recta de la gráfica esfuerzo-deformación. No olvidar que después de este límite, el material se vuelve plástico y su análisis requiere de procesos y expresiones más complejas. A pesar de aquello, la determinación de las propiedades plásticas, ayudan a realizar cálculos estructurales cuando un elemento se encuentra bajo cargas de gran magnitud y con tiempos cortos de duración, como los esfuerzos sísmicos, sin duda, suman importancia al estudio de las estrucutras de madera.

Después de determinar las expresiones para la obtención de las principales propiedades mecánicas de la madera, se detalla a continuación, en la tabla b14., todos los resultados de las probetas de madera, sin reforzar, las cuales fueron divididas en los grupos ya explicados.

Expuestos los resultados, sin duda, el dato más importante que se ha obtenido es el módulo de elasticidad de cada muestra, pues en base a

esta propiedad se determinan todos los factores para el análisis de la madera. En la figura 2.46. se observa claramente, a través de las barras, el deterioro que sufre la madera después de años de función, los cuales servirán como punto de partida para determinar el factor de deterioro para cada gurpo de muestras.

La primera barra corresponde a datos estandarizados para el eucalipto, seguida de la barra que representa la probeta L1 de madera nueva, la cual aproxima su resultado a primer dato. Por último, se detalla las probetas de 50 y 100 años, respectivamente, en las cuales se hace evidente la pérdida de capacidades portantes.

Según datos estandarizados para la madera de eucalipto, el valor de su módulo de elasticidad está entre los 75.000 y 100.000 Kg/cm². Después de obtener nuestros resultados, se confirma que tales datos se aproximan de manera real a nuestro campo de estudio y, de esta forma, se valida todos los análisis técnicos que se presentan en el desarrollo del documento.

2.3.4.1.3. Resultados del ensayo a flexión estática

Respecto a las propiedades mecánicas de la madera de eucalipto, se ha realizado un análisis de cada resultado y de cada reacción que tuvieron las probetas durante todo este proceso de experimentación, lo cual dejó resultados muy útiles para la construcciones en madera. Cabe aclarar que estos procesos son totalmente válidos para ser aplicados en elementos de madera, especialmente en estructuras de eucalipto, dependiendo de los años de antigüedad. A continuación, se enumera conclusiones útiles para la madera de eucalipto, desde una muestra nueva, hasta un elemento con 100 años de uso.

1. Resulta útil y valioso para situaciones didácticas o técnicas, la elaboración de una detallada base de datos que registre de cada muestra estudiada, toda la información obtenida

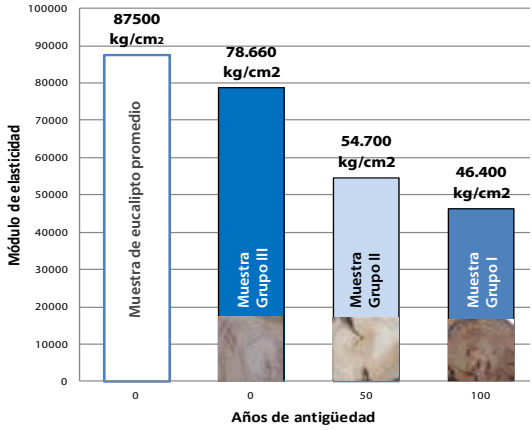


Figura 2.46. Gráfica de los módulos de elasticidad de las probetas a flexión./ Fuente: Daniel Enríquez M.

en laboratorio, esto con el propósito de cotejar resultados. Recuerde que se cuenta con una tabla de datos, y que cada carga y deformación nos dará un resultado similar, pero no igual. Esto puede conllevar a un trabajo fatigante y, en algunas veces, redundante debido a que se puede llegar a manejar una numerosa cantidad de datos que muchas veces pueden resultar irrelevantes; pero, mejora las apreciaciones de cada muestra, y es totalmente válido.

2. Con respecto al uso de maderas de baja densidad para la construcción, queda comprobado lo riesgoso que puede resultar su utilización, debido al alto grado de deterioro que presentan en sus capacidades elásticas.

El estudio de la probeta B1 da cuenta de lo que puede disminuir el material con el pasar de los años, pues, a pesar de que la muestra se encontraba bajo condiciones estables de conservación, su deterioro fue algo inevitable y sus resultados así lo demostraron.

La apariencia de la muestra fue totalmente alterada a causa de xilófagos y rajaduras. Otro factor importante para evitar el uso de maderas de baja densidad fue el resultado de su

módulo de elasticidad, puesto que un elemento de madera, con dichas condiciones, puede resultar una pieza estructuralmente inútil y es allí cuando surge la necesidad de sustituirla por otra pieza.

3. Como consecuencia, a lo anteriormente planteado, es importante manejar criterios para el uso de maderas de baja calidad y especies desconocidas a partir de experiencias similares. Aunque, hoy en día, esta situación sea poco probable, la utilización de madera de baja calidad, puede ser contraproducente a la estructura en general. Por lo tanto, queda descartado el uso de refuerzos estructurales en piezas de baja resistencia.

4. A pesar de los años de antigüedad y del notable deterioro de las propiedades mecánicas que pueda presentar cada probeta, la ductilidad mantiene una constante que es proporcional a la fuerza aplicada. Las gráficas de esfuerzo-deformación para cada grupo de maderas describen la extraordinaria capacidad de deformación de la madera, pese a los años esta propiedad se mantiene.

5. El deterioro que presenta la madera puede evaluarse en dos períodos largos de tiempo, como ya quedó explicado. La madera con 50 años de antigüedad disminuye sus capacidades mecánicas en un 25-30%, con un factor de reducción de 1,43; mientras que, la madera de 100 años disminuye sus capacidades en un 40% y, así mismo, mediante un factor de 1,69. Estos datos son importantes porque proporcionan un indicador bastante aproximado a la realidad. Sin embargo, sabemos que la madera es altamente cambiante en sus resultados, por razones propias de su naturaleza, pero es de gran ayuda cuando se presentan casos de restauración de edificaciones.

6. La proximidad de resultados que tienen las muestras de 50 años, con respecto a las muestras de madera nueva, son menores; esto se debe a la increíble reacción que presentan las fibras de la especie. Esto confirma que la resistencia del eucalipto se debe al

deterioro paulatino que tienen dichas fibras.

Entonces, se puede establecer que el eucalipto bajo buenas condiciones de conservación podrá mantener sus capacidades mecánicas en estado, aceptablemente, bueno dentro de los primeros 50 años, inclusive, podría soportar más de 100 años, pero bajo limitantes más estrictos de conservación. El hecho de que una madera pueda soportar varios años de uso estructural, no quiere decir que sea recomendable mantenerla. Recuerde que la diferencia de capacidades mecánicas entre madera nueva y madera de 100 años es casi del 50%; surge, entonces, la importancia y necesidad de aplicar refuerzos estructurales.

7. El análisis realizado, obviamente, está direccionado a madera antigua, y todos los factores establecidos están en base a maderas de similar condición; sin embargo, no queda descartada la posibilidad de mejorar la capacidades de la madera nueva, antes de ser puesta en obra. Este tema se lo profundizará, más adelante, puesto que en este momento se está abordando sólo el estudio del comportamiento de la madera en su estado natural.

2.3.4.2. Ensayo a compresión paralela

Para el siguiente ensayo de compresión paralela a las fibras, el proceso fue similar al realizado anteriormente; ya que antes de realizar el montaje respectivo, fue necesario el ajuste de medidas para evitar errores en la toma de datos, especialmente en las caras de las probetas, puesto que se debe lograr un asentamiento adecuado entre la base y la carga.

El objetivo de esta prueba está en analizar elementos verticales de madera, entre los más conocidos en la construcción, están las columnas, pies derechos, tochos, pendolones, etc. En conclusión, el análisis será para todos los

elementos que actúen de forma axial en una estructura y estén sometidos a compresión.

La principal ventaja de trabajar con columnas cortas es el comportamiento que tienen cuando se encuentran bajo la acción de una carga gradual; no hay que olvidar que un elemento corto tiene una flexión lateral o pandeo muy pequeño, que prácticamente son despreciables y que puede llegar a fracasar por aplastamiento.

Con esta premisa de comportamientos entre los tipos de columnas, se puede decir que una columna larga o intermedia puede romperse por flexión lateral producida por una carga que es muy inferior a una carga necesaria para producir una ruptura por aplastamiento. Por lo tanto, se deduce que las columnas largas se rompen por flexión lateral o pandeo; las columnas intermedias, por una combinación de aplastamiento y pandeo; mientras que, los elementos cortos, por aplastamiento. Entonces resulta obvio pensar que la resistencia de una columna es mayor, mientras menor es su longitud; y el análisis resulta directamente relacionado a esfuerzos puros de compresión.

Para el caso de las columnas intermedias y largas, resulta difícil determinar exactamente la forma en la que los esfuerzos varían o la proporción que cada una contribuye al esfuerzo total. Ahora bien, los datos obtenidos en el presente análisis no podrán ser considerados para su aplicación directa en una estructura, ya que se debe trabajar con esfuerzos menores a los admisibles establecidos para la madera.

Por ejemplo, si el esfuerzo admisible obtenido de cualquier probeta, resulta mayor al esfuerzo admisible establecido para la madera, se debe a que las propiedades de la columna analizada serán mayores a la de una columna larga o intermedia, que por lo general son utilizadas a menudo en la construcción.

Es importante destacar que, el análisis de los presentes elementos contempla un proceso

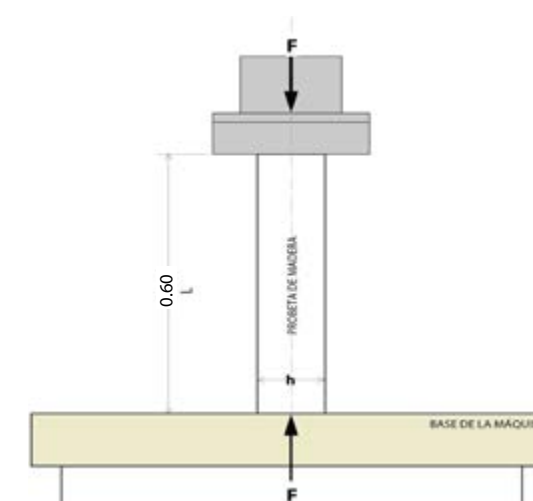


Figura 2.47. Replanteo del ensayo a compresión paralela para determinar las propiedades mecánicas. / Fuente: Daniel Enríquez M.

más rápido y simple, debido a la relación que existe entre sus deformaciones y los esfuerzos aplicados; es decir, cada fuerza producirá una disminución de la longitud pero de manera axial, unificando los esfuerzos de todas las fibras. Entonces, si el ensayo está a compresión, todas sus fibras presentarán la misma condición, de igual manera, si el esfuerzo se encuentra a tracción. Otro dato importante a considerar en este ensayo, es la toma de datos, en vista de que su lectura puede resultar un tanto dificultosa debido a la rapidez con la que actúa la máquina; para ello, es recomendable disminuir la velocidad de la carga y, necesariamente, hacer un registro en video. A pesar de todos los inconvenientes, los resultados tuvieron una gran aproximación a la realidad; más adelante, se podrá ver que la propiedad que tiene la madera con esfuerzos paralelos a sus fibras es muy superior a los esfuerzos perpendiculares a las mismas.

La figura 2.47. resume esquemáticamente el montaje para el ensayo a compresión. Se puede ver claramente que la fuerza F actúa de manera normal a la sección de la probeta y produce una disminución longitudinal conforme aumenta la

carga. Una vez analizado el esquema queda más claro cómo actúan las fibras de la muestra y cómo se relacionan los esfuerzos y las deformaciones.

2.3.4.2.1. Tablas de datos y gráficas de esfuerzo-deformación

Las tablas de resultados y gráficas mantienen la misma secuencia que en el ensayo anterior; es decir, el orden de presentación está de acuerdo con sus años de antigüedad.

Para una mejor comprensión de todos los datos expuestos, es necesario indicar que las curvas de deformación no deben ser dibujadas con los datos aquí expuestos, ya que éstos no representan más que la carga aplicada pero no el esfuerzo. De la misma manera ocurre con las deformaciones, puesto que para determinar las propiedades mecánicas, se necesita la deformación unitaria, más no el dato obtenido directamente; esto se debe a que la deformación unitaria relaciona la disminución de la longitud con respecto a la carga aplicada y a la sección del elemento.

En cuanto a las unidades, las cargas están expresadas en kilogramos fuerza; mientras que, las deformaciones están en pulgadas. Caber recalcar que, para determinar los datos, se debe tener cuidado el momento de las transformaciones pertinentes de las unidades. Se deja establecido que para todo el documento se manejarán las unidades de fuerza en kilogramos (Kgf.); mientras que, las unidades de longitud, serán en centímetros (cm).

A continuación se detalla de manera gráfica las respectivas probetas utilizadas para los ensayos, y la información según el grupo. La probeta A1 (Figura 2.48.) pertenece al "grupo I", y a pesar de provenir de una viga, sus capacidades portantes resultaron favorables para la prueba. En la siguiente página, se detallan los principales componentes del ensayo realizado a la muestra A1, entre los cuales podemos ver el estado de la probeta después



Figura 2.48. Probeta A1, L=60cm. Muestra de eucalipto antiguo 100 años. Izq.: Longitud total. Der.: Sección transversal. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.49. Probeta F2, L=60cm. Muestra de eucalipto antiguo 50 años. / Fuente: Daniel Enríquez M.

del fallo (Figura 2.51.) y su respectiva curva de esfuerzo-deformación (Figura 2.52.), la cual denota una gran incremento de los esfuerzos, respecto a las primeras pruebas realizadas a flexión.

La probeta F2 (Figura 2.49.), al igual que la muestra anterior, provino de un elemento viga, acompañada de resultados aceptablemente buenos para su estudio y además, pertenece al "grupo II" de maderas antiguas. En el ensayo realizado, se pueden distinguir los principales datos generados con la probeta de 50 años de antigüedad. La figura 2.53. representa el estado de la muestra después del ensayo. Aunque la zona de fallo no se distingue claramente, sus fibras se abrieron al inferior de la probeta como consecuencia de las cargas aplicadas.

Datos generales del ensayo a compresión de la "PROBETA A1". (Madera con 100 años de antigüedad)

Tabla de Resultados. "Probeta A1"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50×10^{-3} pulg.
894	25
14134	40
25350	50
34458	60
37930	70
35450	80
32150	90
31820	110

* Carga máxima= 38.022 kgf.

Tabla b16. Probeta A1. Tabla de resultados Carga-Deformación. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca



Figura 2.51. Estado de la probeta A1 después del ensayo a compresión. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta A1"

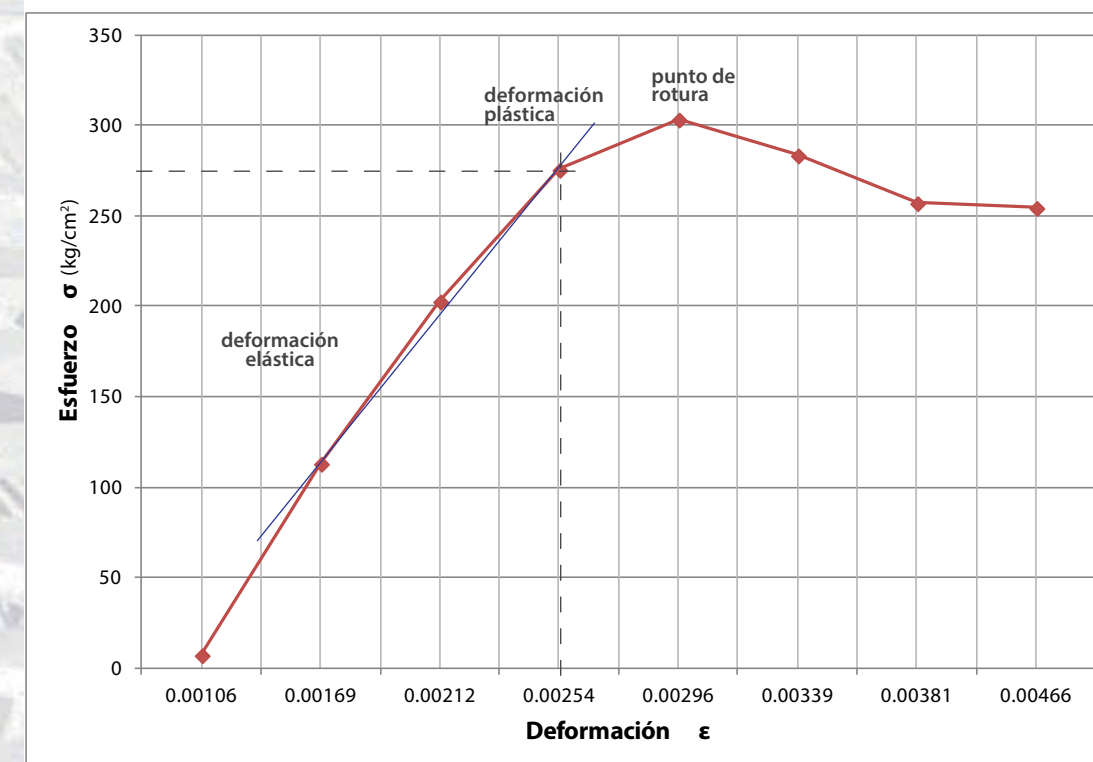


Figura 2.52. Probeta A1. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos verticales. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Datos generales del ensayo a compresión de la “PROBETA F2”. (Madera con 50 años de antigüedad)

Tabla de Resultados. “Probeta F2”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
1519	10
10340	20
17530	30
24890	40
30870	50
34650	60
39320	70
43140	80
47430	90
50500	100
46190	110
45500	120

* Carga máxima= 50.519 kgf.

Tabla b17. Probeta F2. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca



Figura 2.53. Estado de la probeta F2 después del ensayo a compresión. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. “Probeta F2”

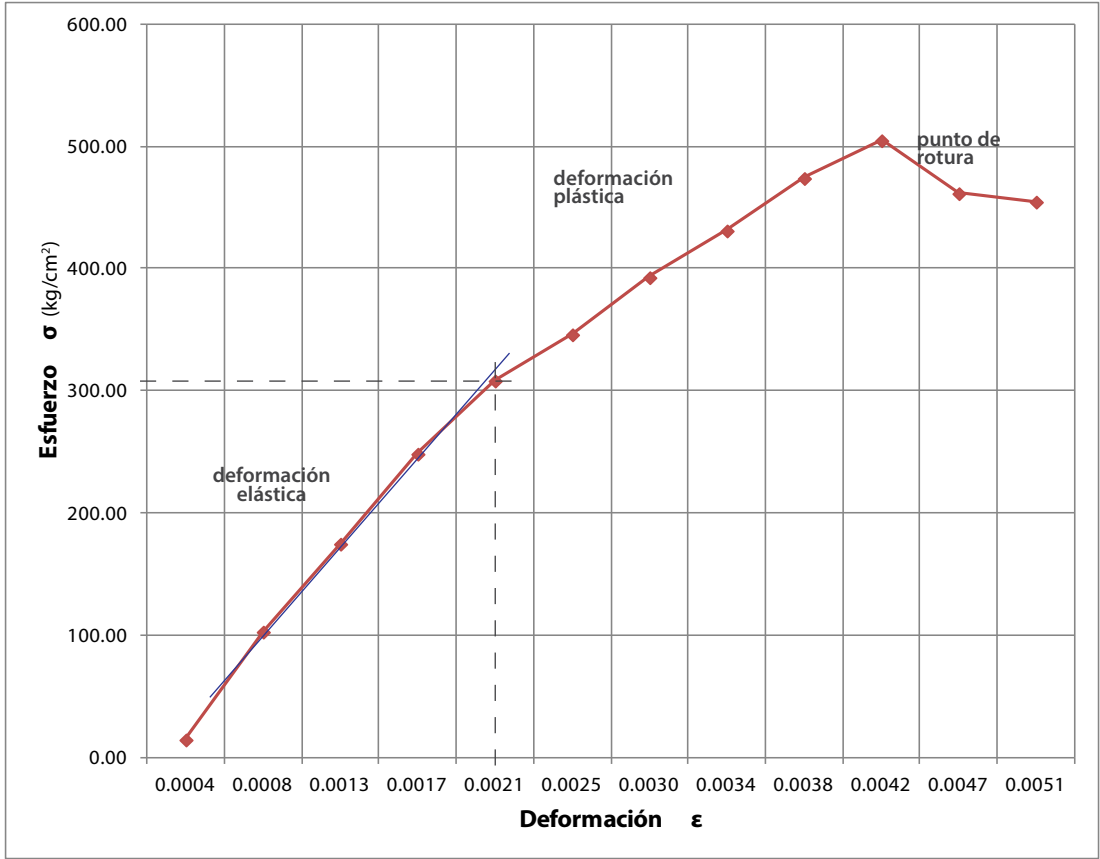


Figura 2.54. Probeta F2. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos verticales. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Datos generales del ensayo a compresión de la “PROBETA L2”. (Madera nueva de eucalipto)

Tabla de Resultados. “Probeta L2”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
1505	10
12500	20
20350	30
27500	40
33990	50
38460	60
43150	70
47250	80
50580	90
53583	100
49500	110
46050	120

* Carga máxima= 53.593 kgf.

Tabla b18. Probeta L2. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca



Figura 2.55. Estado de la probeta L2 después del ensayo a compresión. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. “Probeta L2”

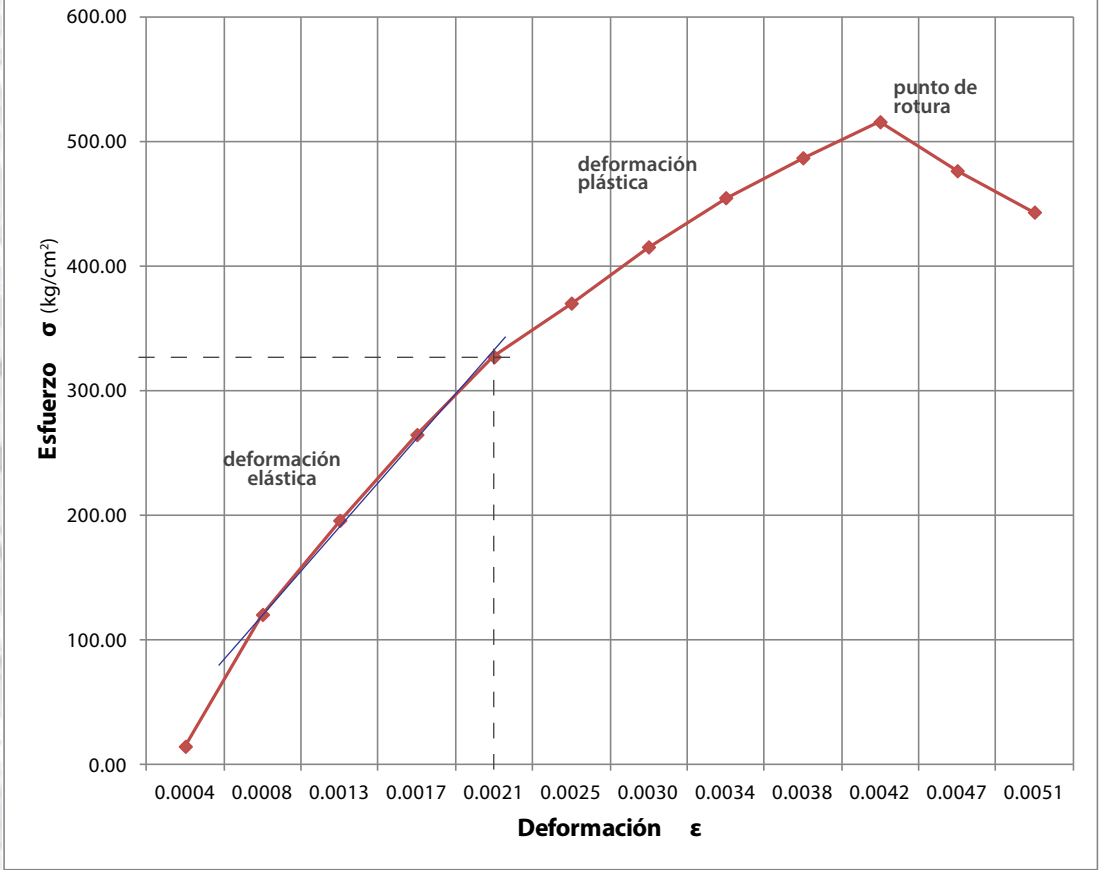


Figura 2.56. Probeta L2. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos verticales. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Finalmente, la probeta L2 (Figura 2.50.) fue la muestra que sirvió de referencia para cotejar resultados y estimar los márgenes de error, pero al igual que los ensayos a flexión éstos fueron mínimos. La muestra pertenece al “grupo II” de maderas nuevas y su información se la puede ver en el último ensayo realizado para muestras nuevas, expuesta en la página anterior, en la cual se detallan, bajo la misma secuencia, los principales datos generados, la figura 2.55. demuestra el estado de la probeta luego de la falla, la cual no es muy notoria, mientras que al afigura 2.56. representa la curva de esfuerzo-deformación y la notable capacidad resistente del material a compresión.

Para cada muestra, se presenta toda la información requerida para el ensayo a compresión, ordenado de la siguiente manera: tabla de los valores de carga y deformación, obtenidos directamente desde la máquina del laboratorio; gráfica del estado de la probeta después del ensayo, es decir, la probeta destruida; finalmente, la gráfica de esfuerzo-deformación, detallando los principales puntos de inflexión y, sobre todo, el rango elástico de cada pieza.

2.3.4.2.2. Fórmulas para obtención de resultados

Para continuar con la obtención de las propiedades mecánicas de la madera a compresión paralela, es necesario recalcar, nuevamente, que todos los análisis fueron realizados dentro de los límites de elasticidad del material.

Una gran ventaja de trabajar con esfuerzos paralelos a las fibras de la madera, es su extraordinario comportamiento a las cargas aplicadas, y también se puede considerar que la aplicación de fórmulas para la obtención de las principales cualidades mecánicas de la madera resultan más rápidas y directas, debido a la relación que existe entre sus esfuerzos y deformaciones. Al igual que en los ensayos de la madera a flexión, para la compresión resulta indispensable obtener el módulo de elasticidad, puesto que



Figura 2.50. Probeta L2, L=60cm. Muestra de eucalipto nuevo. Izq.: Longitud total. Der.: Sección transversal. / Fuente: Daniel Enriquez M.

nuevamente la mayoría de características elásticas se fundamentan en base a dicha propiedad. Para su obtención se ha utilizado la expresión para la Ley de Hooke (Formula 2.2.), en la cual interviene el esfuerzo normal y la deformación unitaria.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{fórmula (2.2.)}$$

$$\downarrow$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Una vez expuesta la manera para obtener el módulo de elasticidad, queda por determinar los dos factores que componen dicha expresión. Por su parte, el esfuerzo determina la fuerza por unidad de área que puede soportar un elemento; entonces, su expresión viene dada de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{fórmula (2.11.)}$$

Mientras que la deformación unitaria es un indicador de la relación existente entre la deformación total y la longitud original del elemento. Por lo tanto, su valor será el cociente entre la deformación y la longitud del elemento. Hay que recordar que el resultado será una magnitud pequeña en valor y carente de unidad, puesto que siempre se deberá utilizar unidades iguales entre los dos términos; es decir, si la longitud se expresa en cm. la deformación también se deberá expresar de esa manera.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{fórmula (2.12.)}$$

Finalmente, para obtener la rigidez a compresión de cada probeta recurrimos a un análisis previo de sus características elásticas. Cabe recordar que, la expresión para determinar la rigidez cambiara según el caso en el que el elemento se encuentre, por ejemplo, la fórmula 2.9. expuesta en el ensayo anterior a flexión, no es válida para la obtención de la rigidez a compresión, a pesar de que se encuentren relacionados el módulo de elasticidad y la sección de cada probeta.

Entonces, el proceso para obtener dicha expresión parte nuevamente de la Ley de Hooke, pero en este caso, se deberá determinar primero la deformación total del elemento. Si se observa; la expresión de Hooke posee solo tres determinantes (σ , E y ϵ), y el factor que necesitamos es δ . Para este caso es totalmente válido reemplazar dichos factores por sus iguales, obteniendo una nueva expresión y de la cual se obtiene la expresión para la rigidez (K_c). A continuación se detalla el proceso antes explicado, para determinar la fórmula 2.13. para la rigidez a compresión:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \epsilon && \text{fórmula (2.2.)} \\ \downarrow & && \downarrow \\ \frac{P}{A} &= E \cdot \frac{\delta}{L} && \text{reemplazando por su igual para despejar } \delta \\ \downarrow & && \\ \delta &= \frac{P L}{E A} && \text{reemplazamos } \delta=1 \text{ y } P=K \\ K_c &= \frac{E A}{L} && \text{fórmula (2.13.)} \end{aligned}$$

(K = representa la rigidez del elemento a compresión, es decir, el valor de la fuerza mínima que producirá una deformación en un elemento de madera.)

Expuestos los datos para determinar las propiedades mecánicas de cada grupo de maderas, se procedió a la generación de una base de datos para una correcta obtención y apreciación de cada resultado. Esto es importante por la cantidad de datos que se maneja.

Al exponer los principales componentes mecánicos que tiene la madera a compresión pura, podemos obtener nuevamente un factor

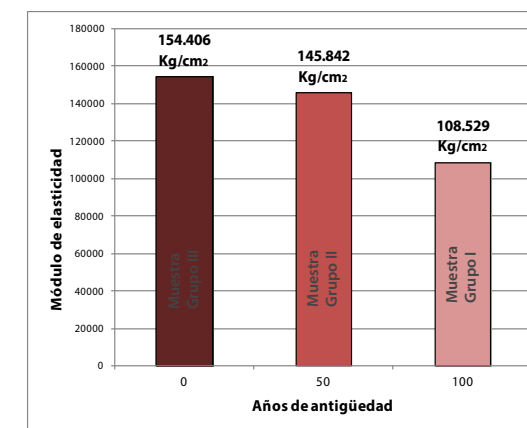


Figura 2.57. Gráfica de los módulos de elasticidad de las probetas a compresión paralela. / Fuente: Daniel Enriquez M.

de deterioro según los años de antigüedad. En la figura 2.57., se puede observar la disminución del módulo de elasticidad y obviamente las capacidades elásticas de cada probeta, conforme avanza los años de uso. Sin embargo, la diferencia de los resultados no son tan distantes como, en cambio, si ocurrió con las muestras a flexión; todo lo cual, puntualiza más aún la capacidad que tiene la madera cuando trabaja con esfuerzos paralelos a la fibra, a pesar de la antigüedad de cada probeta, puesto que en 100 años aproximados las capacidades disminuyen apenas un 30%.

2.3.4.2.3. Resultados del ensayo a compresión paralela

Para finalizar con la obtención de datos, se expone en la tabla b19. las principales capacidades mecánicas, las cuales direccionan el análisis para determinar los factores de deterioro según los años y, de igual manera, servirán para un adecuado diseño estructural. Sin lugar a duda, ha quedado demostrado técnicamente que la madera al trabajar a compresión paralela a sus fibras, posee extraordinarias capacidades, las cuales han sido analizadas y estudiadas para aportar algunos criterios

Tabla b19.
Resultados principales de muestras a compresión. Grupos I,II y III.
Módulo de elasticidad, esfuerzos máximo y admisible y rigidez a compresión
de cada probeta según años de antigüedad.

GRUPO	DESCRIPCIÓN	SECCIÓN b x h (cm)	DEFORM. MÁX. (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kgf/cm ²)	ESFUERZO MÁXIMO (kgf/cm ²)	FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA	RIGIDEZ A COMPRESIÓN (Kgf / cm)
Madera antigua de 100 años (Grupo I)	Probeta A1	12,15 x 10	27,9	108.529,00	275,00	1,42	226.102
Madera antigua de 50 años (Grupo II)	Probeta F2	10 x 10	27	145.842,00	308,00	1,05	243.070
Madera Nueva (Grupo III)	Probeta L2	10 x 10,4	30,1	154.406,00	326,00	-	267.637

Tabla b19. Resultados de muestras sin reforzar a compresión paralela. Módulo de elasticidad, esfuerzos máximos y rigidez. / Fuente: Daniel Enríquez M.

técnicos y útiles para su uso en la construcción. Las conclusiones descritas a continuación tienen como objetivo contribuir con un conocimiento general respecto a las capacidades resistentes del material, estableciendo directrices que aporten a un correcto diseño y refuerzo estructural.

A continuación se enumeran algunos puntos fundamentales que resumen el comportamiento de la madera a compresión:

1. Partiendo de un análisis de las gráficas esfuerzo-deformación, podemos ver que la todas las muestras de madera ensayadas a compresión se vuelven menos dúctil que a flexión, pero aumentan considerablemente su rigidez. Esto se debe a que aumentan notablemente su resistencia, pero disminuyen su capacidad de deformarse.

2. A pesar de los años de antigüedad que presenta cada muestra, la resistencia a la compresión se mantiene de manera considerable. Las capacidades mecánicas, según sus años, disminuyen de forma paulatina, presentando una disminución en su resistencia a esfuerzos máximos admisibles, de apenas 10% en los primeros 50 años. Esto sin duda es ventajoso desde un punto de vista estructural; sin embargo, el deterioro muchas veces es consecuencia de factores externos y suelen presentarse en las partes críticas del elemento, como son: sus bases y uniones debido a una mala conservación.

3. El deterioro de las propiedades mecánicas, según los años de antigüedad, de maderas de 50 años, presentan una disminución del 10%, con un factor de reducción de 1,05; mientras que, las maderas de 100 años disminuyen sus capacidades en un 30%, y mediante un factor de 1,42. Estos datos son muy importantes para estimar la pérdida de resistencia en elementos a compresión, ya que basan sus resultados en un análisis técnico, respecto a una muestra nueva de madera.

Si comparamos estos factores de deterioro con los obtenidos en los ensayos a flexión, observamos que son inferiores; por lo tanto, se confirma lo antes mencionado: que la madera a pesar de los años mantiene de manera paulatina sus capacidades portantes.

4. En cuanto al esfuerzo máximo obtenido, podemos ver que cada muestra supera la resistencia que puede llegar a tener un hormigón de 275 kg/cm². Guardando distancias entre los materiales, podemos asumir que la madera puede alcanzar resistencias similares a las de un hormigón de alta calidad, aunque, dicha analogía resulta subjetiva debido a las características propias de la madera.

En realidad, lo mencionado anteriormente es poco probable para que la madera pueda alcanzar dichas resistencias, debería siempre ser un elemento corto, debido a que sólo bajo esa consideración, el elemento podrá experimentar una compresión pura.

Recordemos que los elementos a compresión experimentan otros esfuerzos como la flexión lateral o pandeo, los cuales son producidos por las cargas axiales, pero cuando el elemento es muy esbelto. Por lo tanto, los esfuerzos máximos obtenidos en el presente ensayo no deberían ser considerados para un diseño estructural, para ello se han establecido esfuerzos admisibles propios para la madera a compresión. Según la Cartilla para Maderas del Grupo Andino, el esfuerzo máximo admisible no debe ser superior a 145 kg/cm², ya que también se consideran los esfuerzos laterales ya mencionados.

5. Una vez expuestos los resultados y reconocer la gran capacidad que tiene la madera para mantener su resistencia a través de los años, es posible prescindir de refuerzos en columnas, aunque esto no significa que no debamos o podamos reforzar un elemento. Se advierte que, el objetivo de este documento es la recuperación estructural, pero de manera discreta, es decir; sin dañar la estética que genera visualmente la madera en especial de las columnas ya que éstas en la mayoría de casos son totalmente vistas.

6. Nuevamente se recalca que al reforzar una columna, se debe realizar un análisis previo y una consideración de los daños para proceder con la recuperación; es importante acotar que cada refuerzo será la respuesta a un caso diferente, pues no es posible estandarizar un método, sin antes conocer el estado de las piezas.

En cuanto al análisis, lo primordial estará en partir de puntos críticos como son sus bases y uniones superiores, ya que si mejoramos esto garantizamos la seguridad de la estructura a través de los años.

7. Debido a que la madera cuando trabaja a compresión no pierde considerablemente sus características mecánicas, el reforzamiento se verá más enfocado en los elementos a flexión. Esto se debe a la complejidad que presentan sus procesos y a los condicionantes que la flexión demanda, pese a ello, no queda descartado el análisis de refuerzos para elementos verticales en sus puntos críticos.

2.3.5. Ensayos mecánicos con madera reforzada

En la actualidad existen diversos procedimientos para el refuerzo estructural de elementos de madera a flexión, y a pesar de que existan diferentes formas, al momento de intervenir una estructura, nuestro primer análisis sobre reforzamiento está centrado en la utilización de piezas metálicas que, generalmente, son platinas adheridas al elemento mediante pernos y resinas epóxicas.

La elección de este sistema se justifica por las ventajas que brinda el trabajar con dicho material, entre las principales características está su peso. En comparación con otros materiales y con el de la madera misma, una platina puede alcanzar pesos muy inferiores. Sin embargo, no quiere decir que el metal sea más liviano que la madera, todo radica en la cantidad de acero que necesite un elemento para reforzar.

Otro factor importante al usar platinas de acero para reforzar es la considerable capacidad que tiene para aumentar las propiedades mecánicas de la madera y para aumentar su inercia sin necesidad de incrementar el peso del elemento. Posee una alta resistencia frente a cargas y grandes capacidades a flexión, además de su uniformidad hace que sus propiedades se mantengan constantes con el tiempo.

Otra ventaja es la ductilidad que tiene el material, ya que podrá soportar grandes deformaciones. En consecuencia, la naturaleza dúctil de los aceros estructurales les permite fluir localmente, evitando así fallas prematuras. Entonces, si el material puede aumentar las propiedades antes mencionadas, obviamente podrá mejorar su rigidez y resistencia.

Respecto a la durabilidad del material, si el mantenimiento es adecuado y periódico, podrá llevar al acero a una prolongada vida estructural. Aunque las ventajas que brinda el acero son variadas, puede conllevar algunas desventajas, entre las cuales está su alta vulnerabilidad para corroerse en ambientes con poca humedad, implicando un mantenimiento permanente; además, puede perder resistencia rápidamente bajo acciones del fuego. A pesar de las desventajas descritas, resultan mayoritarias sus ventajas, por lo cual es totalmente favorable su uso como refuerzo estructural.

Expuestas las principales características del acero, consideramos adecuado y pertinente realizar ensayos con probetas reforzadas, ya que el principal objetivo está en analizar cómo se realiza el aumento de las capacidades mecánicas de cada probeta respecto a las muestras sin reforzar, especialmente con el máximo esfuerzo admisible.

Con respecto a los ensayos de probetas reforzadas, los procesos se mantuvieron iguales a las pruebas anteriores, sin ningún cambio, y la división de las muestras según sus años de antigüedad mantuvo la misma agrupación; es decir, las probetas reforzadas también se dividieron en grupos de 100, 50 años y muestras nuevas de eucalipto.

El refuerzo fue realizado de manera muy sencilla, y consistió en fijar platinas metálicas en la cara inferior de cada probeta, mediante tirafondos dispuestos según la norma. La ubicación de la platina responde a un elemental y rápido análisis, puesto que fue colocada por la cara inferior debido a que allí se encuentran los máximos esfuerzos traccionantes, y una de las características

del acero es su alta resistencia ante la tracción.

Es muy importante mencionar que la utilización de resinas epóxicas para la fijación de la platina a la madera son de gran utilidad para una correcta prueba de laboratorio, puesto que su uso evita errores en los resultados, y los elementos deben estar unidos perfectamente, caso contrario la máquina prensadora puede dar resultados erróneos y de esa forma invalidar el ensayo.

- Materiales y Métodos

El material de ensayo, como ya se mencionó, mantuvo la división de los tres grupos: madera de 100 años (Grupo I), madera con 50 años (Grupo II) y madera nueva (Grupo III). Todas son muestras de eucalipto y presentan una longitud de 100cm. y diferentes secciones.

Cada muestra fue reforzada de manera muy simple y elemental, se utilizó platinas metálicas con acero de 4mm. de espesor y cada sección fue cortada según el ancho correspondiente a su probeta.

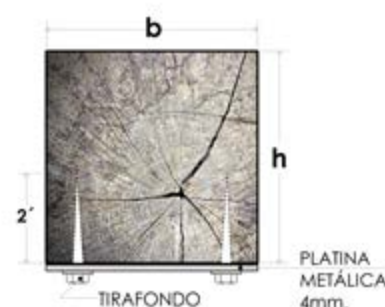


Figura 2.58. Sección de probeta con refuerzo metálico en su cara inferior./ Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.59. Disposición de los tirafondos y secuencia de apriete en zig-zag./ Fuente: Daniel Enríquez M.

En la figura 2.58. se detalla la colocación de la platina y sus respectivos elementos de fijación.

Como elementos de fijación se utilizaron tirafondos de 7mm. de diámetro y con longitudes de 2 y 3 pulgadas, según la sección de la probeta. Además se utilizó arandelas para distribuir el esfuerzo cortante de cada tirafondo.

La disposición de los pernos en las caras inferiores de cada probeta comprendió 2 filas al tresbolillo con una separación en dirección paralela a la fibra de 100mm., mientras que la separación hacia los bordes fue de 15mm. Antes de ingresar cada tirafondo fue necesario realizar agujeros con taladro a manera de guía para evitar rajaduras del elemento debido al problema de fendado que presenta cada muestra. El apriete se lo realizó de manera manual, siguiendo un orden en zig-zag para lograr una unión gradual entre la madera y el metal. (Figura 2.59.)

Para garantizar la unión entre la madera y la platina, además de los tirafondos, se utilizó, en algunos casos, resina epóxica estructural; el objetivo del adhesivo fue mejorar la fijación que se realizó con los pernos e impedir que los dos elementos se separen al momento de realizar el ensayo, ya que de existir algún tipo de separación la prueba hubiera perdida validez, y los resultados obtenidos podrían resultar erróneos o en la mayoría de casos no alcanzar la resistencia requerida. El producto adhesivo utilizado en los ensayos pertenece a la marca de SIKa (Sikadur Epoxi) y, por lo tanto, todas sus especificaciones técnicas y demás datos, respecto a su uso, han sido previamente experimentadas, por lo tanto es posible revisar todas las características antes de ser aplicadas.

2.3.5.1. Ensayos a flexión estática

Una vez listas todas las probetas con sus respectivos refuerzos, procedimos a realizar los ensayos de la misma forma como se ejecutó con las muestras sin reforzar. El montaje de cada probeta mantiene el mismo esquema



Figura 2.60. Probeta B2 reforzada. Izq.: Longitud total con platina metálica. Der.: Sección de la probeta reforzada./ Fuente: Daniel Enríquez M.

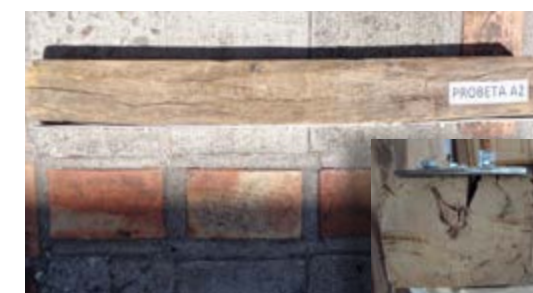


Figura 2.61. Probeta A2 reforzada. Izq.: Longitud total con platina metálica. Der.: Sección de la probeta reforzada./ Fuente: Daniel Enríquez M.

detallado en la figura 2.31. y, como es obvio, la única diferencia fue la presencia de una platina metálica en la cara inferior de la muestra. Hay que recordar que toda pieza que actúa horizontalmente, con luces libres y dependiendo de las cargas, sus fibras presentarán una contraposición en sus reacciones, es decir, cuando las fibras superiores estén a compresión, las inferiores actuarán a tracción o inversamente. Por lo tanto, se hace lógico el uso del refuerzo en la parte inferior de la probeta, pues aumentará la resistencia de las fibras traccionadas, absorbiendo los esfuerzos producidos por las cargas.

Para las primeras pruebas se experimentó con dos probetas de 100 años de antigüedad. La probeta B2 (Figura 2.60.) que proviene de la viga B de madera desconocida y la probeta A2 (Figura 2.61.) proveniente de una muestra de eucalipto, han sido unidas mediante tirafondos de 3 y 2 pulgadas a platinas de 4mm.

Al igual que los ensayos con probetas sin reforzar; se han utilizado muestras de similares características, esto con el objetivo analizar técnicamente el aumento de las propiedades de cada probeta.

Durante el proceso del ensayo, respecto a la lectura de datos, no existió problemas. En una primera aproximación a los resultados obtenidos, se acotó que las capacidades mejoraron considerablemente en relación a las probetas sin reforzar.

Continuando con la ejecución de los ensayos, la siguiente muestra pertenece al grupo II de maderas con 50 años de antigüedad. A la probeta F3 le fue aplicada los mismos procedimientos explicados anteriormente y, de igual manera, sus resultados no presentaron alteraciones ni errores.

Finalmente, se realizó el ensayo con madera nueva de eucalipto perteneciente al grupo III. El proceso con la probeta L3, presentó una primera y única falla en sus resultados. Esto se debió a que la unión de los elementos madera-platina fracasó y al producirse dicho fallo, los datos obtenidos fueron errados, pues la resistencia resultó inferior a la muestra sin reforzar. Debido al fallo, se procedió a anular el ensayo y realizar nuevamente el proceso, pero ahora se sugirió la utilización de resinas epóxicas y una correcta fijación con los tirafondos.

El nuevo ensayo resultó exitoso y no presentó fallas en la unión, por lo que los resultados obtenidos fueron validados para el correcto análisis de la probeta nueva. En la figura 2.62. se detalla únicamente la segunda probeta, puesto que se anuló todo el proceso de la primera.

2.3.5.1.1. Tablas de Datos

Respecto a la determinación de las propiedades elásticas de cada probeta reforzada, es importante indicar que los procesos antes explicados para las muestras sin reforzar



Figura 2.62. Probeta L3 reforzada. Izq.: Longitud total con platina metálica. Der.: Sección de la probeta reforzada./ Fuente: Daniel Enríquez M.

no se pueden aplicar directamente, puesto que dichas teorías se basan en la hipótesis de la homogeneidad del material, lo que lleva consigo que, al permanecer planas las secciones planas, las deformaciones sean directamente proporcionales a las distancia a la línea neutra, es decir, debe existir una igualdad de condiciones entre los dos elementos que componen la probeta.

Entonces, para poder determinar las propiedades mecánicas de las probetas reforzadas, se debe realizar una transformación del elemento compuesto; es decir, homogeneizar los materiales madera y acero. Esto es posible mediante el método de secciones equivalentes, sistema que basa la transformación de los materiales, bajo algunas determinantes de igualdad de cargas, deformaciones y módulos de elasticidad.

Aunque el proceso de homogeneización de materiales todavía no está claro, para hacer más comprensible la situación, vamos a suponer que en base a los resultados obtenidos en el laboratorio, se procede a determinar el esfuerzo máximo de la probeta reforzada; el resultado que nosotros obtengamos si no se aplica una igualdad de materiales, será incorrecto pues el acero y la madera tienen diferentes capacidades de resistencia.

Por lo tanto, el objetivo de esta homogeneización de materiales será el de obtener un resultado

Tabla de Resultados. “Probeta B2”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
415	50
970	100
1800	150
2750	200
3550	250
4340	300
5017	350
5440	400
4700	450
4260	500
4150	550
4265	650

* Carga máxima= 5.547,00 kgf.

Tabla b20. Probeta B2. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Tabla de Resultados. “Probeta A2”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
296	50
900	100
1890	150
2860	200
3982	250
4990	300
5780	350
6500	400
6880	450
7360	500
7940	550
8400	600
8850	650
8960	700
8860	750
9018	800

* Carga máxima= 9.018,00 kgf.

Tabla b21. Probeta A2. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

técnico de las características mejoradas que tiene cada probeta después de ser reforzada. Previo a la aplicación del método de secciones equivalentes y continuando con la



Figura 2.63. Estado de la probeta B2 durante el ensayo a flexión / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.64. Estado de la probeta A2 después del ensayo a flexión. / Fuente: Daniel Enríquez M.

secuencia del documento, es importante detallar las tablas de resultados, obtenidas directamente del laboratorio y aunque todavía no podamos obtener datos técnicamente válidos, podremos observar el notable aumento de resistencia que sufrió cada pieza experimentada.

A continuación se expone la información obtenida de cada probeta de acuerdo a la división de grupos; es decir, desde la muestra más antigua hasta la probeta nueva de eucalipto:

- Madera reforzada de 100 años

La primera muestra corresponde a la probeta B2 y a pesar de que la pieza no alcanzó las capacidades suficientes, en los ensayos anteriores, para ser considerada como estructural, debido a su bajo módulo de elasticidad y a un alto nivel de deterioro, fue experimentada para contemplar

un análisis técnico, respecto al aumento de sus propiedades mecánicas. (Figura 2.63.)

Lo realmente destacable de este ensayo fue el increíble aumento de ductilidad que presentó la muestra B2, puesto que logró duplicar la deflexión obtenida por la probeta B1. La tabla b20. determina los datos obtenidos en el ensayo y además indica que la carga máxima soportada superó, considerablemente, a la obtendía en la probeta sin reforzar.

La probeta A2 perteneciente también al grupo de maderas con 100 años de antigüedad, mejoró su resistencia favorablemente; en consecuencia, sus capacidades elásticas también lo harán. Sin embargo, los datos obtenidos y expresados en la tabla b21. (página anterior) todavía no son lo suficientemente válidos para especificar de manera técnica el aumento de resistencias. (Figura 2.64.)

Otro dato importante que determinó el ensayo con elementos reforzados fue que la carga máxima obtenida para la probeta A2, superó a la muestra A3 con más de 2000 kgf, aproximadamente.

- Madera reforzada de 50 años

El siguiente ensayo fue realizado con la probeta F3, (Figura 2.65.) la cual posee las mismas características que las muestras anteriores, pertenecientes al grupo II. La prueba de laboratorio se efectuó sin inconvenientes y los datos obtenidos, nuevamente, reflejaron un gran aumento en la resistencia del material respecto al no reforzado, los cuales se determinan en la tabla b22.

- Madera nueva reforzada

El último ensayo fue realizado con la probeta L3 (Figura 2.66.), la cual proviene de una muestra de eucalipto nuevo y con condiciones lo suficientemente buenas para alcanzar resultados óptimos y máximos, puesto que los datos obtenidos serán las principales referencias

para determinar el aumento de las propiedades mecánicas de un elemento de madera. La tabla b23. representa las cargas que soportó la muestra, las cuales superaron considerablemente a los datos obtenidos con madera antigua y, sobre todo, la carga máxima alcanzada logró superar a la obtenida con elementos sin reforzar con más de 2000 kgf.

Al obtener los resultados parciales de cada probeta, se observa claramente el aumento de la resistencia respecto a las muestras sin reforzar.

Como una primera estimación de los resultados obtenidos, podemos ver que no sólo aumentó la resistencia de cada elemento, sino, también, su rigidez y ductilidad, pues esto lo evidenció las cargas soportadas por cada probeta en las pruebas de laboratorio y la alta capacidad de deformación que tuvieron las muestras reforzadas con la platina metálica.

Como ya se explicó, la determinación de las capacidades elásticas de los elementos experimentados requiere de un método complementario, respecto a los procesos realizados anteriormente; por lo tanto, el propósito será conocer de manera muy aproximada, cuánto pueden aumentar las propiedades elásticas cuando un elemento de madera es compuesto o reforzado con platinas metálicas.

Otro factor importante a considerar es el aumento de rigidez de cada probeta, debido a que el acero posee una gran capacidad resistente. El incremento se dio de manera notable en las piezas madera. Pero de la misma manera, se necesita obtener un dato técnicamente analizado, sobre dicho aumento. Para continuar con el análisis y la determinación de propiedades mecánicas de uno de los elementos reforzados o compuestos, será necesario indicar,

Tabla de Resultados. "Probeta F3"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
1380	50
2587	100
3897	150
5060	200
6120	250
7070	300
7980	350
8670	400
9470	450
10085	500
10720	550
11244	650
11510	700
11790	750
12050	800
12384	850

* Carga máxima= 12.384,00 kgf.

Tabla b22. Probeta F3. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Tabla de Resultados. "Probeta L3"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
1700	50
3450	100
5500	150
7450	200
8963	250
9990	300
10920	350
11808	400
12154	450
12450	500
13050	550
13470	650
14050	700
14113	750
12500	800
12000	850

* Carga máxima= 14.113,00 kgf.

Tabla b23. Probeta L3. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca



Figura 2.65. Estado de la probeta F3 después del ensayo a flexión. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 2.66. Estado de la probeta F3 después del ensayo a flexión. / Fuente: Daniel Enríquez M.

brevemente, el método de *secciones equivalentes*, para poder aplicarlo y del cual podamos obtener un factor que relacione la transformación de los materiales compuestos.

2.3.5.2. Factor "n". Método de Secciones Equivalentes

El presente documento está fundamentado de manera directa con los procesos de reforzamiento estructural de elementos de madera; por lo tanto, implica el uso de elementos compuestos, es decir, madera reforzada con materiales diferentes, que para nuestro caso específico será el acero.

Como ya se indicó, la aplicación directa de las fórmulas basadas en la teoría de flexión a vigas compuestas, no es posible aplicar debido a la mixtura de materiales que conforman el elemento. Por lo tanto, el objetivo del método de *secciones equivalentes*, será homogeneizar uno de los dos materiales, transformando al elemento compuesto, en uno solo, respecto a su materialidad.

Se empezará por analizar el caso de la figura 2.67.a. que presenta la sección de una probeta que está reforzada en su cara inferior con una platina metálica. Evidentemente, el ejemplo no cumple con los principios para una viga de sección constante, los cuales especifican que el material debe ser homogéneo para poder aplicar la ley de Hooke.

Sin embargo, mediante ciertas modificaciones o transformaciones es posible obtener una sección equivalente que sea de uno solo de los materiales, para después poder aplicar las conocidas fórmulas de la flexión.

Puesto que los materiales deben estar perfectamente unidos (Atornillados, por ejemplo), las deformaciones en la fibras del acero y de la madera han de ser iguales; por lo tanto, si se toma una fibra longitudinal en cualquier punto, del elemento, se tiene que las deformaciones serán las mismas ($\epsilon_a = \epsilon_m$). Por lo tanto, se podrá expresar esta relación mediante el siguiente proceso:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \longrightarrow \quad \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

por lo tanto se puede expresar;

$$\frac{\sigma_a}{E_a} = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad \text{fórmula (2.14.)}$$

De la fórmula 2.14, se distingue que la relación entre esfuerzos y módulos de elasticidad se han de cumplir de la misma manera que para cualquier fibra del elemento. Además, para completar la equivalencia completa, las cargas soportadas deberán ser iguales entre madera y acero; es decir, $P_a = P_m$, lo que en función de las secciones de la fibra de acero y

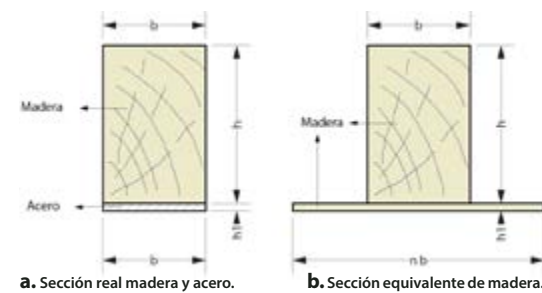


Figura 2.67. Sección equivalente en madera de una probeta reforzada. / Fuente: Daniel Enriquez M.

de su equivalente en madera permiten escribir:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \longrightarrow \quad P = A \cdot \sigma$$

por lo tanto se puede expresar;

$$A_a \cdot \sigma_a = A_m \cdot \sigma_m \quad \text{fórmula (2.15.)}$$

Expuestas las fórmulas 2.14. y 2.15., se puede obtener una nueva expresión, reemplazando el esfuerzo de acero por su igual de tal forma que:

$$A_a \left(\frac{E_a}{E_m} \cdot \sigma_m \right) = A_m \cdot \sigma_m$$

Dividiendo el término σ_m y llamando "n" a la relación E_a/E_m , se obtiene finalmente, la expresión para la equivalencia de secciones:

$$A_m = n \cdot A_a \quad \text{fórmula (2.16.)}$$

El literal "n" determina que el área de la sección equivalente en madera (equivalente a la sección de cada fibra del acero) es **n** veces el área de la sección de acero, pero siempre manteniendo su espesor original, y necesariamente obliga a cambiar el eje centroidal del elemento obtenido y por ende el eje neutro. Recuerde que en flexión, el eje neutro siempre coincidirá con el eje centroidal, pero sólo en el rango elástico.

En resumen, la sección de madera equivalente a la del acero es **n** veces más ancha. Por ejemplo, si $n=20$, significa que para 20cm² de

madera su equivalente será 1cm² de acero. En la figura 2.67.b se puede ver claramente la transformación del elemento y cuanto aumenta en **n** veces dicha dimensión, pero sin alterar el h1 para cumplir la condición de distancia al eje neutro.

2.3.5.2.1. Obtención del Factor "n" y secciones equivalentes para las probetas reforzadas

Después de explicado el proceso para la obtención del factor "n", procedemos a determinar para cada grupo de maderas dicho factor, para lo cual es indispensable conocer los módulos de elasticidad de cada material y las secciones correspondiente de cada probeta.

Respecto a los módulos de elasticidad de cada material, los datos de la madera y del acero son totalmente conocidos, pues en los ensayos a flexión sin reforzar se obtuvo, dichos datos; mientras que para el acero, el módulo de elasticidad está ya determinado debido a homogeneidad propia del material, el dato es de 2x10⁶ kgf/cm².

- Factor "n" para maderas con 100 años

Para la primera determinación del factor n_{B1} , utilizamos la probeta B1 con datos ya conocidos y expuestos en la tabla b14. A continuación se detalla el proceso para determinar el factor que ayudará a obtener una sección equivalente de dicha probeta:

Probeta B1

$$E_m = 6.613 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_a = 2\,000.000 \text{ kg/cm}^2$$

Aplicando la expresión del factor $n = E_a/E_m$ obtenemos:

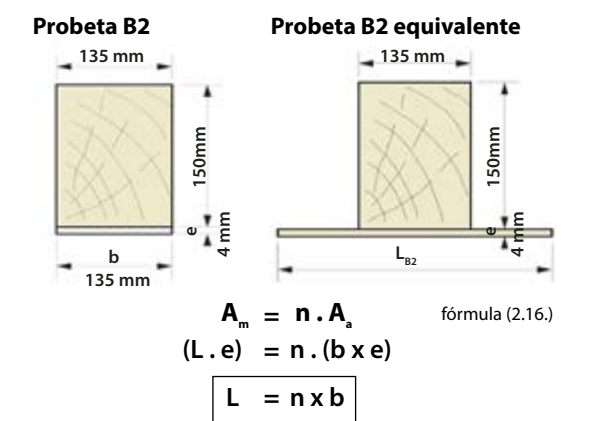
$$n_{B1} = \frac{2\,000.000}{6.613}$$

$$n_{B1} = 302$$

Se observa que el factor n_{B1} obtenido es muy alto, pues esto quiere decir que usar 1cm² de acero equivale a utilizar 302cm² de madera. Esto se debe a que la especie de la pieza de madera posee un

módulo de elasticidad muy bajo, lo cual confirma nuevamente que la capacidad de la probeta B1 es totalmente negativa para ser esforzada o considerada como elemento estructural.

Para la determinación de la sección equivalente de la probeta B2, simplemente aplicamos la fórmula 2.16. y mediante los datos reales de cada sección desarrollamos la expresión. Recordemos que el área corresponde, únicamente, a la sección del refuerzo, y el resto del elemento no altera su forma.



Por lo tanto L equivale a;

$$L_{B2} = 302 \times 135$$

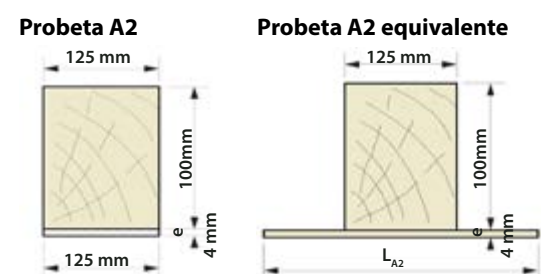
$$L_{B2} = 4.077 \text{ cm}$$

El proceso puede ser aplicado de la misma forma a probetas diferentes, ya que todo dependerá de la materialidad del elemento y del refuerzo. A continuación se detalla la obtención del factor n_{A3} , el cual corresponde a la probeta A2 de madera de eucalipto con 100 años de antigüedad. Respecto a los módulos de elasticidad, el dato ya ha sido determinado para la madera sin reforzar, y para el acero se mantiene el mismo dato.

Para la obtención de L, se debe aplicar el mismo proceso anterior pero con los datos correspondientes a la probeta A3, para que, finalmente, podamos obtener un elemento homogéneo de madera y

Probeta A3
 $E_m = 46.426 \text{ kg/cm}^2$
 $E_a = 2\,000.000 \text{ kg/cm}^2$
por lo tanto;

$$n_{A3} = 43,07$$



Por lo tanto L equivale a;

$$L_{A2} = 43,07 \cdot 125$$

$$L_{A2} = 588,3 \text{ cm}$$

proceder a determinar los principales resultados, aplicando las fórmulas de flexión.

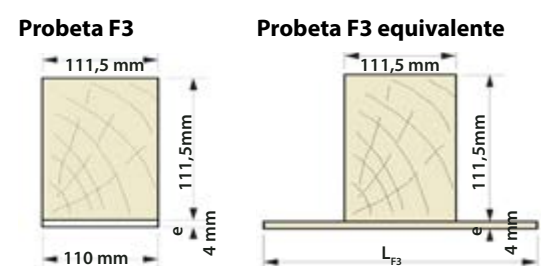
- Facto "n" para maderas con 50 años

Nuevamente se repite el proceso para obtener la sección equivalente de la probeta F3, partiendo del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos de madera sin reforzar.

Probeta F1
 $E_m = 54.681 \text{ kg/cm}^2$
 $E_a = 2\,000.000 \text{ kg/cm}^2$

por lo tanto;

$$n_{F1} = 36,57$$



Por lo tanto L equivale a;

$$L_{F3} = 36,57 \cdot 111,5$$

$$L_{F3} = 407,7 \text{ cm}$$

Para este caso se puede observar que el factor "n" disminuye en magnitud; esto se debe a que las propiedades aumentan conforme disminuyen sus años de antigüedad; por lo tanto, la sección equivalente será menor.

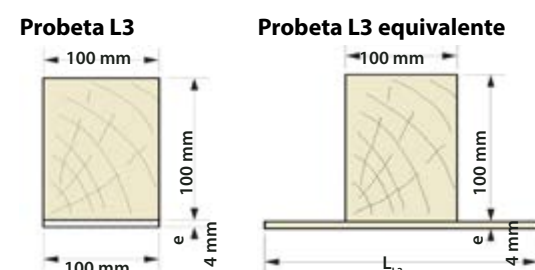
- Facto "n" para maderas nuevas

Para la determinación de la sección equivalente de madera nueva, partimos del módulo de elasticidad referencial obtenido de las probetas sin reforzar, puesto que los datos son de elementos nuevos sin ningún daño o deficiencia estructural, a decir, son las principales fuentes de referencia para exponer datos técnicos de los refuerzos aplicados.

Probeta L1
 $E_m = 78.663 \text{ kg/cm}^2$
 $E_a = 2\,000.000 \text{ kg/cm}^2$

por lo tanto;

$$n_{L1} = 25,42$$



Por lo tanto L equivale a;

$$L_{L3} = 25,42 \cdot 100$$

$$L_{L3} = 254,20 \text{ cm}$$

En resumen, los datos antes expuestos deberán alcanzar de manera muy aproximada a los resultados obtenidos para madera nueva, puesto que la validez de un reforzamiento dependerá de la capacidad que tenga cada sistema para aumentar la resistencia estructural de la madera en deterioro.

2.3.5.2.2. Gráficas de probetas reforzadas

Al obtener las secciones equivalentes de cada probeta reforzada es posible realizar las respectivas gráficas de esfuerzo-deformación para, finalmente, obtener las capacidades mecánicas de cada muestra. Las gráficas fueron realizadas según los resultados obtenidos, luego de transformar las secciones de madera reforzada por sus equivalentes en madera.

Como premisa de un aumento de resistencia podemos ver que la pieza más antigua alcanza un 75% de su resistencia; mientras que la muestra de 50 años alcanzó un 85% de su capacidad total, y aunque la mejora de la muestra es aceptable y cumplen como refuerzos estructurales, ninguna alcanzó la notable resistencia que logró la probeta nueva reforzada, puesto que su incremento logra mejorar su capacidad en un 30% más de la capacidad original. Sin embargo, debemos considerar los cambios que pueden

producirse, ya que la naturaleza misma de la madera presenta variaciones y todos los datos son aproximados, además puede existir variaciones debido a las fijaciones de los elementos madera-acero, ya que éstos no serán siempre exactos.

A continuación, se detalla una a una las gráficas para cada probeta ensayada, empezando con la muestra más antigua de eucalipto (Figura 2.68.)

Para una mejor comprensión del aumento de los datos antes explicados, se debe observar que la curva de esfuerzo-deformación de cada figura aumenta la pendiente de la recta elástica, gradualmente, respecto a las probetas no reforzadas; esto quiere decir que, aunque el módulo de elasticidad en teoría sea el mismo y no cambie para una viga compuesta, su incremento, va a ser paralelo al aumento de las capacidades elásticas, así lo confirman las gráficas para elementos reforzados.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta A2" (Madera de 100 años)

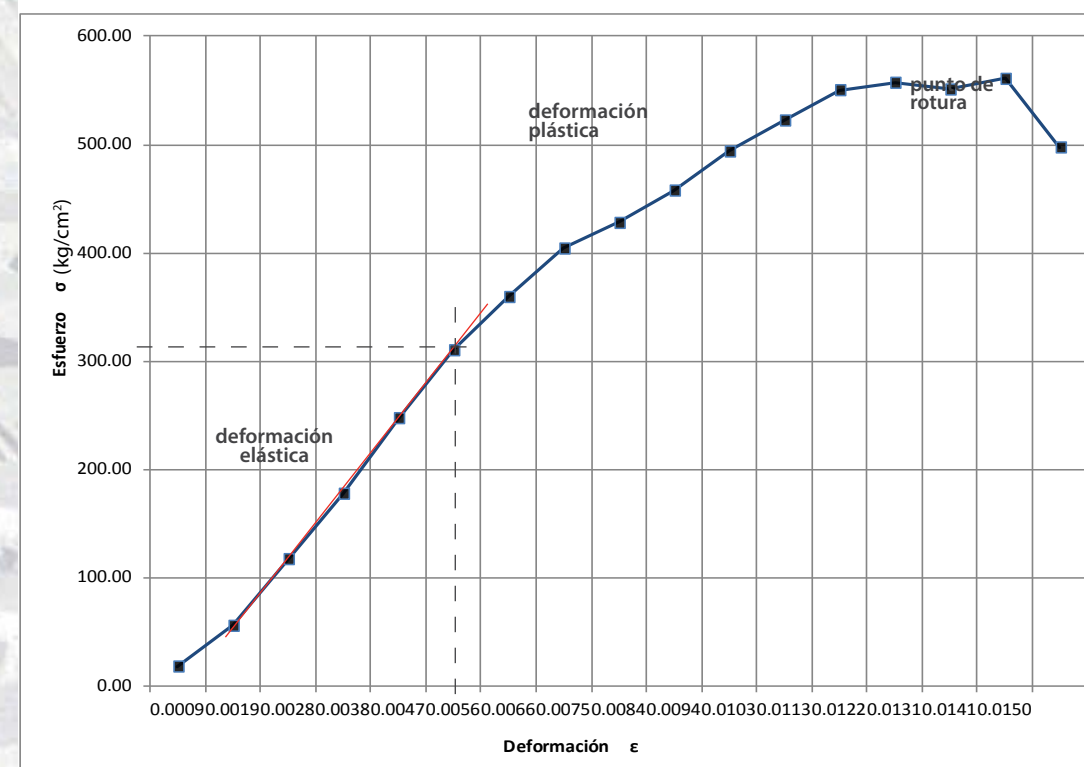


Figura 2.68. Probeta A2. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta F3" (Madera de 50 años)

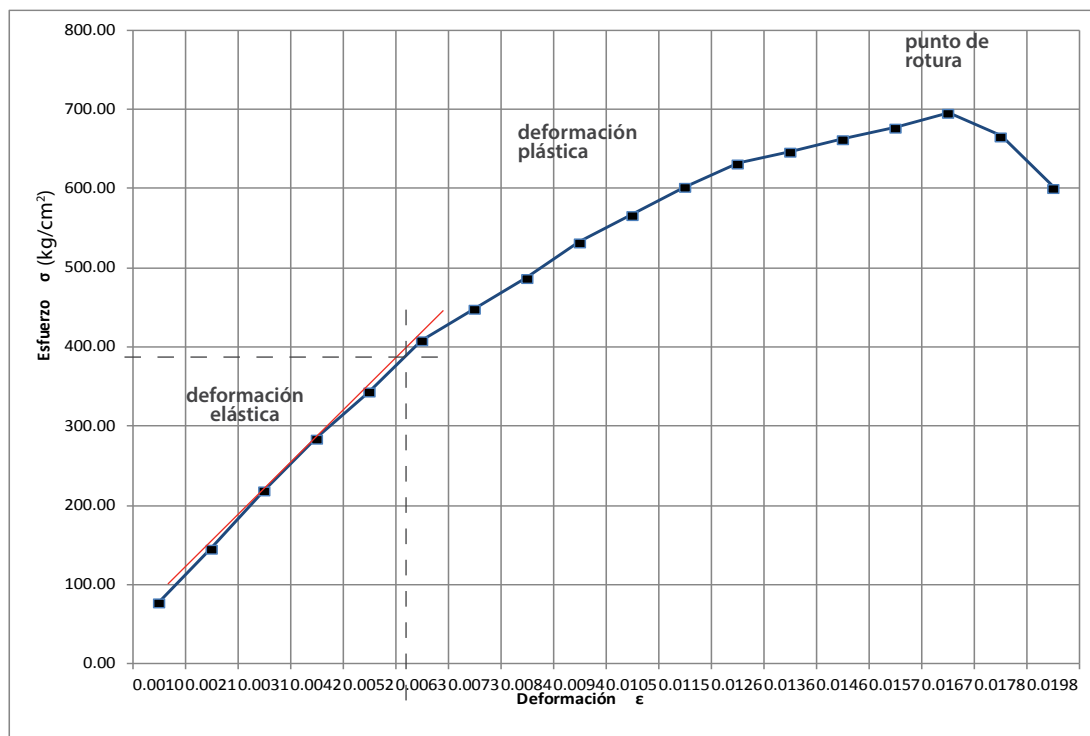


Figura 2.69. Probeta F3. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta L3" (Madera nueva)

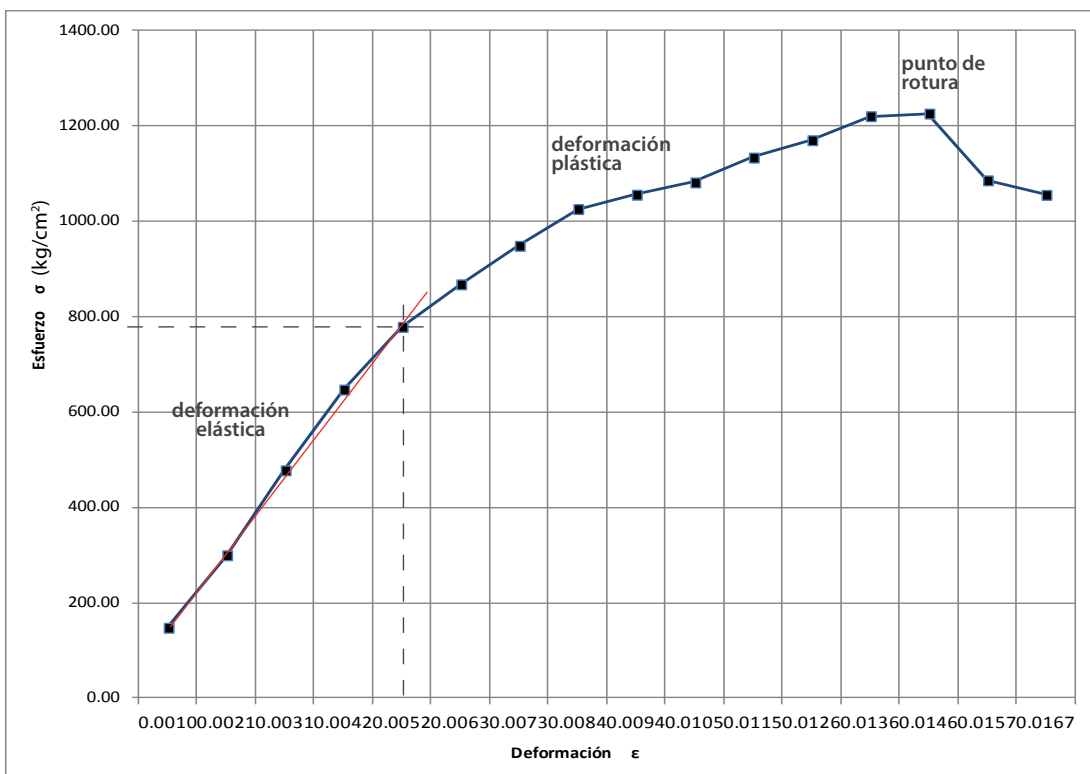


Figura 2.70. Probeta L3. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

2.3.5.2.3. Resultados de probetas reforzadas

Los respectivos resultados para madera reforzada fueron obtenidos mediante las fórmulas antes expuestas, en los ensayos de probetas a flexión sin reforzar, pero después de haber aplicado el método de secciones equivalentes. A pesar de que el incremento de las capacidades elásticas de cada probeta fue un hecho constatado por los resultados expuestos y las gráficas de esfuerzo-deformación, es necesario explicar la influencia que tiene el módulo de elasticidad, cuando actúa junto a otro material distinto.

Como ya se explicó, el módulo de elasticidad representa la resistencia que tiene cada material frente a cargas por unidad de área dentro del rango elástico. Esta característica es la que define la resistencia de cada material; sin embargo, dicha resistencia puede ser mejorada mediante refuerzos estructurales, pero sin alterar el módulo de elasticidad teóricamente; es decir, si tenemos una viga de madera compuesta o reforzada, sabemos que el módulo de elasticidad de la madera se va a mantener igual, ya que esta característica es propia del material, aunque, al interactuar con un material diferente, esta capacidad tiende a mejorar y por ende sus capacidades portantes también, específicamente los esfuerzos admisibles. Por lo tanto, aunque resulte inadecuado decir que un refuerzo aumenta el módulo de elasticidad de un material, los datos expuestos como las gráficas podrían confirmarlo; desde un punto de vista estructural, estas afirmaciones tendrían validez cuando exista un deterioro del mencionado módulo como cuando la madera sea antigua.

Entonces, el módulo de elasticidad, a pesar de no ser necesaria su determinación, fue obtenido mediante la expresión general para elementos a flexión (Fórmula 2.5.), pero con las condicionantes ya explicadas respecto a las secciones, ya que después de aplicar el método de secciones equivalentes fue posible su obtención.

Con respecto a la determinación de las propiedades mecánicas faltantes, fueron obtenidas aplicando las fórmulas expuestas anteriormente. Por su lado, la rigidez también utilizó una expresión ya determinada (Fórmula 2.9.), debido a que su proceso de montaje y cargas fueron exactas a los ensayos realizados con las probetas sin reforzar.

Como se anticipó, el aumento de la rigidez también alcanzó buenos resultados, puesto que las propiedades mecánicas también lo hicieron; sin embargo, la rigidez no fue la única propiedad en aumentar, también lo hizo la capacidad para soportar esfuerzos.

La tabla b24. expone los principales datos obtenidos para madera reforzada con platinas metálicas por su cara inferior; más adelante, se observa cómo pueden variar los resultados de un elemento, si el refuerzo cambia su ubicación y forma respecto a la sección de la pieza, o más aun, si el mismo cambia de materialidad.

Todos los resultados obtenidos y expuestos en la tabla han adquirido un notable aumento, pero el verdaderamente importante fue el aumento del esfuerzo máximo dentro del rango elástico, puesto que en base a este dato se puede proceder a diseñar un refuerzo de manera técnica y eficaz. En consecuencia a dichos aumentos, podemos decir que el incremento aparente del módulo de elasticidad, a pesar de lo descrito anteriormente, brinda la posibilidad de que las pieza reforzadas trabajen con una mayor capacidad elástica que una pieza normal o en su defecto que una pieza antigua pueda recuperar en gran porcentaje sus propiedades iniciales.

Sin duda, otro factor que destaca en el aumento de las propiedades mecánicas es la rigidez a flexión que se obtuvo para cada probeta, puesto que

Tabla b24.

Principales resultados de muestras reforzadas con platinas metálicas por su cara inferior. Grupos I, II y III.
Módulo de elasticidad, esfuerzo max. admisible, momento max. y rigidez
de cada probeta según años de antigüedad.

GRUPO	DESCRIPCIÓN	SECCIÓN b x h (cm)	DEFORM. MÁXIMA (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kgf/cm ²)	ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm ²)	MOMENTO MAX. (Kgf.m)	RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)
Madera antigua de 100 años (Grupo I)	Probeta A2	12,50 x 10,0	20,03	55.110	209,00	81.250,00	2.728,00
Madera antigua de 50 años (Grupo II)	Probeta F3	11,15 x 11,15	24,06	65.670	240,00	99.750,00	3.045,00
Madera Nueva (Grupo III)	Probeta L3	10,0 x 10,0	17,5	134.350	353,00	102.500,00	3.130,00

Tabla b24. Resultados de muestras reforzadas con platinas metálicas. Ensayo a flexión. Módulo de elasticidad, esfuerzo máximo, momento máximo y rigidez.
/ Fuente: Daniel Enriquez M.

al incrementar esta propiedad se mejora considerablemente la capacidad para soportar esfuerzos y, por ende, cada elemento podrá soportar cargas superiores a las admisibles.

A pesar de que los datos de la tabla b24. alcanzaron resultados favorables, debemos realizar los respectivos análisis técnicos, partiendo de datos reales para cada probeta. En el siguiente ítem, se desarrolla una confrontación de datos entre probetas reforzadas y no reforzadas, con un único objetivo; determinar en qué porcentaje y bajo qué coeficientes de aumento actúan las probetas de madera, cuando son reforzadas con platinas metálicas.

2.3.6. Factor de corrección "K"

Los procesos analíticos aplicados a partir del método de secciones equivalentes, han reflejado resultados muy valederos, pero en cierto modo, teóricos, pues no contempla varios defectos que pueden presentarse al momento de aplicar un refuerzo e inclusive los defectos propios de la madera, ya que no es un material isotrópico. Todos los defectos que puedan presentarse, sin duda disminuirán los resultados obtenidos a través del método de secciones equivalentes, por tal motivo, surge indispensable definir un factor de corrección "k", el cual se sustenta en la confrontación de resultados, entre las

prácticas de laboratorio y los procesos analíticos.

La importancia del presente factor, se debe al gran aporte que puede brindar a la definición de un resultado sin necesidad de realizar pruebas de laboratorio, sino considerar directamente, el aumento aproximado, de un elemento de madera, después de ser reforzado.

Para calcular el factor de corrección se deberá aprovechar de los datos obtenidos para los elementos de madera, reforzados y sin reforzar.

Primeramente, se debe considerar el esfuerzo máximo (σ) obtenido para el material que es de 263 kg/cm², seguido de sus principales componentes y también de la inercia de su sección; puesto que al aplicar el método de secciones equivalentes, este último dato, inevitablemente, incrementará y será el que defina el resultado final. Después de obtener los principales datos de la pieza de reforzada, se deberá interpretar la sección equivalente en madera, transformando la platina metálica, por su similar, de tal manera que se pueda determinar la nueva inercia de la sección y el centro de la misma, para definir el nuevo eje neutro y sus respectivas distancias. (Figura 2.71.)

Una vez expuestos los principales resultados de cada muestra, se deberá obtener el momento teórico de la sección, aplicando la expresión del esfuerzo crítico (Fórmula 2.3.); la cual se contemplará de la siguiente manera:

Esfuerzo crítico
fórmula (2.3.)

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

despejando M;

$$M_r = \frac{\sigma \cdot I}{y}$$

donde:

M_r = Momento máx. que resiste la sección(teórico)

σ = Esfuerzo máx. de la madera de eucalipto

I = Inercia de la sección equivalente

y = Distancia al eje neutro

Al hacer referencia al momento máximo que resiste la sección de una muestra de madera, significa que el resultado obtenido, no ha considerado los posibles defectos y errores que se puedan presentar, tanto del material, como de la fijación del refuerzo, es por esto, que cotejar resultados teóricos y reales, resulta importante para la presente investigación y, sin duda un gran aporte al campo de la rehabilitación estructural en madera.

Reemplazando los valores en la fórmula expuesta se ha determinado el primer valor correspondiente al momento máximo; previo a obtener el factor de corrección "K". Es así que el proceso, se encuentra detallado a continuación:

$$M_r = \frac{\sigma \cdot I}{y}$$

$$M_r = \frac{263 \times 2.481,00}{7}$$

$$M_r = 93.215 \text{ kgf. cm}$$

Los datos expuestos han sido previamente determinados y corresponden al análisis aplicado a la probeta nueva de eucalipto, reforzada y sin reforzar, a través del

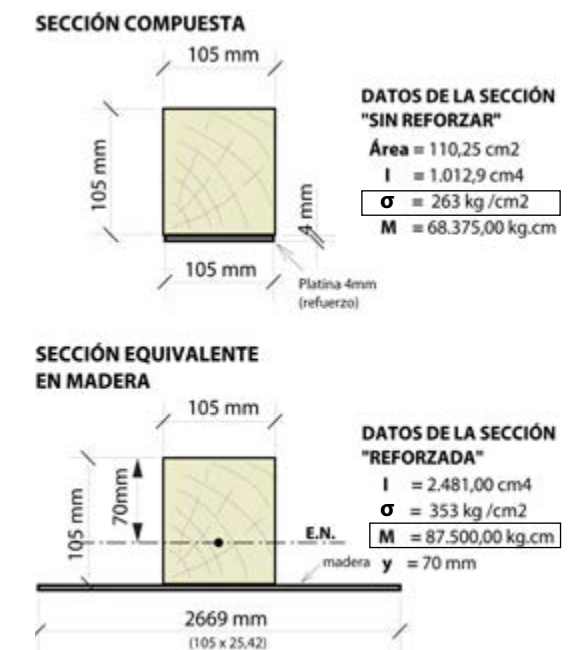


Figura 2.71. Definición del factor de corrección "K". / Fuente: Daniel Enriquez M.

método de secciones equivalentes. Como era de esperarse, el momento máximo (M_r) de la sección, fue mayor al que se determinó en los ensayos de laboratorio, esto se debe a que el resultado no contempló los posibles errores, ya mencionados. Entonces, si se considera que el momento máximo (M), obtenido directamente de las pruebas de laboratorio es menor, se confirma que existieron errores, lo cuales ya ha sido explicados en los incisos anteriores, y dan muestra de un dato real del comportamiento de la madera.

Finalmente, para obtener el factor de corrección "K", se deberá cotejar los momentos determinados (M y M_r), lo cual dará como resultado un valor menor a 1, ya que la madera siempre presentará defectos de diferente ámbito.

$$K = \frac{M}{M_r}$$

$$K = \frac{87.500 \text{ kgf. cm}}{93.215 \text{ kgf. cm}}$$

$$K = 0,94$$

Después de determinar el factor de corrección, para madera nueva, se ha definido de manera técnica y a través de cálculos estructurales un comportamiento real del material, el cual puede ser aplicado a elementos estructurales sin necesidad de realizar ensayos en laboratorio.

En la figura 2.72. se ha detallado los diferentes rangos elásticos para una probeta nueva de eucalipto, determinando en primera instancia la resistencia de una muestra sin reforzar, la cual detalla una capacidad portante menor, respecto a las dos curvas siguientes. Como se mencionó, los resultados obtenidos a través del ensayo en el laboratorio, definieron un notable incremento en las capacidades elásticas del material; sin embargo, con el objetivo de considerar las posibles fallas que se podrían presentar en el sistema de reforzamiento, se ha aplicado el factor de corrección a los resultados obtenidos, para determinar un comportamiento más próximo a la realidad. Es así que, en la curva de Esfuerzo-Deformación,

se puede distinguir el comportamiento elástico del material, después de aplicar el factor de corrección, detallando una capacidad levemente menor al expuesto por la probeta reforzada.

En resumen, el factor de corrección "K", ha aportado notablemente a la determinación de las propiedades portantes de un elemento de madera, sin necesidad de utilizar probetas para analizar en laboratorio, sino que se puede realizar de manera analítica un sistema de reforzamiento aplicado a elementos de madera; sin embargo, no se debe confundir a los datos obtenidos en el laboratorio a través del método de secciones equivalentes, como datos teóricos, ya que estos han definido claramente las propiedades de la madera.

2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES

Para concluir la etapa de investigación acerca de los refuerzos estructurales

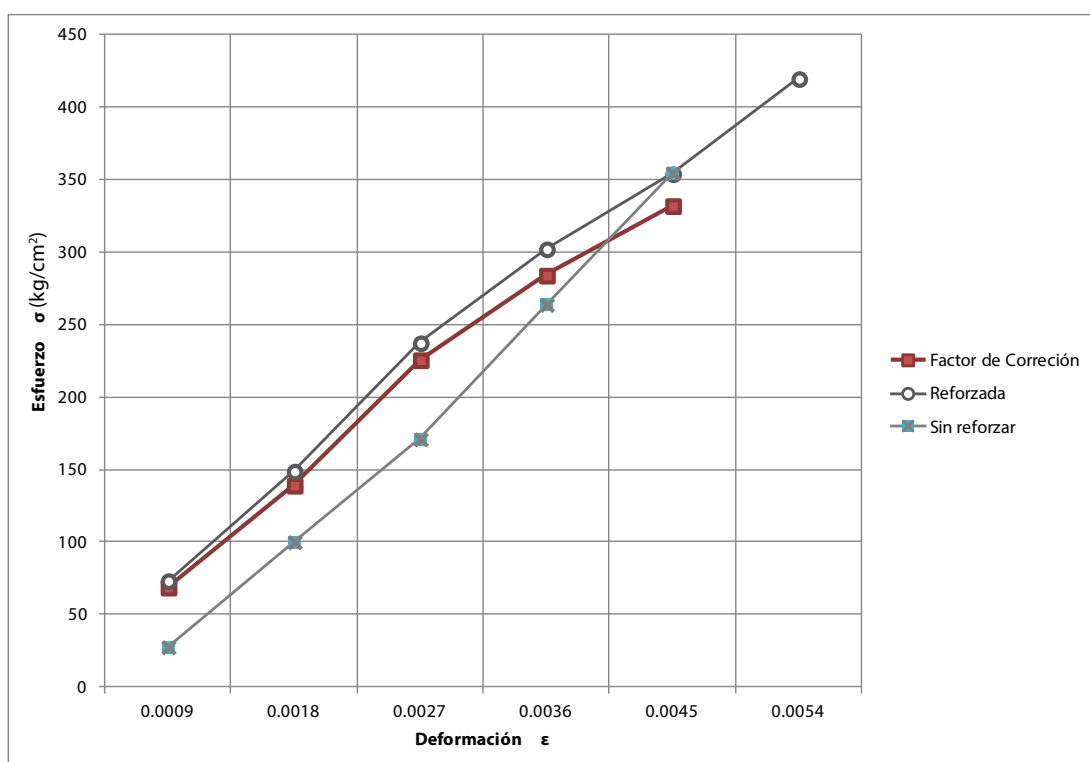


Figura 2.72. Rangos elásticos para muestra nueva: sin reforzar, reforzada y aplicado el factor de corrección. / Fuente: Daniel Enríquez M.

aplicados a elementos de madera, se ha realizado un primer análisis para estudiar, detalladamente, estructuras antiguas y nuevas.

Continuando con los análisis previos a los refuerzos aplicados a muestras de madera, es importante indicar que cada proceso expuesto puede ser aplicado a estructuras con diferentes años de antigüedad, pues los márgenes de error que se mantuvieron en niveles muy bajos y cotejados con ensayos realizados en diferentes situaciones, son bastante válidos por la semejanza de los resultados frente a datos investigados.

Respecto a la confrontación de los resultados de madera sin reforzar, frente a madera reforzada; en primera instancia será indispensable analizar la variación que presente cada gráfica de esfuerzo-deformación, la cual detalla de manera directa el aumento que alcanzó cada muestra después de ser reforzada.

2.4.1. Gráficas combinadas

Al referirnos a las gráficas combinadas, se hace referencia a la confrontación de datos respecto a maderas sin reforzar y reforzadas.

El primer grupo de maderas corresponde a las probetas con 100 años de antigüedad. Estas muestras por ser las más antiguas presentan las propiedades más bajas de los tres grupos experimentados; sin embargo, no quedan exentas de poder ser aplicadas refuerzos estructurales, para mejorar sus condiciones. En la figura 2.73. se encuentran combinadas las gráficas obtenidas en los ítems anteriores para madera de eucalipto reforzada y sin reforzar con 100 años.

Una particular características que detalla la gráfica, es la variación que presentan las muestras al inicio de los esfuerzos, pues según los resultados obtenidos, la probeta reforzada inicialmente tiene una capacidad menor a la no reforzada, pero su aumento crece de manera gradual

Curvas de Esfuerzo-Deformación. "Probetas A3 y A2" (Madera de 100 años)

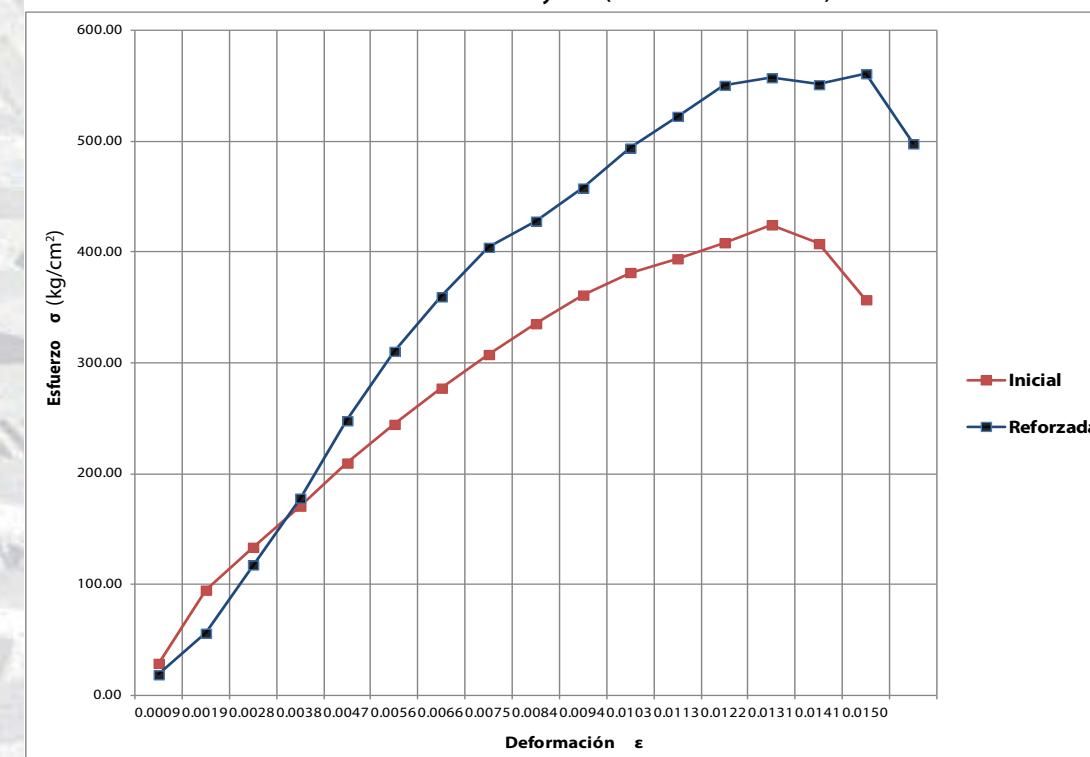


Figura 2.73. Probeta A3 y A2. Gráfica combinada de Esfuerzo-Deformación. / Fuente: Daniel Enríquez M.

conforme incrementa los esfuerzos, determinando una ventaja considerable frente a las propiedades de la muestra sin reforzar. La situación respecto a la diferencia de resistencias, existente entre las probetas, al inicio de las gráficas, se debe a la naturaleza propia del material, pues hay que recordar que la madera puede ser altamente cambiante aunque las muestras pertenezcan a un mismo elemento. Otro factor que pudo haber variado la resistencia puede estar relacionado al asentamiento de las fibras o al asentamiento de la platina, por no estar perfectamente adherida en los puntos de apoyo de la carga.

El cambio de pendiente de la recta en la zona elástica detalla que las propiedades de la muestra reforzada han aumentado y, por lo tanto, sus capacidades resistentes también. Aunque las propiedades plásticas y puntos de rotura no formen parte de nuestro estudio, es importante indicar que dichas capacidades

también han incrementado, resultando favorable para el comportamiento global de la estructura frente a esfuerzos de gran magnitud.

Los resultados para madera con 50 años de antigüedad presenta de manera más regular, el aumento de las capacidades elásticas de las muestra después de ser reforzada. (Figura 2.74.) El incremento se evidencia desde el inicio de la gráfica y a diferencia de la probeta anterior, las capacidades de esta muestra reforzada, alcanzan de manera proporcional un incremento en su elasticidad, aproximándose a un 85% de la resistencia original.

Un detalle importante de resaltar en la gráfica es el punto de rotura en la curva de madera reforzada respecto a la inicial, puesto que si nos fijamos en la deformación de la probeta inicial, podemos observar que fue mayor que la reforzada, pero bajo un esfuerzo inferior.

Curvas de Esfuerzo-Deformación. "Probetas F1 y F3" (Madera de 50 años)

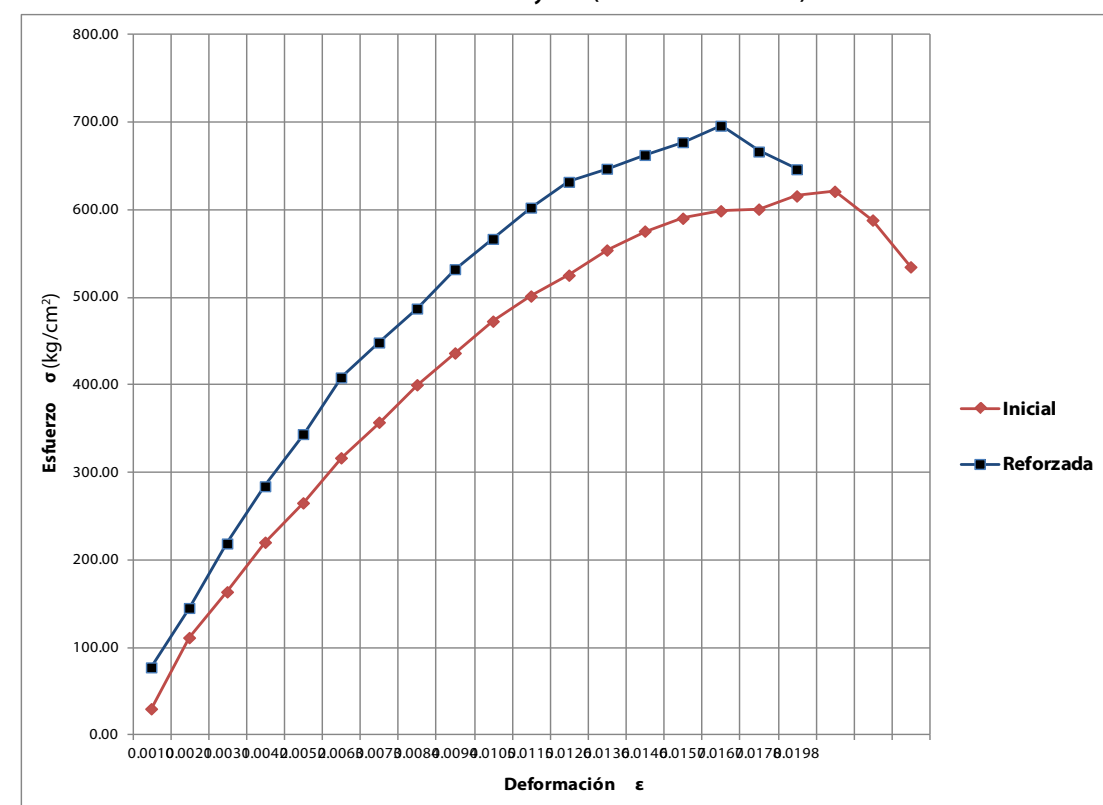


Figura 2.74. Probeta F1 y F3. Gráfica combinada de Esfuerzo-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M.

Este detalle puede conllevar una discusión respecto a los refuerzos en zonas críticas; sin embargo, debemos considerar que la ventaja que tiene la muestra reforzada es gracias a las propiedades del acero, pues éste aporta, con su capacidad de fluencia, al elemento de madera, y conjuntamente logran mantener una resistencia regular después de darse el fallo de la pieza.

Al momento de los ensayos fue claro distinguir que cada muestra después de su fallo continuó soportando de forma decreciente las cargas que aplicaba la prensa. Aunque en la realidad esta situación sea poco factible de darse, contribuye a determinar que la madera no presenta rupturas de forma brusca, sino que mantiene una fase transitoria entre el momento de su ruptura y su fracaso total.

Con respecto al grupo de maderas nuevas, en el cual se puede observar, nuevamente, un

notable incremento de todas las capacidades mecánicas del material, pero a diferencia de las muestras anteriores, el incremento denota ciertas variaciones respecto a su gráfica.

En la figura 2.75. como primer factor se observa que el aumento de los esfuerzos y demás determinantes elásticos son considerablemente altos. Por lo tanto, se valida totalmente la aplicación de platinas metálicas como refuerzos estructurales.

Después del límite proporcional, observamos que la curva adquiere un paralelismo aparente a la inicial y aunque los esfuerzos de la reforzada son obviamente superiores, la deformación en ambos casos alcanza una similar magnitud, pero nuevamente se distingue la fluencia que mantiene la probeta reforzada, luego de la ruptura. Respecto de resultados obtenidos y de factores técnicos del incremento de resistencia que

Curvas de Esfuerzo-Deformación. "Probetas L1 y L3" (Madera nueva)

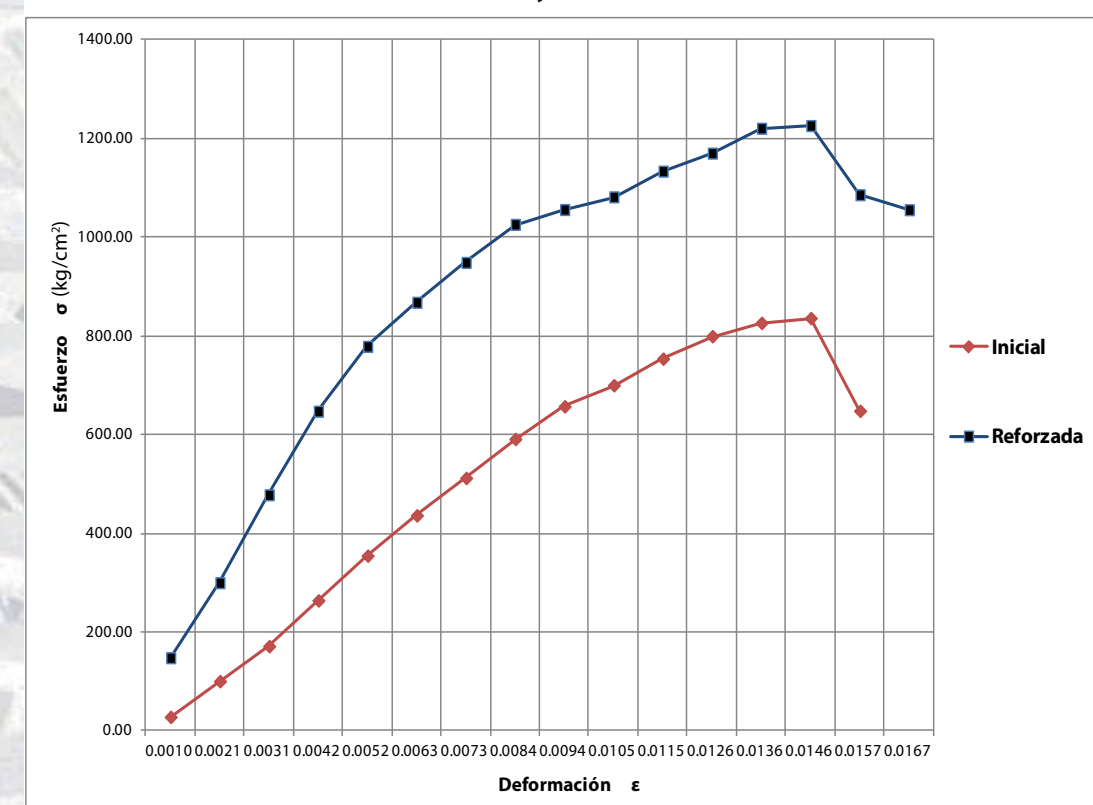


Figura 2.75. Probeta L1 y L3. Gráfica combinada de Esfuerzo-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M.

presenta la madera, después de ser aplicado un refuerzo, es importante plantear ciertas determinantes para su aplicación, puesto que, como ya se mencionó, la posibilidad de reforzar estructuras abre varias alternativas y todas responderán a una situación específica.

Las determinantes para el uso del acero como refuerzo reflejan todo el proceso que se mantuvo a lo largo del análisis; por tal motivo, es importante detallar el incremento que alcanzó cada grupo de maderas, que se lo estudió de manera técnica. Los datos expuestos pueden servir de referencia para ser aplicados en estructuras que se desee rehabilitar o mejorar sus condiciones estructurales.

2.4.2. Factores de Aumento de resistencia

Mediante todo el proceso explicado, el refuerzo aplicado a las probetas ensayadas a flexión han significado un aumento de sus capacidades elásticas y, obviamente, dicho incremento ha variado según la antigüedad de la muestra. Es decir que, el aumento que experimentó la probeta de 100 años es inferior a la muestra nueva, por lo que, los resultados pueden evaluarse mediante los factores de aumento.

Paralelo a los factores de aumento obtenidos, también se ha establecido de manera aproximada, el porcentaje que alcanza cada probeta después de ser reforzada, por lo que es importante conocer en que cantidad recupera, un elemento en deterioro, las propiedades que tuvo originalmente y para el caso de la madera nueva, saber hasta qué punto puede incrementar su resistencia.

A continuación se detalla los factores de aumento de las capacidades elásticas y principalmente del esfuerzo máximo admisible para cada grupo de maderas según sus años de uso:

- Factor para Maderas con 100 años

Para la madera de eucalipto más antigua, el aplicar un refuerzo con platina metálica por su cara inferior, significó un aumento de sus capacidades elásticas, con un factor de 1,20 respecto a sus propiedades iniciales. Respecto a la pérdida de resistencia, una muestra en 100 años puede llegar a perder hasta el 40% de su resistencia, pero después de reforzar una probeta de similares características, observamos que puede recuperar hasta un 15% de su resistencia; es decir, la muestra llega a un 75% de su capacidad original.

- Factor para Maderas con 50 años

Aunque las condiciones de estas muestras fueron mejores que las anteriores, el factor de aumento obtenido resultó igual, puesto que la resistencia de sus capacidades elásticas incrementó mediante un 1,20. De igual manera, hay que recordar que el deterioro de este grupo de maderas es del 30% en 50 años de uso, pero al ser aplicado un refuerzo puede alcanzar el 85% de sus propiedades originales; es decir, que tanto el esfuerzo máximo admisible y la rigidez a flexión incrementan favorablemente para la estructura.

- Factor para Madera nueva

Aunque las condiciones de la madera nueva son las principales referencias para realizar cálculos de refuerzos estructurales, queda abierta la posibilidad de mejorar dichas condiciones y es por ello que un elemento de madera nueva, al ser aplicado un refuerzo, puede mejorar sus capacidades mediante un factor de 1,30. Dicho de otro modo, el porcentaje que puede alcanzar la resistencia de la pieza es del 25% más, que su capacidad original; es decir, la madera puede mejorar su resistencia inicial considerablemente, a través de refuerzos metálicos.

2.4.3. Conclusiones generales

Para finalizar el análisis de la aplicación de refuerzos metálicos en muestras de maderas, es importante indicar los principales aspectos que conlleva un refuerzo de forma general, puesto que todo el proceso realizado puede ser empleado para analizar métodos de distinto tipo. A continuación se describe los principales aspectos a considerar en un refuerzo estructural:

1. Expuestos los factores de aumento de las capacidades mecánicas, queda totalmente validado el uso de platinas metálicas para ser utilizadas como refuerzos; sin embargo, la ubicación de dichos elementos estará sujeta a un análisis técnico de la problemática suscitada al momento de realizar la rehabilitación, puesto que los refuerzos estructurales deberán responder ante situaciones específicas, para solventar deficiencias de carga principalmente.

2. El uso del acero en elementos de madera antigua brinda una gran ventaja respecto al peso, ya que a pesar de tener un peso considerable para cada pieza es muy inferior frente a otros sistemas de reforzamiento. La ventaja está en que un elemento reforzado mediante este sistema no aumenta su inercia notablemente y, por lo tanto, sus reacciones frente a esfuerzos de gran magnitud pueden ser menores.

Una platina metálica representa un 35% más del peso original del elemento y aunque signifique un gran porcentaje para el peso total de una estructura, podría ser despreciable frente a sistemas donde aplican doble sección para reforzar; todo dependerá del sistema de apoyos que tenga la estructura.

3. El aumento de las capacidades de elasticidad es otro factor que valida el sistema, pero no debemos olvidar que una estructura reforzada debe alcanzar como mínimo el 80% de sus propiedades originales, y aunque las probetas con 100 años no alcanzaron dicho porcentaje, no queda descartado

la posibilidad de recuperar un elemento de estas características, puesto que el sistema de platina por la cara inferior es el más sencillo.

La rigidez por su parte también obtuvo buenos resultados, esto hizo que la estructura mejore notablemente su resistencia a esfuerzos y que cada elemento tenga un mejor desempeño elástico.

4. En cuanto al costo aproximado del refuerzo, se puede resumir en un rubro por metro lineal el cual contempla: la platina de 4mm., los elementos de fijación (tirafondos), resinas y mano de obra en un valor que oscila entre 25 a 30 dólares c/ ml. Se debe considerar que, este precio puede variar según las dimensiones del elemento y el espesor de la platina, para la cual no se recomienda espesores menores a 3mm. El valor expuesto es válido a elementos de madera con secciones de entre 12x16 cm hasta 20x20 cm. Obviamente, el sistema debe ser aplicado por mano de obra calificada y con las herramientas adecuadas para evitar dañar los elementos de madera, especialmente los más antiguos.

5. Finalmente, se puede concluir que el sistema de refuerzo con platinas metálicas es viable por la facilidad de trabajo y los resultados obtenidos, aunque los resultados podrían mejorar si las conexiones también lo hicieran. Para ello se recomienda además de usar elementos de fijación como los tirafondos, el uso de las ya mencionadas resinas epóxicas.

02

Referentes bibliográficos y linkografía

1. Zamperini, Emanuele. "Corso de recupero e conservazione degli edifici". Le strutture in legno. A.A. Italia. 2010-2011.
3. Gerhard Fink. "A scheme for the evaluation of experience of the performance of timber structures". Zurich. 2010. pág:2966
4. Junta del acuerdo de Cartagena(PADT-REFORT)."Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino" . Lima-Perú:1982.
5. Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). "Construcción con Madera". Quito-Ecuador: 2011.
6. Enrique Zanni. "Patología de la Madera": degradación y rehabilitación de estructuras de madera. Argentina-Córdoba:editorial brujas,2004.
7. A.I.S. (Asociación colombiana de ingeniería sísmica). "Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada". S.f. Colombia.
8. Díaz Gómez, César. "La rehabilitación de los elementos estructurales de la arquitectura tradicional mediterránea". Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona-España. S.f. .
9. André Jorissen. "General notes on ductility in timber structures". Engineering Structures[Institute of Structural Engineering, ETH Zurich. Zurich]Nro33. (2011). pag: 2988.
10. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF). "Art.163 De las cargas vivas." Capítulo V. Enero, 2004.
11. Ministerio del Ambiente. "Volumenes de Aprovechamiento de la Madera en el Ecuador". Ecuador. 2011.
12. Pytel, A. y Singer F. "Resistencia de Materiales". Cuarta Edición.Mexico D.F. 1995.
13. Neure, Enrique. "Madera en restauración y rehabilitación". S. L. Vol. 59,506, 123-130. Abril-Junio 2007.
14. Cuvi, Nicolas. "Dos cajones con semillas de eucalipto". Terra Incognita. Revista 37. Quito, 2005.
15. Romero, Marco y Otros. "Descripción de las cadenas productivas de madera en el Ecuador". Informe técnico. Quito,2011.
16. Herrero, Miguel. " Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras de madera conífera". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
17. Arriaga, Francisco y otros."Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera". S.L. S.F.
18. Pardo, José. "Estructuras mixtas de hormigón-madera aplicadas a la rehabilitación de forjados". Tesis doctoral. Universidad Politécnica Valencia. 1997.
19. Popol Vuh. "Tratamientos curativos de la madera-Intervención en edificioscon estructuras de madera". Agosto, 2004. http://www.infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_280_tratamientoCurativo.pdf
20. Popol Vuh. Cubiertas sustituidas en la catedral de Burgos. Estado actual. Febrero 2013. <http://www.cpasl.es/burgos>
21. Popol Vuh. "Madera Aserrada Estructural". S.I., S.f. Enero 2013. http://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/actividades/act_paginas/libro/35%20Madera%20aserrada%20estructural.pdf
22. Jaramillo, José. "Ingeniería Estructural I". Universidad Nacional de Colombia. Manizales. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%202/Cargas%20muertas.htm>

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

3.1. SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

3.1.1. Introducción

3.1.2. Métodos de reforzamiento estructural

3.1.2.1 Refuerzo mediante piezas de madera

3.1.2.2. Refuerzo mediante perfiles metálicos por la cara superior

3.1.2.3. Refuerzo mediante secciones de hormigón

3.1.2.4. Refuerzo mediante Fibras de carbono

3.2. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

3.2.1. Análisis del reforzamiento mediante piezas de madera colocadas en las caras superior e inferior de la viga

3.2.2. Análisis del reforzamiento mediante perfil metálico colocado en su cara superior

3.2.3. Análisis del reforzamiento mediante secciones de hormigón

3.2.4. Análisis del reforzamiento mediante fibras de carbono

3.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.3.1. Reforzamientos existentes, aplicados a probetas de 100 años

3.3.2. Reforzamientos existentes, aplicados a probetas de 50 años

3.3.3. Resultados de Reforzamientos aplicados a madera nueva

3.3.4. Conclusiones

3.1. SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

3.1.1. Introducción

En los últimos años las estructuras de madera han sido objeto de distintos y variados procedimientos de reforzamiento estructural, las cuales han tenido como objetivo primordial recuperar las capacidades portantes de elementos que han perdido resistencia por deterioro en el transcurso del tiempo y por factores patológicos.

Aunque la disponibilidad de sistemas de reforzamiento estructural es variada, la mayoría de procesos carecen de análisis y datos técnicos, lo cual impide apreciar el resultado y la eficacia de su intervención. Por lo tanto, es importante que cada refuerzo se respalde con estudios previos antes de su aplicación, en los cuales se pueda observar de manera técnica cómo se produce el aumento de las propiedades mecánicas de una pieza de madera, ya sea ésta: antigua o nueva.

El análisis que se aplique a cada sistema de reforzamiento estructural existente, se presenta como un complemento de los procesos realizados con las probetas del capítulo II, puesto que los datos obtenidos y procedimientos realizados en dichas pruebas podrán ser utilizados para los próximos casos de estudio.

3.1.2. Métodos de reforzamiento estructural

Dentro de los procesos de recuperación estructural de piezas de madera, se puede dividir a los sistemas de reforzamiento en cuatro grupos importantes, los cuales se distinguen por la materialidad y la tipología del refuerzo.

El primer grupo se lo puede clasificar en dos partes, que se diferencian por sus tipologías, pero mantienen la misma materialidad del refuerzo. La primera parte consiste en mejorar el sistema

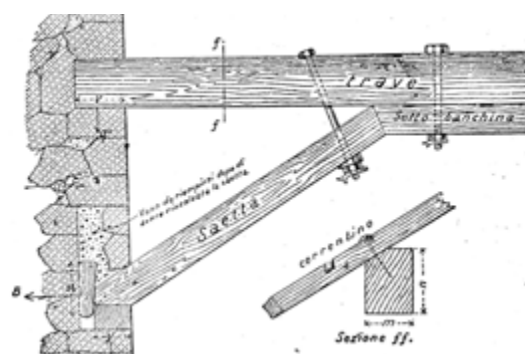


Figura 3.1. Reforzamiento estructural mediante apeos. Fuente: Zamperini, Emanuele. "Corso de recupero e conservazione degli edifici". Le strutture in legno. A.A. 2010-2011. S.J. Pág.:23



Figura 3.2. Reforzamiento estructural mediante cajas metálicas transversales a la estructura de madera. Fuente: Daniel Enriquez M.

estructural mediante la incorporación de un sistema de apoyo paralelo, esto se logra a través de la implementación de apeos o vigas secundarias de refuerzo que aumenten la resistencia de la estructura. (Figura 3.1.) Lógicamente, este sistema siempre requerirá una actuación desde la parte inferior de la estructura, es decir, para su aplicación es necesario tener acceso a todas las caras del elemento a reforzar; esto exige, obligadamente, una pérdida de espacio y altura libre para el caso de forjados de entrepiso.

Aunque el sistema de apeos, hoy en día, no sea el más común para reforzar estructuras, antiguamente su aplicación contribuyó en gran medida a reforzar elementos de madera en deterioro, especialmente vigas que

presentaban considerables deformaciones. Su uso se volvió popular debido a la ausencia de otros materiales para reforzar, como el acero.

Por otra parte, en la figura 3.2. se puede ver cómo una viga metálica refuerza un entramado de vigas de madera, y aunque estéticamente altera al conjunto, eso queda en segundo plano, pues la estructura quedará oculta por el cielo raso falso. La aplicación de vigas secundarias de refuerzo continúa siendo una alternativa para mejorar estructuras, pero su uso se encuentra limitado por algunos factores de resistencia y otros estéticos.

La segunda parte del primer grupo comprende los procesos realizados a través de elementos del mismo material; es decir, refuerzos que surgen a partir de piezas de madera con iguales o mejores condiciones y con ubicaciones estratégicas para mejorar las reacciones. (Figura 3.3.) Este sistema es totalmente válido, siempre y cuando los elementos a ser recuperados no presenten niveles de deterioros muy altos, pues el reforzamiento con madera implica un peso más alto, lo cual genera limitantes para su aplicación.

El éxito de este sistema estará en la correcta ubicación de los elementos de refuerzo respecto a sus fibras; esto se debe a que las reacciones de una pieza de madera son cambiantes, según la orientación de sus ejes ortogonales.

Por otra parte, la fijación entre piezas resulta más fácil, pues son materiales homogéneos y cualquier resina para madera será óptima, para mejorar los resultados de adherencia.

Al segundo grupo pertenece el caso experimentado en el capítulo II (ensayos mecánicos con maderas reforzadas), pues de forma general un elemento puede aumentar sus capacidades elásticas mediante la incorporación de elementos de acero que, por lo general, son fijadas mediante resinas y fijadores metálicos (Tirafondos). Este sistema es muy utilizado en la recuperación o consolidación de elementos de madera



Figura 3.3. Reforzamiento estructural a partir de piezas de madera. Fuente: Daniel Enriquez M.



Figura 3.4. Reforzamiento estructural mediante perfiles metálicos por su parte superior. Fuente: Gonzales, Carlos. "Recuperación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos"

deteriorados por daños de origen biológico.

La incorporación de elementos de acero a piezas de madera presenta una gran eficacia en el aumento de su resistencia, pues como se pudo observar en los ensayos realizados en el capítulo II, el aumento de las capacidades resistentes está entre 15 y 20% para madera antigua y un 40% para madera nueva. (Figura 3.4.) Cabe recalcar que, dichos resultados fueron obtenidos mediante refuerzos aplicados en la cara inferior del elemento.

El tercer grupo consiste en la formación de un sistema mixto de madera y hormigón; es decir, se incorpora secciones de hormigón en la cara superior del elemento de madera, lo cual mejora la resistencia de la pieza de madera y consecuentemente aumenta la resistencia a deformaciones.

El uso de hormigón trae consigo muchas ventajas y desventajas dependiendo del estado en el que se encuentre el elemento de madera. La primera gran ventaja es que la rigidez puede aumentar enormemente, al igual que su inercia y en un grado menor la resistencia; sin embargo, la gran desventaja está en que también aumenta el peso, de tal forma que esto puede ser contraproducente al momento de esfuerzos sísmicos. Otra desventaja que puede existir es que la calidad de la unión entre el hormigón y la madera demanda un cálculo previo y, a pesar de ello, la eficacia de dicha conexión puede resultar con algunos márgenes de error; sin embargo, el éxito de este sistema dependerá de una unión perfecta entre los dos materiales. (Figura 3.5.)

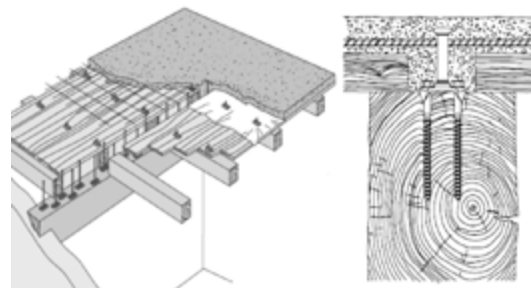


Figura 3.5. Reforzamiento estructural mediante hormigón. Fuente: Vázquez, José. "Patología y Recuperación de estructuras de madera." S.L. Mayo, 2011.



Figura 3.6. Reforzamiento estructural mediante fibras de carbono. Fuente: Daniel Enríquez M.

de los refuerzos más representativos de cada grupo. Los sistemas de reforzamiento estructural a partir de elementos de apoyo, no han sido considerados para los casos de estudio, ya que su aplicación altera la estética de la estructura. Recuerde que los sistemas de reforzamiento deben ser manejados de una manera discreta y, en lo posible, pasar desapercibidos en la construcción, para que así se mantenga la morfología original de los elementos.

Después de realizar la presentación e investigación de los grupos de reforzamiento estructural existentes, se ha procedido a seleccionar los sistemas más destacados para recuperación de capacidades resistentes de un elemento de madera, ya que cada análisis representará un caso de estudio de los cuales se determinarán los aspectos más relevantes.

Los cuatro grupos expuestos presentan posibilidades para reforzar estructuras de madera en diferentes situaciones; todo dependerá del adecuado análisis que tengan cada una de ellas para su aplicación.

Aunque cada sistema represente un aumento considerable en la resistencia y rigidez, para nuestro medio existe poca información técnica acerca de cada método, es por eso que uno de los principales objetivos de este documento es el realizar un respectivo estudio del comportamiento

Aunque cada análisis demande un proceso largo y complejo, a continuación se resume las principales propiedades, ventajas y desventajas que poseen los reforzamientos de cada grupo, para de esta forma validar sus procesos en la construcción.

3.1.2.1 Refuerzo mediante piezas de madera

La alternativa de utilizar elementos de madera para reforzar piezas del mismo material, en procesos de rehabilitación estructural, ha sido muy útil a través del tiempo, a pesar de la gran desventaja que presenta ésta en los resultados obtenidos, ya que no ha logrado incrementos destacables. Aunque el aumento de la resistencia después de aplicar dicho sistema es algo evidente, no se le puede acreditar un gran aporte al refuerzo, ya que también aumentan otros factores negativos, lo cual impide que el refuerzo llegue a ser el más óptimo.

Para obtener un sistema correctamente aplicado, se debe tener en cuenta que el éxito radicaré en la ubicación y orientación adecuada del refuerzo, puesto que la madera mejora sus capacidades según la dirección de sus fibras. Un factor que debe ser siempre considerado es que un refuerzo de este tipo, a más de recuperar las capacidades portantes de un elemento, puede ser aplicado para complementar secciones que presenten deterioro o elementos con problemas de fendado, rajaduras y acebolladuras. Este punto es muy importante, ya que todos los refuerzos estructurales independientes del método que utilicen, deberán complementar las secciones faltantes de un elemento en caso de haberlo; recuerden que la falta de sección en una pieza puede reducir la resistencia, considerablemente.

La figura 3.7. representa las primeras alternativas para aplicar los refuerzos de madera, en los cuales las piezas aumentan la sección y obviamente aumenta su resistencia, pero como ya se dijo, en menor escala. Estos procesos deben ser utilizados especialmente en elementos con un bajo nivel

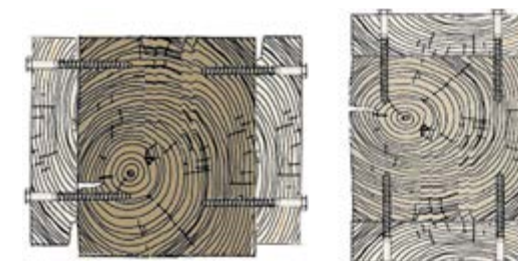


Figura 3.7. Reforzamiento estructural a partir de piezas de madera. Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 3.8. Variante 1. Reforzamiento estructural a partir de piezas de madera. Fuente: Daniel Enríquez M.

de deterioro, puesto que la fijación podría tener problemas por el mal estado del material; además, se podría producir un falso refuerzo ya que el elemento en conjunto no llegaría a aumentar su resistencia ni en un 50% de su capacidad original.

En la figura 3.3. se detalla un claro ejemplo del refuerzo aplicado a las vigas de entrepiso, el cual alcanza una mayor resistencia debido a que su momento de inercia respecto al eje x, es mayor que el de la viga principal. Nuevamente, se recalca que el éxito de este refuerzo estará también en la resistencia que presente la unión y los fijadores, ya sean tirafondos o pasadores.

La posibilidad de manejar los refuerzos puede presentarse según sea la situación de la estructura, para el caso de la figura 3.8. el refuerzo se encuentra ubicado por los tres lados de la pieza de madera; todo con el objetivo de mejorar los esfuerzos a flexión (laterales) y disminuir

vibraciones (superior) en toda la estructura. Aunque resulte un ejemplo muy elemental, su aplicación puede solventar ciertas carencias de resistencia y, además, brinda un espacio ideal para el asentamiento de piezas secundarias.

3.1.2.2. Refuerzo mediante perfiles metálicos por la cara superior

Los refuerzos metálicos por la cara superior del elemento es una alternativa al uso que se le puede dar al acero como refuerzo, puesto que el material brinda muchas ventajas al trabajar conjuntamente con la madera.

Como se mencionó en la introducción del capítulo III, el comportamiento de los elementos de madera rehabilitados, dependerá mucho de la ubicación y forma que tenga el refuerzo aplicado. Por ejemplo, en los ensayos realizados con probetas reforzadas mediante platinas de acero fijadas a la cara inferior, los resultados obtenidos fueron muy favorables y válidos; sin embargo, dichos datos no pueden ser interpretados de la misma manera, como cuando el acero actúa por la cara superior del elemento, pues recuerde que el comportamiento de una estructura puede cambiar dependiendo de la ubicación del refuerzo.

Respecto a la ubicación de un refuerzo metálico, todo dependerá de la condición en la que se encuentre la estructura, ya que resulta más rápido acceder a un elemento por su parte superior y, además, garantiza mejores condiciones para trabajar. Aunque desde un punto de vista más técnico el uso del acero, por la parte superior, no pueda contrarrestar directamente los esfuerzos de tracción que se producen en las fibras inferiores de una pieza cuando trabaja a flexión, contribuye de igual manera mejorando otras capacidades del elemento. En resumen, se puede decir que, el uso del acero, independientemente de su ubicación, mejorará las capacidades resistentes de una estructura de madera y el incremento que pueda experimentar cada pieza, dependerá de los años del nivel



Figura 3.9. Variante 1. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico. Fuente: Gonzales, Carlos. "Recuperación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos"

de deterioro y los años de uso del elemento.

La disponibilidad de poder utilizar perfiles metálicos resulta muy amplia, por lo cual el uso de perfiles ha destacado entre los sistemas de reforzamiento estructural más utilizados. El caso más común es el uso del perfil C, el cual ha sido objeto de varias modificaciones para mejorar la eficacia de resistencia.

- Variante 1 (Figura 3.9)

El refuerzo expuesto en la figura 3.9. representa la primera alternativa que puede ser aplicada mediante el uso de un perfil metálico, como se mencionó, la fijación es realizada mediante tirafondos y el espesor mínimo del perfil debe ser de 4 mm.

El aumento de las capacidades mecánicas de un elemento de madera al colocar perfiles metálicos, es posible determinarlas a través del método de secciones equivalentes, el mismo que permite valorar, primeramente, el incremento de inercia de la sección, a través de la nueva sección generada para la pieza reforzada. Recuerde que al aplicar dicho método, se obtiene una sección homogénea de madera aumentada en área, por lo tanto, su inercia presentará un incremento respecto al inicial (sección sin reforzar), pero la ventaja es que el peso total de la pieza no crecerá debido a que la cantidad de acero

colocado para reforzar será mínimo. En el capítulo II, se determinó factores de equivalencia para madera de tres tipos, por lo tanto, al referirnos a que la cantidad de acero es mínima, se hace referencia a que el usar 1 cm² de acero equivale a usar 25,42 cm² de madera nueva de eucalipto.

Otro factor importante a ser considerado, es la notable capacidad que tiene el acero para mejorar las reacciones de la pieza de madera cuando trabaja a tracción y compresión; sin embargo, la utilización de esta variante 1, no mejora los esfuerzos a flexión, ya que el material es muy dúctil y podría deformarse con facilidad, dependiendo de la longitud que ésta posea.

Este sistema, en los últimos años, ha sido muy utilizado para la recuperación de estructuras de madera, pero en nuestro medio todavía no es común su aplicación, ya que no cuenta con los análisis respectivos y con los datos técnicos que validen y cuantifiquen su aporte.

- Variante 2 (Figura 3.10.)

El siguiente sistema quizá aparenta ser una réplica de la variante 1, y de hecho puede ser considerada de esa manera, ya que su aplicación se fundamenta bajo los mismos criterios; sin embargo, esta alternativa surge en respuesta a mejorar los esfuerzos a la flexión puesto que presenta una platina en el punto medio del perfil C.

Esta platina, perpendicular a las fibras de la madera, mejora la reacción del elemento a flexión, ya que la rigidez aumenta considerablemente; sin embargo, la platina aumentada trabaja por fuera del elemento, produciendo una contribución de esfuerzos indirecta, es decir, actúa desde fuera de la pieza de madera.

Algo muy importante que no se ha mencionado acerca de este método de reforzamiento, es la disponibilidad de espacio que queda para asentar los subelementos que conforman el resto del forjado, y aunque ésta consideración resulte de

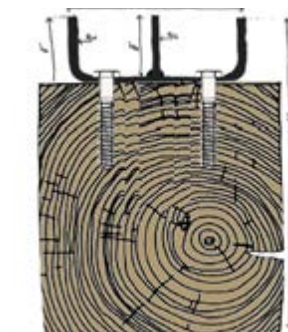


Figura 3.10. Variante 2. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico. Fuente: Gonzales, Carlos. "Recuperación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos"

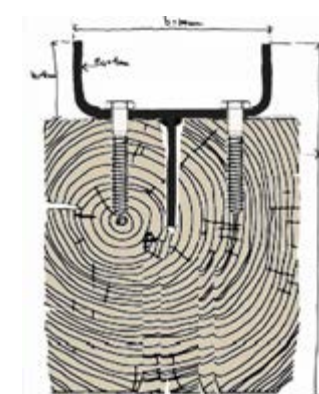


Figura 3.11. Variante 3. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico. Fuente: Gonzales, Carlos. "Recuperación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos"

poco interés, se debe tener claro en los procesos posteriores al reforzamiento, ya que al querer asentar vigas secundarias o simplemente tiras sobre el elemento reforzado, el perfil C podría presentar un inconveniente, pues no existe el suficiente espacio para disponer de una cara superior libre.

- Variante 3 (Figura 3.11.)

Consecuentemente a la variante 2, surge nuevamente una alternativa para continuar mejorando el sistema, pues esta vez la platina incorporada al perfil actúa desde dentro del elemento y por debajo de la correa C. Al encontrarse con la platina metálica en esta posición se garantiza un mejor comportamiento del elemento, pues de esta manera se

1. Revisar capítulo II (Insiso 2.3.5.2. Factor "n". Método de Secciones Equivalentes)

incrementa las propiedades de la variante 1.

Este método mejora, considerablemente, los esfuerzos a flexión y cortante, puesto que la posición de la platina en conjunto con el perfil, tienen una resistencia a los esfuerzos perpendiculares, debido al incremento de su inercia, de allí que el refuerzo actuará aparentemente como una viga T.

Como se pudo observar en el sistema de reforzamiento a partir de perfiles metálicos, la disponibilidad puede ser variada, todo dependerá del resultado que se quiera obtener al momento de intervenir una estructura y obviamente de los recursos económicos que se disponga.

En la figura 3.12. se muestra claramente otras alternativas al sistema expuesto, pues como se mencionó, la aplicación de este sistema dependerá principalmente de las condiciones del elemento y luego de la disponibilidad para realizar el trabajo. El hecho de aplicar un refuerzo con dos platinas inferiores quiere decir que el elemento no debe tener sección muy delgada y que sus condiciones de deterioro no deben estar por debajo del 70% (50 años), puesto que al momento de reducir masa, se podría alterar, de manera muy notoria, las propiedades de la pieza.

La siguiente alternativa (Figura 3.12.b.), con platina al interior y exterior, podría resultar la opción más adecuada para mejorar las condiciones de un elemento; sin embargo, dependiendo del ancho total del perfil, puede resultar incómoda su aplicación constructivamente hablando. Por otro lado, se considera que los esfuerzos que resisten dicho sistema no distan demasiado de los que presentan la alternativa 3, pues ésta garantiza los resultados más óptimos desde diferentes puntos de vista.

Más adelante, se podrá observar los datos técnicos que tiene este sistema de reforzamiento estructural, puesto que la importancia radica

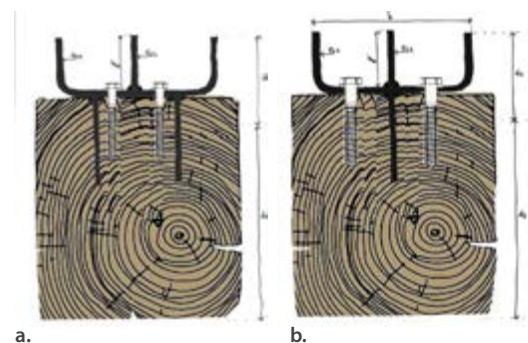


Figura 3.12. Variantes. Reforzamiento estructural mediante perfil metálico. Fuente: Gonzales, Carlos. "Recuperación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos"

en el incremento que puedan alcanzar los elementos después de ser reforzados.

3.1.2.3. Refuerzo mediante secciones de hormigón

El utilizar hormigón como refuerzo adherido a la madera desde un punto de vista estructural, implica algunos factores de riesgo para una estructura en rehabilitación. Esto no quiere decir que su aplicación presente únicamente factores negativos, ya que si se sigue adecuadamente los criterios técnicos para un refuerzo de este tipo, su aporte puede ser favorable para una estructura.

Como primer factor positivo de incremento, se puede considerar que la rigidez que mantiene el hormigón, puede transmitirla a la madera, mejorándola notablemente; recuerde que esta propiedad es muy importante en los diseños estructurales, por lo que resulta favorable, dicho incremento.

El aumento de rigidez relaciona directamente la disminución de vibración en las estructuras de madera, especialmente en elementos de entrepiso, resultando una ventaja en casos específicos, donde la vibración de pisos llega a ser un problema.

Las siguientes propiedades, en incrementar son la inercia y el peso del elemento, dando lugar a un primer riesgo estructural, debido a que se aumenta también la masa de la estructura, ya que a mayor masa, mayor fuerza sísmica.

Como una alternativa se podría recomendar el uso de hormigón ligero, ya que esto reduce el peso original del material, pero mantiene la resistencia requerida para reforzar una estructura. Aunque en nuestro medio no se ha desarrollado el uso de hormigón ligero y sus resultados son desconocidos, podría resultar una buena alternativa para mejorar el sistema de reforzamiento.

Desde un punto de vista técnico, el uso de hormigón cumple con la función específica de resistir esfuerzos a compresión, mientras que la madera resiste los esfuerzos a tracción. En teoría, los dos esfuerzos deberán ser iguales y el eje neutro deberá estar en la unión de los dos elementos para realizar el respectivo análisis, pero por la diferencia de secciones esto no ocurre, resultando necesario el cálculo de flujo cortante en la unión. (Figura 3.13.)

Los cálculos y datos técnicos serán expuestos más adelante, ya que primero se expone los sistemas y alternativas más sobresalientes de cada grupo de reforzamiento estructural. A continuación, se expone las demás alternativas para reforzar elementos de madera mediante hormigón.

La figura 3.14. representa la primera alternativa del refuerzo con hormigón, este sistema implica un uso limitado del material que se encuentra adherido a la pieza mediante conectores metálicos. Como se puede ver, el uso del acero no es indispensable, ya que el hormigón puede resistir esfuerzos a compresión, pero su utilización es necesaria para la adherencia entre materiales (madera-hormigón), y para la reducción de grietas producidas por la contracción del material, además no será necesario realizar el cálculo de esfuerzos cortantes, ya que ambos elementos soportan sin problema dicho esfuerzo.

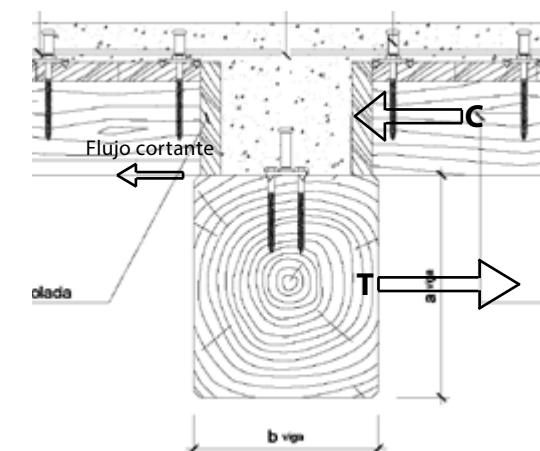


Figura 3.13. Esfuerzos producidos en elementos reforzados con hormigón. Fuente: Vázquez, José. "Patología y Recuperación de estructuras de madera." S.L. Mayo, 2011.

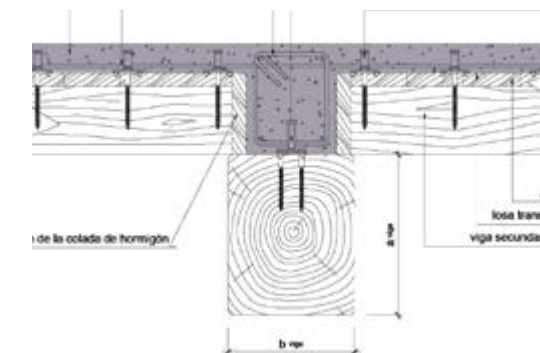


Figura 3.14. Reforzamiento mediante hormigón adherido a la pieza de madera. Fuente: Vázquez, José. "Patología y Recuperación de estructuras de madera." S.L. Mayo, 2011.

Como una alternativa al primer sistema de refuerzo con hormigón, tenemos la figura 3.14., es una variación del proceso pero con el mismo principio, la cual utiliza una viga de hormigón armado sobre el elemento de madera.

Este proceso resulta muy pesado para la estructura; por lo tanto, es recomendable aplicarlo a piezas que mantengan buenas condiciones y con secciones de gran escala, pero, sobre todo, que no presenten deterioros ni faltantes de sección.

Tampoco se debe dejar de lado un previo análisis de apoyos para los elementos reforzados,

2. Pardo, José. "Estructuras mixtas de Hormigón-Madera aplicadas a las rehabilitación de forjados". Tesis doctoral. Universidad de Valencia. Valencia, 1997.

debido al peso que produce el hormigón. Se debe recordar que en muchos casos las construcciones en madera tienen muros de adobe como apoyos con condiciones variadas de resistencia. En resumen, se puede acotar que el uso de hormigón para reforzar estructuras, puede solventar ciertas deficiencias estructurales en la madera; sin embargo, puede presentar ciertos limitantes de uso, que dependerán de las alternativas que se utilicen.

3.1.2.4. Refuerzo mediante Fibras de carbono

Este tipo de refuerzo presenta una característica particular frente a los sistemas antes expuestos. El sistema consiste en aplicar pequeñas platinas de material sintético con fibra de carbono de alta resistencia estructural y resistentes a la corrosión. Estas fibras poseen pesos, prácticamente, despreciables y por su dimensión pueden pasar desapercibidas en el momento de ser aplicadas en un elemento.

En la figura 3.15. se puede observar que las fibras después de ser colocadas en la madera son difíciles de distinguir y su presencia no altera la estética ni la morfología de la estructura, además su actuación deberá procurar proceder siempre desde la parte inferior del elemento para absorber esfuerzos traccionantes, esta consideración se basa en la increíble resistencia a tracción que posee la fibra.

A pesar de ser un sistema nuevo, ha sido muy utilizado para recuperar estructuras no sólo de madera, sino también de hormigón armado y mamposterías de ladrillo y bloque. Además las fibras de carbono constan de una detallada investigación y experimentación por parte de sus fabricantes y dispone de datos técnicos con todas las capacidades resistentes del material, de las cuales se puede aprovechar para considerar previamente un reforzamiento.

Lamentablemente, a pesar de constar con datos



Figura 3.15. Reforzamiento mediante fibras de carbono. Fuente: Daniel Enríquez M. / Escuela central de Cuenca.



Figura 3.16. Espesor de la fibra de carbono. Fuente: Daniel Enríquez M. / Escuela central de Cuenca.

técnicos del refuerzo, nuestro medio carece de información acerca de los resultados finales, obtenidos después de aplicar este tipo de refuerzos; por lo tanto, nuestro objetivo será exponer cómo las platinas de carbono incrementan las capacidades de un elemento de madera.

Como premisa de los resultados que se pueden obtener, los datos técnicos de las platinas especifican que su uso ayuda a incrementar la capacidad de soporte de carga, también aumenta la capacidad a flexión de los elementos de madera y puede solucionar errores de diseño por dimensiones insuficientes.

Respecto a la colocación de las fibras de carbono, se deberá realizar las fijaciones a través de resinas epóxicas, descartando el uso de elementos de fijación como tirafondos o clavos. Recuerde que el espesor de las platinas puede ser desde 1,2 mm. y un ancho de 60 mm. lo cual resulta muy pequeño para el uso de fijadores, además de ser sintético de apariencia vitrificada. Su instalación deberá estar a cargo de personal calificado y con experiencia, ya que una mala fijación puede reducir considerablemente los resultados. (Figura 3.16.)

Para el cálculo de las fibras, resulta conveniente, primeramente, recurrir a sus especificaciones técnicas, las cuales se encuentran ya definidas por sus respectivos fabricantes. Los principales datos que deben ser considerados son; el módulo de elasticidad y esfuerzos a tracción y compresión. Estos datos, pueden variar, según el tipo de fibra, recuerde que existen fibras de diferentes resistencias. Después de precisar las principales características mecánicas del material, el cálculo de su resistencia deberá hacerse a través del método de *secciones equivalentes*.

El refuerzo a partir de fibras de carbono resulta un sistema muy práctico y favorable para una estructura de madera; sin embargo, la desventaja frente a los demás refuerzos está en el costo que representa su aplicación, ya que considerando todos los rubros que interfieren para realizar el proceso, este llega a costar alrededor de 75 dólares por metro lineal; es decir, que para una viga de 4m de longitud, el costo para reforzar dicho elemento será no menos de 300 dólares. Si se considera los metros que pueden llegar a tener una construcción a ser rehabilitada, su costo puede bordear cantidades demasiado altas.

"La variedad de fibras disponibles en el mercado son altas, ya que se encuentran divididas por sus dimensiones y resistencia, por ejemplo, existen platinas con módulos de elasticidad, desde 1'650.000 kg/cm², hasta platinas mejoradas



Figura 3.17. Fibras de carbono aplicadas a vigas de madera con 7m. de longitud. Fuente: Daniel Enríquez M. / Escuela central de Cuenca.

*de 2'100.000 kg/cm² que prácticamente igualan la capacidad que tiene el acero"*₃.

En cuanto a las dimensiones de cada fibra, se dispone de varias posibilidades, todo dependerá de la resistencia que se quiera lograr en el refuerzo. La gran ventaja que presenta el material está en el insignificante espesor que tienen las fibras, pues los espesores van desde 1,2 mm. hasta 1,4mm.

Queda totalmente libre la posibilidad de utilizar más de una platina de carbono en un elemento de madera, debido a la pequeña sección que presenta dicha fibra. En la figura 3.17. se expone cómo el uso de la fibra puede variar de elemento a elemento; todo dependerá del cálculo que se aplique a cada pieza.

Si se observa nuevamente la imagen antes mencionada, se podrá distinguir claramente como cada viga de madera tiene un número diferente de platinas, partiendo desde una sola fibra, para elementos con menor deterioro estructural, hasta piezas con 4 platinas, todo lo

3. Sika Ecuatoriana S.A. "Sika CarboDur - Sikadur 30". Manual Técnico. <http://www.sika.com.ec>

cual dependerá del análisis de cada elemento y de la resistencia solicitada. La cantidad de platinas, que se puedan utilizar en un elemento de madera, responde a un análisis del estado de la pieza o de la función que vaya a cumplir, después de la aplicación del refuerzo.

Una característica particular del proceso aplicada a la restauración de la figuras expuestas (Antigua Escuela Central de Cuenca) es que la platina de carbono no cubre la longitud total de las piezas de madera, ya que el cálculo realizado para la estructura detalló que el refuerzo debe mejorar los momentos máximos y reducir las flexiones en el centro del claro.

A pesar de que la aplicación de este refuerzo se la realizó en una edificación de nuestro medio, la información técnica acerca del incremento de resistencia que alcanzó la estructura, no detalla un porcentaje aproximado de los resultados del refuerzo; por ello, más adelante se exponen los análisis realizados en piezas de madera, realizando procesos que ya han sido explicados en el capítulo II.

Si bien la información expuesta de los refuerzos aplicados en la edificación mencionada carece de datos específicos acerca del aumento de las capacidades resistentes, no quiere decir, que los procesos realizados estén incorrectos o erróneos; al contrario, los datos son suficientemente técnicos para validar el refuerzo; sin embargo, no se apegan a los principios que el presente documento está llevando a cabo, el cual tiene como objetivo determinar el aumento de los esfuerzos dentro del rango elástico.

3.2. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EXISTENTES

Después de observar los diferentes tipos de reforzamiento estructural, es necesario precisar los sistemas más significativos y utilizados en la

construcción y, además, estimar el aumento de las propiedades elásticas; obviamente, sin dejar de lado el análisis acerca del incremento de masa e inercia en las piezas de madera rehabilitadas.

En cuanto al aumento de las propiedades elásticas, el principal objetivo está en calcular el aumento del esfuerzo máximo admisible, ya que en base a este dato, se sustentan la mayoría de datos como los momentos máximos y las fuerzas admisibles. Aunque el módulo de elasticidad en teoría, se mantiene constante, como vimos en el capítulo II, también fue posible estimar su aumento mediante ensayos de laboratorio practicados en probetas de eucalipto nuevo, los cuales representaron al principal sistema de reforzamiento estructural de cada grupo expuesto, anteriormente.

A pesar de que la disponibilidad de sistemas de reforzamiento estructural es amplia, según sus grupos respectivos, fue necesario elegir al método más eficaz y utilizado en rehabilitación de edificios, ya que en muchas ocasiones se han aplicado refuerzos cuyos resultados han sido invalidados, debido a su pequeño aporte, pues no han logrado cumplir el objetivo primordial que es mejorar los esfuerzos admisibles dentro del rango elástico de una probeta.

Para realizar el análisis de los sistemas de



Figura 3.18. Probeta de eucalipto reforzada mediante tabloncillos de madera. Fuente: Daniel Enríquez M.

reforzamiento estructural existentes, se procedió a preparar nuevamente probetas de eucalipto nuevo, replicando los métodos analizados, para ser analizados a través de la máquina prensadora de laboratorio.

Respecto a las limitantes para realizar los ensayos con las probetas reforzadas, se mantuvo las mismas indicaciones expuestas en los ensayos anteriores para flexión, con la única diferencia que cada ensayo reflejó un método distinto; es decir, se experimentó con una probeta por cada sistema de reforzamiento estructural existente, esto con el objetivo de estudiar el comportamiento que tiene cada muestra frente a refuerzos de diferente tipo.

El primer ensayo fue realizado con una muestra de eucalipto reforzada, mediante piezas de madera en su cara superior e inferior, las cuales fueron fijadas a través de tirafondos y resinas epóxicas. (Figura 3.18.)

El uso de perfiles y platinas metálicos corresponde a la segunda probeta ensayada, pero para este caso el refuerzo fue aplicado por la cara superior de la muestra a diferencia de la probeta ensayada en el capítulo II. (Figura 3.19.) Como tercera probeta dentro de los casos de estudio, se utilizó una pieza reforzada con una sección de hormigón por su cara superior, la cual no presentó los resultados esperados. (Figura 3.20.)

Para el último caso de estudio correspondiente a la probeta reforzada con platinas de carbono, resultó complicado realizar el respectivo ensayo, puesto que, como ya se mencionó, los costos son muy elevados para la adquisición del material; sin embargo, gracias al grupo de dirección técnica de la antigua Escuela Central de Cuenca⁴ (Construcción que se encuentra en proceso de restauración), pudimos obtener datos de un ensayo realizado con platinas de carbono, pero a pesar de tener disponibles los datos de la prueba, la información carecía de algunos indicadores sobre el incremento de las propiedades elásticas, las cuales fueron



Figura 3.19. Probeta de eucalipto reforzada mediante perfil metálico tipo "C" y platina por la cara superior. Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 3.20. Probeta de eucalipto reforzada mediante hormigón por su cara superior. Fuente: Daniel Enríquez M.

resueltas y están expuestas, más adelante. Debido a que el presente ensayo está citado desde una fuente ajena al documento, la obtención de imágenes donde se detalla el sistema fue difícil, por lo tanto su representación no pudo ser expuesta, aunque la disposición de la fibra de carbono es idéntica a la aplicada en la figura 3.17.

3.2.1. Análisis del reforzamiento mediante piezas de madera colocadas en las caras superior e inferior de la viga

El siguiente sistema de reforzamiento parte de un principio muy sencillo con relación a los esfuerzos que sufren las fibras al momento del esfuerzo, que consiste en absorber dichos esfuerzos, mediante la implementación

4. Escuela Central de Cuenca, edificación ubicada en la calle Gran Colombia y Benigno Malo (esq.) La edificación se encuentra en proceso de restauración.

de piezas de madera, pero con secciones de menor dimensión que la pieza reforzada.

Se sabe que las fibras de una viga que trabaja a flexión, respecto al eje neutro, están a tracción y a compresión dependiendo de la dirección de la fuerza o carga aplicada; entonces, el refuerzo tendrá como objetivo primordial mejorar los esfuerzos, absorbiendo y distribuyendo mejor las cargas. Por lo tanto, el refuerzo deberá centrarse en las caras superior e inferior de la viga, y así mejorar no sólo sus esfuerzos, sino también aspectos relacionados con su rigidez y deformaciones.

El reforzamiento fue aplicado a una viga de eucalipto de sección 10x10 cm. con piezas de madera de 4x12 cm. fijadas a sus caras superior e inferior, mediante tirafondos de 3 pulgadas y colocadas en doble fila al tresbolillo. (Figura 3.21.) Su aplicación puede resultar factible y rápida en la construcción, aunque, se debe ser muy cuidadoso al momento de colocar los tornillos, ya que es recomendable realizar agujeros previos, a manera de guías, para evitar rajaduras en la pieza a reforzar; no hay que olvidar que el material se agrieta con facilidad por naturaleza.

Al aplicar este tipo de refuerzos, se puede lograr un increíble aumento de la rigidez y disminución de vibraciones, especialmente, en estructuras de piso; sin embargo, el aumento de inercia y peso propio de la pieza reforzada resulta una gran desventaja frente a los demás sistemas de recuperación estructural, ya que al aumentar la masa del elemento, incrementa el riesgo de fallas o fracasos por movimientos sísmicos.

El sobrecargar la edificación implica realizar consideraciones extras acerca de la resistencia de los muros portantes, pues recordemos que en nuestro medio, la mayoría de edificaciones con estructuras de madera, poseen muros de tierra en condiciones no tan buenas, complicando más un proceso de restauración estructural.



Figura 3.21. Izq.: Sección de Probeta reforzada con piezas de madera. Der.: Colocación de tirafondos en doble fila al tresbolillo. Fuente: Daniel Enríquez M.

A pesar de los problemas relacionados con el aumento del peso al utilizar piezas de madera para reforzar, se debe rescatar que el sistema brinda también ventajas muy útiles para mejorar las condiciones elásticas de un elemento de madera. El aumento de la rigidez quizá sea el factor más representativo respecto al incremento de las propiedades elásticas, puesto que alcanza la mejor resistencia, si se compara los resultados de los demás sistemas de reforzamiento.

A continuación se detalla los datos obtenidos después de aplicar el ensayo de laboratorio con la probeta de eucalipto nuevo (Probeta L4), manteniendo los mismos criterios utilizados para muestras a flexión.

- Ensayo a flexión

Como se puede ver en los datos de la tabla c1., las cargas admitidas por la probeta L4 superan de forma significativa a los ensayos expuestos en el presente documento; sin embargo, esto no supone que el refuerzo mediante piezas de madera sea el más recomendado de todos, ya que interfieren factores que limitan su uso.

El principal factor es el aumento de peso y masa

Tabla de Resultados. "Probeta L4"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
495	50
2567	100
4195	150
5963	200
7406	250
8730	300
10150	350
11500	400
12700	450
13980	500
14995	550
16150	600
16800	650
17900	700
18850	750
19875	800
20459	850
19000	900

* Carga máxima= 20.459,00 kgf.

Tabla c1. Probeta L4. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

de la pieza reforzada y de su inercia, como ya se mencionó, esto presenta un riesgo frente a esfuerzos de grandes magnitudes. Recuerde que a mayor masa mayor fuerza sísmica.

Si bien, el sistema de reforzamiento, a través de piezas de madera, no es el mejor sistema entre los estudiados, representa una gran ventaja respecto a su rigidez, ya que en el ensayo realizado fue claro notar que la pieza soportó grandes deflexiones y su fracaso se dio de manera más discreta que las demás probetas ensayadas.

Al referirse a este sistema de reforzamiento como un método no tan recomendado, no significa que los resultados obtenidos hayan sido bajos, por el contrario, este contempla el mejor incremento del esfuerzo entre los cuatro refuerzos estudiados, pero sin llegar a sobrepasar los resultados del refuerzo de platinas por la cara inferior de la probeta, realizados en el capítulo II.



Figura 3.22. Estado de la probeta L4, con refuerzos de madera, después del ensayo. Fuente: Daniel Enríquez M.

Durante el proceso del ensayo y conforme aumentaban las cargas, fue claro distinguir la zona de fallo de la probeta. Esto es muy importante para poder analizar los puntos y las zonas más riesgosas en un elemento de madera que trabaja a flexión. La falla que se produjo después del último esfuerzo admisible se dio en las fibras traccionadas, produciendo una separación entre los anillos de crecimiento, más cercanos al núcleo. En la figura 3.22. se puede distinguir claramente una separación de las fibras traccionadas, ya que son las que mayor esfuerzo soportaron; por lo tanto, este fenómeno aporta una valiosa experiencia para proponer un reforzamiento de manera técnica y con justificaciones de su uso y aplicación.

- Gráfica y resultados

Después de obtener los datos de laboratorio respectivos para la probeta L4, se procedió a realizar la gráfica de esfuerzo-deformación (Figura 3.23.), la cual detalla factores importantes, respecto a la aplicación de este sistema de reforzamiento.

En primer lugar, se puede observar, en la curva y específicamente en el rango elástico que

la pieza presenta, una increíble capacidad resistente. Esta propiedad también se lo pudo evidenciar en los datos de la tabla c1., pues este ensayo admitió cargas muy altas.

El hecho de presentar un rango de elasticidad considerable confirma que la rigidez ha aumentado, siendo muy favorable para las condiciones de resistencia; recalando que la rigidez es la fuerza mínima necesaria para lograr una deformación; por lo tanto, las cargas admisibles deberán ser muy altas para producir una deformación y mucho más para que la probeta sobrepase sus límites elásticos.

Se puede observar también que el límite de proporcionalidad representa el esfuerzo máximo admitido dentro del rango elástico, el cual superó los 300 kg/cm², tal como se detalla en la tabla c2. de resultados; sin embargo, el

Tabla c2.
Resultados del refuerzo aplicado mediante piezas de madera colocadas en las caras superior e inferior de la viga.

DESCRIPCIÓN	Probeta L4 de eucalipto nuevo
SECCIÓN b x h (cm)	10 x 10
DEFORM. MÁX. (mm)	21,5
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm ²)	320,63
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	8.053,00

Tabla c2. Resultados del refuerzo mediante piezas de madera. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta L4" (Madera nueva)

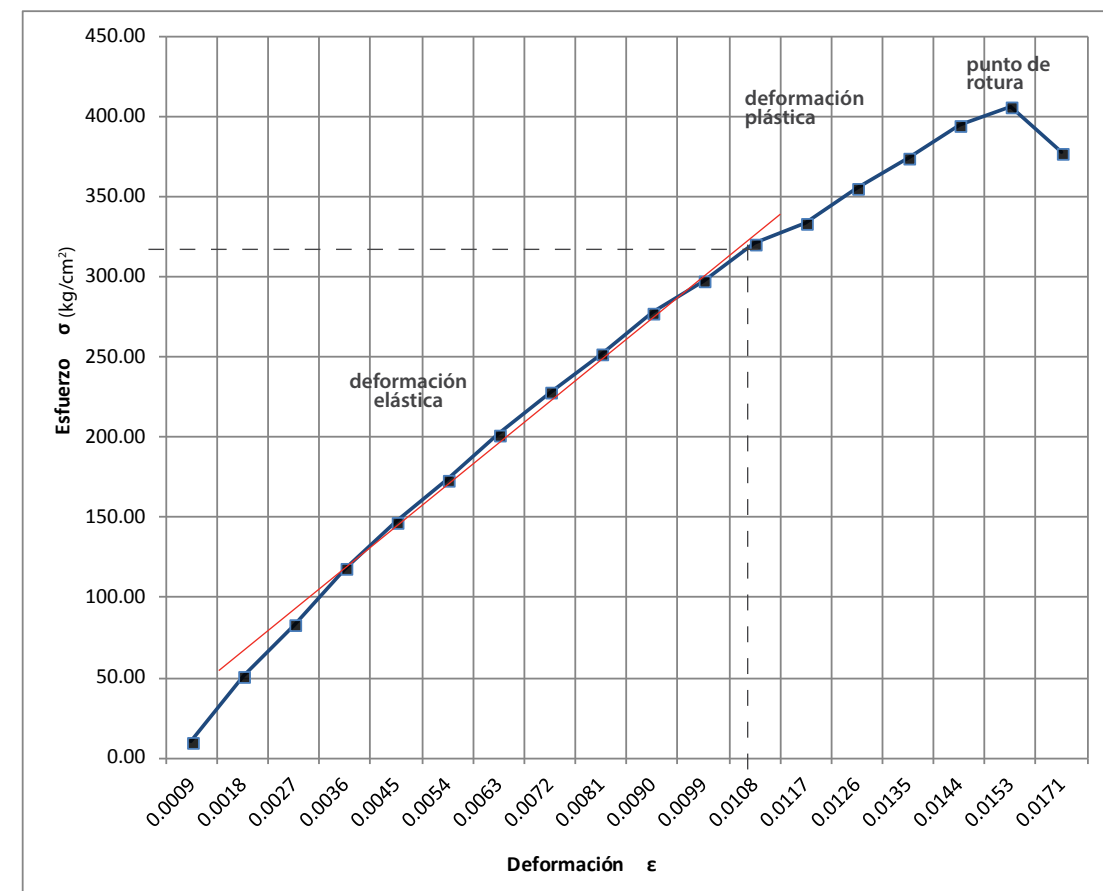


Figura 3.23. Probeta L4. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados mediante piezas de madera. / Fuente: Daniel Enríquez M.

aumento de masa y peso de la probeta han provocado que la inercia de la sección incremente hasta 6 veces respecto al inicial y que su peso haya alcanzado casi el doble que el original.

A pesar de los problemas relacionados con las cargas en las piezas de madera, su uso ha sido un gran aporte al refuerzo de edificaciones patrimoniales, pues los resultados obtenidos han logrado mejorar las capacidades de resistencia de las estructuras; se reitera que su uso podría incrementar el riesgo de fallos.

Para un correcto análisis del sistema expuesto, es importante conocer los resultados reales de la resistencia que puede llegar a alcanzar una pieza de madera después de ser reforzada. Como ya se mencionó, los principales factores a considerar, son los esfuerzos admisibles y la rigidez a flexión dentro del rango elástico.

Por su parte, el esfuerzo máximo admisible, según datos obtenidos en la tabla c2. mejoró en un 22% la resistencia de la pieza, aproximándose al esfuerzo obtenido con el método de platinas metálicas.

Es también importante detallar que, el incremento general de las propiedades elásticas puede estimarse de manera muy aproximada mediante un factor de 1.20; es decir, si sabemos que el esfuerzo máximo admisible para una pieza de eucalipto nuevo bordea los 263 kg/m², su incremento alcanzaría los 316 kg/cm².

No se debe olvidar que todos los datos obtenidos con la madera son aproximados, esto debido a las características naturales del material, por lo que los resultados pueden contribuir al estudio y análisis del comportamiento de la madera.

Por otro lado, unos de los mejores incrementos obtenidos fue el de la rigidez a flexión, la misma que aumentó las condiciones de resistencia del material y su aporte se pudo observar claramente en el ensayo y en la

gráfica de esfuerzo-deformación, la cual detalla que la pieza necesitó cargas muy altas para empezar a deformarse, convirtiéndolo en un material de alta rigidez.

3.2.2. Análisis del reforzamiento mediante perfil metálico colocado en su cara superior.

El siguiente ensayo en los últimos años ha llegado a tener una gran demanda de uso, debido a la facilidad y rapidez que presenta el sistema respecto a elaboración y montaje en obra. Sin duda, el utilizar acero para reforzar, siempre, por las características únicas del material, representará una ventaja frente a otros materiales.

Se logró observar en el primer ensayo realizado con platinas metálicas ubicadas en la cara inferior, que los resultados fueron óptimos y el incremento que experimentaron las probetas fue un gran aporte para validar dicho proceso de reforzamiento, por lo tanto, los resultados que se espera del presente sistema deberán ser iguales.

Como se mencionó, las resistencias, que pueden alcanzar los elementos de madera a partir de piezas metálicas, corresponden a la correcta ubicación que se lo sepa dar al refuerzo. Por ejemplo, si nuevamente recurrimos al concepto de las fibras a tracción, resulta lógico pensar que el refuerzo debería ir siempre en la cara inferior del elemento y así absorber los esfuerzos producidos; sin embargo, este concepto no queda exento de aplicarse inversamente, pues la ubicación del perfil metálico por la cara superior también tiene ventajas y puede llegar a resolver deficiencias estructurales que se presentan al momento de una intervención.

El utilizar este sistema facilita los procesos

de reforzamiento, pues su aplicación evita el acceso a los elementos por su cara inferior, ya que en muchos casos la presencia de elementos con valores históricos limita su actuación.

El reforzamiento contempla un perfil metálico "C" con una platina soldada en la parte inferior e introducida en la pieza de madera, la cual corresponde a la probeta L5, de eucalipto nuevo. Todo el sistema fue conectado a la madera mediante tirafondos de 2,5 pulgadas atornillados desde la cara superior y en doble fila al tresbolillo. Las indicaciones previas para la instalación del refuerzo se mantuvieron bajo los mismos conceptos aplicados y explicados, anteriormente. La dimensión del perfil fue de 100 x 50 mm. y con un espesor de 4mm. el mismo que de la platina inferior. (Figura 3.24.)

El objetivo de este refuerzo radica en que el perfil absorba los esfuerzos presentes en las fibras a compresión y así mejorar la resistencia del elemento; mientras, que la platina ayude a disminuir los esfuerzos cortantes. El cálculo para la determinación de los incrementos estará basado en la aplicación de las secciones equivalentes, método que brinda la determinación de los esfuerzos a compresión y tracción.

La gran ventaja de este sistema y de todos los que utilizan acero para reforzar es el pequeño peso que involucra su uso, ya que el aumento del mismo está en la orden de 35%, dependiendo de la cantidad de acero que se aplique. Los datos puede ser fácilmente comprobados a través de los datos referenciales de pesos de materiales. Por ejemplo, cada probeta experimentada tiene un peso aproximado de 9 kg. sin reforzar, mientras que el perfil metálico presenta un peso de 3 kg. Estos datos pueden ser comprobados con las densidades respectivas de cada material, pues sus pesos están establecidos.

El usar el perfil en la parte superior de la muestra podría representar inconvenientes constructivos, ya que las piezas metálicas ocupan toda



Figura 3.24. Izq.: Sección de Probeta reforzada con perfil metálico C. Der.: Colocación de tirafondos en doble fila al tresbolillo. Fuente: Daniel Enríquez M.

la cara superior del elemento, donde normalmente sirve de apoyo para otras piezas estructurales, y aunque el problema sea fácil de corregir, en ocasiones podría resultar una molestia de ámbito constructivo para el proceso de reforzamiento, todo lo cual se debe tener muy en cuenta para optimizar el trabajo.

A pesar de los pequeños inconvenientes constructivos, el sistema de reforzamiento con perfiles ha alcanzado resultados positivos, desde el punto de vista estructural y también desde su forma de instalación; sin embargo, sus resultados no han logrado superar los refuerzos con platinas fijados en la cara inferior; por lo tanto, se puede afirmar que los elementos reforzados en las zonas de tracción de las fibras responden de mejor manera que las ubicadas en la zona de compresión. Esto no quiere decir que los resultados obtenidos hayan sido malos, por el contrario, han logrado mejorar los esfuerzos y la rigidez, notablemente.

Sin presentar inconveniente alguno el ensayo se lo realizó normalmente, dando como resultado una excelente respuesta al elemento experimentado. A continuación se detalla los principales datos obtenidos en la prueba de laboratorio, para su respectivo análisis y cálculo técnico.

Tabla de Resultados. "Probeta L5"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
420	50
877	100
1750	150
2530	200
3480	250
5060	300
6675	350
8120	400
9525	450
10640	500
11695	550
12553	600
13127	650
13660	700
14296	750
13880	800
13570	850
14030	900

*** Carga máxima= 14.296,00 kgf.**

Tabla c3. Probeta L5. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

- Ensayo a flexión

La respectiva tabla c3. de resultados, detalla de manera clara que la probeta incrementó considerablemente sus capacidades resistentes, cumpliendo con el objetivo del refuerzo de acuerdo a lo planteado. A pesar de que las primeras cargas obtenidas responden a un asentamiento completo de la superficie del perfil, la resistencia aumenta conforme reaccionan los dos materiales en conjunto, llegando a soportar una carga máxima muy similar a la obtenida en el ensayo con platinas metálicas del capítulo II, lo que hace pensar que el incremento de las propiedades elásticas serán de igual magnitud.

En la figura 3.25. se detalla el estado de la probeta L5 luego de ser destruida en el ensayo a flexión, la cual muestra una sección intacta y sin evidencias de separación de fibras; esto se debe al aporte



Figura 3.25. Estado de la probeta L5, con refuerzos mediante perfiles metálicos, después del ensayo. Fuente: Daniel Enríquez M.

que brindó la platina vertical unida al perfil. Recuerde que la función de este elemento fue absorber los esfuerzos cortantes y además mejorar la resistencia a flexión de la probeta.

Aunque la inclusión de la platina metálica en el centro de la probeta, pueda ser interpretada como una pérdida de las capacidades mecánicas de la madera por falta de sección, los resultados reflejaron lo contrario, pues la resistencia incrementó y la apariencia física del elemento se mantuvo en un 90% intacta; es decir, a pesar de que las grietas presenten grandes aberturas y sean las más opcionadas para romperse o separarse entre fibras, no existió tal, lo que significa que una muestra nueva de eucalipto puede soportar este tipo de reforzamientos.

En cuanto al punto de ruptura del elemento, en la imagen se puede observar que la falla se da en el punto medio de la luz y que, nuevamente, las fibras que fracasaron fueron las sometidas a tracción, y a pesar de que el mayor número de grietas se encontraban en la parte superior del eje neutro, donde se encuentran los esfuerzos a compresión, los daños fueron mínimos.

Una vez expuestos los datos obtenidos en laboratorio, queda por analizar los resultados obtenidos con este sistema de reforzamiento con perfiles metálicos, para lo cual es muy importante, en este caso, aplicar el ya mencionado método de secciones equivalentes, ya que para poder aplicar las fórmulas de flexión, el material del elemento compuesto debe ser el mismo.

Como el proceso ya fue explicado y el factor " n_L " obtenido, la determinación de la sección equivalente para la probeta L5 resulta más rápida, pues los módulos de elasticidad han sido ya definidos; sin embargo, hay que tener cuidado con la interpretación de las secciones, pues un error significaría un aumento de masa e inercia injustificado, lo cual obviamente alteraría los resultados.

Para iniciar el proceso de interpretación de secciones, es necesario determinar las dimensiones de la probeta L5 y del refuerzo metálico. El elemento de madera presentó una sección de 100x100mm., mientras que, el refuerzo metálico fue de 100x50mm. (perfil C) y una platina metálica inferior de 4x50mm.

El factor n es el mismo que se determinó para madera nueva de eucalipto; por lo tanto, es totalmente válido su uso en cualquier análisis para madera de eucalipto. Puesto que los factores " n " han sido obtenidos para tres diferentes tipos de muestras, según sus años de antigüedad, puede ser aplicado en cualquier caso que involucre a la madera y al acero. De este modo queda determinada la sección equivalente de una pieza de madera, reforzada con un perfil metálico, por su cara superior. (Figura 3.26.)

Una vez obtenida la sección equivalente, se puede ver que la interpretación de secciones mantiene las principales reglas para su aplicación, ya que mantiene las dimensiones de altitud. Por lo tanto, después de obtener la sección del elemento reforzado es posible aplicar las fórmulas de flexión y determinar

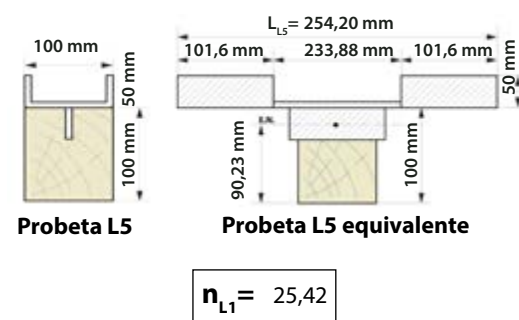


Figura 3.26. Determinación de la sección equivalente para la probeta L5. Fuente: Daniel Enríquez M.

la gráfica de esfuerzo-deformación para luego proceder a obtener los respectivos resultados de esfuerzo y rigidez principalmente.

-Gráfica y Resultados

La curva graficada para la probeta L5 representa, claramente, la reacción del material después de ser aplicada un refuerzo, la cual determina un incremento de su rango elástico y por ende de su esfuerzo máximo admisible. (Figura 3.27.)

Es importante determinar que los primeros puntos reflejan esfuerzos bajos y que la deformación es considerable; esto se debe al acoplamiento que sufre el perfil metálico sobre la superficie de la muestra de madera, puesto que la unión seguramente presentó pequeños espacios entre superficies. Este fenómeno hace que la zona elástica, al inicio de la curva altere su linealidad y se produzca un punto de inflexión; sin embargo, las capacidades obtenidas en este rango aún forman parte de las condiciones de elasticidad del material, el cual a partir del cuarto punto empieza a reflejar la verdadera resistencia del elemento, ya que la reacción es paralela al refuerzo, definiendo de manera más precisa la línea de elasticidad y el límite de proporcionalidad.

En cuanto a los resultados obtenidos, se puede observar en la tabla c4. que el incremento de

cada factor resultó favorable para el elemento de madera, validando el proceso y, sobre todo, aportando un gran incremento de rigidez bajo situaciones que no involucran un aumento de masa y peso de la probeta. Como se determinó, el esfuerzo máximo admisible y la rigidez a flexión son los principales factores que determinan las capacidades elásticas de un material y de una estructura. Por lo tanto, los incrementos pueden ser representados mediante factores numéricos, los cuales ya han sido representados en pruebas anteriores.

En el caso del esfuerzo admisible, se determina que el incremento fue del 16% sobre las capacidades originales de la madera; es decir, que si nuevamente se considera el valor del esfuerzo máximo admisible del eucalipto sin reforzar, se tiene que soporta 263 kg/cm², pero si aplicamos el presente refuerzo,

Tabla c4. Resultados del refuerzo aplicado mediante perfil metálico y platina, fijados a la cara superior de la muestra.

DESCRIPCIÓN	Probeta L5 de eucalipto nuevo
SECCIÓN b x h (cm)	10 x 10
DEFORM. MÁX. (mm)	22,8
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm²)	305,80
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	5.705,80

Tabla c4. Resultados del refuerzo mediante perfil metálico. / Fuente: Daniel Enríquez M.

dicha capacidad puede superar los 305 kg/cm². El incremento de los esfuerzos y demás capacidades elásticas del material puede ser valorado mediante un factor numérico, el cual es de 1,15.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta L5" (Madera nueva)

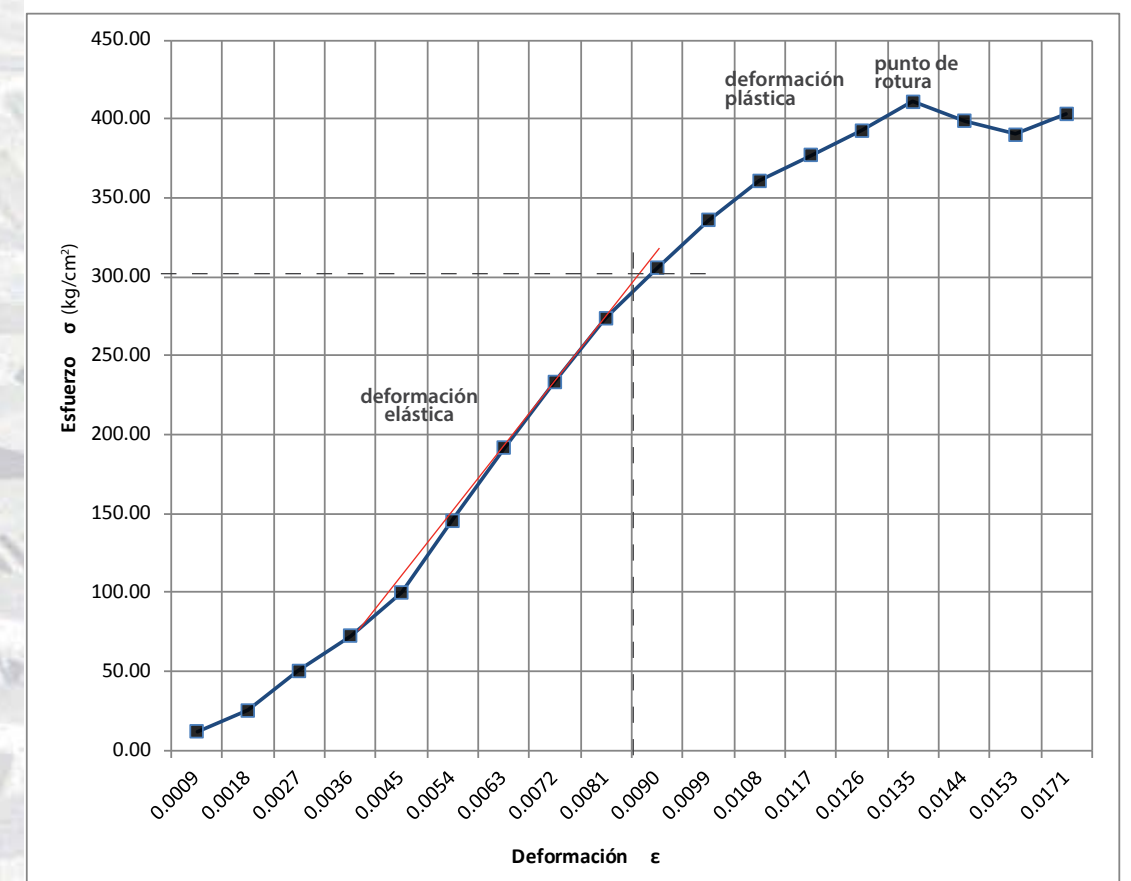


Figura 3.27. Probeta L5. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados mediante piezas de madera. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Para el caso de la rigidez, su incremento también resultó muy eficaz para la pieza de madera, incrementando en gran medida dicha capacidad, pues como vemos la rigidez para este caso alcanzó los 5.705 kg/cm, superando la rigidez obtenida en los refuerzos con platinas fijadas a la cara inferior de la probeta. Por lo tanto, se puede anticipar que el acero en perfiles mejora las situaciones de deformación en un elemento de madera con un gran nivel.

Expresados los resultados y demás criterios de la aplicación del presente refuerzo, se puede determinar que el refuerzo presenta grandes ventajas y que su aplicación es totalmente válida para reforzar elementos verticales. De conformidad, el estudio realizado acerca del comportamiento de probetas reforzadas, se puede detallar que los resultados y la experiencia adquirida han contribuido de gran manera al conocimiento general de los refuerzos metálicos, el cual a su vez ayudará a generar nuevos sistemas, pues queda determinado que el acero mejora los principales factores de resistencia de elementos estructurales.

3.2.3. Análisis del reforzamiento mediante secciones de hormigón

El sistema de refuerzos a partir de secciones de hormigón, como ya quedó señalado puede ser un método con altos niveles de riesgo para la estructura por cuestiones de peso; sin embargo, su uso no se limita debido a las ventajas presentadas. Más adelante se podrá demostrar que el sistema puede ser reemplazado por el uso de piezas de madera, lo cual resultaría un sistema más liviano respecto al presente método.

Es importante señalar, desde un inicio, que el ensayo con probetas reforzadas, mediante secciones de hormigón, resultó muy complicado de realizar, debido a que, en todas las prácticas señaladas, el hormigón fracasó por aplastamiento puntual en las zonas de apoyo de las cargas, por lo que limitó la lectura exacta de las cargas. (Figura 3.28)



Figura 3.28. Estado de la probeta L6, después de realizar en ensayo. Fuente: Daniel Enríquez M.

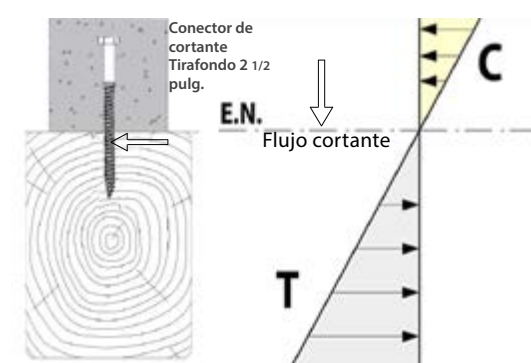


Figura 3.29. Esfuerzos producidos en la sección del elemento reforzado con hormigón. Fuente: Daniel Enríquez M.

Como premisa del análisis, se sabe que el ensayo se vio limitado por algunos factores, sin embargo, las prácticas realizadas con este sistema brindaron algunos datos importantes desde un punto de vista estructural.

En primer lugar, se debe señalar el proceso de aplicación para unir el hormigón a la cara superior de la probeta L6 de madera, ya que resulta indispensable considerar previamente los esfuerzos y flujos cortantes en dicha unión, puesto que en la fijación entre hormigón y madera se presentan los máximos esfuerzos de corte, lo cual puede derivar en una separación de las piezas y en un posterior fracaso del refuerzo. (Figura 3.29)

El cálculo del flujo cortante resulta indispensable para determinar el número de conectores metálicos que deben ir en la probeta de madera, puesto que estos deberán absorber los esfuerzos de corte producidos en la zona de unión entre materiales. En resumen, dicho cálculo evitará que el hormigón se separe de la madera al momento de aplicar cargas y determinará la cantidad de conectores que deberán ser colocados.

Respecto a los conectores, la cantidad promedio necesaria para evitar esfuerzos cortantes, dependerá de la resistencia que estos posean y por ende de sus secciones. En nuestro medio, el uso de conectores es muy restringido, por lo que su obtención se vuelve difícil, pero como alternativa se recurrió a los tirafondos de 2 1/2 pulgadas, los cuales soportan un esfuerzo cortante aproximado de 1150 kg/cm². Este último dato es importante para poder calcular la cantidad de tirafondos que deberán ir en un metro de viga para absorber sin problemas los esfuerzos cortantes.

La cantidad de tirafondos por metro lineal, con las condiciones mencionadas es de aproximadamente 80 a 100 piezas, lo cual cuestiona la eficacia de un tirafondo a cortante, como también cuestiona la eficacia del sistema de reforzamiento. El cálculo para la determinación del número de tirafondos no ha sido expuesto, debido a la complejidad del proceso y además su consideración de es de importancia, ya que el sistema de secciones de hormigón puede ser reemplazado por una sección equivalente de madera.

Una vez conocidos los principales aspectos primarios que conforman el refuerzo mediante secciones de hormigón, es necesario detallar las secciones de los elementos que conforman el elemento de la probeta L6. La sección principal de madera es de 100x100 mm.; mientras que, la sección del hormigón es de 70x50 mm.

Para poder aplicar las fórmulas respectivas para la obtención de esfuerzos admisibles, es

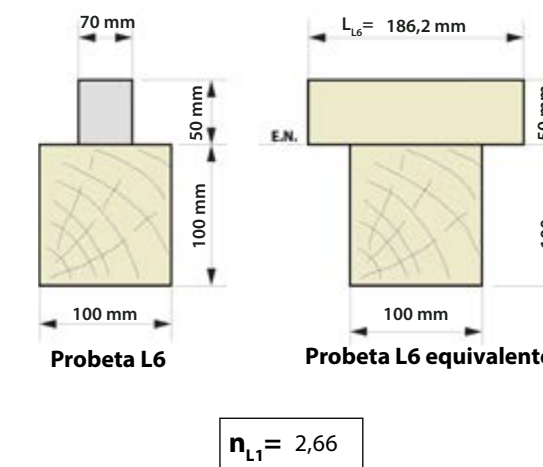


Figura 3.30. Determinación de la sección equivalente para la probeta L6, reforzada con hormigón. Fuente: Daniel Enríquez M.

necesario determinar, primeramente, la sección equivalente en madera del elemento compuesto (madera-hormigón), ya que las fórmulas son aplicables sólo a elementos homogéneos.

El proceso para la obtención de secciones equivalentes, como se puede ver en el capítulo II, involucra la interacción de los módulos de elasticidad de ambos materiales, los cuales son totalmente conocidos; sin embargo, como el hormigón puede alcanzar resistencias diferentes, su módulo de elasticidad también lo hará. A pesar de esto, dicho dato ha sido normado para hormigones de 240 y 260 kg/cm², resultando una cantidad de 210.000 kg/cm² como valor para el módulo de elasticidad del hormigón.

Por lo tanto, conocidas dichas propiedades se tiene como resultado un factor "n" para hormigón de 2,66 del cual obtenemos la sección equivalente que se muestra en la figura 3.30. Se puede distinguir que la sección equivalente del hormigón a madera, es ligeramente más grande que el ancho del elemento reforzado, lo cual se debe a que el valor del factor "n" resultó demasiado pequeño debido al módulo de elasticidad.

5. Ingeniería civil. "Módulo de elasticidad del Hormigón - método Para su determinación". 20 mayo 2014. <http://www.ingenierocivilinfo.com>

Por lo tanto, se puede considerar que mientras el factor “n” se aproxime a la unidad, el refuerzo equivaldrá a utilizar la propia madera.

Si se observa la sección equivalente obtenida, para el presente sistema de reforzamiento, se puede considerar, que aplicando una pieza de madera en la cara superior del elemento se puede reemplazar fácilmente al método, lo cual convendría mucho más, por cuestiones de peso, ya que si se analizan los pesos de cada sistema, el uso de hormigón representó un incremento del 90% al peso original del elemento, mientras que la pieza de madera equivalente a la cantidad de hormigón, puede representar tan sólo el 50% del peso original.

Entonces, se debe considerar que el sistema de reforzamiento, a través de secciones de hormigón, presenta otra desventaja, lo que complica su utilización, además de ser técnicamente difícil de calcular; sin embargo, su análisis puede contribuir con aspectos positivos para la generación de un nuevo sistema de reforzamiento, lo cual nos lleva a continuar con su estudio.

-Ensayo a flexión

El ensayo, con probetas reforzadas mediante secciones de hormigón, resultó inválido debido al fallo del material por aplastamiento de los puntos de apoyo de la carga. A pesar de que el hormigón presentó una capacidad de 200 kg/cm², el resultado no cumplió con las expectativas planteadas, sin embargo, a través de conceptos y datos hipotéticos, se logró configurar una posible resistencia del material reforzado.

Los planteamientos hipotéticos surgieron, primeramente, de la obtención de una sección equivalente para la probeta y de las cargas determinadas en ensayos realizados para refuerzos de madera. Por lo tanto, hipotéticamente los resultados obtenidos se aproximarán a la capacidad que podría alcanzar un elemento de madera cuando es reforzado con secciones de hormigón.

Se debe aclarar que, el fracaso del ensayo se produjo porque las cargas aplicadas fueron puntuales, pero si consideramos que en una estructura la mayoría de cargas son uniformemente distribuidas, el hormigón evidentemente reaccionará diferente.

- Resultados

A pesar de que los resultados no sean obtenidos desde la prueba de laboratorio, mediante los conceptos ya explicados, se puede estimar el incremento que involucra utilizar secciones de hormigón para reforzar.

Al disponer de una sección equivalente en madera (figura 3.30) del presente sistema de reforzamiento a través de secciones de hormigón, nos permite conocer el incremento que puede alcanzar el esfuerzo máximo admisible dentro del rango elástico que es de 305 kg/cm², mejorando en un 15% las capacidades originales del material. Sin embargo, hay que tener en cuenta las desventajas que ocasiona utilizar hormigón como refuerzo y cuestionarse si su uso es el adecuado, ya que, como se pudo ver en la sección equivalente el sistema puede ser fácilmente reemplazado por piezas de madera fijadas en su parte superior.

Respecto a la rigidez, su capacidad debería presentar un incremento muy elevado, ya que la principal característica del hormigón está en su rigidez. Por lo tanto, el dato obtenido alcanzó los 5.405,00 kg/cm. resultado semejante al obtenido en el ensayo anterior, donde se utilizó perfiles metálicos para reforzar. Aunque los resultados expuestos hayan sido planteados hipotéticamente, resultan totalmente válidos, ya que los datos han sido obtenidos en ensayos similares y se aproximan en gran medida a los datos reales.

3.2.4. Análisis del reforzamiento mediante fibras de carbono

El presente proceso quizá sea el más reciente en utilizarse y con grandes bondades debido a su insignificante peso y dimensión. Sin embargo, como ya se pudo ver en las primeras aproximaciones al sistema, su aplicación resulta muy costosa y, además, debe ser ejecutada con personal muy calificado para evitar fallas del refuerzo.

Como consecuencia de las características enunciadas del sistema, resultó difícil la realización del ensayo respectivo, ya que la adquisición de fibras de carbono en pequeñas cantidades no fue posible, pero, gracias al grupo técnico a cargo de la restauración del edificio de la Escuela Central de Cuenca, se pudo tener acceso a ensayos realizados con probetas reforzadas mediante fibras de carbono.

Dichas pruebas reposan en los documentos que guarda información sobre la restauración del edificio del “Museo Remigio Crespo”, que estuvo bajo la responsabilidad del Ing. Enrique García, en el año 2002, y los ensayos fueron ejecutados en los laboratorios de la Universidad de Cuenca.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas con una probeta de eucalipto y, a pesar de tener los datos de carga y deformación, los informes carecen de los análisis respectivos para determinar las capacidades elásticas, como: los esfuerzos admisibles y la rigidez a flexión. En consonancia con los datos obtenidos, se procederá a complementar los resultados y a detallar el incremento de dichas capacidades de manera técnica, mediante factores numéricos.

- Ensayo a flexión

Como ya se aclaró, todos los datos expresados en este ensayo han sido extraídos de documentos realizados en años anteriores, por tal motivo, indicamos que los datos son de propiedad intelectual del autor, Ing. Enrique García y que las

Tabla de Resultados. “Probeta Nro. 3”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
4500	50
9557	100
15200	150
17625	200
20575	250
22875	300
23850	350
28750	400
30000	450
31000	500

* Carga máxima= 31.000,00 kgf.

Tabla c5. Probeta Nro.3. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Ing. Enrique García y Universidad de Cuenca

pruebas fueron ejecutadas el 22 de marzo de 2002 en los laboratorios de la Universidad de Cuenca.

Como primer aspecto del ensayo, se determinó que la sección de la probeta Nro.3 de entre las probetas experimentadas, fue de 13,57 x 18,7 cm. bajo condiciones normales de humedad y de deterioro prácticamente nulo. Por otro lado, la fibra de carbono aplicada, fue de 50 x 1,2 mm. y fijada al elemento con resinas epóxicas en el centro de la cara inferior. La ubicación de la fibra responde, nuevamente, al principio básico de mejorar los esfuerzos de las fibras de la madera que están a tracción. A continuación se detalla la tabla C5. con los respectivos datos de las cargas y deformaciones obtenidas directamente de la máquina del laboratorio.

Como una primera aproximación del ensayo, quizá resulte extraño ver que el primer dato de la tabla es demasiado alto respecto a las pruebas realizados anteriormente. Esto se debe a que la sección de la pieza presenta dimensiones que prácticamente duplican a las que se han venido utilizando; sin embargo,

el resultado final contempla un incremento muy aproximado a los ya obtenidos anteriormente.

Continuando con la determinación de las capacidades elásticas de la pieza reforzada, resulta indispensable recurrir, nuevamente, al método de secciones equivalentes, para obtener la sección compuesta de madera y fibra, por su igual en madera.

Según especificaciones técnicas del material, las fibras de carbono presentan un módulo de elasticidad de $1'650.000 \text{ kg/cm}^2$, el cual si consideramos con otros materiales, es el segundo más resistente después del acero,

Una vez conocidos los módulos de elasticidad de los dos materiales, y aplicando la respectiva fórmula para obtener el factor “n” para fibras de carbonos, tenemos que su valor es de **20,6**, lo cual indica que para 1 cm^2 de fibra de carbono, necesitamos, $20,6 \text{ cm}^2$ de madera y así determinar la sección equivalente del sistema.

En la figura 3.31. se puede observar la respectiva interpretación de la sección equivalente en madera, de la probeta compuesta con fibras de carbono, la cual servirá para determinar el aumento de las capacidades elásticas.

Expuesta la sección del elemento en madera, es posible aplicar las fórmulas para la obtención de los esfuerzos admisibles y la de su rigidez, ya que estos datos no formaban parte en los informes obtenidos de las pruebas de laboratorio. Un dato importante a considerar es que, en todas las pruebas realizadas, la falla del elemento se produjo por el desprendimiento de la fibra, lo que significa que las resinas epóxicas deberán mejorar su calidad y resistencia para el rango plástico; sin embargo, los resultados obtenidos, previo a la ruptura de la pieza, han logrado un evidente incremento de las propiedades mecánicas dentro del rango elástico.

- Gráfica y Resultados

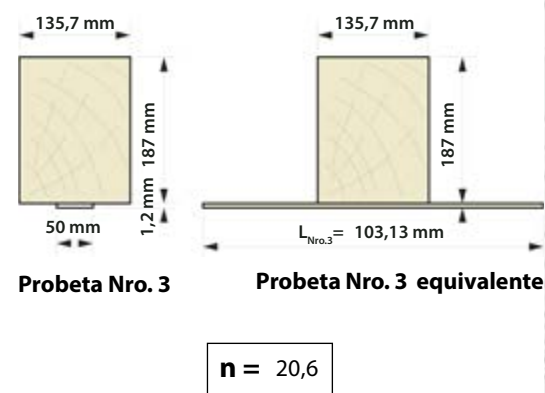


Figura 3.31. Determinación de la sección equivalente para la probeta Nro. 3, reforzada con fibras de carbono. Fuente: Daniel Enríquez M.

Al obtener los respectivos resultados acerca del incremento de las principales capacidades resistentes de la probeta, se observa claramente que los datos son favorables y justifican el uso del refuerzo. A pesar de que el incremento no logró superar los resultados obtenidos en los demás ensayos, su uso presenta una gran ventaja frente a éstos, ya que la fibra por sus condiciones y dimensiones prácticamente puede pasar desapercibida al momento de ser fijada al elemento.

En la tabla c6. se ha determinado los resultados alcanzados con el presente sistema de reforzamiento estructural, que para el caso de los esfuerzos máximos admisibles en el rango elástico, el incremento alcanzó un 6% y a pesar de que esta cantidad es la menor de entre todos los sistemas analizados, su refuerzo es totalmente válido, ya que la prueba fue realizada con una sola fibra, lo cual dependiendo del cálculo estructural que se realice, la cantidad de fibras podría variar. Para el caso del edificio de la Antigua Escuela Central de Cuenca, las vigas fueron reforzadas hasta con cuatro fibras, lo cual obviamente incrementó los esfuerzos traccionantes en un porcentaje mayor al 6% determinado en el presente análisis.

6. Sika Ecuatoriana S.A. “Sika CarboDur - Sikadur 30”. Manual Técnico. <http://www.sika.com.ec>

Por otro lado, la rigidez también optimizó sus resultados incrementando hasta en un 16% las condiciones originales del elemento sin reforzar. Este factor resulta muy importante ya que confirma la notable resistencia que tiene la fibra de carbono a pesar de sus características.

A pesar de no haber sido realizada la prueba de laboratorio, los datos obtenidos fueron un gran aporte para al análisis respectivo del comportamiento de la probeta reforzada con fibras de carbono. En nuestro medio, esta información no ha sido totalmente desarrollada y su uso todavía se ve restringido, pero, los resultados obtenidos dejan, en claro, que el sistema es totalmente válido y que su uso puede contribuir a mejorar las condiciones estructurales de un elemento de madera, quedando como único limitante los costos que representa su aplicación.

Tabla c6.
Resultados del refuerzo aplicado mediante fibras de carbono, fijados a la cara inferior de la muestra.

DESCRIPCIÓN	Probeta Nro. 3 de eucalipto
SECCIÓN b x h (cm)	13,57 x 18,70
DEFORM. MÁX. (mm)	12,8
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm ²)	275,17
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	12.201,26

Tabla c6. Resultados del refuerzo mediante fibras de carbono. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Esfuerzo-Deformación. “Probeta Nro. 3”

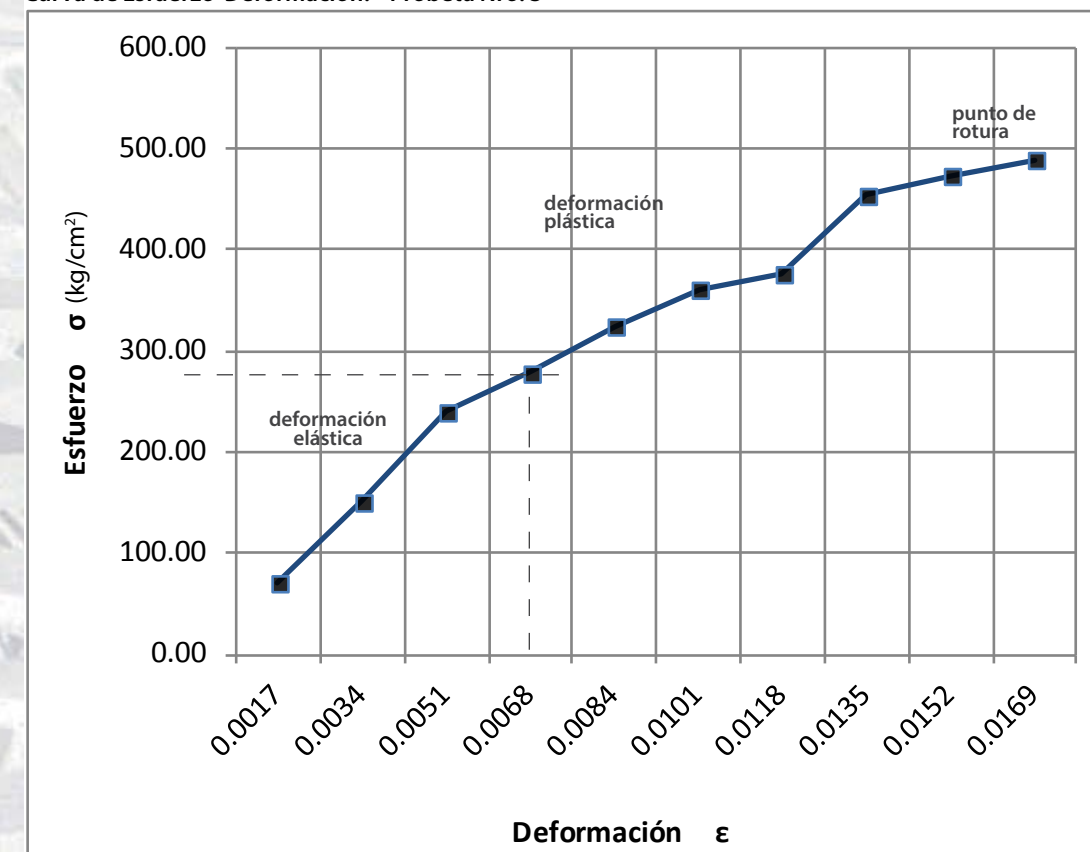


Figura 3.32. Probeta Nro.3. Curva de Esfuerzo-Deformación para elementos reforzados mediante fibras de carbono. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Respecto a la gráfica de esfuerzo-deformación, a partir de los datos obtenidos y, a la base de datos digital, generada para el sistema, se procedió a desarrollar la curva, que resultó un punto elemental para analizar el comportamiento del refuerzo. Expuesta la figura 3.32. se puede analizar las diferentes fases que mantuvo la probeta, ya que sus reacciones se distinguen claramente a lo largo de la gráfica.

La principal particularidad de la curva es que divide todo el proceso en tres partes muy marcadas, las cuales pertenecen, en primera instancia, a un rango elástico, representado con la recta que definen los cuatro primeros puntos, en los cual se encuentra el máximo esfuerzo admisible. Luego del cuarto punto la dirección de la recta cambia y da lugar al rango plástico, el cual a través de marcadas variaciones producidas por el comportamiento de la fibra y de la madera, llegan a la última fase donde se da el fallo de la probeta.

A pesar de que la información original cuenta con la misma gráfica aquí expresada, es recomendable en cualquier caso, volver a graficar la curva para poder definir las etapas antes mencionadas y así valorar los puntos respecto a sus resultados, puesto que en cada uno interviene una carga y deformación diferente; por lo tanto, el análisis de los esfuerzos deberá partir de esta consideración.

Luego de haber determinado el incremento del refuerzo, a través de los respectivos resultados, se podría pensar que el aporte de la fibras es muy limitado, ya que las capacidades resistentes aumentan en un porcentaje inferior al 10%. A pesar de que la consideración resulta verdadera y que para lograr un refuerzo eficaz, el incremento debería ser mayor o igual a un 15%, el uso de fibras de carbono presenta una ventaja única respecto a sus condiciones físicas. Pues como se mencionó anteriormente, el peso que refleja el refuerzo es despreciable, ya que por cada metro lineal de fibra que se utilice, la pieza aumenta 90gr. en su peso total. Esto quiere decir que en

porcentaje, el incremento de peso es de apenas el 1% del peso total, lo cual le otorga una ventaja inigualable frente a los otros materiales. Recordemos que un refuerzo a más de basar su eficacia en la resistencia que pueda alcanzar el elemento, también debe considerar los pesos que represente su uso, ya que mientras menor es el peso del refuerzo, los comportamientos de la estructura serán mejores.

3.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El principal objetivo de recuperar estructuras de madera es el mejoramiento que se pueda brindar a un elemento estructural en deterioro o simplemente incrementar las capacidades del mismo, para un cambio de funciones respecto a su resistencia.

Todos los sistemas estudiados han sido previamente seleccionados de entre varias posibilidades de reforzamiento, ya que han logrado solventar deficiencias estructurales en edificaciones antiguas y con un gran valor.

El reforzamiento de piezas de madera debe estar direccionado a mejorarlas en vez de sustituirlas, pues en muchos casos la sustitución ha sido el único camino a seguir en los procesos de rehabilitación estructural y, precisamente, para evitar estos procesos erróneos, se ha detallado de manera técnica los principales factores de aumento que posee cada sistema de reforzamiento estructural.

El análisis de cada sistema de reforzamiento estructural detalló ciertas ventajas y desventajas, especialmente en los procesos de aplicación, debido a sus diferentes opciones y tipologías de material. Sin embargo, bajo un mismo concepto de mejoramiento estructural, a partir

de la implementación de materiales, todos los métodos reflejaron un incremento en sus capacidades resistentes, por lo cual además de indicar los aportes que puede brindar cada proceso a un elemento de madera, los métodos analizados, servirán de base para generar un nuevo sistema de reforzamiento, el cual deberá solventar las principales deficiencias encontradas en los refuerzos estudiados y, a su vez, mejorar las capacidades resistentes en un porcentaje mayor a las ya obtenidas.

Parte del análisis realizado a cada sistema de reforzamiento estructural, fue el obtener los porcentajes de incremento de las capacidades elásticas de cada probeta, pero todo la metodología fue aplicada a piezas de madera nueva, es decir, a probetas en condiciones excepcionales y sin deterioros de carácter intrínsecos o externos, por lo cual, resulta también necesario, determinar factores de incremento para la madera antigua.

De conformidad con lo enunciado, se puede definir que el obtener datos para madera nueva, brinda la posibilidad de mejorar una estructura de madera antes de ser edificada sin alterar su morfología original; sin embargo, los incrementos para madera antigua deben ser considerados con la misma importancia, ya que todos los procesos de rehabilitación estructural contemplan el mejoramiento de piezas antiguas de madera con diferentes años de antigüedad.

Por lo tanto, se recurre nuevamente a la división de los elementos de madera según sus años de antigüedad, para definir los incrementos que pueda alcanzar las piezas de madera, después de aplicar los diferentes reforzamientos estudiados. Esto es posible gracias a los datos obtenidos en el capítulo II para maderas antiguas, puesto que los resultados reflejaron las condiciones originales de las piezas después de años de uso estructural.

Para mantener secuencia con los datos expuestos en el capítulo anterior, empezaremos por detallar

los resultados para madera antigua de 100 años, en donde se determinará el incremento del esfuerzo admisible para el rango elástico.

3.3.1. Reforzamientos existentes, aplicados a probetas de 100 años

El deterioro que puede llegar a alcanzar un elemento de madera después de 100 años de uso estructural, en porcentaje de reducción, puede disminuir hasta un 40% de sus capacidades originales, lo cual debilita enormemente a una estructura de madera.

La principal pérdida de resistencia se ve reflejada en los esfuerzos admisibles dentro del rango elástico, lo cual significa que el elemento también reduce la capacidad de soportar momentos y cargas de gran magnitud. Por lo tanto, para poder recuperar dichos porcentajes de pérdida, se han aplicado distintos tipos de reforzamiento estructural, los cuales a han sido analizados previamente y han sido experimentados con probetas nuevas de eucalipto.

Para el caso específico de maderas con 100 años de antigüedad, la tabla c7. expone los resultados alcanzados en cada sistema de reforzamiento y considera, porcentualmente, el incremento del esfuerzo máximo admisible con respecto a la propiedad inicial.

Como datos base, tenemos que una pieza de 100 años sin reforzar, alcanzó un esfuerzo máximo de 170 kg/cm², mientras que el dato referencial de una pieza nueva es de 263 kg/cm² (Tabla b15; pág. 130), lo cual demuestra que la madera de eucalipto ha perdido aproximadamente el 40% de su capacidad inicial. Por lo tanto, el objetivo de aplicar los refuerzos es para determinar cuánta capacidad se puede recuperar.

Tabla c7.
Resultados de los sistema de reforzamiento existentes, aplicados a probetas con 100 años de antigüedad. Esfuerzo máx. admisible y Rigidez a flexión.

PROBETA SIN REFORZAR		REFUERZO MEDIANTE PIEZAS DE MADERA		REFUERZO MEDIANTE PERFIL METÁLICO		REFUERZO MEDIANTE SECCIÓN DE HORMIGÓN		REFUERZO MEDIANTE FIBRA DE CARBONO	
$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)
170,00	873,35	208,00	4.752,90	197,00	3.367,50	196,00	3.447,23	180,00	7.080,70
Incremento % respecto al inicial		80%		75%		75%		70%	

Tabla c7. Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes para maderas de 100 años/ Fuente: Daniel Enríquez M.

Según datos relacionados con la recuperación y rehabilitación de elemento de madera, contempla que un refuerzo se considera válido si su resultado recupera hasta un 80% de la capacidad inicial del elemento. Sin embargo, esta consideración resulta muy general y poco flexible, ya que la resistencia de un elemento siempre dependerá del cálculo estructural y del análisis respectivo que se realice a una pieza de madera en rehabilitación.

Si nos remitimos a la tabla c7., se puede observar que al aplicar el primer refuerzo, a través de piezas de madera, el máximo esfuerzo alcanzó hasta un 80% de la capacidad original del elemento, lo cual valida el proceso y da a entender que su aplicación puede resultar la mejor de entre las opciones analizadas.

Por otro lado, el reforzar con perfiles metálicos o con secciones de hormigón fijados a la cara superior de una pieza, representan un incremento del 75% en el esfuerzo máximo, pero, obviamente, manteniendo las diferencias que representa utilizar cada sistema, las cuales han sido explicadas anteriormente. A pesar del bajo incremento que aparentan tener los dos refuerzos expresados, su aporte no deja de ser útil para la rehabilitación de piezas de madera con bajas exigencias estructurales o para complementar a nuevos sistemas planteados.

Finalmente, tenemos el refuerzo que alcanzó el menor resultado, pero contradictoriamente,

el mejor sistema de entre los ya estudiados. Aunque su resultado refleje sólo un alcance del 70% en su esfuerzo máximo, no significa que el sistema haya sido descartado, por el contrario se debe tener en cuenta que la prueba de laboratorio ha sido realizada con una sola fibra de carbono y que sus resultados mejorarán considerablemente, si la aplicación contempla el uso de dos o más fibras en una misma pieza.

La aplicación de los sistemas estudiados ha evidenciado que las capacidades elásticas de las probetas más antiguas de los tres grupos experimentados han incrementado y que su uso es totalmente válido y, a pesar de las ventajas y desventajas que presenta cada método, los resultados obtenidos aportarán consideraciones positivas para optimizar métodos de reforzamiento, que serán de gran importancia para la generación de mejores sistemas.

A continuación en la figura 3.33. se detalla, de manera estadística, el incremento que logró cada pieza de madera antigua de 100 años, con respecto a una probeta sin reforzar, después de ser aplicada los diferentes sistemas de reforzamiento estructural existentes. Como se puede apreciar, la primera barra corresponde a los resultados obtenidos para una probeta sin reforzar, la cual obviamente bajo las

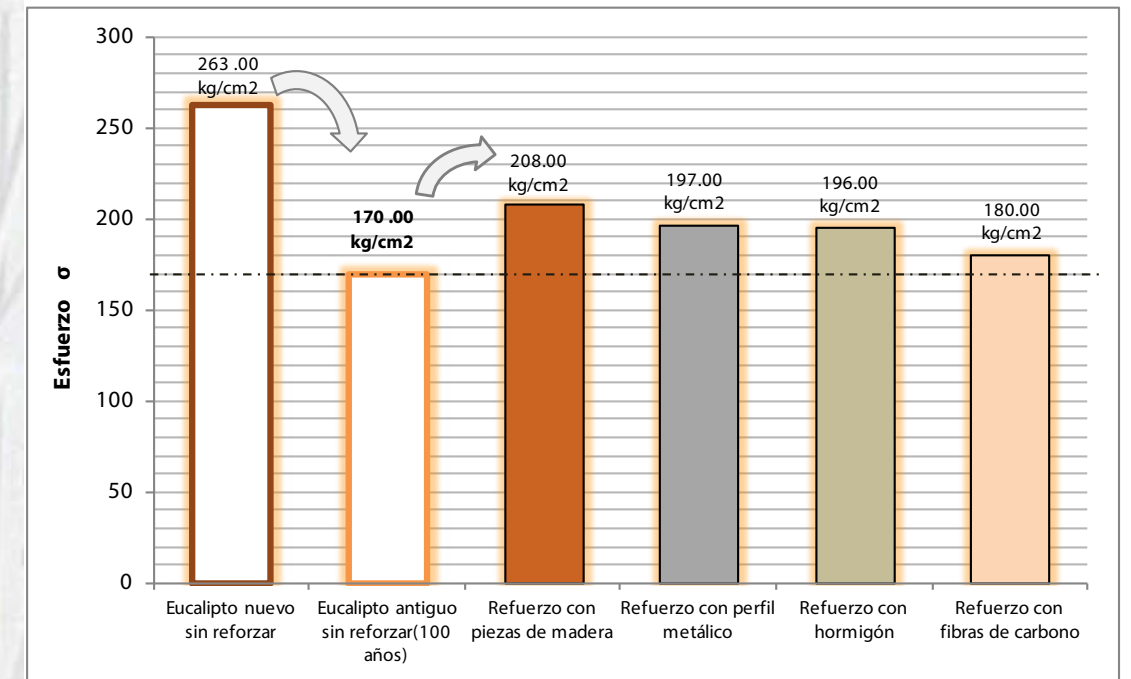


Figura 3.33. Esfuerzos máximos de muestras con 100 años de antigüedad, después de aplicar sistemas de reforzamiento estructural existentes. / Fuente: Daniel Enríquez M.

condiciones ya mencionadas ha disminuido su esfuerzo máximo en un 40%; sin embargo, al aplicar los diferentes tipos de reforzamiento, se puede ver que el incremento se manifiesta en porcentajes variados, siendo el mejor exponente, el refuerzo mediante piezas de madera, como consecuencia del aumento de su esfuerzo máximo, sin embargo, el sistema también presentó ciertas desventajas, principalmente las relacionadas al incremento de peso en la estructura.

3.3.2. Reforzamientos existentes, aplicados a probetas de 50 años

Al referirnos a piezas de madera que bordean los 50 años de antigüedad, hacemos referencia a elementos que han perdido hasta un 30% de sus capacidades resistentes, por lo cual la aplicación de refuerzos estructurales resulta indispensable para recuperar las propiedades perdidas a través de los años.

El trabajar con probetas no tan antiguas y que sus años de uso estructural no superen el medio

siglo, significa que las capacidades perdidas pueden llegar a ser más fáciles de alcanzar. Esto se debe a que los elementos presentan menor deterioro y la resistencia es regularmente buena; sin embargo, no se debe generalizar el concepto de que la madera pierde resistencia únicamente por los años de función. Recuerde que al ser un material que proviene de un organismo vivo, puede ser afectada por otros aspectos patológicos y en períodos cortos de tiempo.

Para definir el verdadero aporte que brinda cada sistema de reforzamiento, en la tabla c8. se puede observar los resultados alcanzados en cada método aplicado, teniendo como referencia el dato para madera sin reforzar.

Como lo detallan los resultados expuestos, el esfuerzo máximo de una probeta de 50 años sin reforzar es de 221 kg/cm², la cual ha disminuido en un 30% con respecto a las capacidades iniciales; por lo tanto, el objetivo

Tabla c8.
Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes, aplicados a probetas con 50 años de antigüedad. Esfuerzo máx. admisible y Rigidez a flexión.

PROBETA SIN REFORZAR		REFUERZO MEDIANTE PIEZAS DE MADERA		REFUERZO MEDIANTE PERFIL METÁLICO		REFUERZO MEDIANTE SECCIÓN DE HORMIGÓN		REFUERZO MEDIANTE FIBRA DE CARBONO	
$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)
221,00	1.272,70	270,00	5.597,90	256,20	3.966,20	254,50	4.060,10	234,00	8.339,60
Incremento % respecto al inicial		102%		97%		96%		90%	

Tabla c8. Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes para maderas de 50 años/ Fuente: Daniel Enríquez M.

de cada sistema aplicado será el de incrementar el esfuerzo y alcanzar el resultado inicial de la madera que es de 263 kg/cm², aproximadamente.

El primer sistema de reforzamiento a través de piezas de madera, determinó que su aplicación puede alcanzar más del 30% de las capacidades perdidas; es decir, su esfuerzo máximo supera los 263 kg/cm² obtenidos con madera nueva. En resumen, al aplicar dicho refuerzo se está devolviendo al elemento antiguo todas sus capacidades perdidas, a través de los años de uso estructural.

Sin duda alguna, el refuerzo mediante piezas de madera, a pesar de sus limitantes, brinda un gran aporte a la recuperación de las capacidades resistentes de la madera; sin embargo, los demás refuerzos aplicados también han logrado mejorar en un buen porcentaje los esfuerzos de cada probeta.

El siguiente sistema de refuerzo a través de perfiles metálicos y platinas, también brinda la posibilidad de incrementar los refuerzos casi en su totalidad, ya que su aumento alcanza el 97%; por lo tanto, su uso queda totalmente válido para ser aplicado en piezas de madera antigua.

Por su lado, el reforzamiento mediante secciones de hormigón ha contribuido de igual forma que el ensayo anterior, ya que su incremento alcanzó el 96% de su resistencia inicial y, a pesar de las desventajas que ya se han señalado para el

presente método, su aporte es positivo y puede ser considerado para intervenciones de rehabilitación.

Finalmente, se tiene el sistema de reforzamiento mediante fibras de carbono, el cual nuevamente determinó el menor incremento entre los demás sistemas estudiados. No obstante, se hace referencia nuevamente al ensayo que ha sido aplicado de la manera más sencilla y que el refuerzo contempla el uso de una fibra. Pero a pesar de esto, el incremento ha logrado alcanzar el 90% de la resistencia inicial, lo cual resulta muy favorable si se considera que el refuerzo puede mejorar a través de la colocación de más fibras.

Después de analizar cada resultado obtenido en los diferentes tipos de reforzamiento, se puede concluir que el uso de cualquier método refleja un gran incremento a las propiedades elásticas del material; por lo tanto, su aplicación dependerá de las condiciones que presente la estructura y las circunstancias de trabajabilidad que éstas demanden.

Para una mejor comprensión de los aumentos obtenidos, se representa en la figura 3.34. los esfuerzos alcanzados para cada sistema de reforzamiento, los cuales están referenciados con el esfuerzo original de una probeta

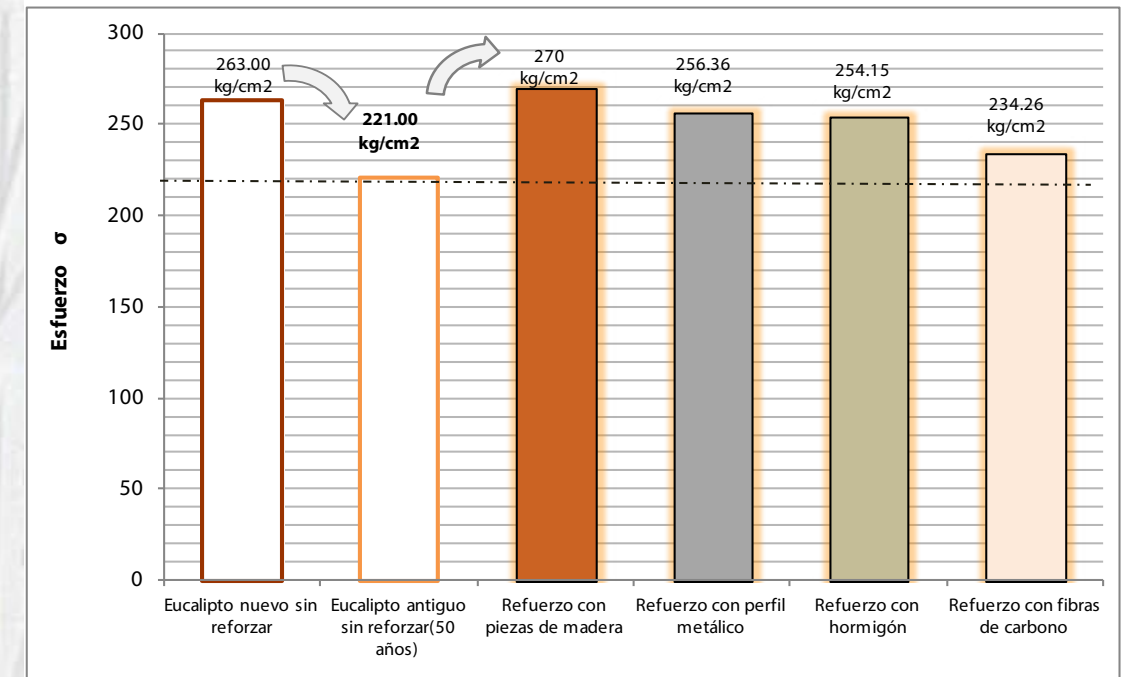


Figura 3.34. Esfuerzos máximos de muestras con 50 años de antigüedad, después de aplicar sistemas de reforzamiento estructural existentes. / Fuente: Daniel Enríquez M.

sin reforzar con 50 años de antigüedad. Las barras simbolizan de manera gráfica el porcentaje del incremento alcanzado para cada caso, confirmando, nuevamente, que el refuerzo a partir de piezas de madera ha logrado el mejor resultado, sin embargo, los demás datos también han presentado considerables aumentos que no distan mucho del primer refuerzo, por lo que las opciones seleccionadas responderán a casos específicos que se presenten en la rehabilitación de estructuras.

Si bien la resistencia del primer método a través de piezas de madera alcanzó, el más alto resultado, se debe tener en cuenta que la eficacia de un refuerzo no sólo establece el aumento de los esfuerzos, sino que consideran otros factores como los relacionados al peso, inercia y rigidez. Por lo tanto, considerar un sistema de reforzamiento estructural dependerá de muchos factores.

3.3.3. Resultados de Reforzamientos aplicados a madera nueva

A pesar de que los resultados han sido ya

establecidos y expuestos en el inciso anterior, (3.2.) es necesario cotejar los resultados para poder observar los porcentajes de incremento que se dan para cada sistema de reforzamiento.

Para mantener la secuencia de presentación de datos, se ha retomado datos de las tablas expuestas en los cálculos de cada reforzamiento, pero ahora han sido unificados para la verificación de sus respectivos porcentajes.

En la tabla c9. tenemos como referencia los datos referenciales para madera de eucalipto sin reforzar, los cuales representan el 100% de las capacidades de un elemento estructural. Ahora bien, para muchos casos de reforzamiento estructural, el mejorar las condiciones iniciales de resistencia de un elemento resulta indispensable, debido a los cambios de función que puede tener una estructura a rehabilitar y, ante todo, para evitar que los elementos de madera a pesar de ser nuevos, sean sustituidos.

Tabla c9.
Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes, aplicados a probetas nuevas de eucalipto.
Esfuerzo máx. admisible y Rigidez a flexión.

PROBETA SIN REFORZAR		REFUERZO MEDIANTE PIEZAS DE MADERA		REFUERZO MEDIANTE PERFIL METÁLICO		REFUERZO MEDIANTE SECCIÓN DE HORMIGÓN		REFUERZO MEDIANTE FIBRA DE CARBONO	
$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)
263,00	3.130,00	320,00	8.053,00	305,83	5.705,50	305,00	5.405,10	275,17	12.201,26
Incremento % respecto al inicial		22%		15%		15%		6%	

Tabla c9. Resultados de los sistemas de reforzamiento existentes, aplicados a maderas nuevas de eucalipto. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Entonces, si se inicia con el dato del esfuerzo máximo obtenido de una muestra sin reforzar, se observa que el primer sistema de reforzamiento a través de piezas de madera puede incrementar su resultado inicial en un 22%. Este resultado refleja, nuevamente, que el primer refuerzo tiene el mejor resultado de los sistemas estudiados y que su aplicación podría aportar grandes ventajas a una estructura, ya que el incremento ha sido favorable en los diferentes grupos de madera.

Por otro lado, el incremento obtenido por los dos siguientes procesos ha alcanzado datos muy similares y, a pesar de tener características diferentes, sus resultados han mejorado los esfuerzos máximos en un 15% respecto a las capacidades iniciales. A pesar de tener incrementos similares, el reforzamiento a través de perfiles metálicos presenta mejores capacidades que usar hormigón y su aplicación resulta más favorable debido a las características propias del material. Como se mencionó, la principal propiedad hace referencia al peso que representa usar el acero, ya que si compara con el primer sistema de reforzamiento que utiliza piezas de madera, con el sistema de perfiles metálicos, los pesos diferirán mucho, y a pesar de alcanzar resultados similares, la cantidad de acero siempre será menor a la cantidad de madera que se necesite para lograr resultados iguales entre sí. Recuerde que en equivalencias de secciones, el usar 1cm² de acero, equivaldrá

a usar 25 cm² de madera; por lo tanto, el uso de acero resultará más liviano que los sistemas con piezas de madera y con secciones de hormigón.

Respecto al último sistema de reforzamiento, nuevamente se recalca que a pesar de su bajo rendimiento, su aporte podría llegar a estar entre los mejores, debido a la gran capacidad para absorber esfuerzos de tracción y compresión, a pesar de sus diminutas dimensiones. Aunque el sistema represente un incremento de tan solo 6% de sus capacidades elásticas, su resistencia podría mejorar y alcanzar hasta un 15% dependiendo de la calidad de fibras utilizadas.

En la actualidad se puede disponer de algunos tipos de fibras que pueden alcanzar módulos de elasticidad variados, inclusive existen fibras que igualan sus características a las del acero, sin alterar sus dimensiones. El único limitante del sistema de fibras está todavía en el costo que representa su aplicación, esto se debe a que es un sistema nuevo para nuestro medio y su uso es todavía muy restringido. Sin embargo, se espera que a través de los años su uso incremente y que lo convertirá en un sistema más accesible económicamente.

Otro factor que también ha incrementado respecto a los iniciales es la rigidez a flexión, pues, a pesar de no aparentar una

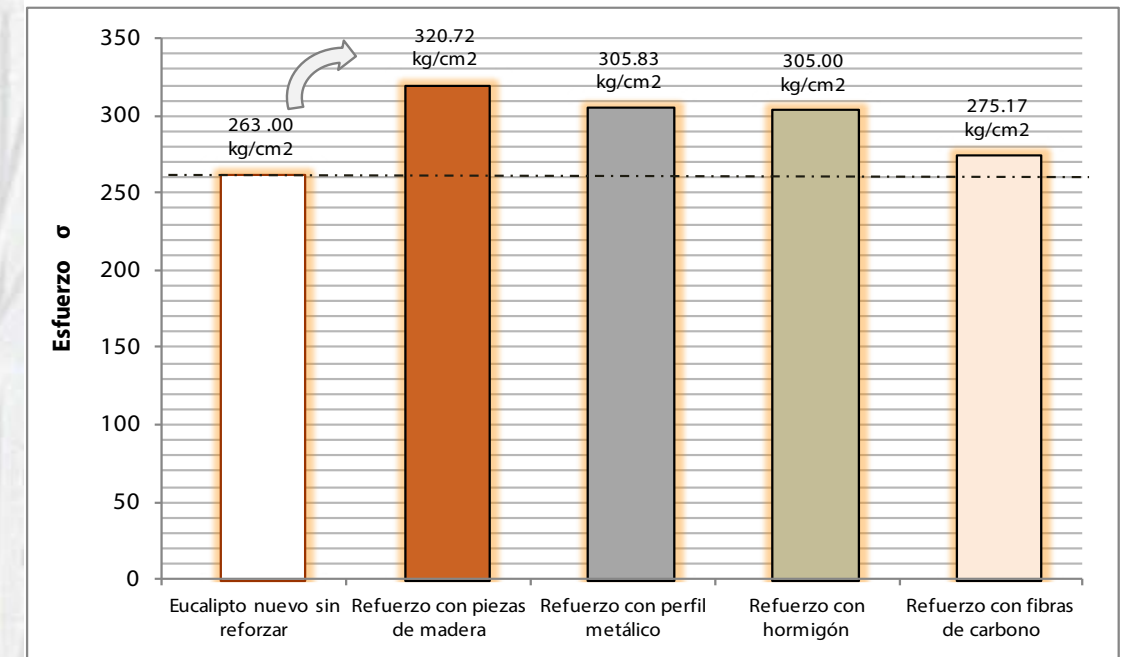


Figura 3.35. Esfuerzos máximos de muestras nuevas de eucalipto, después de aplicar los sistemas de reforzamiento estructural existentes. / Fuente: Daniel Enríquez M.

importancia en los sistemas de reforzamiento, su aporte en la mayoría de casos es indispensable, ya que la rigidez incrementa la resistencia a flexión del elemento; es decir, mejora la capacidad para soportar cargas y disminuye las deformaciones en el elemento de madera.

Después de exponer los respectivos resultados de cada sistema de reforzamiento y en base a los mismos, la figura 3.35. detalla el incremento que alcanzaron las probetas experimentadas, mediante la representación de barras estadísticas, en las cuales se exponen los esfuerzos obtenidos para una probeta sin reforzar, como referencia para la estimación del incremento.

Aunque los resultados obtenidos apuntan al sistema de reforzamiento mediante piezas de madera como el mejor método para incrementar las capacidades portantes de la madera, no puede ser considerado el más óptimo, ya que interfieren muchos factores, tales como; peso, e incremento de masa, los cuales impiden que sea considerado el mejor.

Desde un punto de vista constructivo puede

resultar limitada su aplicación; esto se debe a que la intervención se la debe realizar por la cara inferior y superior, siendo la primera la más complicada; esto no significa que su intervención resulte imposible, todo dependerá del proceso que se realice, ya que en ocasiones retirar los elementos resulta la mejor opción.

Independientemente del proceso que se utilice, el objetivo primordial de un refuerzo debe ser el de brindar la garantía de resistencia frente a esfuerzos de cualquier tipo; por lo tanto, el uso de piezas de madera es limitado debido al aumento de masa en sus secciones, de ahí que, el sistema que brinda las mejores capacidades de resistencia es el refuerzo a través de perfiles metálicos, ya que el incremento se da en un gran porcentaje y sobre todo el aumento de su masa no es de consideración.

A pesar de que el reforzamiento mediante fibras de carbono podría también resultar el

mejor, sus limitantes de resistencia mínima y costos elevados lo hace una opción muy cuestionada, por lo que el uso de acero para reforzar madera queda totalmente justificado.

3.3.4. Conclusiones

Después de analizar uno a uno los sistemas de reforzamiento estructural existentes fue posible definir ciertos aspectos positivos y negativos que contribuirán a la generación de nuevos sistemas para reforzar estructuras de madera, el cual deberá reunir la mayoría de aspectos positivos que presentó cada método y evitar en lo posible factores negativos.

Los principales aspectos que se deben evitar en los nuevos sistemas de reforzamiento son fundamentalmente dos: el aumento de peso y el cambio innecesario de elementos a través de sustituciones.

Para mantener una secuencia con la información presentada, a continuación se enumeran las principales consideraciones correspondientes a cada sistema de reforzamiento:

1. Para el caso del refuerzo, a través de piezas de madera, la principal característica fue la del aumento considerable del rango elástico de la pieza, pues como se vio en la gráfica 3.23. la recta así lo definió. El hecho de que la elasticidad del elemento aumente significa que su resistencia a flexión también lo hace, por lo que lo convierte en un elemento más resistente.

Con respecto al comportamiento, se define que al aumentar la sección de una pieza de madera por las dos caras, su capacidad resistente cambia, ya que al momento de llegar a un punto de ruptura, las piezas que primero fracasan son las de refuerzo, prolongando un período corto el fallo de la pieza en su totalidad. Esto significa que la resistencia que proporcionan las piezas de madera aumentan la rigidez a flexión del

elemento, más que un elemento metálico.

Otro factor positivo que se le puede atribuir al sistema, es que los refuerzos son del mismo material por lo que la pieza resulta totalmente homogénea y sus cálculos y aplicaciones se vuelven más fáciles.

A pesar de los inmejorables resultados que significa utilizar el presente sistema a través de piezas de madera; se recalca nuevamente que su aplicación se limita, debido al peso que representa su aplicación. Pese a ello, este factor podría ser controlado con la combinación de sistemas de refuerzo y mejorando las condiciones soportantes de los apoyos de la estructura.

Resumiendo, los resultados obtenidos después de reforzar las probetas con piezas de madera, se determinó que para elementos antiguos con 100 años de antigüedad, la resistencia puede incrementar hasta un 80% con respecto al estado inicial de la madera. Esto resulta muy favorable para la pieza, ya que recupera en gran medida, las capacidades que perdió a través de los años.

Por otro lado, el mismo refuerzo aplicado a piezas con 50 años de antigüedad, también significó un incremento notable en sus resistencias, llegando a mejorar las condiciones de la madera completamente, respecto de las iniciales; alcanzando el 102% con respecto a la resistencia original del eucalipto.

Para el caso de probetas nuevas, la aplicación del presente sistema representó un incremento del 22% sobre su resistencia original y a pesar de los factores indicados, el resultado llegó a ser el más óptimo respecto a la resistencia.

2. Al referirse a un refuerzo mediante perfiles metálicos, se hace referencia a un

sistema, eficaz, rápido y fácil de aplicar, ya que su intervención involucra una actuación por la cara superior, ya que reforzar las caras inferiores de los elementos en muchas ocasiones resulta complicado por las condiciones que puede tener una edificación.

La eficacia del refuerzo puede ser medida desde varios puntos, por ejemplo, si se refiere al peso que tienen las piezas metálicas en refuerzos, el porcentaje es mínimo, pues a pesar de que el acero es más denso y pesado que la madera, la cantidad necesaria para reforzar es menor. Para el caso específico del refuerzo, a través de un perfil C, el peso total del elemento aumenta tan solo un 35%, lo cual es admisible para cualquier elemento estructural.

Por otra parte, el usar perfiles metálicos puede aumentar considerablemente la inercia del elemento, mejorando la resistencia de las capacidades elásticas, especialmente la rigidez a flexión y el esfuerzo máximo.

Otra ventaja que brinda el usar perfiles metálicos, está relacionada a la ductilidad que adquiere la pieza reforzada, ya que un elemento bajo las condiciones explicadas puede llegar a deformarse más y sin llegar a fracasar. Esto se debe a que el acero absorbe los esfuerzos a flexión y permite que la pieza mejore su resistencia.

Bajo las condiciones indicadas, se puede especificar que el refuerzo alcanzó un 15% más de la resistencia inicial y a pesar de encontrarse actuando en la cara superior del elemento, sus resultados respondieron en gran medida.

Respecto a los demás resultados obtenidos en las probetas antiguas, el sistema también logró incrementos positivos. Tal es el caso de las maderas con 100 años, pues su incremento alcanzó el 75% de las capacidades iniciales. Mientras que para la madera de 50 años el incremento logró el 97%, recuperando la resistencia de la madera casi en su totalidad.

Al hablar de la aplicación del sistema, se puede considerar que no se requiere de procesos especializados, pues sólo necesita ser fijado al elemento a través de tirafondos y resinas epóxicas para mejorar la adherencia entre las dos superficies. Una desventaja relacionada con la unión de estos dos materiales, es que si dicha fijación no es adecuada, el refuerzo podría fracasar y los resultados no lograrían incrementos adecuados.

Otra desventaja que resulta del sistema, podría ser de carácter constructivo, debido a que el perfil ocupa la mayor parte de la cara superior de los elementos y es allí donde las demás piezas estructurales se apoyan; por lo tanto, se debería pensar en las posibles soluciones constructivas, antes de utilizar los perfiles y, aunque no resulte un problema mayor, su solución podría conllevar algunas complicaciones.

3. El refuerzo a través de secciones de hormigón, a pesar de lograr resultados similares a los obtenidos con perfiles metálicos, contempla procesos más largos y cálculos complejos para un adecuado refuerzo con resultados óptimos.

Los cálculos que demanda la aplicación de hormigón a elementos de madera resultan complejos y en ciertos casos inútiles, pues el sistema podría ser reemplazado con la utilización de piezas de madera, puesto que al aplicar los conceptos de sección equivalente se puede tener un sistema de reforzamiento a través de secciones de madera.

Sin embargo, el usar secciones de hormigón para reforzar elemento de madera, puede ser usado para mejorar condiciones que otros materiales no podrían cubrir. Por ejemplo, el sistema tiene la ventaja de reducir considerablemente las vibraciones de una estructura y, además, mejorar

la rigidez, es decir, limitar las deformaciones.

Entre los principales análisis que se deben aplicar al sistema para lograr resultados óptimos, está el cálculo del flujo cortante, el cual detallará los esfuerzos que se producen en la unión de los elementos y, a su vez, determinará la cantidad de tirafondos, entre madera y hormigón, necesarios para impedir la separación entre las dos superficies.

Quizá la mayor desventaja que presentó el sistema, tiene que ver con el peso que involucra usar una sección de hormigón a lo largo de todo el elemento de madera, pues el incremento es del 90%, lo cual prácticamente lo duplica y afecta el comportamiento de la estructura.

Al hacerse presente varias desventajas del sistema, su uso queda limitado, pues se ha demostrado que el aplicar secciones de hormigón a un elemento de madera, puede ser fácilmente reemplazado por una sección equivalente de madera, ya que para el presente caso se detalló que 1cm^2 de hormigón equivale a usar $2,66\text{cm}^2$ de madera;

4. El último sistema de reforzamiento quizá tenga la mayor ventaja frente a los demás métodos, pues su aplicación consiste en aplicar fibras de carbono de dimensiones mínimas pero características únicas respecto a su resistencia.

El uso de fibras de carbono es un sistema relativamente nuevo, pues existen pocos casos en nuestra ciudad que lo han utilizado; por este motivo, sus datos todavía son poco conocidos. Sin embargo, el análisis realizado detalló que su aplicación generó grandes ventajas y aportes para la recuperación de una estructura.

Respecto a la ubicación de la fibra en el elemento de madera, la colocación correcta de la fibra responde a la deficiencia que se genera en la zona de tracción de las piezas; es decir, su colocación siempre deberá ir en la cara inferior del elemento a reforzar, ya

que la resistencia a tracción de las fibras de carbono pueden alcanzar los 28.000 kg/cm^2 . Esta magnitud quizá sea la más resistente entre todos los materiales de refuerzo, inclusive es superior al acero, ya que este presenta una resistencia de 3.000 kg/cm^2 , aproximadamente.

La principal ventaja hace referencia al insignificante peso que genera su aplicación, pues el incremento no supera el 1% del peso total de cada elemento. Esto se debe a que la fibra posee dimensiones milimétricas respecto a su espesor, ya que cada pieza mide entre 1,2 y 1,4 mm.

Entonces, frente a una pieza imperceptible de dimensiones, queda por detallar la resistencia que alcanza cada elemento después de su aplicación. Para maderas nuevas, la resistencia logró incrementar el 6% de las capacidades originales mientras que para madera antigua de 100 años el mejoramiento fue del 70%, respecto a su estado inicial y para elementos con 50 años, el incremento fue del 90%.

Aunque los incrementos hayan sido mínimos, se debe considerar que los refuerzos podrían mejorar a través de un mayor número de fibras, ya que la cantidad no se limita, debido a su ancho. Por lo tanto, el incremento resultará positivo si se recurre a más de un elemento de carbono.

En cuanto a las desventajas que presenta el sistema, la aplicación de las fibras puede ser considerada como una de ellas. Esto se debe a que el montaje del sistema contempla el uso de resinas epóxicas y mano de obra calificada, ya que la fijación debe ser perfecta para evitar que la fibra se desprenda y el refuerzo fracase.

Quizá el principal limitante que tiene el sistema, esté en el costo que representa su uso, pues el precio por metro lineal de fibra instalada,

contempla un rubro que bordea los 75 dólares, lo cual resulta extremadamente costoso si se quiere aplicar en una edificación privada.

La falta de conocimiento del sistema, el poco interés en aplicarlo y la escasa disponibilidad de material, son los principales factores que impiden que el método se dé a conocer y, por ende, que sus precios sean más accesibles. Sin embargo, a través de los años el sistema podría llegar a ser muy utilizado, debido a los resultados positivos y a las excelentes características que proporciona a elementos de madera.

5. Expuestos las principales consideraciones de cada sistema de reforzamiento estructural, la generación de un nuevo sistema deberá solventar todos los aspectos negativos y potencializar los positivos, para así lograr un sistema óptimo y aplicable a la mayoría de elementos con deficiencias estructurales.

Si se piensa en las ventajas a potencializar, cada sistema presentó factores positivos en cuanto a los resultados obtenidos, pero sólo el reforzamiento a través de perfiles metálicos logró una eficacia y optimizó todos los aspectos, a pesar de no tener el mejor incremento en sus esfuerzos y en su rigidez, alcanzó resultados favorables para los tres grupos de madera.

Se puede definir que el uso de perfiles o platinas metálicas optimizan los procesos de reforzamiento, ya que las principales deficiencias que presenta un elemento a flexión, son los esfuerzos a compresión y tracción, a los que el acero responde de manera positiva, además de mejorar la resistencia a la deformación y aumenta la inercia sin necesidad de incrementar el peso.

Para el caso de elementos esbeltos, la torsión puede ser un esfuerzo que altere su comportamiento y aspecto; sin embargo, las platinas metálicas pueden ayudar a reducir este fenómeno absorbiendo las fuerzas cortantes que lo producen. Por otra parte,

se debe tener presente que los esfuerzos de torsión, no son tan comunes en elementos de madera; esto se debe a que tiene sección llena.

Como una segunda opción de sistemas de reforzamiento, es notable el incremento que se puede obtener a través de fibras de carbono sin aumentar el peso del elemento. Sin embargo, su aplicación todavía es limitada debido al precio que representa.

A pesar de todo, el sistema puede representar un gran complemento al uso de elementos metálicos, y así generar un reforzamiento mixto, el cual resultaría muy óptimo, tomando en cuenta las características que brinda cada material.

Continuando con la categorización de los refuerzos, podemos considerar al sistema de piezas de madera como el tercer sistema más eficaz, pues a pesar de tener los mejores resultados de los sistemas estudiados, su aplicación representa un notable incremento en el peso. Además su montaje también resulta limitado, debido a que las piezas de madera son de gran escuadría, resultando en ocasiones complicadas de fijar in situ por motivos de espacio.

Finalmente, ante la opción de utilizar secciones de hormigón, se determinó que su uso equivale a usar una sección mayor de madera y que los resultados pueden alcanzar un incremento positivo y similar, pese a esto, no queda descartado su uso para situaciones específicas donde, se logre solventar todas las condicionantes para su aplicación.

03 Referentes bibliográficos y linkografía

1. Junta del acuerdo de Cartagena(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino" . Lima-Perú:1982.
2. Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). "Construcción con Madera". Quito-Ecuador: 2011.
3. Pardo, José. "Estructuras mixtas de hormigón-madera aplicadas a la rehabilitación de forjados". Tesis doctoral. Universidad Politécnica Valencia. 1997.
4. Herrero, Miguel. " Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras de madera conífera". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
5. Vázquez, José. " Patología y recuperación de estructuras de madera". S.L. Abril-Mayo. 2011.
6. Gonzáles, Carlos. "Recuperación de estructuras de madera mediante refuerzos metálicos". Tesis doctoral. LYCEA. Arquitectura e Ingeniería. España, 2007.
7. Finnforest KERTO. "Refuerzo de estructuras de madera". S.L. S.F.
8. Pytel, A. y Singer F. "Resistencia de Materiales". Cuarta Edición. Mexico D.F. 1995.
9. Arriaga, Francisco y otros. "Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera". S.L. S.F.
10. Zamperini, Emanuele. "Corso de recupero e conservazione degli edifici". Le strutture in legno. A.A. Italia. 2010-2011.
11. Finnforest KERTO. "Un fuerte soporte para estructuras de madera". Mayo 2014. <http://www.fupicsa.com/productos/pdf/20090303100227.pdf>
12. A. Angeli. "Cálculo de estructuras de madeira". Sistemas de conexión. S.l. Octubre 2008. <http://www.cismadeira.com/construcion/downloads/11.unionesmet.pdf>
13. Popol Vuh. "estructuras de madera". Diciembre 2012. <http://es.scribd.com/doc/33958254/Estructuras-de-madera>
14. Sika Ecuatoriana S.A. "Sika CarboDur - Sikadur 30". Manual Técnico. <http://www.sika.com.ec>

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

4.1. DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

- 4.1.1. Introducción
- 4.1.2. El material ideal para un sistema de reforzamiento eficaz y económico
- 4.1.3. Consideraciones para generar un sistema de reforzamiento estructural
- 4.1.4. Determinación de nuevos sistemas de reforzamiento estructural

4.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DESARROLLADOS

- 4.2.1. Sistema con doble platina metálica tipo "T", fijadas a las caras superior e inferior, del elemento
- 4.2.2. Sistema con perfil metálico "C", fijado a la cara superior del elemento
- 4.2.3. Sistema mixto 1, refuerzo con pieza de madera, más un perfil metálico tipo "T"
- 4.2.4. Sistema mixto 2, refuerzo con pieza de madera, más fibras de carbono
- 4.2.5. Sistema mixto 3, refuerzo con perfil metálico tipo "T", más fibras de carbono

4.3. ENSAYOS MECÁNICOS DE LOS SISTEMAS DESARROLLADOS

- 4.3.1. Ensayo a flexión estática. Sistema con doble platina metálica tipo "T"
- 4.3.2. Ensayo a flexión estática. Sistema con perfil metálico "C" fijado a la cara superior del elemento
- 4.3.3. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 1, mediante pieza de madera y platina metálica tipo "T"

4.4. SIMULACIÓN DIGITAL DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO MIXTO

- 4.4.1. Software utilizado para la modelación digital
- 4.4.2. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 2, mediante pieza de madera y fibras de carbono
- 4.4.3. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 3, mediante platina metálica tipo "T" y fibras de carbono

4.5. RESULTADOS E INCREMENTOS DE TÉCNICAS DESARROLLADAS

- 4.5.1. Reforzamientos aplicados a muestras de 100 años
- 4.5.2. Reforzamientos aplicados a muestras de 50 años
- 4.5.3. Reforzamientos aplicados a muestras nuevas

4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS TÉCNICAS DESARROLLADAS

- 4.6.1. Conclusiones y recomendaciones respecto a la metodología
- 4.6.2. Conclusiones y recomendaciones respecto a la resistencia adquirida
- 4.6.3. Conclusiones y recomendaciones respecto a la aplicación de cada sistema
- 4.6.4. Conclusiones respecto al costo de fabricación e instalación por metro lineal de cada sistema
- 4.6.5. Líneas futuras de investigación

4.1. DESARROLLO DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

El proponer un nuevo sistema de reforzamiento estructural aplicado a piezas de madera con diferentes tipos de resistencia, según los años de antigüedad, involucra varios factores acerca del comportamiento que puede alcanzar una pieza rehabilitada y el contexto en el que se la aplique. Pero, a pesar de las consideraciones empleadas para valorar un método de refuerzo, cada proceso tendrá como objetivo principal: recuperar las capacidades resistentes, perdidas a través de los años, en el caso de madera antigua o mejorar las condiciones de una pieza nueva.

Para el caso de madera antigua, se hace referencia a los procesos de recuperación estructural de edificaciones antiguas que, en la mayoría de los casos, son inmuebles con un alto valor histórico. Por lo tanto, resulta indispensable generar sistemas que ayuden a mejorar las condiciones estructurales de una pieza de madera antigua, pero sin alterar la morfología original del elemento, ya que los elementos antiguos, dependiendo de los años en uso, varían su resistencia en porcentajes ya determinados.

Mientras que para piezas nuevas de madera, los refuerzos aplicados incrementarán su resistencia original, mejorando el comportamiento de una estructura en varios aspectos, pues cada elemento equivaldrá a usar una pieza de características superiores a una normal. Por lo tanto, el reforzamiento estructural para elementos de madera no debe ser visto como un método para recuperar únicamente edificaciones antiguas, sino que debe ser entendido como un proceso, en el cual se mejora las características resistentes de una estructura, a partir de sus componentes principales.

Previo a la aplicación de refuerzos es muy importante que se defina los principales componentes a reforzar dentro de una estructura; esto se debe a que no todas presentarán la

misma pérdida de resistencia ni el mismo nivel de deterioro. Por lo tanto, si se recurre a los análisis realizados para madera antigua y nueva, se puede definir que los componentes más vulnerables de una estructura, son todos los elementos que trabajan horizontalmente y con luces libres entre apoyos, ya que estos presentaron mayores factores de deterioro a través de los años de uso; sin embargo, esto no significa que los refuerzos para elementos verticales carezcan de importancia o no sea necesaria su aplicación, todo dependerá de la resistencia requerida para dichas piezas (columnas).

Otro factor a ser considerado para no reforzar a los elementos verticales, es que la pérdida de sus capacidades portantes a través de los años es mínima, como se pudo ver en el capítulo II. Una columna de madera bajo condiciones adecuadas de preservación, en 100 años, pierde aproximadamente el 10% de su resistencia original.

En resumen, la aplicación de sistemas de reforzamientos ha sido direccionada a elementos horizontales debido a su capacidad, para perder resistencia a través de los años y para generar piezas de madera más resistentes y con grandes capacidades elásticas.

4.1.1. Introducción

En los cuatro grupos de reforzamiento estructural, estudiados en el capítulo anterior, se determinó las principales ventajas y desventajas de cada sistema existente, con el objetivo de generar nuevos métodos para reforzar elementos de madera aprovechando los factores positivos que presentó cada sistema y evitando repetir falencias que pudieran producir desventajas o efectos negativos a una estructura.

La principal desventaja que se presentó en la

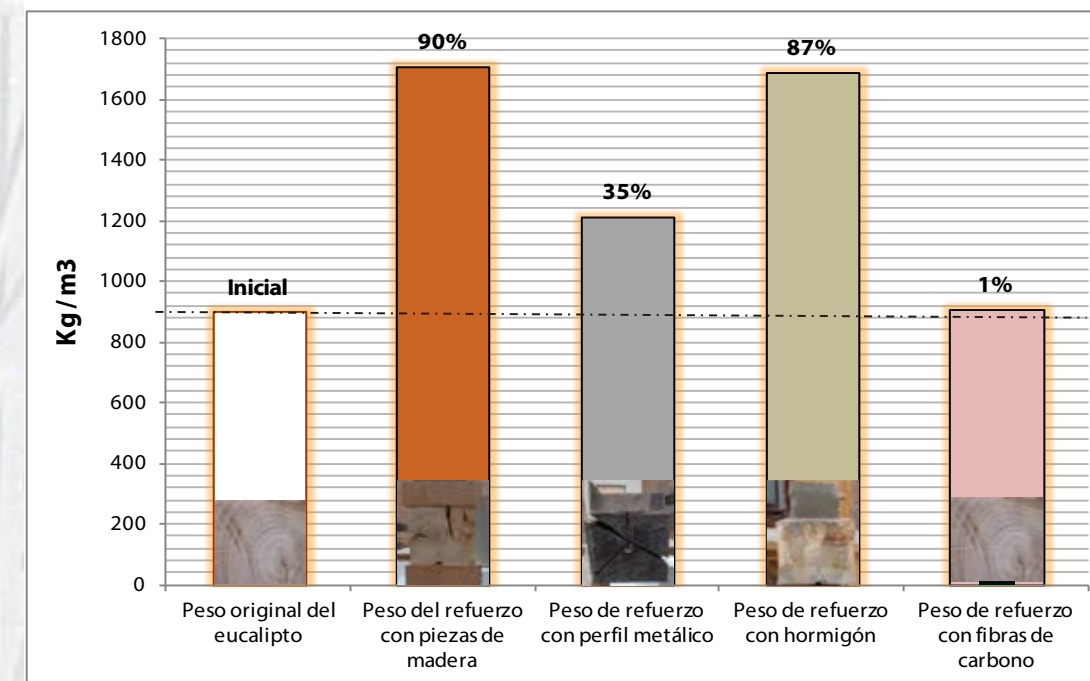


Figura 4.1. Incremento de peso de los sistemas de reforzamiento existente. / Fuente: Daniel Enríquez M.

aplicación de los sistemas de reforzamiento tuvo que ver con el incremento de peso y masa de los elementos de madera. Como se puede ver en la figura 4.1. cada sistema presenta diferentes incrementos de peso para los elementos de madera, esto se debe a que el material del refuerzo puede variar en densidad y cantidad.

“Como referencia se determinó que el peso del eucalipto con un contenido de humedad (C.H.) del 15% oscila entre los 800 y 1000 kg/m³”. Este dato hace referencia a un elemento aserrado y sin reforzar, que evidentemente al actuar con otros materiales auxiliares, su peso incrementará y dependiendo del tipo de refuerzo empleado, existirán diferentes aumentos.

Para el caso de los refuerzos mediante piezas de madera, el incremento del peso fue evidente ya que las piezas aumentaron en un 90% respecto al inicial; sin embargo, frente a esta desventaja, el sistema presenta un gran aporte estructural el cual radicó principalmente en la resistencia, ya que aumenta la sección del elemento y reduce la esbeltez del mismo, además que la adherencia entre elementos de

la misma materialidad resulta más fácil, pues las dos superficies se adhieren a través de resinas y tirafondos, logrando una fijación muy eficaz.

El problema de los incrementos de peso se relaciona directamente con una mala fijación entre el refuerzo y la pieza de madera, ya que la eficacia del refuerzo dependerá del trabajo que logren solidariamente los dos materiales. Cuando no existe una adherencia adecuada, el refuerzo puede significar más peso muerto para la pieza de madera, reduciendo la capacidad de sobre carga y resistencia de la estructura, ya que una unión deficiente disminuye la rigidez del elemento por no absorber adecuadamente los esfuerzos cortantes. Por lo tanto, un refuerzo debe garantizar una correcta fijación entre los elementos, de no hacerlo, los procesos se invalidan y puede aumentar el riesgo de fallo en las piezas reforzadas.

En el caso de refuerzos con secciones de hormigón, nuevamente se hace presente los incrementos

1. JUNAC (PADT-REFORT). “Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú:1982.

de peso, pero en este caso el problema resulta más crítico, ya que el peso del material es muy elevado y el incremento puede significar un 87% más del peso original, lo cual resulta elevado si consideramos que la cantidad de hormigón es mínima en comparación con el sistema anterior.

Otra dificultad que debe ser considerada, está referida a los cálculos previos que requiere su aplicación para lograr un elemento que trabaje de manera conjunta entre madera y hormigón. El hormigón por ser un material extremadamente rígido necesita de componentes auxiliares para reaccionar igual que una pieza de madera, por este motivo se pudo ver en el capítulo III, que la determinación del flujo cortante es indispensable para garantizar la adherencia entre los materiales. Entonces, aplicar secciones de hormigón como refuerzos para madera puede resultar un proceso complejo; sin embargo, puede aportar favorablemente a la mejora de otros factores estructurales.

Continuando con el análisis del incremento del peso, los sistemas anteriores, con madera u hormigón, a pesar de tener incrementos considerables, han sido aplicados en la recuperación estructural de edificaciones a través de los años, logrando solventar satisfactoriamente deficiencias estructurales, por lo tanto su uso no queda descartado ya que se puede aprovechar de las ventajas que involucra su uso.

Los siguientes sistemas de reforzamiento estructural corresponden a métodos más ligeros e igual de eficaces que los antes mencionados. El primero de ellos se refiere al método que utiliza perfiles metálicos para reforzar aplicados a las caras superiores. Este sistema, como ya se mencionó, presentó un porcentaje superior de ventajas frente a las desventajas, ya que se necesita menor cantidad de material para reforzar y por ende el peso que involucra su uso no excede el 35% del peso inicial, además de un considerable incremento de inercia.

Otra ventaja que logró el sistema a través de la implementación de perfiles metálicos para reforzar, está en el aumento considerable de la resistencia y de las capacidades elásticas del material. También cabe recalcar que la disponibilidad del material, la economía y rapidez de montaje, hacen del sistema un refuerzo óptimo para la recuperación estructural de elementos de madera.

El último sistema que se consideró para la generación de nuevos sistemas de reforzamiento corresponde al método que utiliza fibras de carbono en la cara inferior de las piezas de madera. Este sistema quizá sea el mejor exponente de los refuerzos ligeros, ya que la influencia de su peso es despreciable, incrementando en un 1% al peso original de un elemento a reforzar. La eficacia de este sistema radica en la increíble capacidad de resistir esfuerzos a tracción, a pesar de tener dimensiones muy pequeñas. A pesar de ser un método óptimo para reforzar, el principal limitante es el costo que involucra su uso; pues como ya se determinó, el precio de su aplicación es elevado y poco accesible para viviendas particulares. Por lo tanto, este factor conlleva a que los procesos de reforzamiento estructural vayan cada vez reduciéndose y optando por sistemas más sencillos y económicos, como es el caso de la sustitución de elementos, lo cual va en contra de la conservación de bienes patrimoniales.

A pesar de que la mayoría de criterios referidos a ventajas y desventajas de los sistemas de reforzamiento ya fueron analizados en el capítulo anterior, fue necesario recopilar los principales factores que caracterizan a cada método, pues el objetivo es obtener un refuerzo que optimice todos los recursos aplicados y que mejore las condiciones de un elemento estructural de madera.

4.1.2. El material ideal para un sistema de reforzamiento eficaz y económico

Como se pudo ver en el inciso anterior, cada sistema presenta factores que los distinguen entre sí según sus funciones; sin embargo, resulta necesario determinar un sistema del cual se pueda potencializar al máximo sus aspectos positivos, es decir, exponer el mejor método de reforzamiento estructural de los casos ya estudiados.

En el capítulo III se determinó los refuerzos aplicables a piezas de madera, en cuatro grupos según sus tipologías y materialidad, de los cuales el sistema mediante perfiles metálicos reunió los mejores aspectos para reforzar un elemento en deterioro o nuevo.

En primer lugar, se debe aclarar que los demás sistemas de reforzamiento son totalmente válidos, y que su uso dependerá de la situación en la que una estructura se encuentre. El objetivo del presente documento pretende lograr un método para reforzar elementos de madera, incrementando sus capacidades resistentes, pero bajo las condicionantes, que lo convierten en un sistema óptimo, rápido y económico, que a continuación se detallan:

- Debe producir el mínimo impacto visual estético a los elementos de una estructura reforzada, es decir, su presencia debe pasar desapercibida y no interferir con el diseño original.

- Deberá recuperar las capacidades elásticas de una pieza de madera, la cual ha perdido resistencia por el deterioro a través de los años, debiendo alcanzar como mínimo el 80% de sus capacidades originales. Para el caso de madera nueva el incremento también deberá ser positivo y sus resultados responderán a un cálculo estructural previo, en el cual se analice, principalmente cargas.

- Deberá incrementar la rigidez a flexión, para garantizar que la resistencia del material y sus comportamientos elásticos sean mejores.

- Respecto a los procesos de preparación y montaje de los refuerzos, estos deberán ser rápidos y fáciles de instalar, pues en muchos casos el acceso a los elementos de madera es muy limitada.

- El sistema, a más de reunir todos los requerimientos antes expuestos, resulta de gran importancia que el costo que involucra su aplicación sea accesible a la mayoría de grupos sociales; esto ayudará a promover el uso de los refuerzos estructurales y así evitar que las sustituciones sigan atentando contra las edificaciones de valor histórico.

Expuestos los principales factores y los análisis realizados en el capítulo III, nuevamente se considera el uso de perfiles metálicos como la mejor opción para reforzar piezas de madera, ya que logra cumplir considerablemente, todos los requerimientos para ser un sistema eficaz. (Figura 4.2.)

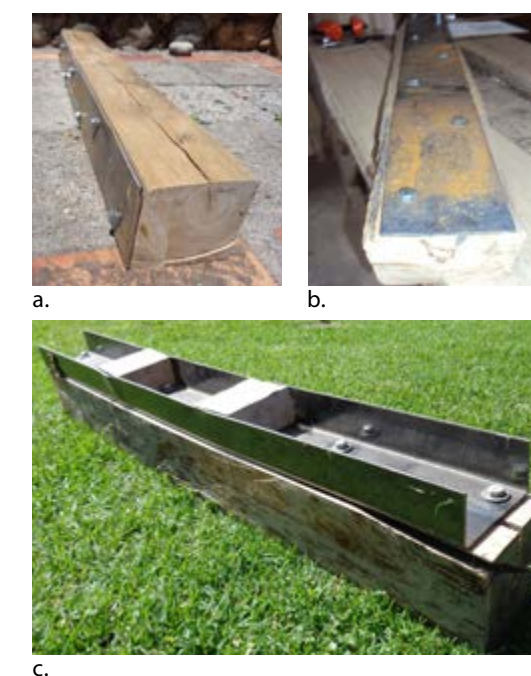


Figura 4.2. Sistemas de reforzamiento a través de elementos metálicos. a.: Refuerzo con platina metálica ubicada en la cara inferior de la pieza. b.: Colocación de tirafondos al tres bolillo en dos filas. c.: Refuerzo con perfil metálico ubicado en la cara superior de la pieza. / Fuente: Daniel Enriquez M.

Otro aspecto positivo en relación al uso de perfiles metálicos, es el peso, puesto que el incremento es bajo debido a que la cantidad necesaria de material para reforzar es mínima y, consecuentemente, el impacto visual será menor, es decir, su incorporación no altera la estética del elemento ni de la estructura.

Se pudo determinar también que la instalación es rápida, ya que para unirlos a la madera es únicamente, necesario tirafondos de alta resistencia; y se cuenta con las herramientas adecuadas, la fijación de perfiles o platinas metálicas resulta un proceso regularmente rápido; sin embargo, dependiendo de las complicaciones que normalmente surgen en los procesos constructivos, la instalación podría variar respecto a su tiempo. Es importante poner, nuevamente, en consideración el uso de resinas epóxicas para mejora las adherencias de la madera con el metal; sin embargo, la falta de estos componentes no han limitado la buena actuación de los refuerzos metálicos.

Respecto de la discreción del refuerzo, el colocar elementos metálicos disminuye el impacto visual

de la pieza de madera y, además, no altera la estética general de la estructura, pues dependiendo de la ubicación pueden pasar desapercibidos.

El incremento de la resistencia también representa un factor de gran importancia para catalogar al sistema entre los mejores, ya que los elementos reforzados pueden alcanzar hasta un 25% más de sus capacidades originales para el caso de madera nueva; mientras que para madera antigua, el aumento podría recuperar en un gran porcentaje la resistencia original de las piezas. En la figura 4.3, se detalla cómo la resistencia de cada elemento de madera, dividido por sus años de antigüedad, logró recuperar y aumentar sus esfuerzos máximos respecto a los datos inicialmente, es decir, capacidades del material antes de ser reforzado. Esto confirma el gran aporte de las piezas metálicas para mejorar las condiciones de resistencia de la madera.

Consecuentemente, se determinó que factores como: la rigidez a flexión y demás capacidades elásticas incrementaron de manera proporcional a los datos expuestos, por lo tanto, cada proceso que involucre el uso de perfiles

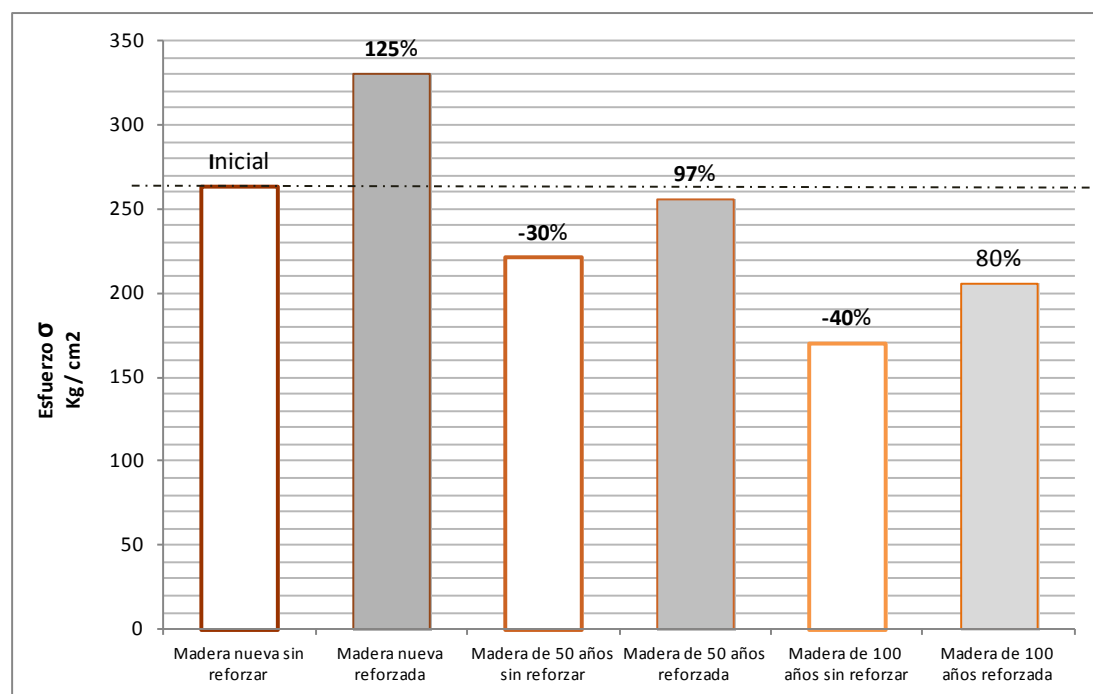


Figura 4.3. Resistencias alcanzadas con elementos metálicos como refuerzos, para los tres grupos de madera según sus años de antigüedad. / Fuente: Daniel Enríquez M.

metálicos aportará a un adecuado proceso de rehabilitación estructural en piezas de madera.

Con respecto al último aporte que puede brindar el uso de piezas metálicas para reforzar, se pudo determinar que, a través de adecuados procesos de aplicación y optimizando la cantidad de acero, se logró obtener un sistema más económico respecto a los demás métodos analizados. Dependiendo del perfil o de la platina que se utilice, sus costos fueron determinados entre 20 y 30 dólares por cada metro lineal de refuerzo instalado; rubro que contempla el costo del acero, la mano de obra, fijadores y además resinas epóxicas; sin embargo, el valor expuesto no es fijo, ya que puede ser sujeto a variaciones, por motivos adicionales presentes en cada proceso de rehabilitación.

Analizadas las particularidades del sistema de reforzamiento a partir de elementos metálicos, queda comprobada la eficacia que brinda y los excelentes resultados que puede significar su aplicación. Por lo tanto, la generación de nuevos métodos de reforzamiento tendrá como principal elemento el acero, que a través de mejoras y complementos deberá devolver e incrementar la resistencia de los elementos de madera en porcentajes mayores a los ya establecidos en los análisis anteriores, independientemente de la edad que presente cada pieza.

4.1.3. Consideraciones para generar un sistema de reforzamiento estructural

Como se observó anteriormente, el aumento de peso de un elemento, resulta el principal factor a considerar dentro de un sistema de reforzamiento estructural, sin embargo, es importante establecer ciertos parámetros para la proposición de nuevos métodos de reforzamiento.

Los elementos de madera en procesos de deterioro, por lo general, presentan disminución de volumen, lo cual en la mayoría de casos, disminuye la inercia de la sección y esto, a su vez repercute en el

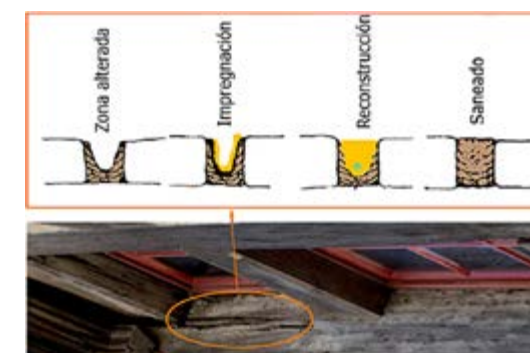


Figura 4.4. Recuperación de secciones ausentes por deterioro de la madera. / Fuente: Daniel Enríquez M.

comportamiento elástico del material. Por ejemplo, cuando una pieza presenta menor inercia, pierde ductilidad y rigidez y, a la vez, pierde capacidad resistente, por lo tanto, un refuerzo debe procurar incrementar la inercia seccional de una elemento, pero evitando aumentos grandes de peso.

La presencia de: rajaduras, gemas, xilófagos y demás agentes patológicos como la contracción del material, afectan directamente a la sección de un elemento, por lo tanto, resulta necesario y recomendable, sanar los faltantes de material, como complemento previo a un proceso de recuperación estructural. El proceso resulta rápido y sencillo, puesto que se debe colocar pequeñas piezas de madera en lugares donde la falta del material es más notoria, esto con la intención de devolver las condiciones iniciales a una sección afectada, con lo cual se está mejorando a la pieza en un porcentaje mínimo antes de ser reforzada.

La figura 4.4. detalla el proceso de saneado de una pieza deteriorada, que a través de un cuidadoso procedimiento logrará restablecer la apariencia y la sección del elemento. En primer lugar, se debe identificar las zonas más comprometidas y con mayor ausencia de material, luego, mediante una depuración de la zona afectada eliminar todo el material suelto y demás impurezas y, finalmente, a través de resinas epóxicas, colocar

pequeñas piezas de madera que encajen en las aberturas. Para mejorar la adherencia, se permite el uso de clavos dependiendo de la situación.

La siguiente consideración hace referencia al adecuado mantenimiento que debe tener el material, ya que al provenir de un organismo vivo, es más susceptible a la acción de diversos agentes que pueden causar alteraciones progresivas a su eficiencia y durabilidad; por lo tanto, la conservación de un elemento de madera no dependerán únicamente de un reforzamiento eficaz.

Aunque la madera puede ser atacada por agentes degradantes, esta desventaja puede ser controlada mediante sistemas de preservación relativamente simples, los cuales deberán ser suplementos de un reforzamiento estructural.

El eucalipto a pesar de ser considerado una madera durable, está propenso a pérdidas de sección notorias, puesto que es vulnerable al ataque de xilófagos y hongos, pues además, de ser un material con muchas rajaduras y grietas. Se hace necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Para mantener buenos resultados de un reforzamiento estructural, es importante considerar ambientes adecuados para las piezas de madera, es decir, mantener los espacios relativamente secos, libres de cualquier humedad. Hay que recordar, que a mayor humedad, incrementa la presencia de agentes bióticos. Sin embargo, no se debe confundir la humedad del ambiente, con el contenido de humedad del material. A pesar de que los dos factores pueden causar el mismo efecto, sus manifestaciones no son iguales. Como ya se enunció, la humedad del ambiente hace referencia al contexto en el cual puede actuar el material, causando problemas externos del material. Mientras que, el contenido de humedad hace referencia al porcentaje de agua en el interior del material, el cual interfiere directamente en el comportamiento soportante.

A pesar de que estos datos han sido ya expuestos anteriormente, resulta oportuno recalcar que los contenidos de humedad, tanto externos como internos, alteran la resistencia de la madera, por lo que resulta importante su consideración para garantizar la durabilidad de un sistema de reforzamiento, ya que si no se presta atención a estos factores, ni el mejor método de recuperación, logrará perdurar una estructura en el tiempo.

4.1.4. Determinación de nuevos sistemas de reforzamiento estructural

Después de obtener los principales factores y condicionantes, para la proposición de nuevos sistemas de reforzamiento estructural, se ha definido al acero como el principal material para reforzar elementos de madera, pero sin descartar, la posibilidad de combinar materiales para reforzar, puesto que, tanto la madera, como las fibras de carbono, pueden alcanzar grandes resultados, ya que sus únicos limitantes fueron el peso y el costo, respectivamente. Sin embargo, optimizando estos limitantes se pueden generar sistemas de gran resistencia y de características considerables.

Es importante indicar que, el sistema de reforzamiento mediante secciones de hormigón ha sido descartado para la generación de nuevos métodos; esto se debe a los limitantes que demanda el uso de dicho material y a los riesgos que representa su uso en edificaciones antiguas, puesto que el objetivo de un refuerzo es mantener una estructura a través del tiempo, mas no condicionarla con algún efecto de riesgo.

4.1.4.1. Sistemas con acero

Durante el desarrollo de la presente investigación, se analizó métodos de reforzamiento estructural

a través de piezas metálicas con diferentes formas y ubicaciones. Entre los primeros ensayos, se pudo distinguir la utilización de una platina fijada con tirafondos a la cara inferior de la probeta.

A pesar de haber obtenido resultados aceptables, se pudo determinar ciertas deficiencias. En primer lugar, se observó una baja capacidad para aumentar el rango elástico de la probeta, ya que las platinas se deformaron a la brevedad; esto provocó que la muestra entre rápidamente en un rango plástico, deformándola de manera permanente. En segundo lugar, se determinó pequeños defectos en la fijación de los elementos, a tal punto que un ensayo fue invalidado por el desprendimiento de la platina; sin embargo, esta deficiencia fue fácilmente controlada, mediante el uso de resinas epóxicas. (Figura 4.5.) Los resultados obtenidos para contemplar la eficacia del acero como refuerzo, fueron posibles gracias a la aplicación del método de secciones equivalentes, en el cual se pudo definir que la capacidad resistente de la madera incrementó un 25% más, respecto al dato inicial.

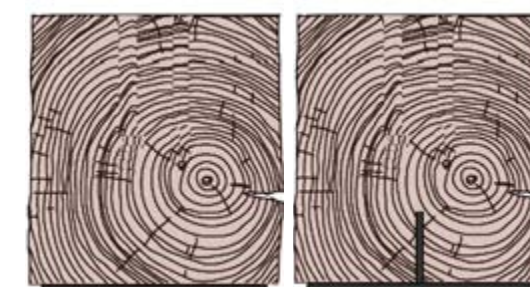
Por otro lado, frente al inconveniente suscitado con la platina simple, surge la necesidad de mejorar las condiciones del refuerzo, por lo que después de una analizar la forma y el comportamiento de la misma, se ha planteado soluciones que mejorarán el sistema.

Para mejorar las reacciones de la platina y también la rigidez, se ha aumentado una platina extra al elemento metálico, pero dispuesto de manera perpendicular, obteniéndose una pieza en forma de "T". Dicho elemento mejorará los esfuerzos a flexión en la platina, puesto que aumentará la inercia y la rigidez de la misma. La nueva forma de la platina, hará que el refuerzo se introduzca en el elemento de madera, mejorando la adherencia y además ayudando a distribuir en mayor medida los esfuerzos cortantes. (Figura 4.6.b.)

Aunque las incrustaciones en elementos de madera, especialmente en los más antiguos,



Figura 4.5. Fijación deficiente entre madera y platina metálica. / Fuente: Daniel Enríquez M.



a. Platina metálica, simple. b. Platina metálica "T".

Figura 4.6. Mejoramiento de platina metálica simple, mediante otra platina perpendicular. / Fuente: Daniel Enríquez M.

pueda ser visto como una agresión a la pieza, quedó demostrado que dicha acción no perjudica el comportamiento de las piezas antiguas, sin embargo, es importante indicar, que cada proceso deberá tener ciertos condicionantes y que, nuevamente, se recalca que cada intervención responderá a un caso específico en una estructura de madera.

Después de haber expuesto un mejoramiento para la platina, ésta ayudará a incrementar las capacidades elásticas del material dando lugar a una primera aproximación de un sistema de reforzamiento eficaz.

Continuando con los elementos metálicos como refuerzo, ahora se procede a analizar el

perfil "C", fijado a la cara superior de la pieza de madera y que también fue experimentado en laboratorio. Al igual que la platina simple fijada, el perfil metálico alcanzó buenos resultados, incrementado en gran medida las capacidades del material, pero generando ciertas deficiencias que, a la vez, son totalmente controlables.

El principal problema se presentó en la forma del perfil, puesto que sus alas al estar dispuestas para arriba, presentaron un problema de carácter constructivo, ya que pueden interferir con el de apoyo de otros subelementos estructurales, además se pudo determinar en los ensayos de laboratorio, que al ser elementos muy delgados y al estar perpendicular a las cargas, pueden fallar con facilidad por pandeo o flexión lateral, lo cual disipa mucha energía, y se puede traducir en un desperdicio de área del acero en las alas. Además este efecto puede producir asentamientos diferenciales en una estructura cuando las cargas son puntuales. (Figura 4.7.)

Cabe indicar que, al perfil C se le aumentó una platina inferior, manteniendo el mismo criterio aplicado a la platina simple, esto con la intención de mejorar los esfuerzos a cortante y flexión.

Para solventar los problemas causados por las alas del perfil, se propone optimizar el perfil, transformándolo en una platina "T", tal como se muestra en la figura 4.8. A pesar de que la platina pueda perder rigidez en un porcentaje mínimo, por la eliminación de sus elementos superiores, logrará incrementar de igual manera las capacidades elásticas del material; esto se debe a que aportará resistencia a los esfuerzos de compresión, los cuales serán menores a los de tracción, puesto que en flexión, la falla generalmente se da en las fibras de la cara inferior del elemento de madera. Otra ventaja de utilizar una platina T, fijada en la cara superior del elemento, es que ésta dispone de toda la superficie para que subelementos estructurales puedan apoyarse normalmente y, a la vez, ocultar el refuerzo.

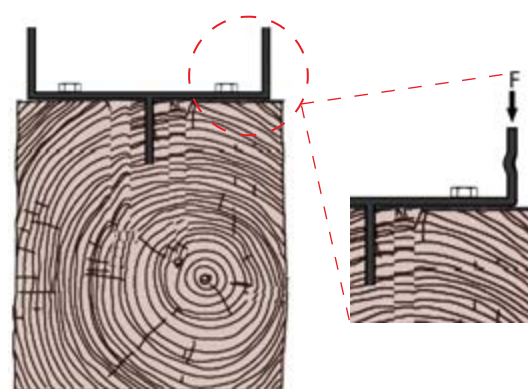


Figura 4.7. Defectos de pandeo lateral, en alas del perfil "C". / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 4.8. Optimización de perfil "C", en una platina "T", mejorando el área de asentamiento. / Fuente: Daniel Enríquez M.

De conformidad con los criterios expuestos, la figura 4.8. detalla un adecuado uso del elemento metálico por la cara superior; entonces, queda expuesto el segundo aporte para la generación del nuevo sistema de reforzamiento.

Al unir los criterios de reforzamiento con la platina "T" inferior y la superior, se tiene como resultado un reforzamiento eficaz, económico y fácil de instalar, el cual representa el primer método generado para reforzar elementos de madera, cumpliendo con los principales condicionantes que demanda la restauración. (Figura 4.9.)

Cabe recalcar que más, adelante, se expondrán

los respectivos análisis y datos técnicos para cada sistema de reforzamiento generado, los cuales detallarán: dimensiones de los refuerzos, incrementos de resistencia y comportamientos de cada pieza, después de ser reforzados.

Respecto a la optimización del perfil C, es importante indicar dos posibles variantes de uso generadas para aportar incrementos de resistencia, a partir de adecuadas aplicaciones de los perfiles C, todo dependerá de la situación que se presente en los procesos de rehabilitación.

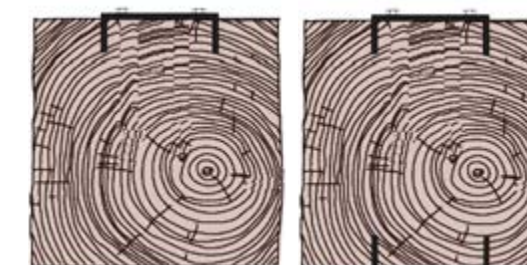
Al analizar los inconvenientes que generaron las alas del perfil C dispuestas hacia arriba, surge la posibilidad de utilizar el mismo perfil pero en forma inversa, es decir, con las alas hacia abajo, lo cual implica una mejor reacción a esfuerzos cortantes y a flexión, además de optimizar la superficie superior del elemento.

Entonces como primera variante, se propone utilizar un perfil C, con una dimensión menor al ancho de la probeta, de tal manera que las alas metálicas se incrustarán en la madera. Este proceso puede presentar dos consideraciones fundamentales al momento de ser aplicados; la primera, si las condiciones del elemento lo permiten, será posible realizar dos canales para que las alas se incrusten sin inconvenientes. El segundo aspecto corresponde a la parte estética de los elementos, ya que si la situación exige discreción en los refuerzos, el perfil deberá pasar desapercibido, para ello es recomendable utilizar un perfil C pequeño. Por lo tanto, si se presentan los dos factores mencionados, la figura 4.10. representa un adecuado uso del perfil, con la posibilidad de optimizar el sistema, a través de dos perfiles ubicados en la cara superior e inferior.

La segunda variante a utilizar perfiles "C" mantiene el mismo criterio, utilizar las alas del perfil hacia abajo. La diferencia con la opción anterior es fundamentalmente la dimensión del refuerzo, ya que para este caso se propone un perfil C con dimensiones



Figura 4.9. Refuerzo con doble platina T, ubicadas en las caras inferior y superior. / Fuente: Daniel Enríquez M.



a. Perfil "C" pequeño. b. Doble perfil "C" pequeño.

Figura 4.10. Variante 1 del refuerzo a través de perfiles C invertidos e incrustados. / Fuente: Daniel Enríquez M.

superiores a las del elemento de madera. Sin duda alguna, esta variante presentará mejores resultados debido al tamaño del refuerzo; sin embargo, puede ser considerado como un método poco discreto, ya que al forrar el elemento de madera, se puede llegar a perder la estética original de las piezas.

A pesar de aquello, este sistema resulta muy adecuado para reforzar las estructuras de viviendas no inventariadas o en elementos que queden ocultos. La gran ventaja que brinda un perfil C de mayor dimensión que el elemento de madera, está en la rapidez de su colocación y en que no es necesario modificar las secciones con canales para realizar incrustaciones, lo cual define un método más económico.

La figura 4.11. representa el uso propuesto para perfiles C, con dimensiones mayores al ancho de las piezas de madera. También, sugiere la aplicación de dos perfiles ubicados en las caras superior e inferior de la muestra, lo cual podría resultar una pérdida total de la estética del material, pero, consecuentemente, puede llegar a proporcionar un gran incremento de resistencia; esto obedece a un notable incremento de los principales factores elásticos.

Se debe considerar que los refuerzos propuestos, siempre deberán responder a cálculos técnicos, realizados previo a una intervención, ya que a través de cálculos se podrá elegir el sistema apropiado para reforzar un elemento de madera. Como parte del análisis técnico, es importante determinar las condiciones de las piezas a reforzar, puesto que el factor determinado influirá también en la elección de un sistema.

4.1.4.2. Sistemas mixtos

El análisis realizado a los sistemas de reforzamiento estructural existente confirmó al acero como un material óptimo y adecuado para ser aplicado como refuerzo; sin embargo, no se descartó que el uso de otros materiales podrían contribuir a aumentos de resistencia considerables.

La principal dificultad, que se encontró en los sistemas estudiados, fue el peso que representó cada refuerzo a los elementos de madera, pero a pesar de esta desventaja, también se pudo distinguir incrementos con favorables resultados. En el caso específico de los refuerzos a través de piezas de madera, se observó que el incremento fue el mejor de todos; sin embargo, representó un peso negativo para el elemento de madera.

Por otro lado, el refuerzo, a través de fibras de carbono, tuvo como principal aporte el insignificante incremento de peso y un proceso prácticamente identificable, debido a las dimensiones del material. Como desventaja, se pudo observar que el aumento de resistencia

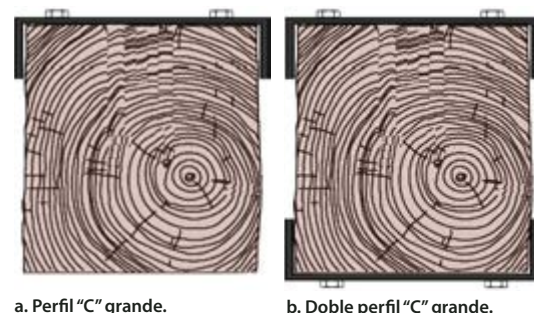


Figura 4.11. Variante 2 del refuerzo a través de perfiles C invertidos.
Fuente: Daniel Enríquez M.

no fue el esperado. Esto se debe a que los cálculos fueron realizados con una sola fibra, lo cual deja abierta la posibilidad de optimizar el sistema, aprovechando mayor cantidad de fibras. Otra desventaja presentada por el sistema radicó en el precio que involucra su aplicación, quizá este factor fue el más incidente para que los refuerzos, a base de fibras de carbono, se vea limitado y su uso no sea tan frecuente en los procesos de restauración.

El proponer sistemas de reforzamiento mixtos tiene como objetivo principal potencializar las ventajas de cada método estudiado. Los casos más representativos de refuerzos mixtos fueron obtenidos a través de analizar ventajas y desventajas, principalmente relacionadas con el incremento de peso y de resistencia. Los sistemas a ser expuestos son tres y contemplan el uso de: la madera, acero y fibras de carbono, como refuerzos.

El primer refuerzo mixto corresponde a un sistema que combina la resistencia del acero y de la madera. Hay que recordar, que reforzar con piezas de madera ayuda a incrementar la rigidez de la pieza y la resistencia de manera positiva. Esto se debe al aumento de sección y por ende a un notable incremento de inercia en la sección del elemento. Sin embargo, se pudo observar que también aumentó el peso total

del elemento, lo cual resulta riesgoso para una estructura de madera. A pesar del problema suscitado, se ha aprovechado de elementos metálicos para contrarrestar el peso incidente.

La propuesta de reforzamiento mixto sugiere el uso de una pieza de madera en la parte superior del elemento, puesto que los esfuerzos a compresión pueden ser fácilmente solventados por dicha pieza y los procesos de instalación resultan más rápidos. Por otra parte, la incorporación de una platina "T" se fijará por la cara inferior del elemento, esto con la intención de mejorar los esfuerzos a tracción y a flexión. En resumen, el resultado final responde, en primer lugar, a una situación de resistencia, propia de los materiales empleados y, en segundo lugar, al reducido espacio que generalmente existe para ejecutar los refuerzos. La figura 4.12. detalla claramente la disposición de los refuerzos en la sección de una pieza de madera, la misma que será analizada de manera técnica, para validar su aplicación y determinar los porcentajes de incremento.

El segundo reforzamiento mixto refleja la resistencia que puede aportar la unión de la madera y las fibras de carbono como materiales de refuerzo. Este sistema consiste en aplicar una pieza de madera de las mismas características que el caso anterior por la cara superior del elemento, puesto que es la posición más adecuada para que la madera trabaje adecuadamente y sea fácil de instalar. Mientras que las fibras de carbono deberán ser colocadas en la cara inferior y como recomendación, se deberá ubicar al menos dos fibras, para así, garantizar un incremento de resistencia positivo. (Figura 4.13.) La ubicación de las fibras en la cara inferior del elemento responde a la capacidad única que tiene el material para resistir esfuerzos a tracción, frente a los de compresión, por tal motivo, ha quedado descartada la posibilidad de colocar fibras por la cara superior de los elementos de madera.

El cambio de la platina T por las fibras de



Figura 4.12. 1° Reforzamiento estructural mixto. Sistema mediante una pieza de madera (cara superior), más una platina metálica "T" (cara inferior).
/ Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 4.13. 2° Reforzamiento estructural mixto. Sistema mediante una pieza de madera (cara superior), más tres fibras de carbono (cara inferior).
Fuente: Daniel Enríquez M.

carbono, representa una gran ventaja respecto al despreciable incremento de peso en el elemento de madera, pero a la vez representa una desventaja, debido al elevado precio que representa cada metro lineal de refuerzo, puesto que utilizar fibras puede resultar hasta cuatro veces más costoso que utilizar platinas o perfiles metálicos.

El tercer sistema de reforzamiento estructural mixto corresponde a la unión del acero con las fibras de carbono. Manteniendo el criterio de la aplicación de las fibras de carbono, por la cara inferior del elemento; mientras que la platina "T" fue colocada por la cara superior.

Nuevamente, se debe recalcar que la ubicación de cada refuerzo responde a la característica propia del material, por ejemplo: como las fibras tienen una gran capacidad para soportar esfuerzos a tracción, la ubicación más adecuada será en la parte inferior del elemento; mientras que la platina metálica por responder adecuadamente a esfuerzos de compresión, puede ir por la cara superior sin ningún problema.

Quizá la principal ventaja de este sistema mixto radica en el peso que representan los dos materiales (acero y fibras), puesto que al trabajar conjuntamente, dan como resultado un método muy ligero y a la vez rápido de aplicar. Respecto a los resultados, por las limitantes ya explicadas referentes a las fibras de carbono, surge la necesidad de utilizar simulación digital para demostrar la eficacia del reforzamiento y para determinar de manera técnica el incremento de las capacidades elásticas del elemento reforzado.

En la figura 4.14. se puede apreciar los principales componentes del tercer sistema de reforzamiento mixto, el cual a más de ser el método más liviano de entre los generados, podrá alcanzar resultados óptimos, debido a la capacidad portante de cada material. Un consideración importante, al momento de usar fibras de carbono, es la calidad que pueda presentar la resina epóxica al momento de unir la madera con el refuerzo, puesto que el éxito del mismo radica en el poder de adherencia entre los dos elementos, por lo tanto, si la resina epóxica es de mala calidad, el refuerzo con seguridad fallará y no logrará los resultados esperados y por ende será considerado negativo o no apto para procesos de recuperación estructural.

Como se pudo observar, la combinación de materiales para reforzar elementos de madera resultó muy variada, respecto a forma, peso y resistencia; todo dependerá de las condiciones que presente la estructura y de las exigencias que esta demande. En consecuencia, los tres sistemas mixtos



Figura 4.14. 3º Reforzamiento estructural mixto. Sistema mediante una platina metálica "T" (cara superior), más tres fibras de carbono (cara inferior). / Fuente: Daniel Enríquez M.

generados para procesos de reforzamiento representan las opciones más favorables, debido a las condiciones de cada material. El primer refuerzo contempla el uso de madera (cara superior) y acero (cara inferior) muy útil para reducir vibraciones y para incrementar la rigidez a flexión en el elemento.

El segundo sistema, por su lado, sugiere el uso de madera (cara superior) y fibras de carbono (cara inferior). Este sistema solventará los esfuerzos a tracción en gran medida y además presentará un incremento notable de la inercia.

Finalmente, como el tercer sistema mixto considera el uso de una platina "T" (cara superior) y fibras de carbono (cara inferior). A pesar de ser un sistema muy liviano, la disminución de vibraciones no serán iguales a los sistemas anteriores; sin embargo, la capacidad para soportar los esfuerzos a compresión y tracción, respectivamente, serán lo suficientemente favorables para lograr incrementos positivos para un elemento de madera.

4.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DESARROLLADOS

La determinación de nuevos sistemas de reforzamiento estructural ha sido el resultado de varios análisis y experimentos realizados con muestras físicas de madera, lo cual contribuyó a la obtención de técnicas que tienen como material principal al acero, a manera de platinas y perfiles en formas "T" y "C", respectivamente.

En el inciso anterior, se pudo determinar algunas posibilidades de refuerzos estructurales, los cuales se distinguieron por la capacidad de incrementar la resistencia del material; pero, a pesar de haber definido los mejores sistemas de reforzamiento estructural, la presentación de cada uno, fue de manera breve y descriptiva; por tal motivo se deberá detallar los principales componentes de cada refuerzo planteado y, a la vez, definir las dimensiones adecuadas y sugeridas para los refuerzos y además indicar sus ventajas y desventajas. Otro factor importante que debe ser tomado en cuenta es el precio que implica la fabricación e instalación de cada sistema, el cual será contabilizado por metro lineal.

A continuación, se encuentran detallados las cinco técnicas de reforzamiento estructural propuestas para ser aplicadas a elementos de madera de diferentes años de antigüedad.

4.2.1. Sistema con doble platina metálica tipo "T", fijadas a las caras superior e inferior del elemento

A través de ensayos y análisis de procesos existentes, se ha logrado optimizar el uso del acero como refuerzo y se ha definido al presente método como el más importante entre los sistemas propuestos, ya que sus condiciones favorecerán de manera considerable al mejoramiento de la resistencia en componentes estructurales de madera.

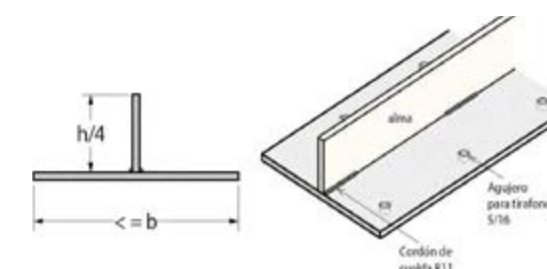


Figura 4.15. Descripción y dimensiones de la platina metálica tipo "T". / Fuente: Daniel Enríquez M.

- Componentes

El sistema contempla el uso de dos platinas metálicas en forma de "T", las mismas que han sido fijadas a ambas caras del elemento de madera (superior e inferior). Cada platina posee un espesor de 4mm y ha sido unida entre sí (alma y alas), por medio de puntos de soldadura. (Figura 4.15.) Sin embargo, con la intención de optimizar recursos, se podría comprar una perfil tipo "T" a pesar de no ser comercial en nuestro medio. Aunque las dimensiones de la platina deberán ser determinadas a través de cálculos estructurales, se sugiere mantener el ancho del refuerzo, menor o igual a "b" (ancho de la sección). Esto se debe a dos factores: el primero es que al tener un espesor muy pequeño, la superficie tendrá que estar totalmente apoyada sobre la cara del elemento, para así garantizar una reacción conjunta entre los dos materiales. El segundo, está referido a la estética de la estructura, puesto que la platina tendrá que mimetizarse entre los demás subelementos estructurales. Si bien es cierto, el criterio emitido puede resultar contradictorio, respecto a la ubicación de la platina inferior, puesto que ésta no posee elemento alguno que la pueda ocultar, sin embargo, hay que considerar que las platinas tienen anchos menores a las piezas de madera, por lo tanto, no deberán quitar protagonismo al material principal.

A pesar de lo enunciado, el sistema responde a una mayoritaria tendencia, respecto a los procesos constructivos tradicionales de estructuras de madera, especialmente en forjados de entrepiso, los cuales presentan cielos rasos por su parte inferior, ocultando las vigas de madera.

Continuando con la determinación de dimensiones para las platinas metálicas tipo "T", queda por definir la altura del alma que se incrustará en la pieza de madera, para lo cual se sugiere un alto de $h/4$, es decir, la cuarta parte de la altura total de la sección de madera. Esta dimensión ha sido propuesta para evitar pérdidas exageradas de material, ya que los canales se los realizará longitudinalmente y por ambas caras del elemento a reforzar, pudiendo debilitarlo, si las ranuras son demasiado grandes.

La altura propuesta para el alma de la platina "T" mejorará considerablemente la rigidez del refuerzo y, por ende, este incremento será transmitido al elemento de madera; además las incrustaciones ayudarán a mejorar la adherencia entre acero y madera, ya que como complemento al refuerzo, se puede utilizar resinas epóxicas en las ranuras generadas para la instalación de las platinas "T".

Respecto a la fijación de las platinas, se lo deberá realizar mediante tirafondos de 2 ó 3 pulgadas y su disposición deberá ser, dependiendo de la sección de la madera, dos filas al tres bolillo o si la dimensión es mayor, se recomienda tres filas de tirafondos y de igual manera al tres bolillo.

- Peso del refuerzo

Después de aplicar e instalar todos los componentes que conforman el presente refuerzo, se ha determinado que el incremento del peso por platina no superó el 25% del total del elemento de madera; es decir, si se considera que el sistema contempla 2 platinas de iguales condiciones, el peso resultante no superará

el 50% de la cantidad inicial, por lo cual, el refuerzo se considera relativamente liviano.

Cabe indicar que, la relación de peso, está referenciado con los datos expuestos para la madera de eucalipto, la cual determina que el peso por metro cúbico es de 900 a 1000 kg; por lo tanto, si se considera tal cantidad, el peso del material después de ser aplicado el refuerzo sería de 1350 kg/m³. Sin embargo, al trabajar con maderas de diferentes años de edad, es obvio pensar que los pesos estarán por debajo de los establecidos, sin embargo, el incremento se dará de la misma manera, ya que el acero, tiene la característica de no alterar sus capacidades con el pasar de los años.

- Características

Al utilizar las platinas metálicas en forma "T", se está mejorando considerablemente las capacidades mecánicas de los elementos de madera. Esto se debe a que el acero ha sido ubicado en las zonas donde se necesita mayor resistencia para absorber los esfuerzos a compresión y a tracción.

La platina superior deberá cumplir con el deber de mejorar los esfuerzos a compresión y de mitigar las vibraciones que se producen por el efecto de cargas vivas. Por otra parte, la platina inferior tendrá como deber mejorar los esfuerzos a tracción, los cuales, generalmente, son los primeros en fracasar cuando se da una sobrecarga a la estructura. En consecuencia, una viga que trabaje a flexión, presentará mayor daño en las fibras traccionadas, por lo tanto, resulta favorable mejorar su resistencia.

Respecto al alma de la platina "T", su función será la de incrementar y distribuir uniformemente los esfuerzos a cortante y a flexión, además de mejorar la unión entre la platina y el elemento

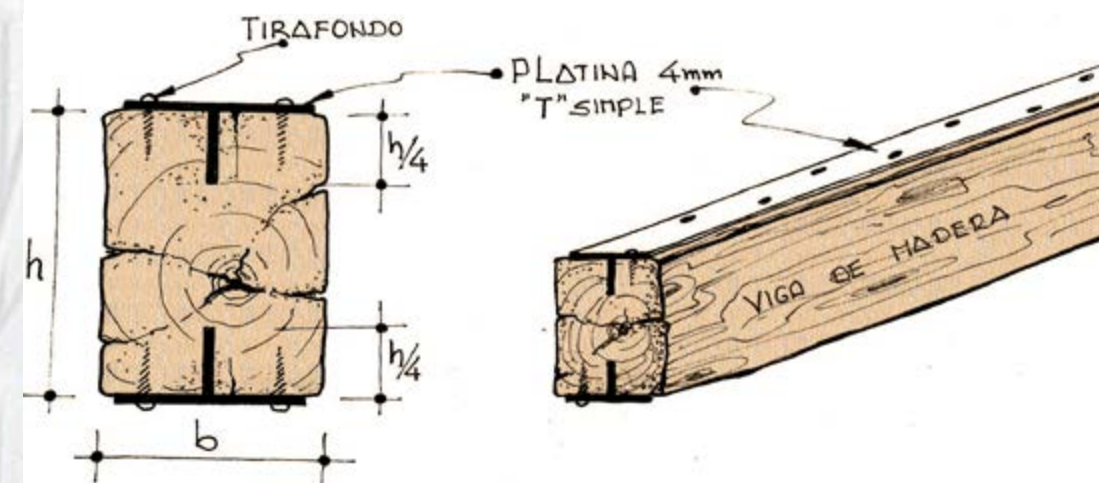


Figura 4.16. Sistema con doble platina metálica tipo "T", fijadas a las caras, superior e inferior, del elemento. / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

de madera. Otra característica positiva del refuerzo, es que la rigidez a flexión también logrará un incremento favorable, ya que las almas de las platinas rigidizarán sus componentes superiores, por lo tanto, esto ayudará a mejorar la resistencia del material para soportar cargas mayores sin sufrir deformaciones notorias. En conclusión, el mejoramiento de la rigidez aumentará el rango elástico del elemento estructural.

Un aspecto negativo de utilizar este sistema se puede suscitar cuando la condición de la estructura se ve alterada por situaciones de humedad; es decir, el acero puede verse seriamente perjudicado si la humedad del ambiente es muy alta, ya que, si el material no es previamente preservado, puede corroerse en un periodo corto de tiempo. Por lo tanto, resulta indispensable que todo refuerzo metálico, presente protección contra la corrosión antes de su colocación.

Los factores positivos frente a los negativos dan cuenta de un sistema eficaz y óptimo para ser utilizado en la rehabilitación de edificaciones. El éxito del refuerzo se debe al trabajo que realizan las platinas metálicas, conjuntamente con el elemento de madera, lo cuales solidariamente pueden mejorar la resistencia de toda una estructura.

En la figura 4.16. se puede observar detalladamente, todos los componentes del refuerzo mediante platinas metálicas, el cual refleja el refuerzo más representativo del presente documento.

- Precio por metro lineal de refuerzo

El precio que representa el presente sistema de reforzamiento puede ser considerado como otro aspecto positivo, ya que la fabricación e instalación, puede resultar un refuerzo económico frente a los demás métodos de reforzamiento.

El rubro por metro lineal de refuerzo contempla: las platinas metálicas tipo "T", los fijadores o tirafondos, herramientas y mano de obra calificada. Por lo tanto, se puede considerar que el precio del refuerzo, por metro lineal, está alrededor de 40 a 45 dólares, ya que el refuerzo es con doble platina.

Es de suma importancia aclarar que los precios establecidos son referenciales, ya que dependerá del medio, de la variación en el precio del acero y adicionalmente, de los costos indirectos, para definir un costo total del refuerzo.

4.2.2. Sistema con perfil metálico "C", fijado a la cara superior del elemento

El presente sistema sugiere un uso más adecuado de los perfiles metálicos "C", ya que los procesos de reforzamiento existentes y analizados en el capítulo anterior, han presentado inconvenientes de carácter constructivo, debido a la manera en que son ubicados. El sistema más utilizado en recuperación estructural, propone el uso del perfil metálico "C", fijado a la cara superior de un elemento de madera, pero sus alas con dirección hacia arriba, lo cual como ya se explicó, generó superficies inadecuadas para un correcto asentamiento de subelementos estructurales. Por lo tanto, como una mejora al refuerzo, el presente sistema utiliza un perfil C, pero invertido, es decir, la dirección de las alas ahora es hacia abajo. De esta manera, se optimiza la resistencia del refuerzo y además se genera una superficie libre para ser utilizada como apoyo.

- Componentes

El principal y único componente del sistema es el perfil metálico "C", el cual deberá cumplir con algunos requerimientos para ser aplicado adecuadamente. Como primer aspecto, se sugiere que el perfil posea una dimensión mayor al ancho de la sección de madera, esto con la intención de que la pieza de madera encaje adecuadamente entre las alas del refuerzo. (Figura 4.17.)

Otro aspecto a considerar, deben ser las medidas que presenten los elementos a reforzar y los perfiles metálicos, ya que estos últimos son prefabricados y sus dimensiones están ya establecidas, por lo tanto, el ajuste preciso entre el refuerzo y la sección de la pieza no estará contemplado para este sistema de reforzamiento.

A pesar del inconveniente con las dimensiones entre ambos materiales, la utilización de perfiles C, resulta más económico y fácil de instalar. Por ejemplo, si la pieza a reforzar presenta una sección de 140 x 150 mm, lo más adecuado será

utilizar un perfil de 150mm, el cual tendrá un mejor encaje o acoplamiento a la muestra, pero si por el contrario se presenta una sección de 110 x 110 mm, lo más cercano al ancho de la muestra será un perfil de 125 mm. Como consecuencia de lo descrito, todo dependerá de la disponibilidad de perfiles metálicos en el mercado industrial, respecto a la sección del elemento de madera.

La fijación del perfil, nuevamente, sugiere el uso de tirafondos de 2 pulgadas, colocados en dos o tres filas al tres bolillo. Algo muy importante a considerar, es que mientras exista mayor número de tirafondos, la unión mejorará considerablemente, por tal motivo, es recomendable ubicarlos a cada 10 cm entre ejes, y para mejorar los esfuerzos cortantes y de presión del tirafondo, utilizar arandelas.

- Peso del refuerzo

Al poseer un sistema que utiliza elementos metálicos como refuerzo, nuevamente, se confirma que el peso incidente en la pieza de madera será menor, ya que en este caso se utiliza únicamente un perfil C, el cual representó un incremento del 35% del peso original, lo cual ubica al refuerzo como un método ligero y óptimo para utilizar.

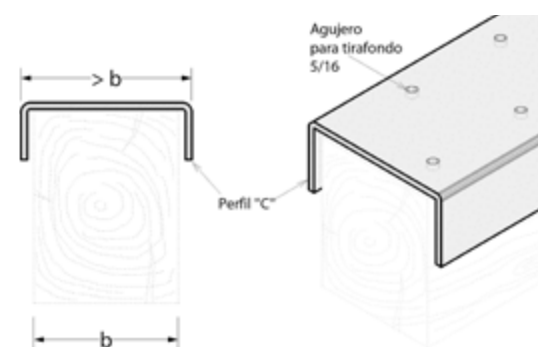


Figura 4.17. Descripción y dimensiones de la platina metálica tipo "C".
Fuente: Daniel Enríquez M.

Los cálculos para determinar el peso del sistema se remiten a datos establecidos para cada perfil, puesto que el refuerzo contempla, el uso de un perfil fijado a la cara superior de la pieza de madera; sin embargo, este dato podría variar dependiendo de la dimensión que presente el refuerzo. Recuerde que las medidas de los perfiles pueden variar y por supuesto el peso, a partir de la sección de la pieza de madera.

- Características

El utilizar un perfil C como refuerzo otorga varias ventajas a una estructura, ya que optimiza el uso de la pieza metálica y mejora las condiciones de apoyo en la superficie superior de los elementos de madera.

Se pudo definir en el capítulo III, que dicho perfil presentó notables incrementos en las capacidades elásticas del material, a pesar de tener sus alas en dirección hacia arriba. Esto obedece a que el refuerzo, a más de absorber y distribuir los esfuerzos a compresión, mejoró la resistencia a deformaciones por ser un elemento más rígido que una platina simple; sin embargo, se detalló que sus ubicación produce inconvenientes de carácter constructivo y desperdicios de área en el perfil, por lo cual surge la propuesta de invertir el perfil, en beneficio del sistema, es decir, colocar el refuerzo en dirección contraria. Las ventajas de su nueva ubicación han sido ya enunciadas y, obviamente, el incremento de las capacidades portantes del material se presentarán de igual forma al utilizar el perfil hacia arriba.

A pesar de ser un refuerzo aceptable y eficaz, se puede considerar como una gran desventaja el impacto visual que puede causar a la estética de la estructura, esto se debe a que el perfil ocupará gran parte del elemento de madera, dejando en evidencia sus alas a los costados del mismo.

Sin embargo, por las condiciones que

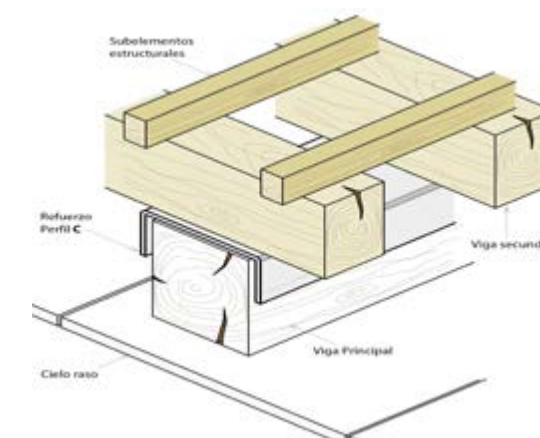


Figura 4.18. Descripción y dimensiones de la platina metálica tipo "C".
Fuente: Daniel Enríquez M.

normalmente presentan las construcciones de madera, el sistema podría pasar desapercibido, ya que al ser aplicado a vigas principales, quedaría oculto por los demás componentes de la edificación, pero de ser estructuras vistas, no se recomienda el sistema como la mejor opción, por cuestiones netamente estéticas y conceptos patrimoniales. En la figura 4.18. se observa claramente como el presente sistema y la mayoría de métodos pueden quedar ocultos por los subelementos existentes en una estructura.

Después de establecer los principales componentes del sistema de reforzamiento a través de un perfil C, en la figura 4.19. se detalla de manera más precisa, como está propuesto para ser aplicados en forjados de madera que demanden mínimas exigencias estéticas.

Algo que siempre se debe tomar en cuenta al trabajar con acero, es su preservación para evitar corrosiones prematuras y daños directos a las estructuras, vale indicar que un refuerzo debe garantizar una larga permanencia a los componentes de una estructura a través de los años.

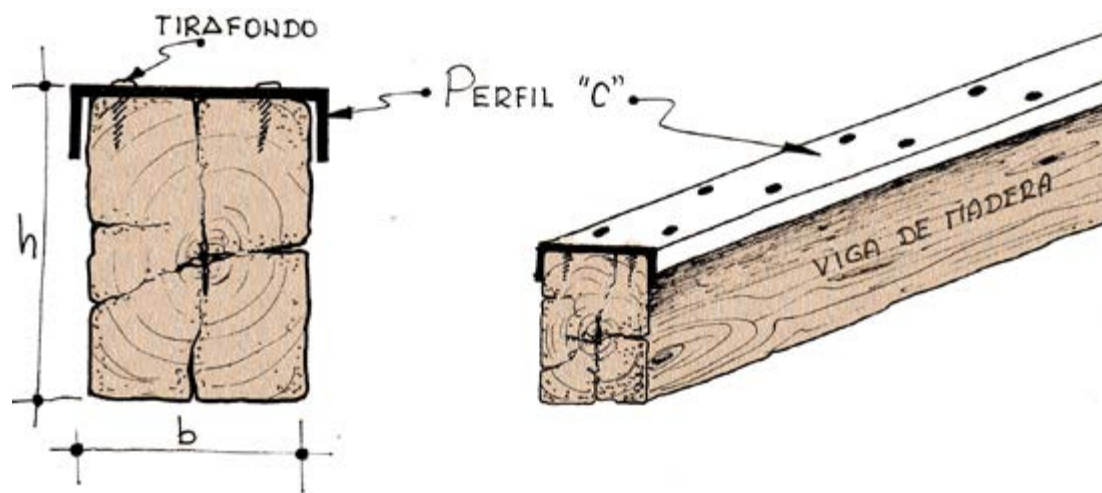


Figura 4.19. Sistema con perfil metálico "C", fijado a la cara superior del elemento. / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

- Precio por metro lineal de refuerzo

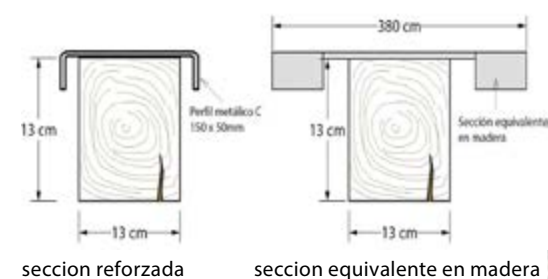
Al usar un elemento prefabricado, en este caso, un perfil metálico "C", reduce considerablemente el costo del refuerzo, ya que la fabricación no se la considera como un rubro, quedando únicamente el costo de instalación como segundo factor incidente del precio total.

El rubro por metro lineal, para el presente sistema contempla: el perfil C, los tirafondos, herramientas y la mano de obra para su respectiva instalación. Como se mencionó, el utilizar elementos prefabricados ha logrado reducir el costo total, teniendo como referencia un precio de 20 a 25 dólares por metro lineal de refuerzo. Nuevamente, se recalca que este costo puede ser sujeta a cambios, en especial por el tamaño del perfil, puesto que éste responderá a la dimensión que presente la sección a reforzar, y en especial al cálculo que se realice para determinar la cantidad de refuerzo necesario para una pieza de madera.

Para calcular un perfil adecuado para reforzar un elemento una viga de madera, se indica de manera concreta un caso común: Si se tiene una viga de madera de 13 x 13 cm de condiciones aceptables, que soportar un esfuerzo máximo de 260 kg/cm² y se necesita que el elemento supere dicho valor, se debería

recurrir a un cálculo a través de sus secciones.

Al tener la sección $b=13\text{cm}$, el perfil C, más próximo a esa medida es el de 150 x 50mm, de tal manera que al aplicar el método de sección equivalente, se deberá transformar al perfil por su equivalencia en madera, para poder determinar si la nueva sección logra cumplir con el incremento requerido, tal como se describe a continuación:



Para transformar al perfil C, se debe recurrir a los procesos ya explicados en el capítulo II, para transformar al acero en madera, en el donde se determinó que el factor es $n=25,42$. En consecuencia, los procesos de cálculo y definición de resultados serán expuestos más adelante, para cada sistema de reforzamiento planteado.

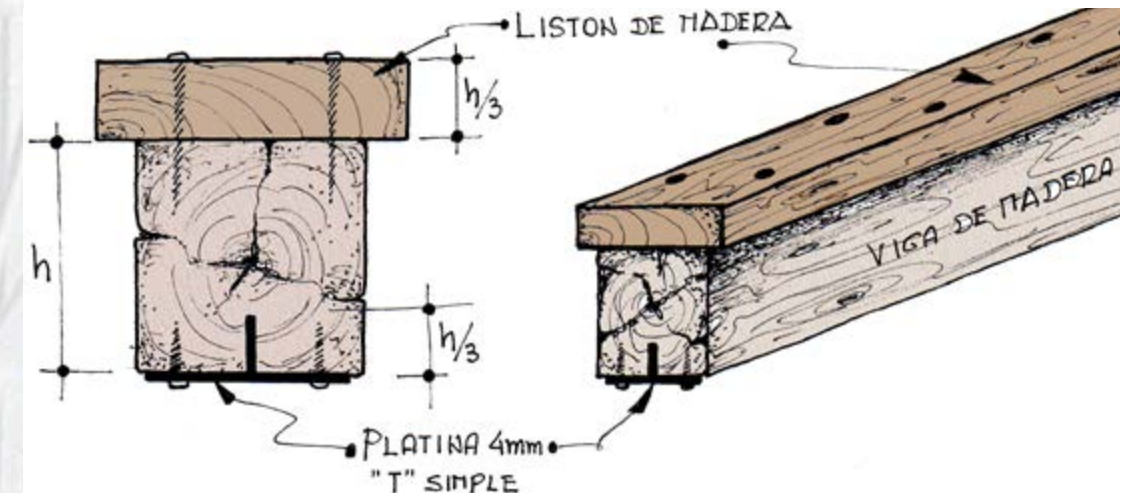


Figura 4.20. Sistema mixto 1, refuerzo con pieza de madera, más un perfil metálico tipo "T". / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

4.2.3. Sistema mixto 1, refuerzo con pieza de madera, más un perfil metálico tipo "T"

Como se mencionó, el hecho de combinar sistemas de reforzamiento puede dar como resultado procesos óptimos y aportes considerables al incremento de las propiedades mecánicas del material. El primer refuerzo mixto considera el uso de una pieza de madera y una platina metálica tipo "T", fijados a la cara superior e inferior del elemento de madera, respectivamente. El objetivo principal de este sistema es aprovechar al máximo los aportes que brindan la madera y el acero, cuando son adecuadamente ubicados, ya que a través de ellos se puede incrementar la sección del elemento y la resistencia a cargas de mayor magnitud.

La figura 4.20. detalla de manera precisa cómo se encuentra configurado el sistema de reforzamiento mixto, presentando las dimensiones sugeridas para su aplicación. Sin embargo, a continuación, se indica los principales componentes y justificativos que validan a la presente técnica.

- Componentes

Como ya se explicó, el refuerzo está compuesto por su cara superior, con una pieza de madera, con un ancho mayor a la del elemento de madera. La altura recomendable es de $h/3$, esta dimensión se debe a algunos factores

que inciden en un proceso de restauración. Entre ellos, tenemos que la altura de entrepiso, disponible en edificaciones antiguas, por lo general, es muy limitada, lo cual obliga a que dicho refuerzo tenga una dimensión mínima, respecto a su altura. Por otra parte, la pieza de madera está diseñada para mejorar la rigidez del elemento y, a través de cálculos previos, se ha determinado que la altura sugerida de $h/3$ presenta buenos resultados de resistencia. El último factor que justifica la altura del refuerzo se debe a que, al ser un material idéntico al reforzado, el incremento de peso podría ser muy grande, lo cual no se considera recomendable para validar al sistema.

Con respecto al ancho del refuerzo, se recomienda que sea más ancha que el elemento principal de madera, puesto que los incrementos se darán, mientras mayor sea la inercia de la sección. Al ser la altura, un limitante del sistema, el utilizar piezas para reforzar más anchas resultará favorable para el sistema, es por eso que se recomienda sobrepasar el ancho total del elemento a cada lado con una dimensión no mayor a $b/3$.

La segunda parte que complementa este primer refuerzo mixto es la platina tipo "T", que deberá

ir fijada a la cara inferior del elemento de madera. Dicha platina presenta las mismas condiciones que se utilizó para proponer el refuerzo 1 (Figura 4.15.), por tal motivo su descripción se puede remitir a lo ya explicado para tal sistema.

En cuanto a los elemento de fijación, nuevamente, se ha recurrido al uso de tirafondos, los cuales son de dos dimensiones diferentes; esto se debe a que la pieza de madera presenta mayor altura y, por ende, los tirafondos deberán tener como mínimo 3 pulgadas; mientras que, para la platina se mantienen los de 2 pulgadas. Otro factor importante que interfiere en la unión de la pieza de madera es la presencia de resinas epóxicas, las cuales ayudarán a fijar los elementos de mejor manera. Por ser superficies con iguales condiciones, la adherencia será favorable para el sistema y la calidad de la resina, no exige ser de alta resistencia.

- Peso del refuerzo

El presente sistema no puede ser considerado un sistema liviano, ya que sus componentes, principalmente, el primero aportará un peso considerable, por ser un material macizo; sin embargo, el incremento de peso es aceptable para una estructura, puesto que puede ser aplicado a un elemento de madera, sin producir factores de riesgo elevados. Esto se debe a que el peso aumenta como consecuencia de implementar una pieza de madera para reforzar, pero a la vez y a favor del sistema, aumenta también su sección, por este motivo el sistema es valedero y totalmente aplicable.

Respecto a los porcentajes de incremento, el utilizar este sistema de reforzamiento, involucra un aumento del 70% del peso original, sin embargo, si se considera que el aumento de sección, el peso puede ser expresado en un 25%, pues solo se consideraría el peso de la platina metálica. Al margen del incremento resultante, el sistema presenta excelentes condiciones para devolver las capacidades mecánicas a cualquier tipo de madera.

- Características

La presencia de una pieza de madera fijada a la cara superior del elemento garantiza un incremento notable de la rigidez a flexión y del rango elástico, debido a que aumenta el área de la sección y su inercia. Dichos aumentos se producen debido a que el refuerzo absorbe en gran medida los esfuerzos a compresión, distribuyendo sobre toda su superficie las cargas incidentes sobre la estructura. Si se observa la imagen 4.20. se distingue al refuerzo de madera, con un ancho mayor al elemento estructural, contribuye a que los esfuerzos se distribuyan de mejor manera hacia los elementos que sobresalen a los costados del elemento.

Por otra parte, se determinó que el colocar un elemento de madera en la cara superior de un componente estructural presenta mejoras de resistencia muy notorias; sin embargo, no hay que olvidar que al sistema también lo complementa una platina metálica tipo "T", fijada en la cara inferior de la pieza, la misma que aporta mayor resistencia al trabajar conjuntamente con el refuerzo de la cara superior.

La colocación de una platina "T" en la cara inferior del elemento de madera, ayudará a mejorar los esfuerzos a tracción, y resultará un importante componente para mejorar la rigidez a flexión.

- Precio por metro lineal de refuerzo

La combinación de madera y acero para reforzar dan como resultado un proceso más largo y requiere de mano de obra calificada por tal motivo, el costo del sistema puede significar un incremento considerable, respecto a los demás reforzamientos generados.

Por lo tanto, el rubro general que refleja el posible

costo del refuerzo con madera y platina metálica ha sido dividido en dos partes. La primera parte corresponde al valor de la pieza de madera, la misma que debe ser preparada previo a la intervención, ya que sus medidas responderán a lo que exige el sistema. Adicionalmente, hay que considerar la mano de obra en dos partes, las cuales corresponden a fabricación e instalación. Considerando todo el proceso correspondiente a la elaboración de sistema, se ha determinado que el costo puede variar entre 15 y 18 dólares por metro lineal de refuerzo.

La segunda parte del rubro general corresponde al costo que representa la platina metálica tipo "T". Como el valor de dicha pieza ya fue determinada, queda por recalcar que el precio por metro lineal es de 25 dólares, lo cual sumado a la cantidad anterior, da como resultado un costo general de refuerzo mixto, que varía entre 45 y 50 dólares, pero sin considerar precios indirectos.

4.2.4. Sistema mixto 2, refuerzo con pieza de madera, más fibras de carbono

El siguiente sistema responde a un mejoramiento del método anterior, ya que mantiene el uso de una pieza de madera, fijada a la cara superior del elemento, pero sustituye la platina "T", por fibras de carbono, las mismas que por sus notables condiciones de resistencia a la tracción, generan un sistema liviano y eficaz.

A pesar de resultar un sistema evidentemente bueno, por la característica propia del material, el principal inconveniente estará en el costo que implica un metro lineal de refuerzo, lo cual ha provocado un rechazo generalizado del método y surge un cuestionamiento respecto su uso: **¿por qué elegir el mencionado sistema, si existen otras alternativas igual de buenas?** Quizá la respuesta a esta pregunta, resulte desfavorable para el uso de fibras de carbono; sin embargo, considerando los grandes beneficios que puede brindar dicho material, se estima que con el pasar

de los años, el sistema logré abaratar costos a medida que su uso se generalice cada día más.

- Componentes

Como se mencionó, el sistema refleja un minoritario cambio en el refuerzo de la cara inferior del elemento, por lo cual la pieza de madera se mantiene bajo las mismas condiciones de altura, que el sistema anterior; sin embargo, por cuestiones netamente experimentales, el ancho de la pieza de madera ha sido colocada con el mismo ancho que el elemento a reforzar. La disminución del ancho del refuerzo se la realizó para determinar diferencias de resistencia, entre un elemento de igual dimensión y otro más ancho que la pieza principal.

En cuanto al refuerzo inferior, se ha sugerido el uso de tres fibras de carbono de resistencias lo suficientemente buenas, para lograr una reacción óptima, frente a los esfuerzos de tracción, producidos en dicha zona. El número de fibras propuestas podrían variar dependiendo de los cálculos previos que se realicen, sin embargo, no se recomienda, que en piezas deterioradas, se aplique menos de dos fibras, ya que una sola no contiene la suficiente capacidad para incrementar la resistencia de un elemento antiguo.

Para el caso específico de esta investigación, se ha propuesto el uso de fibras de carbono (CarboDur S512), ya utilizadas en el medio y que son de dimensiones similares a las utilizadas en el ensayo del capítulo III, es decir, son elementos de 50 x1,2 mm. La capacidad de resistencia a la tracción que presenta cada fibra es de 28.000,00 kg/cm², lo cual la define como un elemento adecuado para soportar dichos esfuerzos.

El sistema de fijación para cada refuerzo, superior e inferior, corresponde a la materialidad

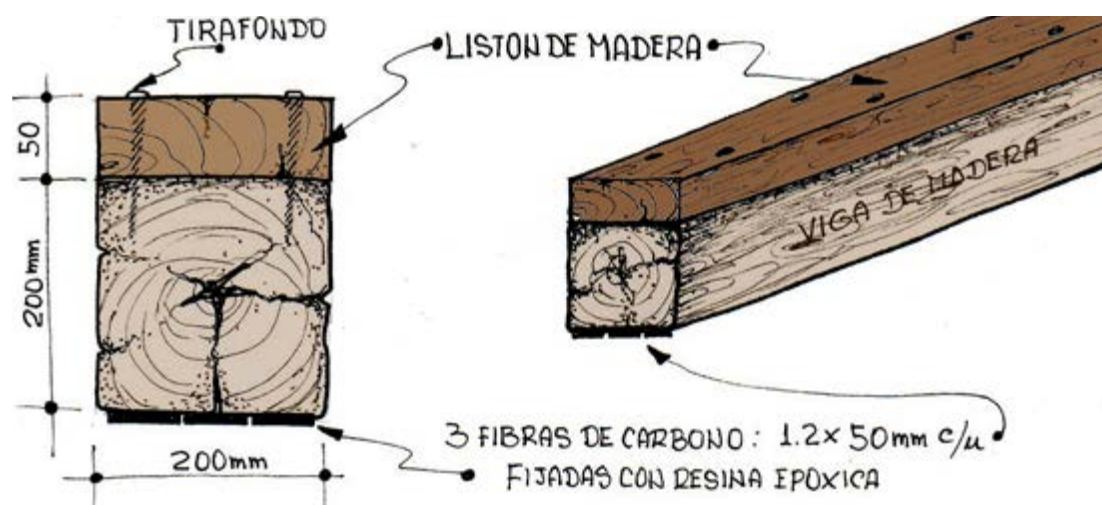


Figura 4.21. Sistema mixto 2, refuerzo con pieza de madera, más fibras de carbono. / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

de cada uno de ellos. Para el elemento de madera, se ha propuesto, nuevamente, tirafondos de 3 pulgadas; mientras que para las fibras, la única manera de fijar los elementos es mediante resinas epóxicas de alta calidad.

- Peso del refuerzo

Al referirnos en instancias anteriores, que el presente sistema es un mejoramiento del anterior, su ventaja radica fundamentalmente en la influencia del peso que genera aplicar una pieza de madera y fibras de carbono. Por su parte, la pieza de madera, en las dimensiones establecidas, presenta un incremento del 30% al peso original del elemento reforzado. Mientras que las fibras de carbono, debido al insignificante peso que posee cada una, el aumento se aproxima al 3%, lo cual define un sistema muy liviano, favorable para elementos con niveles altos de deterioro. Si se suma ambas cantidades, se observa que el peso no supera un incremento del 33% al volumen general, confirmando la eficacia de combinar materiales para reforzar.

- Características

En cuanto a los factores que presenta el sistema de madera y fibras de carbono, se puede definir que los principios de diseño son los mismos que

se han expuesto en el sistema anterior, puesto que la pieza de madera responde a una necesidad de mejorar los esfuerzos a compresión y además de incrementar la resistencia a cargas de mayor magnitud, lo cual también representa incrementos considerables en la rigidez del elemento.

La fibras en cambio sustituyen el trabajo que ejerce el acero en los anterior sistemas, ya que al tener una considerable capacidad, inclusive mayor que la del acero, para soportar tracción, su ubicación es la ideal para el sistema.

La composición general del sistema propuesto se puede observar en la figura 4.21. la misma que representa las dimensiones establecidas para determinar la resistencia que puede alcanzar el refuerzo.

Respecto al análisis técnico del refuerzo, para determinar el máximo esfuerzo y la rigidez a flexión, se recalca nuevamente, que su experimentación directa en el laboratorio, no fue posible, debido al alto costo y poca disponibilidad que representan las fibras de carbono en el medio, por lo cual se recurrió a programas digitales, los cuales de manera muy aproximada detallaron los

resultados esperados. Por esta razón, la figura 4.21. presenta un sistema con medidas reales, ya que la simulación digital contemplará dichos datos.

- Precio por metro lineal de refuerzo

Al referirse al precio que representa el actual sistema, se genera el principal inconveniente debido a los elevados costos que se manejan al utilizar fibras de carbono y, en este caso, se adiciona una pieza de madera, lo cual encarece más el sistema. Si bien, la pieza de madera no involucra un precio muy elevado para el sistema, las fibras por su parte sí lo hacen, ya que se ha definido que por cada metro lineal de fibra instalada en obra, su valor es de 75 dólares, lo cual en primera instancia, ya resulta costoso, pero hay que considerar que las platinas propuestas son tres, lo cual incrementará el costo enormemente. Es así que, por las tres fibras el precio no debe ser menor a 225 dólares el metro lineal, y si a esto se le suma el precio de la pieza de madera, que bordea los 18 dólares, se tiene como dato general, que el valor del refuerzo asciende a 243 dólares por metro lineal de refuerzo.

4.2.5. Sistema mixto 3, refuerzo con perfil metálico tipo "T", más fibras de carbono

Como una nueva alternativa, para continuar mejorando los sistemas de reforzamiento mixtos, se propone en esta ocasión, reemplazar la pieza de madera, que se fija en la parte superior del elemento, por una de las ya conocidas, platinas metálicas tipo "T", pero manteniendo el uso de fibras de carbono por la parte inferior.

- Componentes

Los principales componentes del sistema son dos. Como primer refuerzo, está la platina metálica "T" fijada a la cara superior del elemento mediante tirafondos de 2 pulgadas, colocados en doble fila al tres bolillo. Por otra parte, se ha propuesto fibras de

carbono de las mismas características que en el sistema anterior, es decir, colocadas en la parte inferior del elemento y fijadas al mismo con resinas epóxicas de alta resistencia.

Un punto importante de recordar es que la calidad de la resina para fijar las fibras, debe ser de alta resistencia a esfuerzos cortantes. De esta manera, se garantiza la unión y se impide un desprendimiento de la fibra al momento de mayor esfuerzo en el elemento, ya que en los ensayos analizados, resultó común observar el fallo debido a la separación de la fibra.

- Peso del refuerzo

Como resultado de mejorar los sistemas anteriores, se ha logrado optimizar los materiales de refuerzo, hasta llegar a un reducido aumento en el peso del elemento. Es así que, para la platina metálica, se determinó que el incremento de peso fue del 22%, y si a esto se le suma el 3% de las fibras de carbono, se tiene un incremento total del 25%, respecto al peso original del elemento reforzado.

- Características

Al utilizar una platina metálica en la parte superior del elemento, se está garantizando una adecuada reacción a los esfuerzos de compresión, y además por la condición del refuerzo se había establecido que la distribución de esfuerzos cortantes y el incremento de resistencia a la flexión harán del sistema propuesto un método para reforzar excelente.

Consecuentemente, si a las notables consideraciones enunciadas, se aumenta los aportes de las fibras de carbono que mejorando los esfuerzos a tracción y a la vez reducen deformaciones, hacen del sistema el más óptimo, eficaz y rápido de aplicar entre los propuestos;

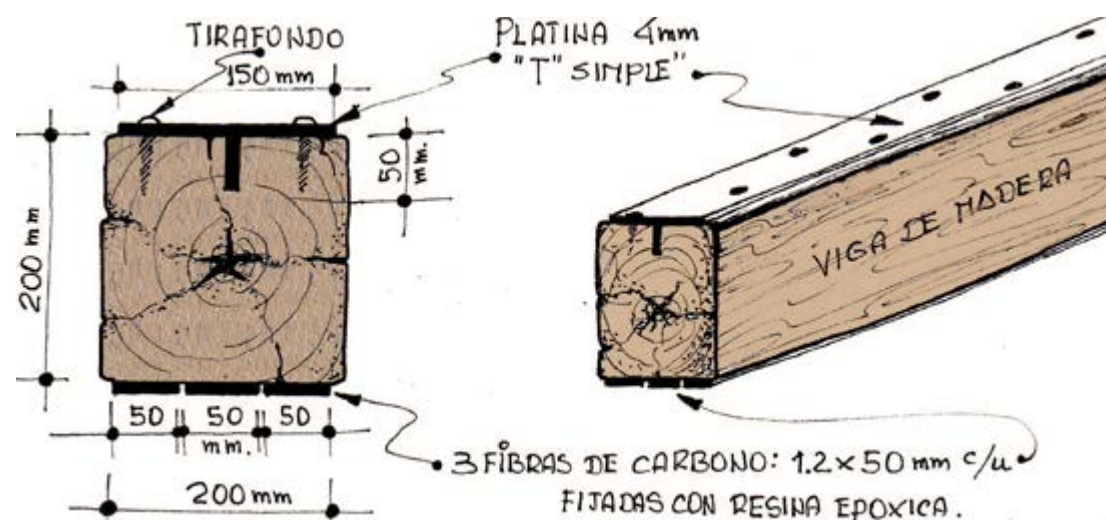


Figura 4.22. Sistema mixto 3, refuerzo con perfil metálico tipo "T"; más fibras de carbono. / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

sin embargo, al estar presente las fibras de carbono, el método genera una descompensación en sus ventajas, ya que los elevados costos se imponen a la aplicación común del sistema.

En la figura 4.22. se encuentra detallada, la configuración general del presente sistema, el cual presenta, nuevamente, elementos dimensionados y con especificaciones, esto con la intención de determinar los resultados del refuerzo a través de programas digitales, de la misma forma que el método anterior, puesto que la obtención de las fibras de carbono, resultó limitado, para realizar los respectivos ensayos mecánicos en laboratorio.

- Precio por metro lineal de refuerzo

Como se anticipó, utilizar fibras de carbono representa un gasto económico muy alto, esto se debe a que las tres fibras bordean su costo en 225 dólares, considerando todos los rubros que inciden en la aplicación por cada metro lineal.

Por otra parte, la platina metálica, al ser un elemento más comercial y de fácil acceso, su precio oscila de 20 a 25 dólares, así mismo, considerando fabricación y demás gastos de instalación. Juntando los dos precios anteriores, se ha obtenido un valor general de 245 dólares por cada metro lineal de refuerzo, bajo las condiciones ya

expuestas, por lo tanto, nuevamente, surge los cuestionamientos: **¿Por qué utilizar este método?, ¿A cambio de qué beneficio, resulta conveniente gastar en este sistema?** La verdad es que, las respuestas a estas preguntas no son fáciles de determinar, ya que a pesar del beneficio evidente que aporta la generación de un sistema eficaz y muy liviano, resulta contradictorio gastar grandes recursos económicos, puesto que dentro de esta investigación se ha determinado sistemas de igual eficacia y con costos más baratos y accesibles.

4.3. ENSAYOS MECÁNICOS DE LOS SISTEMAS DESARROLLADOS

Como parte primordial de los procesos investigativos del presente documento, ha sido parte fundamental la realización de ensayos mecánicos, a través de laboratorio, para determinar los principales factores de incremento y deterioro de cada muestra experimentada. Es así que, para definir la calidad de los esfuerzos propuestos, fue necesario realizar pruebas de resistencia mecánica, replicando en

probetas de madera los sistemas desarrollados.

En consecuencia a lo enunciado, surge la necesidad de aplicar, físicamente, pruebas de laboratorio con probetas de eucalipto, bajo condicionantes expuestas en capítulos anteriores, para determinar de manera técnica y específica los resultados de cada sistema desarrollado. Las muestras a ser experimentadas son de maderas nuevas y antiguas, puesto que se definió tres grupos de maderas según sus años de función estructural.

Cabe recalcar que, para cada ensayo realizado se utilizó una probeta diferente, las mismas que presentaron dimensiones determinadas en ensayos anteriores y bajo los mismos procedimientos aplicados en los capítulos II y III.

Se determinó, como principales sistemas desarrollados por la presente investigación, a cinco refuerzos estructurales. A través de criterios y experiencias adquiridas, en estudios realizados a reforzamientos existentes, se logró elaborar con probetas de eucalipto nuevas y antiguas, sistemas basados en el uso de elementos metálicos y sistemas mixtos, fundamentados en la combinación de diferentes materiales que aporten resultados considerables para el aumento de las propiedades mecánicas de la madera. La preparación de cada muestra, nuevamente, fue realizada a través de procesos mecanizados con maquinaria adecuada para la preparación de madera. (Figura 4.23.)

4.3.1. Ensayo a flexión estática. Sistema con doble platina metálica tipo "T"

Para determinar los resultados correspondientes al sistema de doble platina metálica, en primer lugar, fue necesario, nuevamente, retomar las condicionantes que exige el ensayo por cuestiones de disponibilidad de la máquina en el laboratorio de la universidad, la cual admite, para ensayos a flexión, probetas con una sección a escala normal, pero de longitud no mayor a 100cm. Las cargas aplicadas,



Figura 4.23. Preparación de probetas, previo a los ensayos mecánicos. / Fuente: Daniel Enríquez M.

de igual manera, fueron aplicadas mediante dos puntos de apoyo en el centro de la muestra, la cual se apoyó sobre una base metálica con dos apoyos, para simular un elemento simplemente apoyado, el proceso de montaje aplicado puede ser observado en la imagen 2.31. del capítulo II.

El siguiente punto a desarrollar, fue la preparación de la probeta reforzada con dos platinas metálicas "T" fijadas a las caras superior e inferior. La muestra utilizada corresponde a la probeta L7, la misma que pertenece al grupo de maderas nuevas de eucalipto. Las dimensiones del elemento fueron: 12 x 13 x 100 cm, a la cual fue aplicado las dos platinas con dimensiones: 10 x 3.5 x 100 cm. (Figura 4.24.)

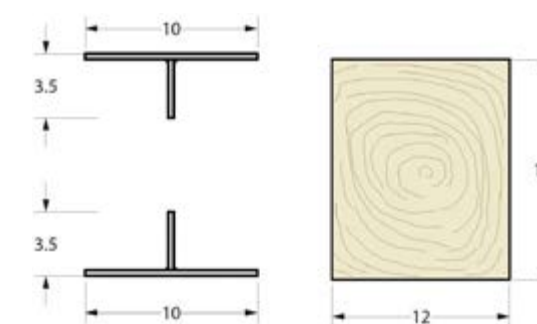


Figura 4.24. Dimensión de los componentes del sistema de reforzamiento con doble perfil metálico tipo "T". / Fuente: Daniel Enríquez M.

La probeta L7 pertenece al grupo de maderas nuevas y sus condiciones fueron las más aceptables, es decir, no presentó defectos como rajaduras o grietas de gran tamaño, y la presencia de nudos fue totalmente nula. Su preparación no presentó complicaciones, salvo por la dureza propia del material, ya que su contenido de humedad fue del 18%. A pesar del alto contenido de humedad (C.H.) del material, los resultados no se vieron afectados, respecto a su resistencia.

En la figura 4.25. se detalla de manera precisa, el resultado de la probeta, después de ser aplicado el refuerzo con dos platinas metálicas tipo “T”. También es posible observar el estado de la madera, sin ningún defecto que pueda alterar el ensayo y además de una sección libre de grietas. Otro factor importante de señalar es la colocación de los tirafondos, los cuales se fijan a la madera a cada 10cm y en doble fila al tres bolillo y con un apretado en zigzag para garantizar un adecuado asentamiento entre las superficies.

El uso de resinas epóxicas no fue necesario para el presente refuerzo, ya que cada proceso busca disminuir costos, pero sin quitar calidad a cada sistema. Es así que ninguno de los ensayos realizados en laboratorio, utilizó resinas de adherencia.

- Datos de laboratorio

El ensayo fue realizado bajo los condicionantes establecidos para pruebas a flexión estática, puesto que el proceso mantuvo la misma secuencia que pruebas anteriores. Sus cargas fueron medidas a través de un deformímetro, a cada 50x10-3 pulgadas. Las cargas aplicadas reflejaron inmediatos incrementos, ya que sí se compara los datos actuales, con ensayos anteriores, la resistencia a cargas fue mayor y el comportamiento, en una primera aproximación, constató un considerable aumento de la propiedades mecánicas del material y una disminución en las deformaciones; sin embargo, estos datos enunciados fueron solo una proyección anticipada de los finales,



Figura 4.25. Probeta L7 reforzada con doble platina metálica tipo “T”. / Fuente: Daniel Enríquez M.

ya que son producto de una percepción visual del desarrollo del ensayo, conforme se aplicó las cargas en la probeta. No se debe olvidar que sólo los resultados finales, obtenidos mediante fórmulas propias de la flexión, determinarán técnicamente los incrementos producidos

A continuación, se encuentran detallados los principales componentes obtenidos en el ensayo, los cuales estan dispuestos de la siguiente manera: Tabla de resultados, gráfica del ensayo y sus principales características. Una vez expuesta la tabla d1., se puede observar como las cargas manifestaron grandes magnitudes, tal es el caso, que la carga máxima admitida fue de 24.949 kgf., sin duda alguna, la mayor carga soportada, entre las probetas experimentadas. Como consecuencia de la obtención de cargas altas, los resultados deberán reflejar condiciones similares, es decir, la probeta reforzada deberá aportar notables incrementos a sus capacidades elásticas, por lo tanto, será necesario realizar los respectivos análisis y aplicación de fórmulas para obtener los resultados esperados.

En la figura 4.26. se observa el respectivo montaje de la muestra para la realización del ensayo. Durante el proceso se pudo denotar, una notable resistencia a la flexión por parte de la probeta,

Datos generales del ensayo de la “PROBETA L7”. (Refuerzo con doble platina “T”)

Tabla de Resultados. “Probeta L7”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
2030	50
2900	100
3920	150
5460	200
7580	250
9830	300
11450	350
13270	400
14700	450
16010	500
17380	550
18670	600
19850	650
20900	700
21750	750
22540	800
23370	850
24570	900
24949	950
23950	1000

* Carga máxima= 24.949,00 kgf.

Tabla d1. Probeta L7. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

pero a pesar de aquello, se pudo evidenciar puntos de fallo en la sección de la probeta. El fracaso mencionado produjo una separación de las fibras traccionadas en la sección de la muestra, así lo evidencia la figura 4.27., sin embargo, la apariencia general de la probeta después del ensayo, no evidenció daños o deformaciones notorias.

- Gráfica y resultados

Después de exponer los respectivos datos del ensayo a flexión, expuestos en la tabla d1. y en las gráficas; a través de una base de datos digital, se logró obtener la curva de deformación representada en la figura 4.28.

La presente curva describe de manera literal



Figura 4.26. Montaje para ensayo a flexión de Probeta L7. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 4.27. Sección de la Probeta L7, después del ensayo. / Fuente: Daniel Enríquez M.

los datos referidos al comportamiento elástico y plástico del material, puesto que los refuerzos metálicos, lograron distribuir y absorber los esfuerzos de compresión y tracción, a además se pudo evidenciar claramente los puntos de inflexión en la curva, debido a los asentamientos que se producen entre las superficies de los materiales.

En consecuencia, los cuatro primeros puntos de la curva denotan claramente un cambio de dirección de la recta elástica, esto se debe a que

el sistema sufrió asentamientos entre los espacios de las platinas y la madera, lo cual por ser muy pequeño el desplazamiento, la curva toma un ligero cambio de dirección. Al analizar cada curva generada dentro de esta investigación, resulta común encontrar este tipo de inflexiones, puesto que, la madera también presenta asentamientos, debido al aplastamiento puntual de sus fibras.

Por otra parte, para la obtención de resultados y un correcto análisis del sistema, es necesario determinarlos a través del *método de secciones equivalentes*, en donde se pueda manejar de manera teórica, un elemento homogéneo para aplicar las respectivas fórmulas de la flexión. Es así que para establecer una sección equivalente, se ha utilizado el factor para transformar el acero a madera, el cual es $n=25,42$. Este dato, permite interpretar a la sección reforzada como una sola de madera. Figura 4.29.

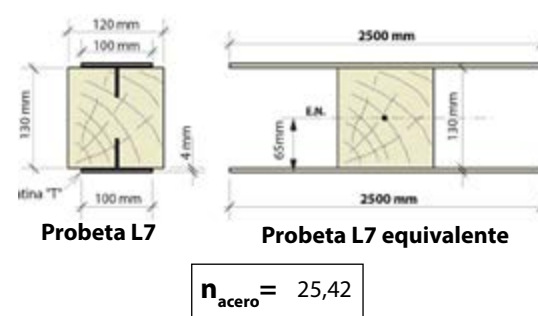


Figura 4.29. Determinación de la sección equivalente para la probeta L7. Fuente: Daniel Enríquez M.

Después de haber obtenido la sección equivalente se ha procedido a determinar los principales resultados del sistema, expuestos en la tabla d2. Como primer dato, se ha definido el esfuerzo máximo admisible, el cual representó un incremento del 30% en relación a los datos iniciales del material, es así, que el resultado fue de 349,86 kg/cm². Hay que recordar que el dato ya determinado, para un elemento sin

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta L7" (Madera nueva)

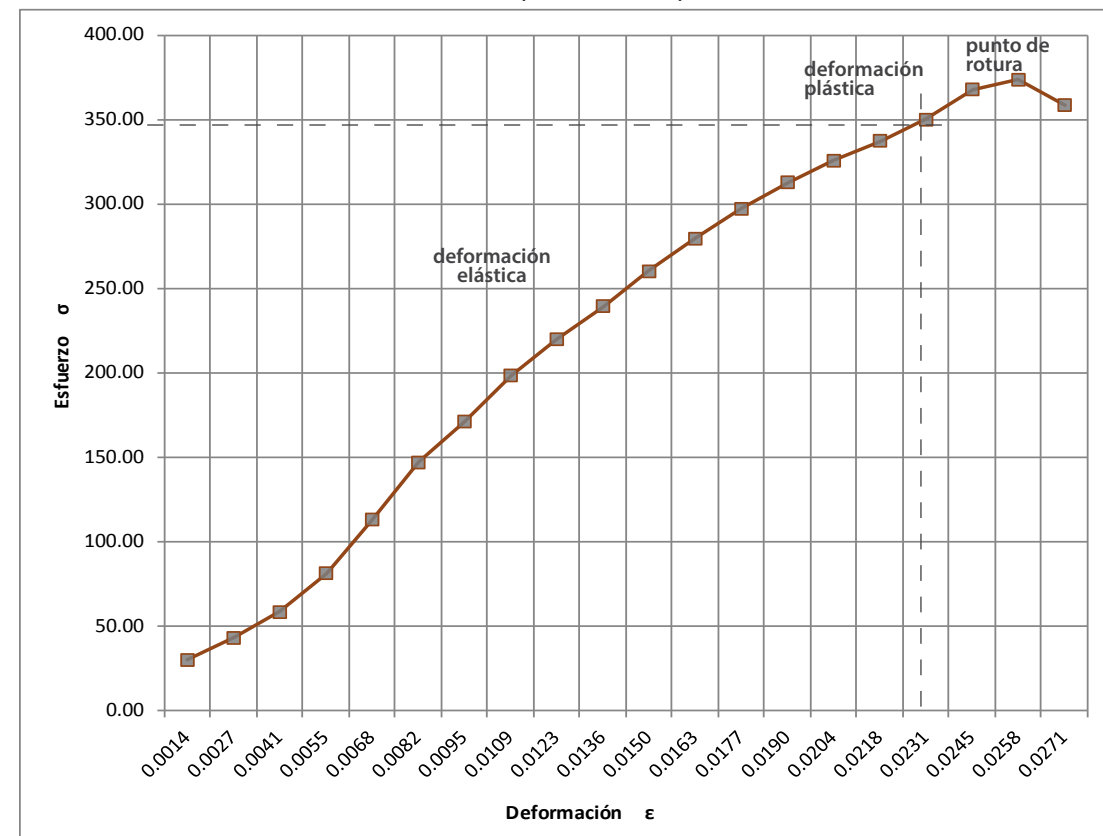


Figura 4.28. Probeta L7. Curva de Esfuerzo-Deformación para elemento reforzado mediante platinas metálicas tipo "T". Fuente: Daniel Enríquez M.

Tabla d2.
Resultados del refuerzo aplicado mediante doble platina metálica tipo "T" fijadas a la cara superior e inferior de la muestra.

DESCRIPCIÓN	Probeta L7 de eucalipto nuevo
SECCIÓN b x h (cm)	12 x 13
DEFORM. MÁX. (mm)	24,1
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm²)	349,86
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	14.800,00

Tabla d2. Probeta L7. Resultados del refuerzo mediante doble platina metálica tipo "T". Fuente: Daniel Enríquez M.

reforzar es de 263 kg/cm², por lo tanto, el aporte generado por el sistema, es totalmente favorable y cumple con todo lo establecido para un refuerzo, dejando constancia de que el sistema desarrollado, es el más adecuado para ser aplicado en intervenciones de reforzamiento.

Otro factor fundamental, que determinó la gran resistencia que puede llegar a tener un elemento de madera, a través del presente sistema, fue la rigidez a flexión, la cual dio como resultado 14.800 kg/cm, definiendo al sistema, capaz de eliminar en gran medida vibraciones y deformaciones en el elemento reforzado.

Finalmente, es importante destacar que el sistema presentó un rango elástico muy elevado debido a que material mejoró su rigidez a flexión, a tal punto que las deformaciones permanentes no fueron notorias, pues esto lo demuestra la figura 4.30. donde se detalla el estado de la probeta L7, después del ensayo. Gracias al aporte de los refuerzo metálicos, el presente sistema presenta una gran ventaja estructural, frente a los demás refuerzos.

4.3.1.1. Factor de corrección "K", para el sistemas de platinas T.



Figura 4.30. Deformación de la probeta L7, después del ensayo. Fuente: Daniel Enríquez M.

A través de los datos obtenidos en el laboratorio con las muestras de madera nueva, es posible obtener el factor K; simplemente, se deberá cotejar el momento determinado en el laboratorio, con el momento teórico, determinado a través del método de secciones equivalentes.

Como se pudo observar en los procesos aplicados, el análisis parte de la fórmula 2.13 para el esfuerzo crítico, de la cual se deberá obtener el momento teórico (MT). En la figura 4.31. se detalla los principales resultados obtenidos para la sección de la muestra experimentada con las dos platinas tipo "T", de los cuales partirá nuestro análisis.

A continuación, se detalla el proceso para la determinación del momento máximo (M_T), utilizando los datos expuestos en la figura 4.31. para luego proceder a determinar el factor "K" requerido:

$$M_T = \frac{\sigma \cdot I}{y}$$

$$M_T = \frac{290 \times 10.412,00}{6,9}$$

$$M_T = 399.936,50 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Después de haber determinado el momento teórico, es posible determinar el factor de corrección, ya que el dato del momento máximo, obtenido en el laboratorio ha sido ya definido y expuesto. Por lo tanto, se detalla la expresión que define dicho factor:

$$K = \frac{M}{M_t}$$

$$K = \frac{307.125,00 \text{ kgf} \cdot \text{cm}}{399.936,50 \text{ kgf} \cdot \text{cm}}$$

$$K = 0,8$$

El valor que reflejó K, confirma que existieron defectos en el sistema de reforzamiento, esto se debe a que la falla en la probeta, se produjo por la separación de las fibras y por el espacio presente entre las superficies de los dos materiales. Por lo tanto, este factor contribuirá a determinar las capacidades elásticas de diferentes elementos de madera, con mayor proximidad a la realidad.

Como complemento a la información, resulta conveniente demostrar de manera gráfica el comportamiento elástico que presenta el material después de determinar el factor de corrección, esto con el objetivo de apreciar el aporte del factor "k". Por lo tanto, en la figura 4.32. se ha definido la curva de esfuerzo-deformación, representando el comportamiento elástico del material.

Sin duda la figura, representó comportamientos muy similares entre las dos curvas; sin embargo, sus capacidades portantes difieren, debido a que la línea de color rojo, representa el comportamiento del material, luego de aplicar el factor de corrección, lo cual define un resultado que considera los posibles fallos que se suscitan en un reforzamiento, especialmente, cuando este involucra la unión de piezas metálicas a través de conectores.

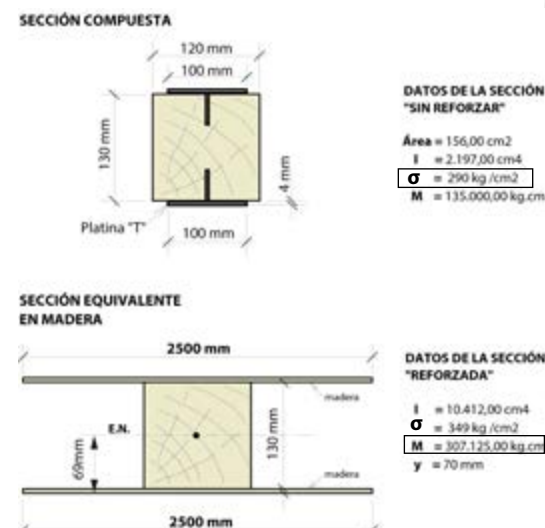


Figura 4.31. Definición del factor de corrección "K". / Fuente: Daniel Enríquez M.

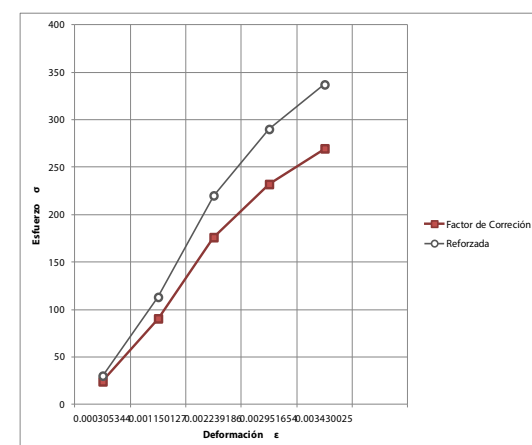


Figura 4.32. Rango elástico después de aplicar el factor de corrección "K". / Fuente: Daniel Enríquez M.

4.3.2. Ensayo a flexión estática. Sistema con perfil metálico "C" fijado a la cara superior del elemento

Manteniendo la secuencia de los anteriores ensayos, como primer punto, se ha determinado la composición del sistema, el cual contempla el uso exclusivo de un perfil metálico fijado a la cara superior del elemento de madera. (Figura 4.33.)

Como ya se explicó, el sistema responde a un uso más adecuado y óptimo del perfil, puesto que en la mayoría de casos, su uso inadecuado ha generado algunos inconvenientes de carácter constructivo, por lo tanto, el nuevo sistema sugiere una ubicación diferente del perfil, es decir, con sus alas con dirección así abajo, para generar un encaje correcto entre los dos materiales.

El elemento de madera utilizado para el ensayo, ha presentado ciertas deficiencias como: rajaduras y gemas, sin embargo, estos defectos se encuentran dentro de los límites admisibles, lo cual valida el proceso de análisis.

Respecto a las dimensiones de cada elemento, es importante especificar que las medidas de la pieza de madera fueron de 13 x 13 x 100cm, y su contenido de humedad de 16%. Por otra parte, las medidas del perfil, como ya se anticipó, debieron adaptarse a la sección del elemento a reforzar, por lo tanto, la dimensión más adecuada para dicho refuerzo fue el perfil de 150 x 50 y de 3mm de espesor.

- Datos de laboratorio

El desarrollo del segundo ensayo presenta en la tabla d3. los resultados que reflejó la máquina del laboratorio, los cuales reflejaron un notable aumento en la resistencia del elemento reforzado, tal es el caso que la carga máxima, alcanzada fue de 18.008 kgf., lo cual resulta totalmente favorable si comparamos con los 12.000 kgf. que se obtuvieron con un probeta sin reforzar y de las mismas condiciones. Sin embargo, realizar cualquier estimación de los posibles resultados, sin aplicar respectivos procesos de cálculo, genera datos muy superficiales, por lo tanto, para determinar de manera técnica los resultados e incrementos del sistema, se deberá aplicar primeramente las fórmulas correspondientes al método de secciones equivalentes.



Figura 4.33. Probeta L8 reforzada con un perfil metálico "C". / Fuente: Daniel Enríquez M.

Datos generales del ensayo de la "PROBETA L8". (Refuerzo con perfil metálico "C")

Tabla de Resultados. "Probeta L8"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
1500	50
3140	100
4802	150
6250	200
8002	250
9450	300
10800	350
12225	400
12870	450
13700	500
14370	550
14900	600
15580	650
16130	700
16340	750
17060	800
17540	850
17920	900
18008	950

* Carga máxima= 18.008,00 kgf.

Tabla d3. Probeta L8. Tabla de resultados Carga-Deformación./ Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

En la figura 4.34. se detalla la probeta L8 en el momento previo al ensayo, la misma que no presentó mayores defectos en su forma, que podría alterar los resultados finales. Es así que en la figura 4.35. se puede observar la sección del elemento antes de ser aplicada fuerzas, la cual denotó una superficie libre de fallas, salvo por una sola rajadura, producto de la contracción del material, lo cual es característico en el eucalipto, sin embargo, se podría dar una separación de fibras en dicha zona al momento de aplicar cargas. Por lo tanto, como una primera aproximación a los resultados finales, se puede decir que el refuerzo es totalmente válido y que su uso garantiza el aumento de las propiedades elásticas a un elemento de madera.

- Gráfica y resultados

La grafica 4.37. representa la curva de esfuerzo-deformación del presente sistema, la cual manifiesta un comportamiento típico de la madera, ya que define los tres estados del material de forma directa. La recta que dibujan los primeros puntos representa el estado elástico del material y define un comportamiento normal y continuo, es decir, el sistema no presentó asentamientos entre las superficies del perfil y de la madera, reaccionando solidariamente.

Al sobrepasar el estado elástico, es posible apreciar un ligero cambio de dirección en la gráfica, definiendo así el estado plástico del elemento, el cual conforme aumentan las cargas, aproxima su resistencia hasta el punto de ruptura, sin embargo, durante dicho proceso, fue posible distinguir, que a la mitad de la curva, un punto alteró levemente la gráfica, esto se produjo debido a que la sección empezó a fallar y la disipación de energía se hizo presente por la separación de la fibras, pero a pesar de aquello, el elemento continuó resistiendo, hasta llegar a la máxima carga en donde se dio la falla total.

Después de haber analizado el comportamiento del elemento, a través de la curva de



Figura 4.34. Montaje para ensayo a flexión de Probeta L8. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 4.35. Sección de la Probeta L8, antes del ensayo. / Fuente: Daniel Enríquez M.

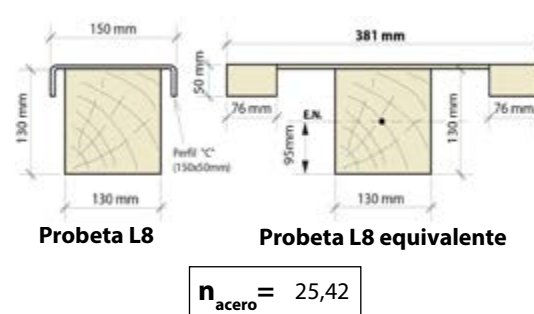


Figura 4.36. Determinación de la sección equivalente para la probeta L8. Fuente: Daniel Enríquez M.

esfuerzo-deformación, fue necesario aplicar los respectivos procesos para el cálculo de resultados, utilizando nuevamente, el método de secciones equivalentes. Para realizar la transformación del perfil metálico, se debe hacer uso del factor de equivalencia para el acero, el

cual ya fue definido como $n=25,42$; quedando por definir la sección homogénea en madera, a través de una correcta interpretación para evitar problemas en su cálculo. (Figura 4.36.)

A partir de la nueva sección obtenida para el presente sistema es posible aplicar las fórmulas de la flexión para definir técnicamente los resultados e incrementos. Es así que, en la tabla d4. se presentan los respectivos resultados del método propuesto.

Sin duda, el principal dato a considerar fue el del esfuerzo máximo, el cual reflejó un incremento del 33%, superando a todos los resultados obtenidos dentro de la investigación, inclusive logró mejorar el resultado expuesto por el sistema anterior, pero con una distancia mínima. Esto confirma que los dos métodos desarrollados fueron los mejores exponentes para

Tabla d4.
Resultados del refuerzo aplicado mediante perfil metálico "C" fijado a la cara superior del elemento.

DESCRIPCIÓN	Probeta L8 de eucalipto nuevo
SECCIÓN b x h (cm)	13 x 13
DEFORM. MÁX. (mm)	24,1
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm ²)	351,39
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	8.034,00

Tabla d4. Probeta L8. Resultados del refuerzo mediante perfil metálico "C". / Fuente: Daniel Enríquez M.

realizar reforzamientos estructurales aplicados a elementos de madera. El resultado obtenido para el esfuerzo máximo fue de 351,39 kg/cm², y para la rigidez a flexión fue de 8.034 kg/cm.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta L8" (Madera nueva)

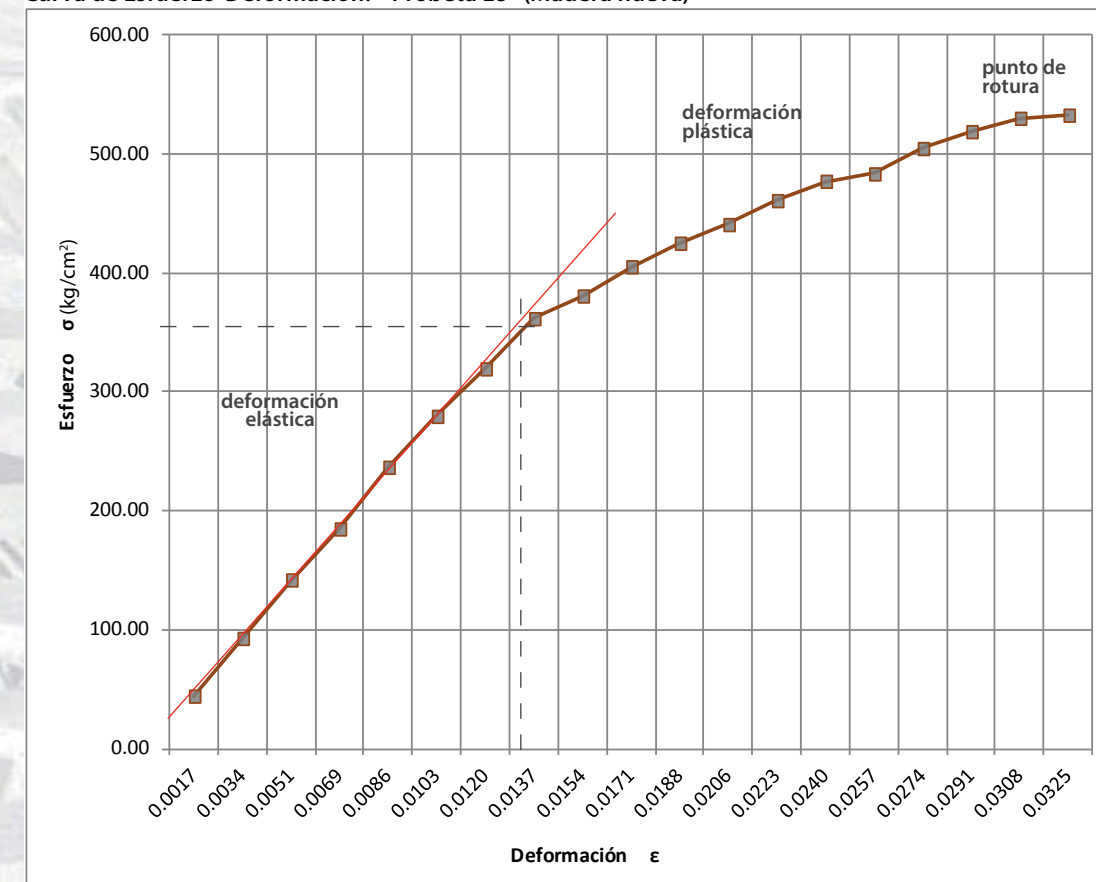


Figura 4.37. Probeta L8. Curva de Esfuerzo-Deformación para elemento reforzado mediante perfil metálico. / Fuente: Daniel Enríquez M.

A pesar de que su rigidez también aumentó, respecto a los datos iniciales, no logró superar al resultado del sistema anterior; por lo tanto, el presente método, es considerado como una gran alternativa al sistema con platinas metálicas "T".

En la parte final de este análisis, es importante detallar las principales cualidades que manifestó el sistema de reforzamiento, a través de sus procesos y comportamientos. Como una primera ventaja del sistema, se pudo distinguir que la instalación del perfil fue el más rápida entre los refuerzos expuestos, ya que solo fue necesario realizar agujeros al perfil y luego fijarlo, sin duda, un proceso muy rápido de aplicar y a la vez muy económico, por la disponibilidad de material y por ser un elemento prefabricado.

Realizando de manera visual, una estimación de los comportamientos y datos obtenidos, se puede tener como principal premisa, que a pesar de que el sistema no alcanzó los datos del método con platinas "T", el aporte brindado fue notable al momento de mejorar la resistencia del elemento.

Después de realizar el ensayo, el estado de la sección cambió considerablemente, esto se debe a que la rajadura existente, al aplicar cargas, produjo una separación de las fibras (Figura 4.38.), por lo tanto, se ratifica que las piezas a flexión, mejorarán sus capacidades elásticas, mejorando la resistencia de las fibras inferiores.

Respecto a la deformación permanente que presentó el elemento, se puede recalcar que la falta de refuerzo en la cara inferior de la probeta disminuyó el rango elástico del material, manifestando un rango plástico mayor produciendo una deformación permanente, levemente notoria, como lo detalla la figura 4.39.

4.3.2.1. Factor de corrección "K", para el sistema con perfil C

Para determinar el presente factor, nuevamente, se recurre a los datos obtenidos con el



Figura 4.38. Sección de la probeta L8, después del ensayo. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 4.39. Deformación de la probeta L7, después del ensayo. / Fuente: Daniel Enríquez M.

método de la sección equivalente, del cual se determinará el momento (M_r), para luego ser comparado con el momento máximo del ensayo.

El proceso maneja una misma secuencia, la única diferencia, radica en los resultados que se van determinando, ya que cada sistema presentó diferentes defectos en su elaboración.

En la figura 4.40. se encuentran detallados los resultados de la sección equivalente, para luego aplicar el respectivo procedimiento para la determinación del factor K.

$$M_r = \frac{\sigma \cdot I}{y}$$

$$M_r = \frac{290 \times 5.652,50}{9,5}$$

$$M_r = 172.550,00 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Por lo tanto, el factor de corrección para el sistema con eprfil C se detalla de la siguiente manera

$$K = \frac{M}{M_r}$$

$$K = \frac{143.906,00 \text{ kgf} \cdot \text{cm}}{172.550,00 \text{ kgf} \cdot \text{cm}}$$

$$K = 0,83$$

El valor obtenido para K, representa los defectos ocasionados por la evidente separación de las fibras traccionadas; sin embargo, el valor refleja defectos mínimos en el sistema, ya que los resultados variaran en un pequeño porcentaje, tal como le detalla la gráfica 4.41. en la cual se expone los rangos elásticos del material cuando es aplicado el factor.

El factor de corrección "K" aporta de manera técnica, al cálculo estructural de sistemas de reforzamiento, de allí radica su importancia y además garantiza resultados más reales cuando se carece de la información que brinda una prueba de laboratorio.

4.3.3. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 1, mediante pieza de madera y platina metálica tipo "T"

El siguiente sistema representa la optimización de dos elementos de gran resistencia. El primero, una pieza de madera fijada a la cara superior del elemento a través de tirafondos y resina epóxica. El segundo refuerzo corresponde a una platina metálica tipo "T", fijada con tirafondos. (Figura 4.42)

Al proponer el sistema, se determinó que cada componente responden a una adecuada aplicación de sus características. Por ejemplo, la



Figura 4.40. Definición del factor de corrección "K", para el sistema de perfil C. / Fuente: Daniel Enríquez M.

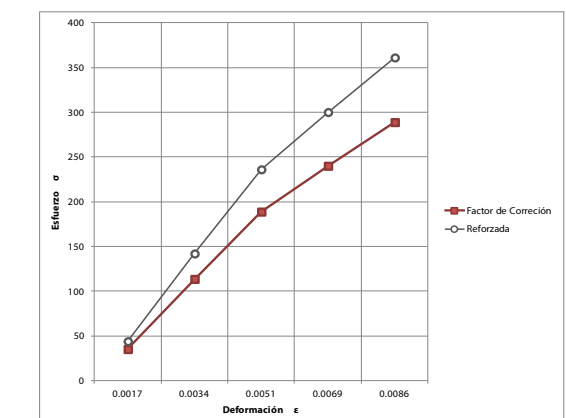


Figura 4.41. Rango elástico después de aplicar el factor de corrección "K". / Fuente: Daniel Enríquez M.

pieza de madera ha sido propuesta de tal forma, que aprovechando el mínimo de material, pueda brindar grandes aportes a la resitencia a compresión del elemento. Por otra parte, se encuentran la platina metálica "T", la cual ya ha sido utilizada en propuestas anteriores, su uso se remite a reducir las deformaciones, a través de soportar esfuerzos a tracción producidos en la cara inferior del elemento de madera.

El objetivo de este sistema mixto está en aprovechar las ventajas de dos materiales,

para generar un método de reforzamiento eficaz y sobre todo económico; por tal motivo, el sistema ha sido aplicado a una probeta de madera con 100 años de antigüedad. Es importante recordar que dicha muestra perteneció al grupo “I” de maderas antiguas y que surgió del elemento dintel C.

Las condiciones de la pieza fueron aceptables, ya que manifestó poca presencia de polilla, a pesar de su exposición a la intemperie. El único defecto presente, fue el deterioro y la ausencia de material en las aristas de la cara inferior, sin embargo, el defecto no incidió en el resultado final.

El propósito de aplicar un refuerzo mixto, a una pieza de madera antigua, es demostrar la capacidad portante que puede alcanzar el material al incrementar su resistencia, y así determinar de manera técnica, cómo un sistema de reforzamiento, puede devolver las condiciones de resistencia, perdidas a través de los años.

Para efectuar el ensayo, fue necesario preparar la probeta C, regulando sus dimensiones, ya que presentó irregularidad en su sección. Después de realizar los mencionados procesos, la dimensión obtenida fue de 12 x 11 x 100 cm. Por otra parte, las medidas del refuerzo de madera, fueron de 14 x 3,5 x 100 cm. y con eucalipto nuevo. En lo que respecta al segundo refuerzo metálico, sus dimensiones fueron las mismas que se aplicaron a sistemas anteriores. (Figura 4.43)

- Datos de laboratorio

El desarrollo del ensayo representó los comportamientos más interesantes de entre todas las probetas analizadas, puesto que la muestra al ser un material antiguo y con una resistencia inferior a una pieza nueva de eucalipto, sus reacciones generaron gran expectativa en sus resultados.

Al iniciar el ensayo, las cargas se fueron definiendo con total normalidad, las cuales se encuentran expuestas en la tabla d5.



Figura 4.42. Madera con 100 años de antigüedad. Probeta “C”, reforzada con una pieza de madera y una platina metálica “T”. / Fuente: Daniel Enríquez M.

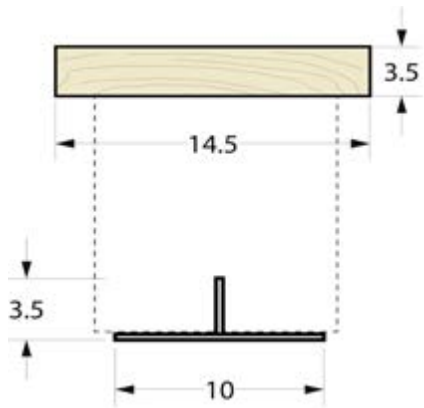


Figura 4.43. Componentes y dimensiones del sistema de reforzamiento mixto 1. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Sin embargo, a partir de la carga 8.650,00 kgf. el elemento manifestó una separación de sus fibras, de manera inesperada, disipando energía, lo cual redujo la resistencia; pero el ensayo no se detuvo y se continuó aumentando la fuerza de las cargas; en consecuencia la resistencia empezó a aumentar y a recuperar sus condiciones portantes a tal punto, que la carga final llegó a los 10.996,00 kgf, lo cual demostró que los refuerzos empezaron a actuar con mayor exigencia, luego del primer fallo en el elemento.

Al considerar el sistema con muestras de madera

Datos generales del ensayo de la “PROBETA C”. (Refuerzo mixto 1)

Tabla de Resultados. “Probeta L8”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN 50 x 10 ⁻³ pulg.
1094	50
2790	100
3570	150
4420	200
5290	250
6090	300
7000	350
7930	400
8650	450
8450	500
8630	550
8890	600
9450	650
9890	700
10105	750
9960	800
10130	850
10310	900
10480	950
10700	1000
10996	1050
10500	1100

* Carga máxima= 10.996,00 kgf.

Tabla d5. Probeta C. Tabla de resultados Carga-Deformación. / Fuente: Daniel Enríquez M. y Universidad de Cuenca

nueva, sus incrementos podrían resultar aun mejores que los alcanzados con una probeta antigua, esto se debe a que un elemento de madera nueva, presenta condiciones superiores a las antiguas. Es oportuno indicar que el deterioro del eucalipto, a través de los años, puede alcanzar hasta un 40% menos de su capacidad original.

Otro factor importante, en el proceso, dentro del respectivo análisis, fue el estado de la probeta C después del ensayo. Al observar las figura 4.44. y 4.45., se puede ver claramente que la pieza de madera no refleja grandes daños en su sección, y tampoco se distinguen separaciones entre las fibras traccionadas, a



Figura 4.44. Montaje para ensayo a flexión de Probeta C. / Fuente: Daniel Enríquez M.



Figura 4.45. Sección de la Probeta C, después del ensayo. / Fuente: Daniel Enríquez M.

pesar de ser un elemento de resistencia reducida.

Para demostrar de mejor manera el incremento que presentó la probeta C a pesar de las fallas prematuras suscitadas, resulta necesario citar los datos establecidos en la tabla b12. del capítulo II, los cuales reflejaron para la probeta A3, (muestra con 100 años de antigüedad) una carga máxima de 7077 kgf. sin duda un dato inferior al obtenido en este ensayo.

- Gráfica y resultados

Debido a los diferentes comportamientos que manifestó la probeta C, sus reacciones resultaron irregulares, por lo que la curva de esfuerzo-deformación reflejó un estado muy particular, reflejando todo el proceso ocurrido en el ensayo.

La figura 4.46. describe los diferentes propiedades mecánicas del material, en diferentes etapas. Como ya se mencionó, la recta, que se encuentra definida por los primeros puntos de la gráfica, define el rango elástico de la probeta, el cual se mantuvo regular hasta llegar al punto en donde se produjo el primer fallo, el cual al disipar energía, ocasionó un cambio en la dirección y en la forma de la recta; sin embargo, debido a los refuerzos aplicados, el elemento recuperó rápidamente su resistencia y la admisión de

carga, nuevamente empezó a incrementar.

Como consecuencia, el definir exactamente el límite de elasticidad resultó confuso, debido al extraño comportamiento que presentó la probeta, sin embargo, gracias a los análisis realizados y a los datos obtenidos fue posible determinar que el rango elástico alcanzado se mantuvo dentro de la recta de la figura de esfuerzo-deformación y los datos obtenidos después del cambio de dirección en la curva, forman parte del estado plástico del material.

Respecto a los datos obtenidos mediante la aplicación del refuerzo, como se estimó al momento del ensayo, fueron favorables para el elemento de madera, ya que se obtuvo un incremento mayor a los esfuerzos antes expuestos para maderas antiguas.

Curva de Esfuerzo-Deformación. "Probeta C" (Madera de 100 años)

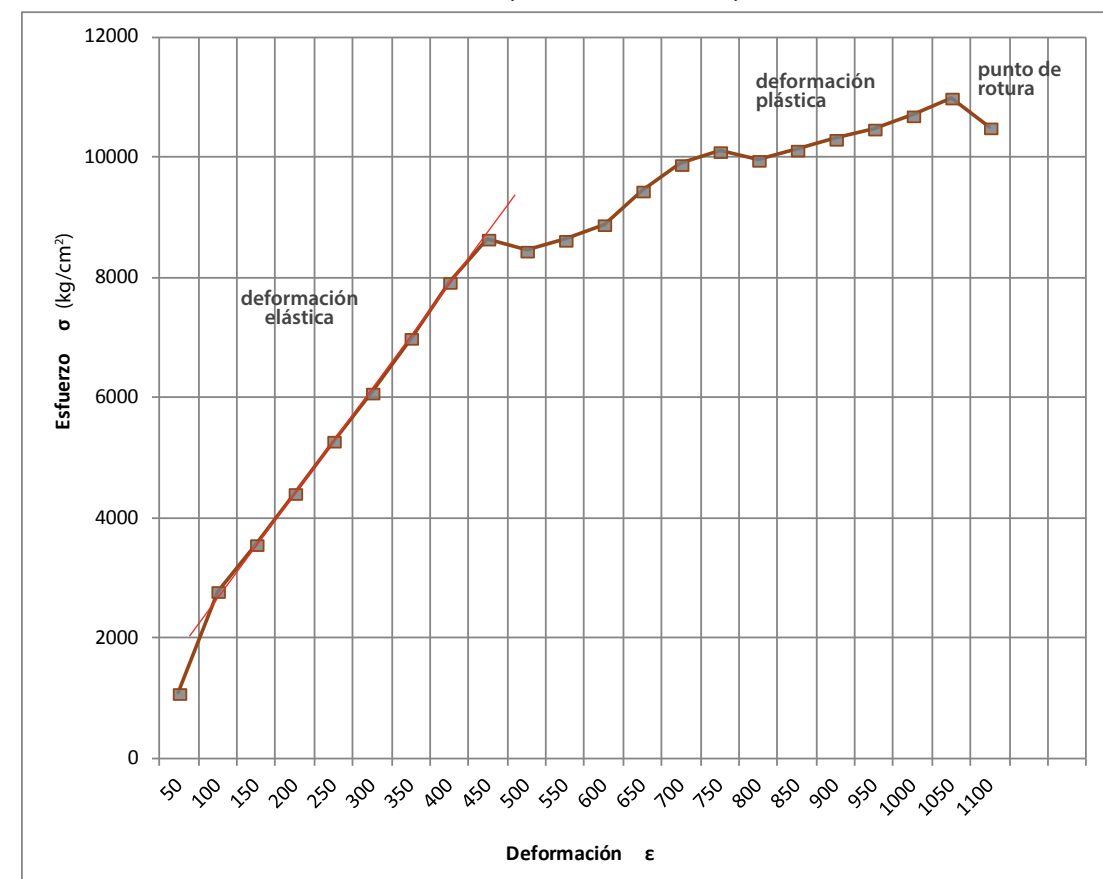


Figura 4.46. Probeta C. Curva de Esfuerzo-Deformación para elemento reforzado mediante perfil metálico. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Sin embargo, para obtener los respectivos resultados, fue necesario aplicar, nuevamente, el método de secciones equivalentes, para transformar la platina metálica, por su equivalencia en madera. Se ha determinado que el factor de transformación para el acero es $n=25,42$ por lo cual resultó sencillo interpretar la nueva sección. La figura 4.47. se detalla el proceso aplicado al refuerzo mixto, del cual se ha aprovechado para definir los resultados del sistema.

En la tabla d6. se puede observar los principales resultados del refuerzo mixto, aplicado a un elemento de madera antigua, el cual establece un incremento del 22% en su máximo esfuerzo admisible, con relación a los datos iniciales del material antiguo. Si se considera que, el máximo esfuerzo admisible, para una muestra con 100 años, es de 170 kg/cm^2 , y para una muestra nueva es de 263 kg/cm^2 ; el resultado de aplicar dicho refuerzo reflejará una recuperación de resistencia del 82%, ya que el resultado final del máximo esfuerzo admisible, es de 212 kg/cm^2 .

No hay que olvidar que el refuerzo fue aplicado a una muestra de madera antigua, lo cual significa que la capacidad resistente de la misma será menor a una madera nueva; por lo tanto, si el refuerzo es aplicado a una muestra nueva, el incremento posiblemente alcance un 25%, debido a que las condiciones de la madera nueva son mejores. Por lo tanto, resulta importante considerar que al aplicar el presente refuerzo mixto, a una probeta de madera nueva, la rigidez a flexión podrá incrementará de manera considerable, por ser un material con resistencia adecuada.

Después de haber analizado el sistema y confirmar que sus aplicación es totalmente válida para reforzar elementos de madera, resulta necesario indicar los principales aspectos que reflejó el sistema.

La idea del sistema surge como una adaptación de los material para un trabajo determinado, es decir, la pieza de madera al estar fijada a la parte superior del elemento, absorbió adecuadamente

Tabla d6.
Resultados del refuerzo mixto 1, aplicado mediante una pieza de madera y una platina metálica tipo "T".

DESCRIPCIÓN	Probeta C de eucalipto antiguo
SECCIÓN b x h (cm)	12 x 11
DEFORM. MÁX. (mm)	29,7
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm²)	212,45
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	7.823,70

Tabla d6. Probeta C. Resultados del refuerzo mixto 1, mediante una pieza de madera, más una platina metálica tipo "T". / Fuente: Daniel Enríquez M.

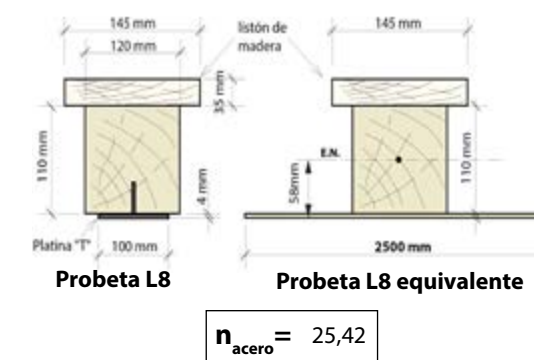


Figura 4.47. Determinación de la sección equivalente para la probeta L8. Fuente: Daniel Enríquez M.

todos los esfuerzo a compresión, mientras que la función de la platina fue la de mejorar la resistencia a la tracción y también la rigidez del elemento.

Respecto al estado final de la probeta luego del ensayo, se ha expuesto en la figura 4.48. la ruptura producida en la mitad del claro, en consecuencia la evidente deformación, confirma que el comportamiento plástico de la muestra fue notable, ya que las muestras anteriores, a pesar de resistir mayores cargas, no manifestaron sus deformaciones de la forma

que sí lo hizo la probeta antigua. Esto resulta favorable para mejorar comportamientos sísmicos u otras cargas de gran magnitud. A pesar de que el análisis de rangos plásticos de la madera, no están considerados en la presente investigación, resulta un gran aporte establecer los estados de cada probeta luego de ser reforzada con los diferentes sistemas desarrollados.

4.4. SIMULACIÓN DIGITAL DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO MIXTO

Las diferentes dificultades presentadas por la adquisición de fibras de carbono, para desarrollar los respectivos ensayos de laboratorio, limitaron los análisis de sistemas mixtos desarrollados por la presente investigación. Por la baja demanda y los altos costos de las fibras de carbono, fue necesario utilizar medios alternos para obtener resultados de cada reforzamiento.

Al momento de definir las técnicas nuevas de reforzamiento, se detalló que los sistemas mixtos 2 y 3 (Figuras 4.21. y 4.22.) serían analizados a través de medios digitales, en donde se simularía una situación similar a las presentadas en los ensayos realizados en laboratorio.

Es importante considerar que la modelación digital genera prototipos perfectos, con cualidades inmejorables, respecto a su materialidad y forma, por lo cual los resultados reflejarán datos muy elevados y, necesariamente, deberán ser considerados en un porcentaje menor, por cuestión de seguridad en las estructuras analizadas. A través de la investigación, se pudo confirmar que la madera está sujeta a varios cambios de forma y resistencia; consecuencia de defectos, por lo que considerar un elemento de madera como un material perfectamente homogéneo y libre de defectos es un error, ya que los programas digitales no ha logrado simular con precisión hasta el día de hoy; sin embargo, esto no significa que los datos obtenidos a través de dichos medios, sean de poca confiabilidad, por el contrario,



Figura 4.48. Deformación permanente de la probeta C, después del ensayo. / Fuente: Daniel Enríquez M.

generan una gran aproximación a los resultados esperados, pero bajo los limitantes indicados.

Otro factor importante al trabajar con modelación digital de sistemas de reforzamiento, es que al utilizar fibras de carbono de fabricación Sika (Carbodur), las especificaciones expuestas por dicha empresa fabricante establecen que la resistencia a tracción del material es de 28.000 kg/cm², una capacidad muy grande, si se considera que el acero tiene una resistencia a la tracción de 3500 kg/cm². Entonces, si la fibra alcanza tal cantidad, el sistema digital establecerá el dato íntegramente, lo cual incrementará los resultados finales; por lo tanto, hay que considerar, nuevamente, que las resistencias establecidas, no reflejarán lo obtenido en muestra real, ya que la verdadera resistencia lo establecerá la resina epóxica, puesto que de ella dependerá el comportamiento del refuerzo.

En resumen, considerar las capacidades resistentes de cada material, a través de los programas digitales, siempre darán como resultado, datos de gran magnitud, llegando a incrementar las capacidades portantes, hasta cuatro veces más, que un elemento ensayado físicamente; sin embargo, cada sistema modelado de forma digital ha sido cotejado con los resultados y comportamientos de muestras reales, definiendo como válido los procesos de los refuerzos mixtos 2 y 3, con rangos de error muy pequeños.

4.4.1. Software utilizado para la modelación digital

Entre la gran disponibilidad de programas digitales para cálculos estructurales, el elegido para realizar los análisis de los sistemas propuestos fue el software de fabricación italiana "SeismoStruct". Este programa es utilizado de manera generalizada, para análisis estructurales, el cual es capaz de medir comportamientos estáticos y dinámicos en pórticos o elementos individuales.

El programa enfoca el análisis de las estructuras, especialmente, en sus rangos elásticos, definiendo de manera exacta curvas de deformación, tensiones y demás capacidades mecánicas de cualquier material. Su uso ha sido diseñado para un carácter más académico, por lo tanto, fue posible realizar la simulación de las pruebas con gran precisión, las cuales fueron realizadas con probetas pequeñas en longitud y cargas puntuales, ubicadas en los tercios de su longitud. La modelación y la obtención de una tabla de datos aportaron en gran medida a la determinación de resultados.

Los datos expuestos de carga y deformación, utilizaron el sistema de unidades actual; es decir, que para cargas la unidad fue en kilonewtons, mientras que las deformaciones fueron expresadas en metros.

La figura 4.49. representa la hoja de cálculo del programa y las gráficas de esfuerzo-deformación que se pueden obtener, a través de modelar los elementos estructurales, con la gran ventaja, de generar las condiciones que presenta cada material. Por otro lado, la figura 4.50. representa los procesos que fueron aplicados para la determinación de los principales datos de los sistemas mixtos 2 y 3, desarrollados en la presente investigación.

En resumen, el programa utilizado brinda la posibilidad de modelar elementos de diferente forma y tamaño, por lo cual resultó un gran aporte para la obtención de datos, en cada

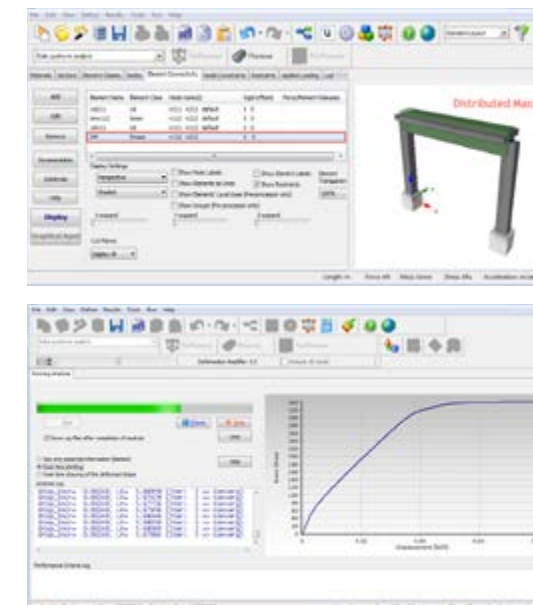


Figura 4.49. Hojas de cálculo del software "SeismoStruct". / Fuente: www.seismosoft.com

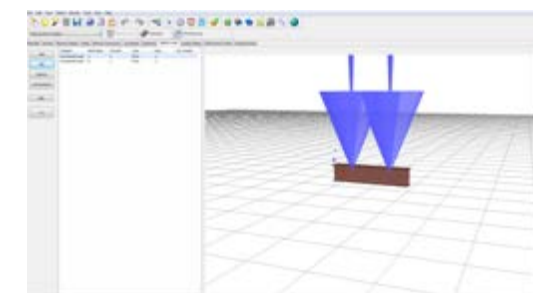


Figura 4.50. Modelación digital de un elemento estructural, a través de "SeismoStruct". / Fuente: www.seismosoft.com

sistema de reforzamiento mixto; es importante recalcar que se realizaron los respectivos procesos digitales, debido a los altos costos y a la poca disponibilidad que proporcionan las fibras de carbono, lo cual imposibilitaba el análisis de los sistemas desarrollados.

4.4.2. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 2, mediante pieza de madera y fibras de carbono

Para la modelación digital del sistema

mixto 2, se han establecido dimensiones reales entre los principales componentes de un refuerzo, simulando un caso específico de reforzamiento a una viga (Probeta L9), la cual contempla como primer elemento: un listón con dimensiones de 200 x 50 x 1000 mm., fijado a la cara superior de una viga de madera de 200 x 200 x 1000 mm; y, por su cara inferior, la fijación de tres fibras de carbono de 50 x 1,2 mm. (Figura 4.51)

Como se mencionó, el ensayo a flexión estática con medios digitales presentó los mismos criterios aplicados en las prácticas de laboratorio, es decir, se consideró una porción de viga de 1 metro, con las dimensiones ya indicadas y con fuerzas aplicadas de manera puntal, en los tercios de la misma. La diferencia entre los ensayos se produjo en los rangos de medida para las deformaciones, los cuales fueron tomadas cada 0.15 cm y las cargas estuvieron en Kilonewtons (kN).

El cambio de unidades se debe a una estandarización de datos, los cuales responden a un sistema internacional de unidades, sin embargo, la investigación considera pertinente, mantener el sistema de unidades antiguo, es decir, Kilogramos-Fuerza (Kgf) para cargas y centímetros (cm) para medidas de longitud, área, volumen, etc. De ser el caso, en que se solicite un sistema de unidades internacional, resulta factible y rápido aplicar transformaciones a los todos los resultados expuestos.

Para obtener los respectivos resultados de las cargas aplicadas y deformaciones del prototipo generado, la figura 4.52. representa el esquema del ensayo, el cual bajo los condicionantes indicados determinó cargas de gran magnitud, por lo tanto, se puede interpretar que el incremento de las capacidades elásticas serán superiores a las obtenidos con los sistemas desarrollados de manera física.

- Datos generales del ensayo

La obtención de datos para la generación de la

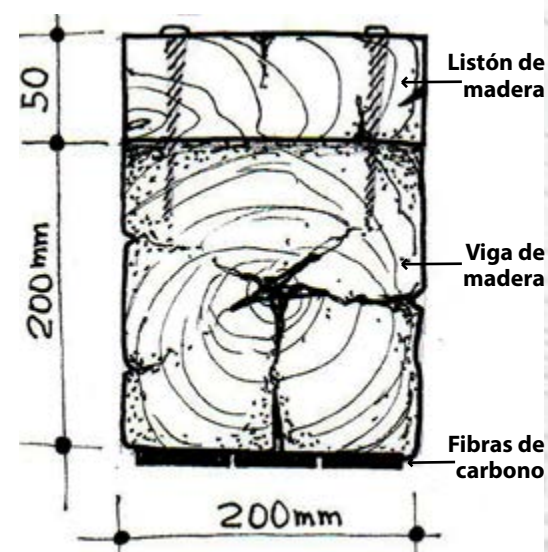


Figura 4.51. Sección de la Probeta L9. Refuerzo mixto 2, con una pieza de madera y fibras de carbono. / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

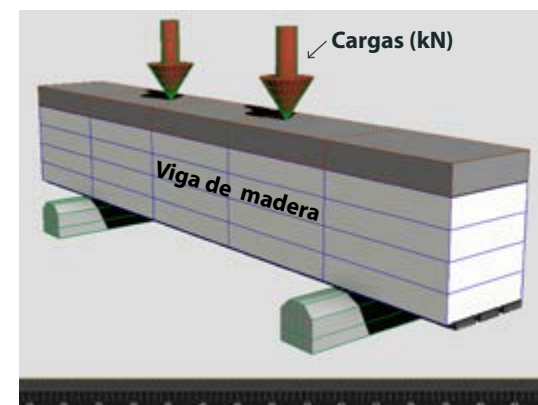


Figura 4.52. Modelación digital del sistema de reforzamiento mixto 2, con pieza de madera y fibras de carbono. / Fuente: Daniel Enríquez M.

tabla de cargas y deformaciones fue a través de varios incrementos en las fuerzas, con el objetivo de generar resultados precisos y a la vez determinar una gráfica de esfuerzo-deformación regular. La cantidad de datos que expuso el programa, fueron alrededor de 400, sin embargo, para el respectivo análisis y representación del sistema, se ha reducido dicha cantidad, de tal manera que las deformaciones se presentan a cada 0.30 cm.

Tabla de resultados digitales. "Probeta L9"

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN cm.
0	0
27631.66	0.3
55316.41	0.6
83111.65	0.9
111072.56	1.2
138976.18	1.5
161102.53	1.8
174386.86	2.1
183275.76	2.4
189754.28	2.7
194750.02	3
198884.28	3.3
202447.02	3.6
205704.25	3.9
206737.40	4.2

Tabla d7. Probeta digital L9. Tabla de resultados Carga-Deformación, obtenida a través de modelación digital. / Fuente: Daniel Enríquez M. & Ing. Hernán Gracia.

En la tabla d7. se encuentran expuestos los resultados del ensayo realizado de manera computarizada, en donde se puede observar las cargas con unidades ya transformadas a Kgf, mientras que las deformaciones se mantienen en cm. Como ya se mencionó, los datos expuestos han sido reducidos, debido a la cantidad obtenida. A pesar de tener datos reducidos, la determinación de sus principales factores elásticos no presentó complicaciones y, por el contrario, se pudo analizar adecuadamente, cada término, en especial los del rango elástico.

- Gráfica y resultados

Dentro de la presente investigación, el método de secciones equivalentes se ha convertido en un proceso fundamental para la determinación de resultados de elementos compuestos por diferentes materiales, ya que los reforzamientos existentes y desarrollados, exponen sistemas con elementos de diferente materialidad, convirtiendo una viga de madera, en una pieza compuesta por uno o dos materiales.

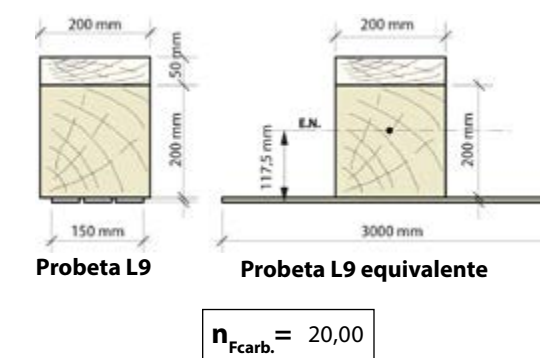


Figura 4.53. Determinación de la sección equivalente para la probeta L9. Fuente: Daniel Enríquez M.

En consecuencia, para obtener los resultados del sistema mixto 2 se ha determinado el factor "n" para fibras de carbono con un valor de 20. Dicho factor representa la equivalencia, entre materiales, es decir, dentro del sistema desarrollado: 1 cm² de fibra de carbono equivale a utilizar 20 cm² de madera, por lo tanto, en la figura 4.53. se define la sección equivalente para el presente caso.

Al obtener la sección homogénea del sistema, se ha procedido a determinar los respectivos resultados, aplicando las fórmulas ya conocidas para la flexión, obteniendo primeramente la gráfica de carga-deformación. La figura 4.54. representa de forma detallada la curva del comportamiento mecánico del sistema propuesto, la cual se diferencia de las demás gráficas expuestas en incisos y capítulos anteriores, por la precisión y regularidad de sus etapas. Al ser un ensayo realizado de manera digital, los procesos interpretaron al prototipo modelado, como un elemento perfecto, con adherencias entre materiales exactos, es decir, la prueba representó materiales perfectos y libres de falla, lo cual incrementó los resultados más allá de una expectativa real, sin embargo, han sido de gran ayuda para definir la resistencia general del sistema.

Finalmente, los resultados obtenidos para el sistema mixto 2 reflejaron incrementos de gran magnitud para las capacidades portantes del material. La tabla d8. establece claramente, que el máximo esfuerzo alcanzó los 588,33 kg/cm², un valor que, sin duda, es por el aporte de las fibras de carbono.

Al comparar el resultado determinado con los inicialmente establecidos, el sistema responde a un incremento de más del 120% de su resistencia, es decir, si se considera que la madera posee un valor inicial de 263 kg/cm², en su esfuerzo máximo, al aplicar el refuerzo propuesto, la resistencia podría alcanzar, sin problemas, el doble de su capacidad.

Sin embargo, tal resultado no debería ser interpretado íntegramente, ya que al ser obtenido a través de medios digitales, las condiciones propias de la madera y de los refuerzos, no son expuestas

Tabla d8.
Resultados del refuerzo mixto 2, aplicado mediante una pieza de madera y 3 fibras de carbono.

DESCRIPCIÓN	Probeta L9, a través de modelación digital
SECCIÓN GENERAL b x h (cm)	20x20
DEFORM. MÁX. (mm)	40,2
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm ²)	588,33
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kg / cm)	21.109,00

Tabla d8. Probeta L9. Resultados del refuerzo mixto 2, mediante una pieza de madera, más fibras de carbono. Obtenidos con simulación digital / Fuente: Daniel Enríquez M.

Curva de Carga-Deformación. "Probeta L9" (Modelo digital)

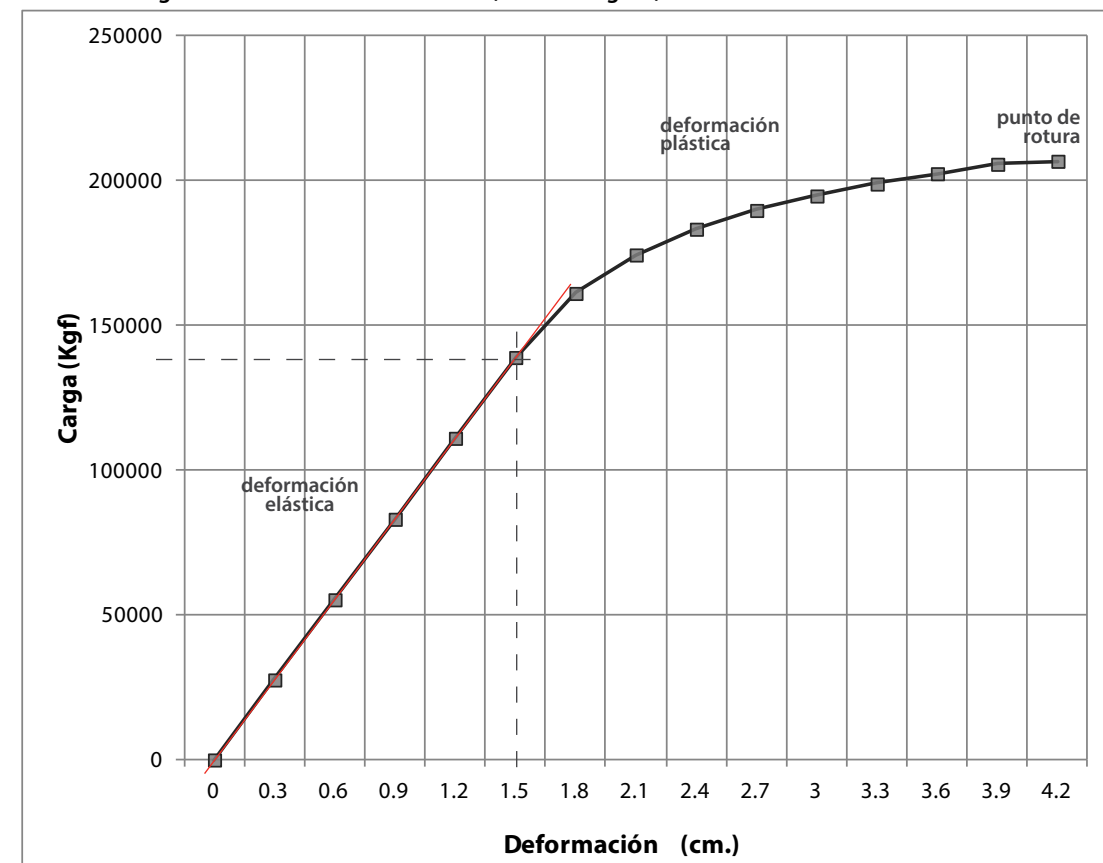


Figura 4.54. Probeta L9. Curva de Carga-Deformación para elemento reforzado mediante pieza de madera y fibras de carbono. / Fuente: Daniel Enríquez M.

adecuadamente; es decir, un programa digital interpreta a los elementos con materialidades perfectas, y fijaciones exactas, lo cual no ocurre en la realidad, puesto que la madera siempre presentará defectos de diferente tipo y las uniones entre refuerzos no alcanzarán tal precisión. Por lo tanto, a través de análisis y estudios realizados a los comportamientos de cada material, se sugiere que los resultados finales sean considerados con un 50% menos, es decir, si el refuerzo determinó un incremento del 120%, se sugiere una interpretación de sólo el 60% en el incremento.

4.4.3. Ensayo a flexión estática. Sistema mixto 3, mediante platina metálica tipo "T" y fibras de carbono

Como una alternativa al sistema anterior, surge la propuesta que contempla el uso de una platina metálica, a cambio de la pieza de madera fijada por la cara superior del elemento, manteniendo el uso de las fibras de carbono en la cara inferior de la viga de madera. Al referirse a una alternativa mejorada del método anterior, se hace referencia a que el refuerzo mixto 3 presenta las mismas características que el anterior y su proceso de análisis, será igual, es decir, a través de modelación digital.

En la figura 4.55. se determinan los principales componentes del sistema desarrollado, presentando una platina metálica "T" fijada a la cara superior del elemento, y 3 fibras de carbono adheridas a la cara inferior del mismo, los cuales serán modelados digitalmente para la obtención de sus resultados.

Al analizar los componentes del refuerzo, sin duda alguna, anticipa que los incrementos se darán de manera cuantiosa, superando inclusive al sistema mixto 2; esto se debe a la sustitución de la pieza de madera por una platina metálica, la cual representa mejores condiciones de resistencia, bajo incremento de peso y optimización del espacio. Si a esto se le suma las bondades de cada fibra de

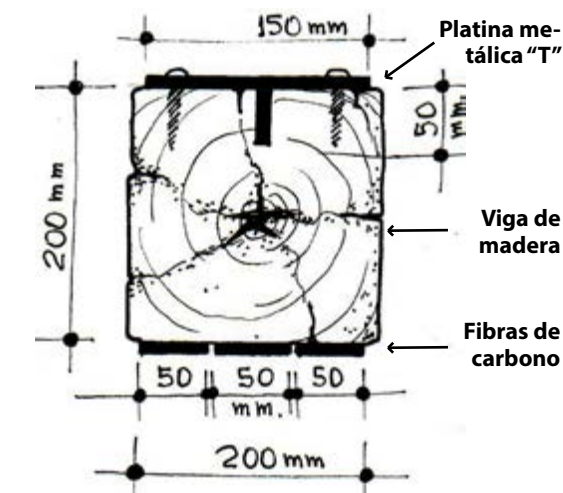


Figura 4.55. Sección de la Probeta L10. Refuerzo mixto 3, con platina metálica y fibras de carbono. / Fuente: Arq. Clever Enríquez M.

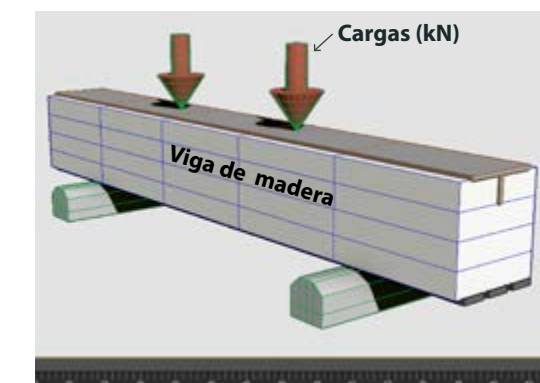


Figura 4.56. Modelación digital del sistema de reforzamiento mixto 3, con platina metálica y fibras de carbono. / Fuente: Daniel Enríquez M.

carbono, el sistema de reforzamiento estructural mixto se convertirá en el mejor método desarrollado para elementos de madera, ya que sus resultados serán inmejorables y totalmente aplicables a cualquier componente de una estructura.

- Datos generales del ensayo

Como se anticipó, el ensayo a flexión del sistema propuesto se manejó de la misma manera que el anterior. La figura 4.56. representa el esquema utilizado para la obtención de los primeros datos de carga y deformación, dentro de la simulación digital, con datos expuestos cada 0.15 cm de deformación y cargas en kilonewtons.

Tabla de resultados digitales. “Probeta L10”

CARGAS kgf	DEFORMACIÓN cm.
0	0
26319.54	0.3
52698.02	0.6
79199.05	0.9
105883.81	1.2
132813.43	1.5
158598.61	1.8
180315.98	2.1
193781.37	2.4
201100.66	2.7
206786.84	3
211483.84	3.3
215624.57	3.6
219433.19	3.9
223071.17	4.2
226612.95	4.5

Tabla d9. Probeta digital L10. Tabla de resultados Carga-Deformación, obtenida a través de modelación digital. / Fuente: Daniel Enríquez M. & Ing. Hernán Gracia.

La tabla d9. de resultados representa los datos obtenidos dentro de la simulación digital para la probeta L10, los cuales han sido nuevamente seleccionados, entre un gran cantidad de información, disminuyendo el número de cargas con deformaciones a cada 0.30 cm. Las unidades de las cargas han sido transformadas a kilogramos fuerza, para mantener un sistema de medida uniforme.

Si se observa la tabla de resultados, se puede distinguir que cada carga refleja una gran magnitud de fuerza, lo cual da cuenta que el sistema ha reaccionado de manera favorable y que sus resultados finales serán cuantiosos. Sin embargo, no se debe dejar de lado los criterios sugeridos para la interpretación de resultados obtenidos a través de programas digitales. Recuerde que los datos son determinados, con elementos supuestamente perfectos y carentes de fallas naturales, por lo tanto, la lectura de los datos finales, nuevamente, sugiere un 50% menos del total establecido.

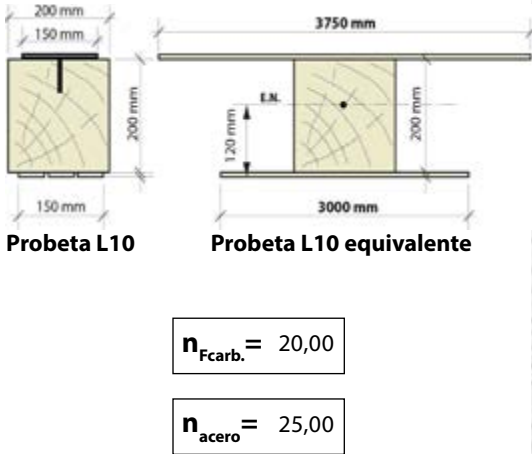


Figura 4.57. Determinación de la sección equivalente para la probeta L9. Fuente: Daniel Enríquez M.

Al presentarse nuevamente, el caso de combinación de materiales en un solo elemento surge la necesidad de aplicar el método de secciones equivalentes, pero en este caso se lo debe realizar a través de dos factores. El primer factor corresponde al de las fibras de carbono, mientras que el segundo se utiliza para el acero.

La figura 4.57. representa la sección equivalente del sistema de reforzamiento mixto, en la cual se establece dos láminas de madera con diferentes dimensiones, en la parte superior e inferior del elemento. La lámina superior es el resultado de aplicar una equivalencia de acero a madera, al ser el factor $n=25$ para el acero, la dimensión del componente superior será mayor. Por otro lado, la lámina inferior representa el resultado de transformar los 15cm de fibra de carbono a madera, pero manteniendo el alto establecido de 1,2mm.

Al igual que el caso anterior, la figura 4.58. representa la curva de carga-deformación del elemento reforzado, la cual por cuestiones de precisión en el cálculo del programa se manifiesta de manera regular, sin variaciones notorias, definiendo el rango elástico con una recta exacta, seguida por un punto de inflexión que representa

al límite de elasticidad, y, a partir de allí se define claramente el rango plástico del elemento.

Como ya se anticipó, los resultados obtenidos por medio de la simulación digital, representados en la tabla d10., reflejaron considerables incrementos. Así que para el esfuerzo máximo se estableció que el refuerzo alcanzó 654 kg/cm^2 , superando a cualquier dato determinado dentro de esta investigación. Al no estimar defectos presentes en la madera y no considerar la deficiencia de unión entre los refuerzos, la precisión en el resultado final se reduce considerablemente; por tal motivo, se recomienda interpretar el resultado final solo en un 90% más que el dato inicial, lo cual no deja de ser favorable para elemento de madera en deterioro, Es decir, al saber que el dato del máximo esfuerzo para madera de eucalipto sin reforzar, es de 263 kg/cm^2 , y que después de

Tabla d10. Resultados del refuerzo mixto 3, aplicado mediante una platina metálica y 3 fibras de carbono.

DESCRIPCIÓN	Probeta L10, a través de modelación digital
SECCIÓN GENERAL b x h (cm)	20x20
DEFORM. MÁX. (mm)	42,0
ESFUERZO MAX. ADMISIBLE (kgf/cm²)	654,94
RIGIDEZ A FLEXIÓN (Kgf / cm)	18.551,00

Tabla d10. Probeta L10. Resultados del refuerzo mixto 3, mediante una platina metálica, más fibras de carbono. Obtenidos con simulación digital / Fuente: Daniel Enríquez M.

aplicar el refuerzo, el incremento ascenderá a 500 kg/cm^2 , lo cual sin duda, genera un elemento adecuado para los procesos de restauración.

Curva de Carga-Deformación. “Probeta L10” (Modelo digital)

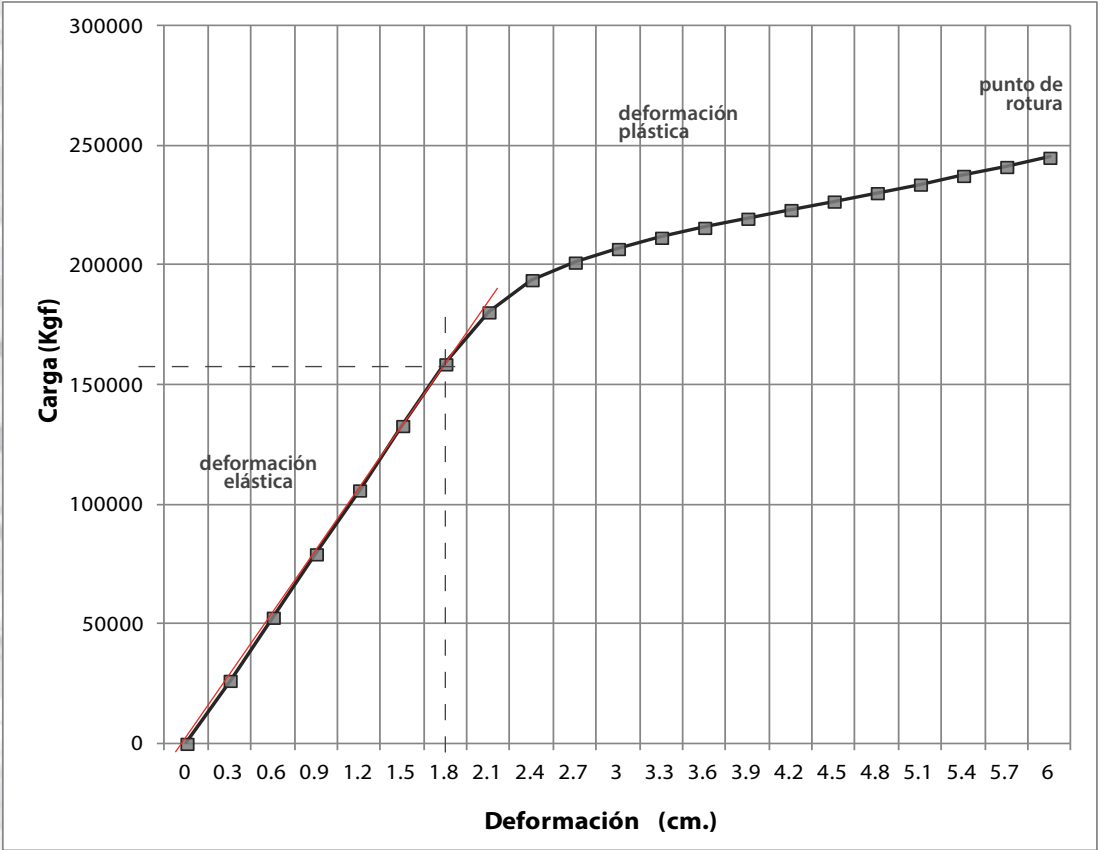


Figura 4.58. Probeta L10. Curva de Carga-Deformación para elemento reforzado mediante platina metálica y fibras de carbono. / Fuente: Daniel Enríquez M.

4.5. RESULTADOS E INCREMENTOS DE TÉCNICAS DESARROLLADAS

Después de haber analizado cada sistema de reforzamiento, propuesto en la presente investigación, resulta necesario establecer los incrementos que pueden llegar a alcanzar los tres diferentes grupos de maderas, que fueron divididos según sus años de antigüedad: madera de 100 años (Grupo I), madera de 50 años (Grupo II) y madera nueva (Grupo III).

Antes de ser expuestos los resultados para cada grupo de madera, es importante indicar que los sistemas desarrollados fueron expuestos desde el reforzamiento más óptimo, hasta el de menor eficacia, pero sin considerar los sistemas analizados con modelación digital, ya que sus datos no se los considera aplicables para maderas antiguas, puesto que los deterioros manifiestan diferentes deficiencias de resistencia, y el programa no define con exactitud ciertos fallos.

Como principal refuerzo desarrollado, se presenta al sistema aplicado con doble platina metálica "T", pues como se pudo observar, predominaron las ventajas ante las desventajas de los demás refuerzos, puesto que mejoró las condiciones de resistencia y rigidez, también, mejoró la composición estética y optimizó el peso total de la estructura.

El segundo refuerzo y alternante del primero estableció el uso de perfiles metálicos "C". Un método igual de eficaz, pero poco discreto para mimetizarse entre los elementos de madera, alterando notoriamente la composición estética de la estructura, sin embargo, el incremento de su resistencia fue de mayor magnitud que el sistema anterior, además optimizó costos, por ser un elemento prefabricado y fácil de instalar.

El tercer sistema de reforzamiento estructural hace referencia a la combinación de dos métodos, los cuales reflejaron notables incrementos, por lo tanto, se propuso la implementación de estos

sistemas para generar un refuerzo mixto, el cual contempla el uso de madera y acero, mejorando especialmente la rigidez de los elementos de madera y, aumentando la capacidad a flexión.

4.5.1. Reforzamientos aplicados a muestras de 100 años

La principal característica en la madera de 100 años es el deterioro que adquiere el material por factores propios del tiempo, determinando un déficit del 40% a su resistencia original, es decir, para una muestra sin reforzar, el esfuerzo máximo tendrá un valor de 170 kg/cm², por lo tanto, el objetivo de cada refuerzo desarrollado será devolver dicha pérdida, pero sin alterar la estética del elemento.

Al aplicar cada refuerzo en muestras de 100 años, los resultados se han reflejado en la tabla d11., en la cual se detalla el incremento de resistencia, respecto a la inicial. No se debe olvidar que la madera originalmente posee una resistencia de 263 k/cm², por lo tanto, cada refuerzo deberá aproximar su incremento a dicho valor, pero además, deberá contemplar un aumento de rigidez adecuado para disminuir las deformaciones y garantizar un rango elástico mayor al original.

Como primer resultado, se encuentra el reforzamiento aplicado a través de platinas metálicas, el cual fue determinado como el mejor sistema, ya que a más de aumentar el esfuerzo máximo del elemento, aporta considerablemente a la rigidez del mismo, debido a las características propias de los refuerzos. Se puede observar que el esfuerzo ha alcanzado el 84% de su valor inicial, lo cual resulta adecuado para maderas antiguas, ya que para validar los resultados de un refuerzo con dicho material, el valor deberá aproximarse a un 80%, por lo tanto, se confirma la eficacia del sistema.

Tabla d11.
Resultados de los sistema de reforzamiento desarrollados, aplicados a probetas con 100 años de antigüedad.Esfuerzo máx. admisible y Rigidez a flexión.

PROBETA SIN REFORZAR		REFUERZO MEDIANTE DOBLE PLATINA METÁLICA TIPO "T"		REFUERZO MEDIANTE PERFIL METÁLICO "C"		REFUERZO MIXTO 1, MEDIANTE PIEZA DE MADERA Y FIBRAS DE CARBONO	
$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)
170,00	873,35	221,00	8.735,10	226,00	4.742,14	212,50	7.823,70
Incremento % respecto al inicial		84%		86%		80%	

Tabla d11. Resultados de los sistemas de reforzamiento desarrollados, para maderas de 100 años/ Fuente: Daniel Enríquez M.

A pesar de no tener el valor más alto del esfuerzo entre los sistemas, ya que el refuerzo con perfil metálico "C", logró mejorar el dato, el sistema de platinas metálicas confirma su eficacia, debido al incremento que alcanzó la rigidez a flexión, lo cual garantiza una resistencia a deformaciones muy superior los demás sistemas.

El segundo sistema de reforzamiento, mediante un perfil metálico "C", ha logrado un incremento superior al método anterior, pero con una diferencia mínima, ya que su incremento fue del 86%, es decir, con un esfuerzo máximo de 226 kg/cm². Dicho resultado, al ser muy óptimo y brindar

una gran capacidad elástica al material, no ha logrado incrementar la rigidez, como sí lo hizo el sistema de platinas, sin embargo, el dato obtenido es totalmente válido para el sistema. Por su lado, el tercer sistema propuesto, logró un mejoramiento del 80%, pero a pesar de ser el menor resultado obtenido entre los refuerzos desarrollados, su incremento presenta grandes aportes de elasticidad al elemento. El esfuerzo presentó un valor de 212 kg/cm², lo cual es aceptable para una madera antigua.

Para una mejor compresión de los resultados obtenidos a

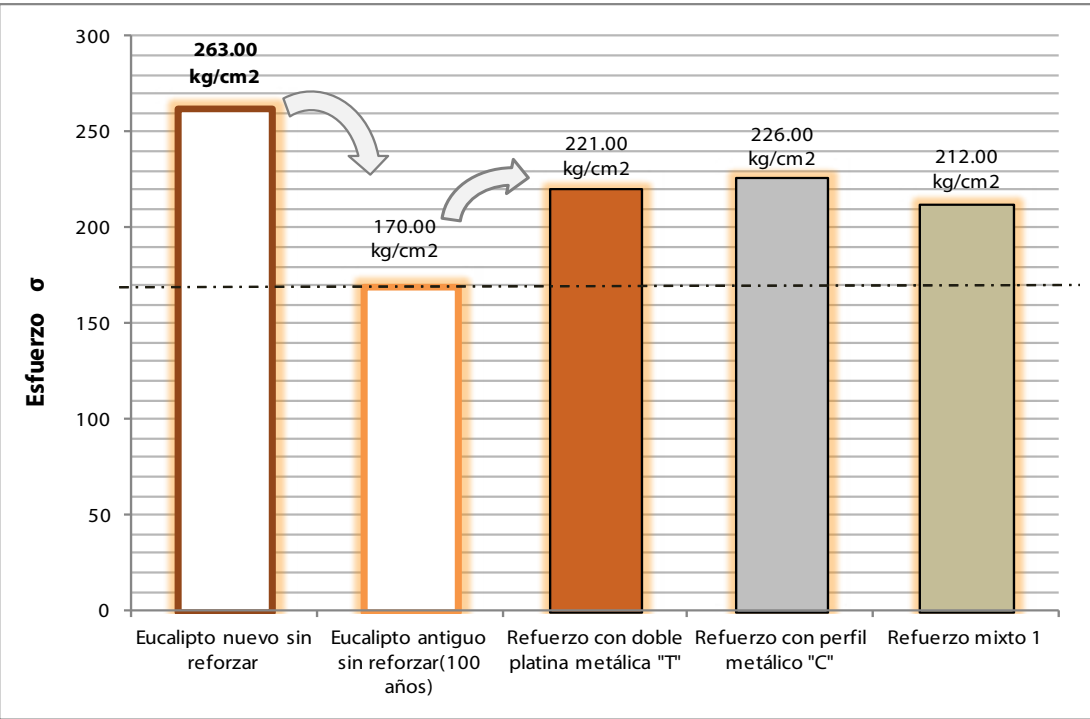


Figura 4.59. Esfuerzos máximos de muestras con 100 años de antigüedad, después de aplicar sistemas de reforzamiento estructural. / Fuente: Daniel Enríquez M.

través de cada refuerzo, se ha expuesto en la figura 4.59. mediante la representación de barras, la pérdida de resistencia en 100 años. Pero tras aplicar un reforzamiento, la madera recupera las condiciones en diferentes porcentajes: su resistencia. Cabe indicar, que la primera barra representa a un elemento de madera, nuevo y sin reforzar, mientras que la segunda barra, equivale a un elemento antiguo que sufrió una pérdida en su resistencia del 40%, y las tres últimas barras corresponden a cada sistema propuesto por el presente documento.

4.5.2. Reforzamientos aplicados a muestras de 50 años

Como ya se determinó, la condiciones de la madera con 50 años de antigüedad reflejan mejores resistencias que las muestras anteriores, ya que su deterioro presenta un déficit del 25%, por lo tanto, el resultado referencial para el esfuerzo máximo con dicha madera es de 221 kg/cm². Para presentar los resultados de cada refuerzo, se mantiene la secuencia de presentación, es decir, se exponen los datos, desde el principal sistema, hasta el de menor rendimiento, obviamente, el orden no fue alterado, ya que el sistema de platinas, nuevamente fue el mejor para este tipo de madera.

La tabla d12. presenta los datos obtenidos para cada sistema de reforzamiento estructural. Por un lado, el primer método con platinas metálicas ha reflejado un incremento del 109% en su esfuerzo máximo, es decir, el refuerzo logró recuperar la resistencia perdida a través de los años y mejorar dicho dato, puesto que su valor fue de 287,30 kg/cm², considerando que el dato original es de 263 kg/cm².

Nuevamente, el actual sistema confirmó su eficacia debido al incremento que alcanzó la rigidez a flexión del elemento, sin duda es la mejor lograda para la madera de estas características, lo cual establece que el material soportará

grandes cargas para producir deformaciones, mejorando notablemente el rango elástico.

El segundo sistema con perfil metálico “C” expone un incremento del 111% en su esfuerzo máximo; pero a pesar de haber obtenido un valor mayor que el método anterior, reflejado en 293 kg/cm², la diferencia no es de consideración, por lo cual se podría hacer uso de cualquier sistema en estructuras que soliciten refuerzos de este tipo, sin embargo, la aplicación de perfiles metálicos generó un incremento a la rigidez, superior al sistema de platinas, por lo tanto dicho refuerzo se ratifica su eficacia estructural.

Como último sistema aplicado, se utilizó al método mixto 1, el cual a pesar de tener el menor rendimiento de entre los tres propuestos, su aporte fue de gran ayuda para mejorar los comportamientos elásticos del material. Se evidenció, que tanto la pieza de madera, como la platina metálica, mejoraron la capacidad elástica del elemento, a través de soportar grandes cargas y deformaciones.

El resultado obtenido con el sistema mixto 1 no se alejó de los demás refuerzos, puesto que su incremento fue de 105%, lo que significa que su esfuerzo máximo recuperó totalmente su capacidad y superó levemente al dato establecido para madera nueva, pues su resultado fue de 276,25 kg/cm².

El incremento de la rigidez a flexión, también, presentó un gran aporte al elemento, puesto que su resultado fue mayor que el obtenido con el sistema de perfiles metálicos, pero inferior al método principal con platinas, lo cual ubica al sistema como un proceso aceptable para devolver capacidades elásticas a madera, especialmente antigua.

Tabla d12.
Resultados de los sistema de reforzamientodesarrollados, aplicados a probetas con 50 años de antigüedad. Esfuerzo máx. admisible y Rigidez a flexión.

PROBETA SIN REFORZAR		REFUERZO MEDIANTE DOBLE PLATINA METÁLICA TIPO “T”		REFUERZO MEDIANTE PERFIL METÁLICO “C”		REFUERZO MIXTO 1, MEDIANTE PIEZA DE MADERA Y FIBRAS DE CARBONO	
$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)
221,00	1.272,70	287,30	10.288,10	293,93	5.585,23	276,25	9.300,00
Incremento % respecto al inicial		109%		111%		105%	

Tabla d12. Resultados de los sistemas de reforzamiento desarrollados, para maderas de 50 años/ Fuente: Daniel Enríquez M.

Para mejorar la apreciación, nuevamente, se expone en la figura 4.60. los incrementos obtenidos por cada sistema de reforzamiento, aplicado a madera de 50 años. La primera barra corresponde a una muestra de madera nueva y sin ser reforzada, seguida por una muestra antigua, definiendo entre las dos, el deterioro que se produce por el pasar de los años. Las siguientes tres barras representan los incrementos que alcanzó cada sistema propuesto, confirmando que la diferencia entre los dos primeros, no es de consideración.

4.5.3. Reforzamientos aplicados a muestras nuevas

La utilización de madera nueva, sin duda, aportó resultados referenciales para que muestras antiguas puedan definir sus incrementos a través de la aplicación de refuerzos desarrollados y existentes, direccionando los procesos de rehabilitación, exclusivamente en edificaciones antiguas; sin embargo, parte de los objetivos generales del documento, enfocan sus procesos para ser aplicados a madera nueva, ya

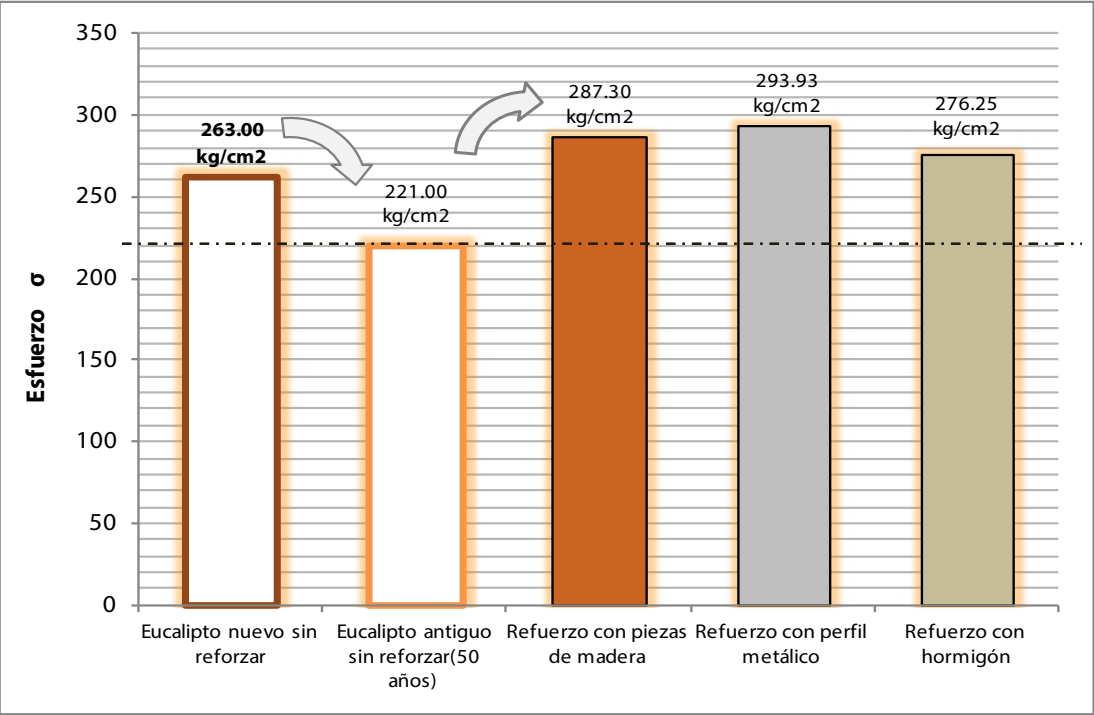


Figura 4.60. Esfuerzos máximos de muestras con 50 años de antigüedad, después de aplicar sistemas de reforzamiento estructural. / Fuente: Daniel Enríquez M.

Tabla d13.
Resultados de los sistema de reforzamientodesarrollados, aplicados a probetas nuevas.
Esfuerzo máx. admisible y Rigidez a flexión.

PROBETA SIN REFORZAR		REFUERZO MEDIANTE DOBLE PLATINA METÁLICA TIPO "T"		REFUERZO MEDIANTE PERFIL METÁLICO "C"		REFUERZO MIXTO 1, MEDIANTE PIEZA DE MADERA Y FIBRAS DE CARBONO	
$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)	$\sigma_{\text{MAX. ADM.}}$ (kgf/cm ²)	$K_{\text{FLEXIÓN}}$ (Kgf / cm)
263,00	3.130,00	349,30	14.800,00	351,39	8.034,06	328,75	13.606,43
Incremento % respecto al inicial		30%		33%		25%	

Tabla d13. Resultados de los sistemas de reforzamiento desarrollados, para maderas nuevas./ Fuente: Daniel Enríquez M.

que a pesar de las notables capacidades elásticas de un material sin reforzar, éstas pueden ser mejoradas previo a los procesos constructivos, generando elementos de gran resistencia.

A pesar de que los resultados fueron determinados en los análisis anteriores, resulta favorable cotejar los datos para analizar de manera conjunta los respectivos incrementos. Por lo tanto, manteniendo la misma secuencia de presentación, en la tabla d13. se presentan los valores correspondientes al esfuerzo máximo y a la rigidez

a flexión de cada sistema de reforzamiento propuesto por el presente documento.

El primer refuerzo, considerado el mejor entre los propuestos, estableció que el incremento de la resistencia se da mediante un 30%, puesto que su esfuerzo alcanzó un valor de 349 kg/cm². Dicho dato, representa un mejoramiento del material muy favorable, puesto que si una estructura es compuesta por elementos reforzados, se garantiza comportamientos elásticos y plásticos inmejorables, frente a cargas de gran magnitud,

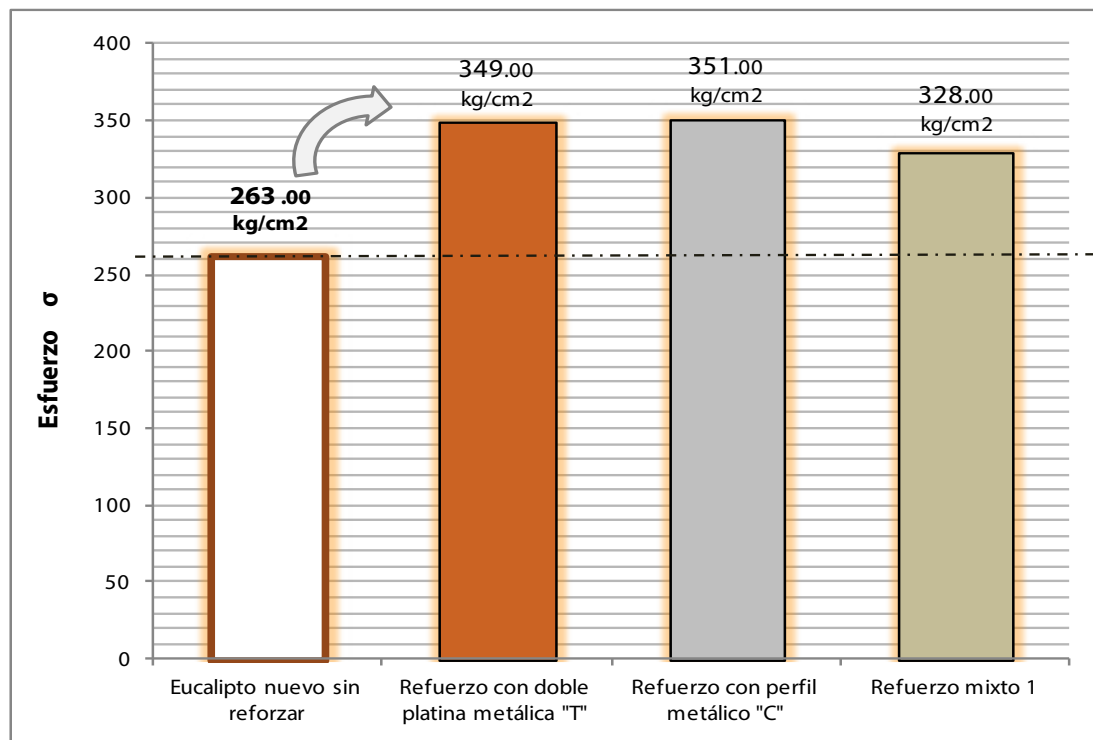


Figura 4.61. Esfuerzos máximos de muestras nuevas, después de aplicar sistemas de reforzamiento estructural. / Fuente: Daniel Enríquez M.

por lo tanto, brinda la posibilidad de utilizar a la madera, en proyectos de gran escuadría, y sin recurrir a elementos secundarios.

Como se pudo observar en los resultados anteriores, la forma y, ubicación de las platinas metálicas "T" mejoró notablemente la capacidad de soportar mayores cargas, sin sufrir grandes deformaciones, es decir, la rigidez a flexión incrementó de tal manera que el rango elástico del material fue el mejor expuesto entre los sistemas ensayados, lo cual garantiza un adecuado comportamiento, frente a esfuerzos sísmicos.

Continuando con la determinación de resultados, nuevamente, la tabla d13. refleja el incremento obtenido por el sistema de reforzamiento, mediante perfil metálico "C", el cual logró superar al resultado obtenido por el primer método. Dicho incremento fue de 33%, lo que significa que el valor alcanzó los 351 kg/cm², un valor que no se aleja notablemente del primero. A pesar del resultado expuesto por el presente refuerzo, el incremento de la rigidez no logró superar al obtenido con el sistema de platinas, pero, representa un aceptable aumento en el comportamiento elástico del material.

El último sistema de reforzamiento, aplicado de madera combinada, a más de presentar incrementos positivos para la madera, presentó comportamientos elásticos muy favorables, especialmente, en su capacidad de deformación, ya que su rigidez a flexión logró aproximar su resultado, en gran medida, al obtenido con el sistema de platinas; sin embargo, el incremento de su esfuerzo máximo alcanzó un 25%, reflejando un valor de 328 kg/cm².

Expuestos los resultados, queda confirmado que cada sistema, representa grandes ventajas para la madera, ya que lograron mejorar en diferentes magnitudes, los comportamientos elásticos y la resistencia a grandes cargas incidentes. Por lo cual, para mejorar la apreciación de los resultados se presenta en la figura 4.61. a manera de barras

estadísticas, los diferentes esfuerzos máximos, alcanzados por cada sistema. En este caso, al no existir elementos con deterioros en sus capacidades, la referencia es la primera barra, la cual corresponde a una muestra nueva y sin reforzar.

4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS TÉCNICAS DESARROLLADAS

Los resultados finales de cada técnica de reforzamiento propuesta en el presente documento han logrado notables aportes al campo estructural de la madera, los cuales se han reflejado en los excelentes comportamientos por parte de los elementos de madera estudiados, específicamente, en la especie de eucalipto. Los incrementos de resistencia han sido los adecuados para considerar a un elemento de madera reforzado, más eficaz y resistente que un normal, por lo tanto, a través de conclusiones, se expondrán los principales aportes que proporciona al gran abanico de los reforzamientos estructurales, abordando diferentes temas como: los relacionados a costos, procedimientos de fabricación y aplicaciones, ya que los procesos, no solo se manifiestan en los ambitos de resistencia.

4.6.1. Conclusiones y recomendaciones respecto a la metodología

Respecto a los procesos metodológicos, utilizados para la generación de cada sistema, se exponen de manera general los principales aspectos:

1. Cada sistema propuesto presentó rapidez y facilidad en sus procesos de fabricación, ya que sugirió el uso de materiales disponibles

y fáciles de trabajar. Para la realización de los sistemas, se ha requerido de reducidos recursos, lo cual abarató costos.

2. La prefabricación de refuerzos genera un ahorro considerable de recursos, tanto en mano de obra, como en rapidez de instalación, así que los perfiles propuestos para los sistemas de reforzamiento se consideran una buena alternativa y con resultados totalmente favorables en el incremento de resultados.

3. Para las uniones entre los refuerzos y los elementos de madera, se recomienda el uso de fijadores metálicos con resistencia adecuada para soportar esfuerzos cortantes producidos por las cargas incidentes. Los fijadores sugeridos son tirafondos con calibres mínimos de 5/16 pulgadas y longitudes mínimas de 2 pulgadas para la unión madera-acero, y de 3 ó 4 pulgadas para unir madera con madera; estas medidas responden al espesor que puedan manifiesta cada sistema de reforzamiento.

4. Un componente de gran importancia a las uniones entre elementos son las resinas epóxicas, las cuales garantizan una fijación adecuada para que las reacciones entre elemento y refuerzo se produzcan de manera conjunta; la calidad del adherente es variado, por lo tanto, resulta intrascendente recomendar un específico.

5. El uso de pernos metálicos que atraviesan los elementos de madera no son recomendables para los sistemas de refuerzo desarrollados, ya que desde un punto de vista estético, no favorece a una estructura de madera, por otro lado, se debería considerar el estado de la madera, antes de aplicar pernos, ya que si la madera presenta malas condiciones por defectos propios, los pasadores podrían hacer que el material fracase ante esfuerzos cortantes o apresurar su deterioro.

6. Respecto a las dimensiones sugeridas para cada refuerzo, ya sea de madera o metálico, corresponde a una optimización del área disponible para aplicar los sistemas, ya que en la mayoría de casos, el espacio entre los componentes de una estructura es reducido. Además, se debe considerar que los refuerzos deben ser discretos y no alterar la composición estética de los elementos de madera; por estas razones se han manejado dimensiones, que no superan a la cuarta parte de la altura general de la sección.

Todas las consideraciones establecidas dan cuenta de que las metodologías aplicadas corresponden a sistemas sencillos y fáciles de fabricar, lo cual garantiza que el uso de cada sistema podrá ser aplicado sin necesidad de gastar recursos innecesarios.

4.6.2. Conclusiones y recomendaciones respecto a la resistencia adquirida

Los resultados de cada refuerzo propuesto confirmaron el notable incremento y la supremacía de la resistencia, frente a los sistemas existentes, aplicados a través del tiempo, dando como resultado incrementos de diferente tipo, pero todos con cualidades positivas que favorecieron a las condiciones elásticas de la madera, por lo tanto, es importante, indicar los principales aspectos generados por cada sistema, según su importancia:

1. El principal refuerzo corresponde al sistema de doble platina metálica tipo "T". Los incrementos expuestos por dicho método lograron mejorar las condiciones del material en todos los aspectos y sobre todo, se manifestó de manera discreta sin alterar la estética del elemento.

- El esfuerzo máximo, que logró el sistema fue del 30% más respecto al original (349,86 kg/cm²), lo cual sin duda mejoró la elasticidad del elemento considerablemente. Otro factor importante que se presentó fue el aumento de la rigidez a flexión, la cual reflejó un incremento notable en el rango elástico del material, esto se debe a que la forma en "T" de las platinas mejoraron la resistencia a flexión y, al estar ubicadas en ambas caras, el incremento resultó favorable.

El incremento también se vio reflejado en elementos antiguos, es así que para madera de 100 años, el esfuerzo máximo recuperó el 84% de su capacidad original, es decir, el valor obtenido fue de 221 kg/cm², considerando que el dato inicial para madera con estas características es de 170 kg/cm². Por otro lado, la madera de 50 años presentó una recuperación de 109%, alcanzando 287 kg/cm² y superando al dato determinado para madera nueva, que es de 263 kg/cm².

- Respecto a la discreción del sistema, por las dimensiones reducidas de cada platina, el sistema no manifiesta alteración en la estética, hay que recordar que las platinas son propuestas con anchos menores a las secciones de cada elemento, con un ancho sugerido de 100mm, para elementos de hasta 150x150mm y anchos de 150mm, para secciones mayores a 200 x 200mm.

- El principal problema de los procesos de reforzamiento estructural, generalmente se producen por el exagerado aumento del peso al elemento reforzado, por tal motivo, sugerir un sistema liviano garantiza eficacia en el comportamiento general de una estructura.

2. El segundo sistema propuesto y con grandes aportes a la resistencia estructural corresponde al uso de un perfil metálico "C", fijado a la cara superior del elemento de madera. Dicho sistema logró recuperar

la resistencia del material en un 33%, lo cual significó un valor de 351,39 kg/cm² al esfuerzo máximo, y a pesar de ser mínimamente mayor que el sistema con platinas "T", no fue considerado, como el mejor, por su bajo incremento en la rigidez a la flexión.

El aplicar un refuerzo a la cara superior de un elemento de madera acelera notablemente, los procesos de instalación, sin embargo, al no tener un elemento que absorba los esfuerzos traccionantes en la cara inferior, hace que el sistema no logre una resistencia a la flexión, adecuadamente.

- En lo que respecta a la resistencia adquirida con elementos antiguos, el sistema, nuevamente representó notables aumentos, ya que para madera de 100 años el esfuerzo máximo logró recuperar un 86% de su capacidad original, es decir, el valor del esfuerzo fue de 226 kg/cm², mientras que para madera de 50 años, la recuperación de resistencia fue de 111%, es decir, recuperó en su totalidad el valor inicial y lo mejoró en un 11%, lo que significó un valor de 293 kg/cm² para su esfuerzo máximo.

- La discreción del sistema, quizá resulte una desventaja ante los demás refuerzos, debido a que el perfil metálico se manifiesta con dimensiones mayores al ancho del elemento reforzado, lo cual podría interferir en la composición general de la estructura, sin embargo, el sistema podría ser disimulado a través de subelementos que conforman la edificación.

3. El tercer sistema experimentado corresponde a la combinación de dos refuerzos ya analizados, es decir, el reforzamiento mixto 1 presenta una pieza de madera fijada a la cara

superior, y un platina metálica "T", fijada a la cara inferior. A pesar de ser el método de menor rendimiento entre los sistemas expuestos, la resistencia lograda fue considerada como un gran aporte para madera antigua.

- El sistema fue diseñado para mejorar los esfuerzos a compresión y tracción, mediante materiales adecuados para cada esfuerzo.

- Respecto a la resistencia del refuerzo, el esfuerzo máximo logró aumentar en un 25% del dato inicial, es decir, el valor obtenido fue de 328 kg/cm², el cual es un gran aporte, si se considera que el dato inicial es de 263 kg/cm². Para el caso de madera antigua, la recuperación de sus capacidades portantes fueron considerables, tal es el caso, que para madera de 100 años, el esfuerzo máximo, recuperó un 80% de su dato original, alcanzando un valor de 212 kg/cm², mientras que para madera de 50 años, el incremento fue de 105%, es decir, el sistema logró recuperar la resistencia que tiene la madera nueva, y lo mejoró en un 5%.

Dichos datos, validaron al sistema, y lo han considerado aceptable para ser aplicado, especialmente, a madera antigua, ya que la pieza del mismo material brinda grandes capacidades mecánicas. Por tal motivo, se sugiere que la pieza de madera sea de una especie más dura y mejor que el eucalipto y de preferencia más ancha que la sección a reforzar, para aumentar la inercia de la sección.

4. A pesar de ser marginadas por el alto costo, que representa el uso de fibras de carbono, dicho material presentó inmejorables resultados, los cuales superaron categóricamente a los definidos hasta el momento. Como se pudo observar, el análisis de los refuerzos mixtos con fibras de carbono fue posible, a través de medios digitales, los cuales evidenciaron resultados

con magnitudes inmejorables, pero se vieron limitados, principalmente, por el costo y la poca disponibilidad del material.

- Los sistemas a través de fibras de carbono fueron propuestos en dos formas diferentes ya explicados en inciso anteriores, sin embargo, resulta importante recordar que la resistencia adquirida por cada uno de ellos fueron las mejores entre todos los sistemas desarrollados.

El refuerzo mixto 2, que contempla el uso de un listón de madera y 3 fibras de carbono, reflejaron un incremento del 60% en su esfuerzo máximo, lo cual significó un valor de 420 kg/cm², mientras que el sistema mixto 3, con un perfil metálico y fibras de carbono incrementaron el esfuerzo máximo en un 90%, es decir, un valor de 499 kg/cm².

4.6.3. Conclusiones y recomendaciones respecto a la aplicación de cada sistema

A través de los análisis realizados y de las aplicaciones de cada sistema de reforzamiento, se ha obtenido diferentes ventajas y desventajas, la cuales reflejaron los siguientes aspectos:

1. El sistema a través de platina metálicas "T" no exige procesos largos y costosos, por el contrario, mediante herramientas adecuadas y simples, cada una de ellas puede ser fácilmente instalada, optimizando recursos económicos.

- Cada platina "T" responde a una fabricación previa para ser utilizada, la cual después de fijar sus respectivas dimensiones, a través de cortes simples y soldaduras

se logra la forma requerida, sin embargo, es importante indicar que las platinas "T" también pueden ser compradas, a pesar de no ser muy comunes en nuestro medio.

- Cada platina deberá presentar agujeros dispuesto a lo largo de cada 10 cm y, dependiendo del ancho del elemento a reforzar, la fila de agujeros serán doble o triple, pero siempre al tresbolillo, para distribuir de mejor manera los esfuerzos cortantes presentes en cada fijador.

2. Para la aplicación del segundo sistema, los recursos utilizados son mínimos, ya que se utiliza un elemento prefabricado, lo cual optimiza tiempo y costos en mano de obra.

- El sistema precisa una aplicación rápida, ya que el perfil deberá ser ajustado a la parte superior del elemento de madera a través de tirafondos.

3. El sistema mixto 1 por presentar dos tipos de refuerzo, se deberán preparar previamente los elementos para aplicarlos.

- La pieza de madera, respetando las dimensiones establecidas y sugeridas para su elaboración, deberá ser obtenida preferentemente de elementos más resistentes y más grandes que la viga a reforzar, con todos sus lados corregidos y con superficies planas para mejorar la unión entre materiales.

- Respecto a la fijación del elemento de madera, se la debe realizar a través de tirafondos con longitudes no menores a 3 pulgadas y dispuestos de la misma manera que las platinas metálicas. Para mejorar la adherencia entre los materiales, se puede recurrir al uso de resinas epóxicas. Por ser superficies del mismo material, la calidad de la resina no exige grandes capacidades.

4. Como consideración general, es importante indicar que para cada refuerzo se deberá aplicar algún método de preservación, esto con la intención de garantizar la durabilidad de los materiales. Para la madera, se debe aplicar preservantes que impidan la proliferación de xilófagos, ya que son vulnerables a sus ataques y obviamente, evitar la presencia excesiva de humedad. Para el acero, es importante que se aplique anticorrosivo, ya que la corrosión puede disminuir considerablemente la resistencia del material. En ambos casos, el control del contenido de humedad en el ambiente, es vital para garantizar la resistencia a lo largo del tiempo, ya que un refuerzo, frente a un ambiente de humedad puede perder toda su capacidad resistente.

4.6.4. Conclusiones respecto al costo de fabricación e instalación por metro lineal de cada sistema

Los costos que presenta cada sistema de reforzamiento reflejan el uso adecuado y la cantidad justa de materiales, para generar precios accesibles. El objetivo es promover el uso de refuerzos, a favor de mantener las principales edificaciones patrimoniales con sus componentes originales, por lo tanto, el precio de cada refuerzo contempla los siguientes aspectos:

1. Para el sistema de platinas metálicas "T", por presentar elementos elaborados a través de platinas simples, el costo por metro lineal de refuerzo alcanzó los 45 dólares, precio que también contempla: mano de obra, herramientas y fijadores metálicos (tirafondos).
2. El segundo sistema, al presentar un perfil prefabricado, expone el costo más

bajo entre los métodos desarrollados, esto se debe a que el perfil “C” por su condición, reduce considerablemente los costos de mano de obra en la instalación. Por lo tanto, el valor establecido para cada metro lineal de refuerzo oscila entre 20 y 25 dólares, contemplando: mano de obra, herramientas y fijadores.

3. Para el tercer refuerzo desarrollado, por ser un sistema mixto, el costo final representa dos valores correspondientes a los diferentes materiales utilizados. Considerando en el primer valor, al rubro de la pieza de madera, el cual contempla: la preparación del listón de madera, la mano de obra, las herramientas y los fijadores, reflejando un precio por metro lineal de 15 a 18 dólares; en este precio juega un papel importante, la especie de madera que se utilice.

Por su parte, el precio de la platina, como ya se explicó, por metro lineal, asciende a 25 dólares, valor que considera todos los aspectos de fabricación e instalación. Al considerar los dos valores establecidos, el costo total del refuerzo mixto alcanza un valor entre 40 a 45 dólares cada ml., pero nuevamente, no han sido considerados las variaciones que puede presentar el refuerzo, especialmente, en el costo del listón de madera, ya que la propuesta contempló el uso de eucalipto.

4. Quizá el costo más elevado que se pudo evidenciar en el desarrollo de los sistemas de reforzamiento fue el uso de fibras de carbono, las cuales presentaron precios demasiado altos para considerarlos como métodos adecuados en las intervenciones de estructuras.

La presente investigación determinó que el costo por cada metro de fibra de carbono es de 75 dólares, el cual contempla todos los precios necesarios para su instalación. Por lo tanto, si se considera que cada

sistema, propone el uso de tres fibras, el valor parcial del refuerzo solo en fibras, asciende a 225 dólares el metro, y si a este valor se le suma el costo del listón de madera y de la platina metálica, elementos que contiene cada sistema mixto, el costo final de los sistemas no será menor a 240 dólares por metro lineal, lo cual limita enfáticamente su utilización.

5. A pesar de los increíbles resultados y ventajas que proporciona el sistema con triple fibra de carbono, sus altos costos evitan que el uso de dicho refuerzo se generalice, ya que nadie optará por utilizarlos, disponiendo de sistemas resistentes y mucho más económicos. El problema provocado por los precios altos de la fibras repercute de forma directa en la concientización para mantener a las edificaciones con valor histórico, ya que resulta desde cualquier punto de vista, más económico realizar procesos de sustitución de elementos, antes que recuperarlos

4.6.5. Líneas futuras de investigación

Cada conclusión expuesta por esta tesis, aportó un gran conocimiento al tema de los reforzamientos estructurales de madera, el cual ha sido especialmente dirigido a la especie de eucalipto, sin embargo, a través de los análisis realizados a cada sistema existente y propuesto han surgido nuevas posibilidades de aplicación, las cuales requieren de un mayor conocimiento y, a la vez, no han podido formar parte dentro de los contenidos de esta tesis.

De allí que, dentro de todas estas posibilidades, se han sugerido algunas líneas de investigación, las cuales a más de ser consideradas interesantes resultan un gran aporte para

analizar los comportamientos estructurales de la madera. Las posibilidades más opcionadas son expuestas a continuación:

- Comportamientos plásticos en las estructuras de madera reforzada

Este tema se lo puede considerar, como continuación de la presente tesis, ya que únicamente se analizaron, comportamientos netamente elásticos, y a pesar de que el estudio de un campo plástico resultará más complicado, debido a las diferentes reacciones que llegarán a presentar la madera, sería un gran aporte para poder definir estructuras con mayor capacidad para soportar movimientos sísmicos o esfuerzos de gran magnitud y que actúan por lapsos cortos.

Dentro de los análisis realizados, se determinó que la madera al pasar a un rango plástico sufrió deformaciones permanentes, pero de diferente tipo y magnitud, por lo tanto, a través del estudio de los comportamientos plásticos del material, se podría definir metodologías adecuadas para resolver el tema de las deformaciones permanentes, obviamente, utilizando elementos que no hay sufrido rupturas.

- Madera laminada para reforzar

Mediante la investigación de las propiedades resistentes de la madera, se pudo determinar que la madera laminada puede alcanzar grandes resistencias, a través de la optimización del material, utilizando elementos pequeños unidos entre sí, lo cual hace pensar que las condiciones de dicho material son adecuadas para generar refuerzos estructurales.

A partir del desarrollo de la madera laminada, se empezó a construir edificaciones de gran escuadría y elementos de gran resistencia, por lo tanto, al proponer una metodología que adapte los principios de los elementos laminados a la recuperación estructural de madera antigua, resulta un

gran aporte, puesto que los sistemas lograrían resultados óptimos, mediante costos reducidos y apariencias estéticas muy favorables.

- Sistemas de reforzamientos con elementos de carbono

Dentro de los principales sistemas desarrollados por esta tesis, se determinó que las bondades y ventajas que brinda las fibras de carbono a la recuperación estructural, resultaron inmejorables, debido a los notables incrementos que genera dicho material, sin embargo, se determinó también, que el gran limitante se presentó en el precio del mismo, ya que al ser un sistema demasiado costoso, su utilización se vio rezagada y poco sugerida para el campo de la construcción.

Dadas las circunstancias, resulta favorable, pensar en sistemas que aprovechen las bondades del carbono, para mejorar las capacidades portantes, ya que la característica de dicho elemento químico incrementa enormemente la resistencias a la tracción y compresión de un material, por lo tanto, se podría generar prototipos de reforzamientos, los cuales presenten mayor cantidad de carbono. El propio acero podría suponer mejores incrementos, si se le aumentara más carbono a su composición.

En conclusión, se debe procurar generar metodologías que aporten, positivamente, a la preservación de bienes patrimoniales, ya que existe un gran interés social de por medio, para mantener la historia de una cultura, la cual se plasma en edificaciones antiguas, también se debe pensar en prolongar la existencia de estructuras nuevas, las cuales con el pasar de los años, tendrán su parte dentro de la historia de una sociedad.



04

Referentes bibliográficos y linkografía

1. Junta del acuerdo de Cartagena(PADT-REFORT).“Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino” . Lima-Perú:1982.
2. Norma Ecuatoriana de la Construcción(NEC-11). “Construcción con Madera”. Quito-Ecuador: 2011.
3. M. Herrero y otros.“Construcción con Madera”, uniones tradicionales. Universidad Poiténica de Madrid. Madrid-España. S.f.
4. Herrero, Miguel. “ Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estrructuras de madera conífera”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
5. Vázquez, José. “Patología y Recuperación de estructuras de madera.” S.L. Mayo, 2011.
6. Zamperini, Emanuele. “Corso de recupero e conservazione degli edifici”. Le strutture in legno. A.A. Italia.2010-2011. Pág.:23
7. Arriaga M., Francisco. “Refuerzo de vigas de madera mediante perfiles metálicos situados en la cara superior”. Materiales de construcción. Vol. 60. 2010.
8. Gonzáles, Carlos. “Recuperación de la capacidad mecánica en piezas de madera solicitadas a flexión en estructuras tradicionales operando por la cara superior mediante refuerzos y prótesis metálicas”. Tesis doctoral. Universidad Politéctina de Madrid. 2007.
9. Pytel, A. y Singer F. “Resistencia de Materiales”. Cuarta Edición.Mexico D.F. 1995.
10. Arriaga, Francisco y otros.“Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera”. S.L. S.F.
11. A. Angeli. “Cálculo de estructuras de madeira”. Sistemas de conexión. S.I. Octubre 2008. <http://www.cismadeira.com/construcion/downloads/11.unionesmet.pdf>
12. R. Martinez y otros. “La madera como material de construcción”. Febrero 2013. <http://www.herrera.unt.edu.ar>
13. Laboratorio de Investigación de Materiales Universidad de Santiago. “Madera Laminada”. Abril 2013. http://web.usach.cl/~lab_made/MaderaLaminada1.htm
14. Popol Vuh. “estructuras de madera”. Diciembre 2012. <http://es.scribd.com/doc/33958254/Estructuras-de-madera>
15. Modelación digital de un elemento estructural, a través de “SeismoStruct”. / Fuente: www.seismosoft.com



01

ANEXO A1

En este anexo A1, se cita textualmente, el tratado adoptado por el ICOMOS (El Consejo Internacional de Monumentos y Sitios), muy importante para la conservación e intervención de las estructuras históricas en madera, en la cual se describen los principales aspectos que rigen a la protección de dicho material:

PRINCIPIOS QUE DEBEN REGIR LA CONSERVACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS HISTÓRICAS EN MADERA (1999)

Adoptados por ICOMOS en la 12ª Asamblea General en México, en octubre de 1999.

Este documento tiene por finalidad definir los principios y métodos de actuación fundamentales y universalmente aplicables para la protección y conservación de las estructuras históricas en madera, de tal forma que se respete su significado cultural. En este contexto se entiende que las estructuras históricas en madera hacen referencia a todo tipo de construcción o edificio hecho en madera, total o parcialmente, que tenga un significado cultural o que forme parte de un sitio histórico.

Para la conservación de dichas estructuras, estos principios:

- Reconocen la importancia de las estructuras en madera de todas las épocas como parte del patrimonio cultural mundial;
- Tienen en cuenta la gran variedad existente de estructuras en madera;
- Tienen en consideración la diversidad de especies y de calidades de maderas utilizadas para construirlas;
- Reconocen la vulnerabilidad de las estructuras construidas total o parcialmente en madera, a causa del deterioro y degradación de los materiales expuestos a diferentes condiciones medio

ambientales o climáticas, a las variaciones en el grado de humedad, a la luz, a los efectos nocivos de hongos e insectos, a la especulación, a los incendios y a otros accidentes;

- Reconocen la creciente escasez de las estructuras históricas en madera como consecuencia de su vulnerabilidad, de su caída en desuso y de la desaparición de los oficios artesanos relacionados con las técnicas de diseño y construcción tradicionales;

- Sopesan la gran diversidad de las medidas y tratamientos requeridos para la preservación y conservación de estos recursos históricos;

- Tienen en cuenta los principios de la Carta de Venecia y de la carta de Burra, así como la doctrina de ICOMOS y de la UNESCO, y tratan de que estos principios generales se apliquen a la protección y preservación de las estructuras en madera;

Formulan las siguientes recomendaciones:

INSPECCIÓN, RECOGIDA DE DATOS Y DOCUMENTACIÓN

1. Antes de realizar cualquier intervención, el estado de la estructura y de sus elementos deberá ser cuidadosamente documentado, al igual que todos los materiales utilizados en los tratamientos, conforme al artículo 16 de la Carta de Venecia y los Principios de ICOMOS para el Registro documental de los Monumentos, Conjuntos arquitectónicos y Sitios culturales. Toda la documentación pertinente, incluyendo las muestras características de materiales superfluos y de elementos extraídos de la estructura, así como toda la información concerniente a las técnicas y maneras de hacer tradicionales, deberá ser compilada, catalogada, depositada en lugar seguro y resultar accesible cuando resulte necesario. La documentación deberá explicitar también las razones específicas que hayan motivado la selección de los materiales y métodos utilizados para los trabajos de conservación.

2. Cualquier intervención deberá ser precedida de un diagnóstico exhaustivo y riguroso de las condiciones y causas del deterioro y degradación de las estructuras de madera. Dicho diagnóstico se apoyará en la evidencia documental, en una inspección de hecho y un análisis material y, su fuera necesario, no solo en comprobaciones de las condiciones físicas, sino también en métodos basados en pruebas no destructivas. Esto no impedirá las intervenciones menores que sean necesarias ni las medidas urgentes.

VIGILANCIA Y MANTENIMIENTO

3. Es de crucial importancia mantener una estrategia coherente de vigilancia continua y de mantenimiento regular para la conservación de las estructuras históricas de madera, así como para preservar su significación cultural.

INTERVENCIONES

4. El objetivo prioritario de la preservación y de la conservación es mantener la autenticidad histórica y la integridad del patrimonio cultural. Por lo tanto, toda intervención deberá estar basada en estudios y evaluaciones adecuados. Los problemas deberán ser resueltos en función de las condiciones y necesidades pertinentes, respetando los valores estéticos e históricos, así como la integridad física de la estructura o del sitio de carácter histórico.

5. Toda intervención propuesta deberá tender a:

- a) utilizar métodos y técnicas tradicionales;
- b) ser técnicamente reversible, si es posible, o
- c) al menos, no estorbar o impedir los trabajos de conservación, que pudieran ser ulteriormente necesarios, y
- d) no impedir el acceso, en el futuro, a las informaciones incorporadas en la estructura

6. Intervenir lo menos posible en la trama de las estructuras históricas de madera constituye todo un ideal. En algunos casos, la intervención

mínima dirigida a asegurar la preservación y conservación de estas estructuras de madera podrá significar su desmontaje, total o parcial, y su montaje subsiguiente, a fin de permitir que se efectúen las reparaciones necesarias.

7. Cuando se realicen intervenciones, la estructura histórica de madera debe ser considerada como un todo; todos los materiales, comprendidas las piezas del armazón, entrepaños, postigos y contraventanas, techumbre, suelos, puertas y ventanas, etc., deben recibir la misma atención. En principio, se deben conservar al máximo los materiales existentes. La preservación debe extenderse a los materiales de acabado como los yesos, pinturas, enlucidos, papeles pintados, etc. Si fuera necesario renovar o reemplazar los materiales del acabado, se copiarán, en la medida de lo posible, los materiales, técnicas y texturas originales.

8. El objetivo de la restauración es la conservación de la estructura histórica y de la función que le es inherente, así como revelar su valor cultural mejorando la percepción de su integridad histórica, de sus estadios anteriores y de su concepción original, dentro de los límites de las pruebas materiales históricas existentes, tal como se indica en los artículos 9 a 13 de la Carta de Venecia. Las piezas y otros elementos retirados de una estructura histórica deben ser catalogados y sus muestras características deben ser guardadas de manera permanente como parte de la documentación.

REPARACIÓN Y SUSTITUCIÓN

9. Para la reparación de estructuras históricas se podrán utilizar piezas de madera que sustituyan a las deterioradas, respetando los valores históricos y estéticos, cuando las necesidades de la restauración lo hagan necesario. Las nuevas piezas, o partes de éstas, deben ser de la misma clase de madera y, en su caso, de igual o mejor calidad que las sustituidas. Deben tener, si es posible, características naturales similares. Los índices de humedad

y todas las demás características físicas de la madera empleada en la sustitución deben ser compatibles con la estructura existente. Se deberán utilizar técnicas artesanales y formas de construcción iguales a las utilizadas originalmente, así como el mismo tipo de herramientas y máquinas. Siempre que resulte adecuado, los clavos y otros accesorios deben reproducir los materiales originales. Para sustituir parte de una pieza deteriorada, se empleará su ensamblaje tradicional para unir la parte nueva y la antigua, si se comprueba que esta operación es posible y compatible con las características de la estructura a reparar.

10. Debe actuarse de forma que las nuevas piezas, o fragmentos de éstas, se distingan de las antiguas. No es deseable copiar el desgaste o la deformación de los elementos sustituidos. Se podrán utilizar métodos tradicionales apropiados u otros modernos debidamente comprobados para atenuar la diferencia de color entre partes antiguas y nuevas, cuidando que ello no afecte o perjudique la superficie de la pieza de madera.

11. Las nuevas piezas, o los fragmentos, deben llevar una marca discreta, grabada, por ejemplo, a cuchillo o con un hierro al rojo, de manera que sean identificables en el futuro.

RESERVAS DE BOSQUES HISTÓRICOS

12. Se deberá fomentar la creación y protección de bosques y reservas arbóreas que puedan proveer las maderas necesarias para la conservación y reparación de las estructuras históricas de madera. Las instituciones responsables de la salvaguarda y de la conservación de edificios y sitios históricos deben establecer o fomentar la creación de comercios dedicados a la venta de madera en los que resulte posible procurarse los materiales apropiados para intervenir en este tipo de estructuras.

MATERIALES Y TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CONTEMPORÁNEA

13. Los materiales contemporáneos como las resinas epóxicas, y las técnicas modernas como los refuerzos estructurales en acero deben ser escogidos y utilizados con la mayor prudencia, y solamente en los casos en que la perdurabilidad y el comportamiento estructural de los materiales y de las técnicas de construcción hayan sido probados satisfactoriamente durante un largo período de tiempo. Las instalaciones de servicios, tales como la calefacción y los sistemas de detección y prevención de incendios, se llevarán a cabo de forma que respeten el significado histórico y estético del edificio o el sitio.

14. Se limitará y controlará el uso de productos químicos, y sólo serán utilizados si representan una ventaja cierta, si su eficacia a largo plazo está demostrada y cuando no supongan riesgo alguno para el público o para el entorno.

FORMACIÓN

15. La regeneración de los valores relativos al significado cultural de estructuras históricas en madera a través de programas de formación es un requisito esencial para una política de conservación y de desarrollo durable. Se recomienda fomentar la creación y el desarrollo de programas de formación concernientes a la protección, salvaguarda y conservación de las estructuras históricas en madera. Esta formación debe estar basada en un plan estratégico que integre las necesidades de producción y de consumo durables, y comportar programas a escala local, regional, nacional e internacional. Estos programas deben dirigirse a todas las profesiones y sectores de actividad dedicados a este género de trabajo y, en particular a los arquitectos, ingenieros, conservadores, artesanos y gestores de sitios.

02 ANEXO B1

En el siguiente anexo B1 se detallan todos los resultados obtenidos desde el laboratorio para las diferentes muestras de Eucalipto expuestas en el capítulo II; iniciando con las probetas más antiguas. Hay que recordar que las probetas se dividieron en tres grupos, según sus años de antigüedad:



PROBETAS DE EUCALIPTO SIN REFORZAR CON 100 AÑOS DE ANTIGÜEDAD

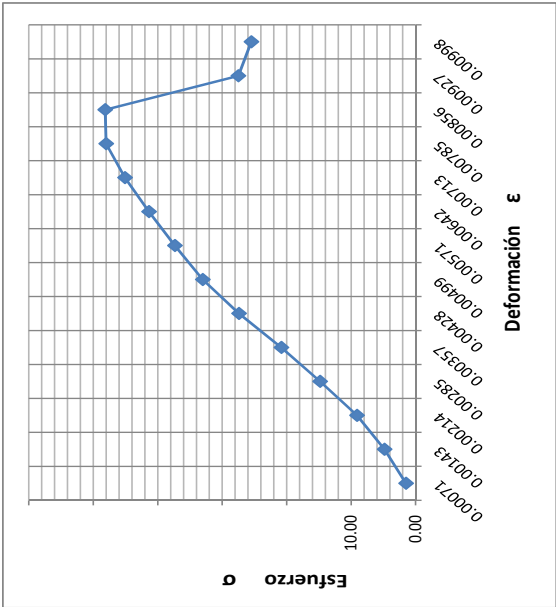
ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA

Probeta B1

madera desconocida de 100 años

b x h	216.46	Rigidez	538.18
Inercia total	4503.09		
Y	7.9		
E sin reforzar	6613.74		
carga max adm.	2196		

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv
68	25	0.0635	0.00071	1.49	2090.11	850	11072.87
220	50	0.127	0.00143	4.82	3381.08	2750	5536.48
415	75	0.1905	0.00214	9.10	4252.03	5187.5	3691.04
676	100	0.254	0.00285	14.82	5194.76	8450	2768.34
950	125	0.3175	0.00357	20.83	5840.42	11875	2214.73
1250	150	0.381	0.00428	27.41	6404.14	15625	1845.66
1506	175	0.4445	0.00499	33.03	6613.74	18825	1582.06
1703	200	0.508	0.00571	37.35	6544.30	21287.5	1384.36
1886	225	0.5715	0.00642	41.36	6442.55	23575	1230.6
2056	250	0.635	0.00713	45.09	6321.29	25700	1107.6
2189	275	0.6985	0.00785	48.00	6118.74	27362.5	1006.97
2196	300	0.762	0.00856	48.16	5627.17	27450	923.12
1254	325	0.8255	0.00927	27.50	2966.36	15675	852.17
1162	350	0.889	0.00998	25.48	2552.58	14525	791.36

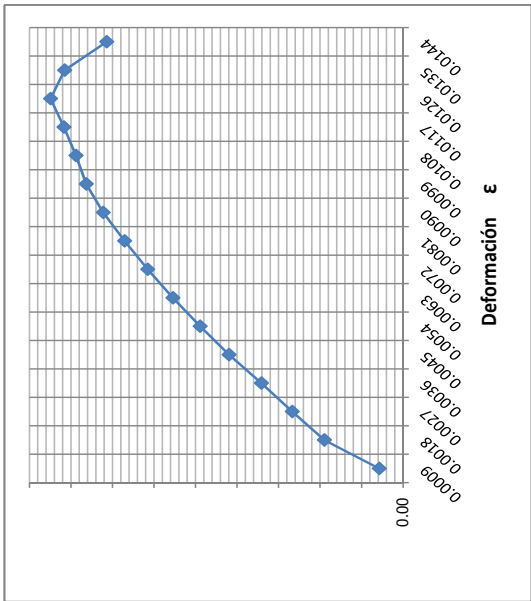


Probeta A3

eucalipto de 100 años

b x h	125	Rigidez	873.90
Inercia total	1041.66		
Y	5		
E sin reforzar	46426.46		
carga max adm.	7077		

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv
479	50	0.127	0.0009	28.74	31823.89	5987.5	5536.48
1581	100	0.254	0.0018	94.86	52521.28	19762.5	2768.34
2226	150	0.381	0.0027	133.56	49301.59	27825	1845.66
2845	200	0.508	0.0036	170.70	47262.35	35562.5	1384.36
3493	250	0.635	0.0045	209.58	46426.46	43662.5	1107.6
4075	300	0.762	0.0054	244.50	45140.86	50937.5	923.12
4620	350	0.889	0.0063	277.20	43873.28	57750	791.36
5126	400	1.016	0.0072	307.56	42601.02	64075	692.56
5590	450	1.143	0.0081	335.40	41303.43	69875	615.73
6020	500	1.27	0.0090	361.20	40041.44	75250	554.28
6360	550	1.397	0.0099	381.60	38466.29	79500	504.01
6567	600	1.524	0.0108	394.02	36417.93	82087.5	462.13
6808	650	1.651	0.0117	408.48	34859.91	85100	426.7
7077	700	1.778	0.0126	424.62	33659.84	88462.5	396.35
6795	750	1.905	0.0135	407.70	30174.07	84937.5	370.05
5950	800	2.032	0.0144	357.00	24778.81	74375	347.04





PROBETAS DE EUCALIPTO SIN REFORZAR CON 50 AÑOS DE ANTIGÜEDAD

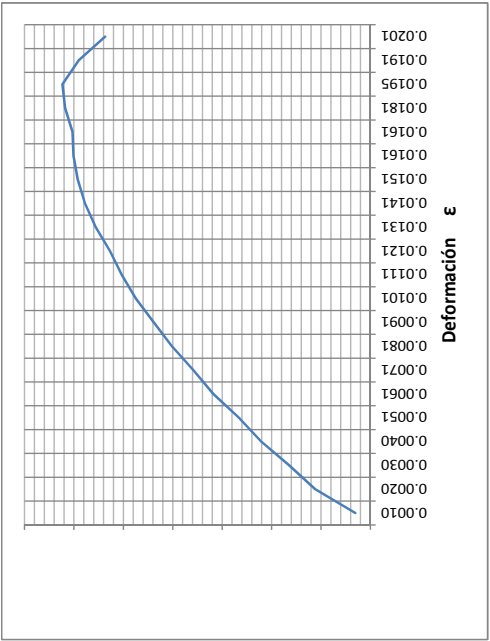
ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA

Probeta F1

eucalipto de 50 años
b x h 124.32
Inercia total 1288
Y 5.6
E sin reforzar 54681.15
carga max adm. 11468

Rigidez	1272.70
---------	---------

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv
560	50	0.127	0.0010	30.43	30089.57	7000	5536.48
2060	100	0.254	0.0020	111.96	55345.31	25750	2768.34
3025	150	0.381	0.0030	164.40	54184.02	37812.5	1845.66
4070	200	0.508	0.0040	221.20	54681.15	50875	1384.36
4900	250	0.635	0.0051	266.30	52671.20	61250	1107.6
5850	300	0.762	0.0061	317.93	52409.28	73125	923.12
6600	350	0.889	0.0071	358.70	50688.82	82500	791.36
7390	400	1.016	0.0081	401.63	49670.21	92375	692.56
8060	450	1.143	0.0091	438.04	48163.66	100750	615.73
8730	500	1.27	0.0101	474.46	46961.03	109125	554.28
9260	550	1.397	0.0111	503.26	45294.38	115750	504.01
9700	600	1.524	0.0121	527.17	43504.09	121250	462.13
10230	650	1.651	0.0131	555.98	42363.56	127875	426.7
10629	700	1.778	0.0141	577.66	40885.13	132862.5	396.35
10900	750	1.905	0.0151	592.39	39145.43	136250	370.05
11057	800	2.032	0.0161	600.92	37240.11	138212.5	347.04
11092	850	2.159	0.0161	602.83	37357.99	138650	347.04
11370	900	2.286	0.0181	617.93	34065.86	142125	308.72
11468	925	2.3495	0.0195	623.26	32010.01	143350	287.61
10862	950	2.413	0.0191	590.33	30844.54	135775	292.6
9875	1000	2.54	0.0201	536.68	26651.19	123437.5	278.09



PROBETA NUEVA DE EUCALIPTO SIN REFORZAR

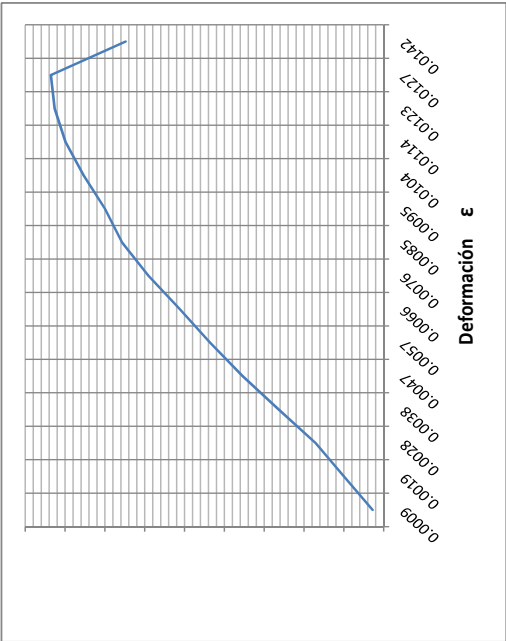
ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA

Probeta L1

eucalipto nuevo
b x h 110.25
Inercia total 1012.9
Y 5.25
E sin reforzar 77946.33
carga max adm. 12910

Rigidez	1426.71
---------	---------

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv
428	50	0.127	0.0009	27.73	29242.93	5350	5536.48
1545	100	0.254	0.0019	100.10	52782.67	19313	2768.34
2640	150	0.381	0.0028	171.04	60131.09	33000	1845.66
4070	200	0.508	0.0038	263.69	69532.35	50875	1384.36
5470	250	0.635	0.0047	354.40	74767.65	68375	1107.6
6730	300	0.762	0.0057	436.03	76668.45	84125	923.12
7900	350	0.889	0.0066	511.83	77151.55	98750	791.36
9120	400	1.016	0.0076	590.88	77946.33	114000	692.56
10140	450	1.143	0.0085	656.96	77049.83	126750	615.73
10800	500	1.27	0.0095	699.72	73874.81	135000	554.28
11630	550	1.397	0.0104	753.50	72337.30	145375	504.01
12333	600	1.524	0.0114	799.05	70335.78	154163	462.13
12750	650	1.651	0.0123	826.06	67139.22	159375	426.7
12900	675	1.7145	0.0127	835.78	65695.56	161250	412.67
10000	700	1.778	0.0142	647.89	45667.14	125000	370.05





PROBETA DE EUCALIPTO REFORZADA CON 100 AÑOS DE ANTIGÜEDAD

ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA

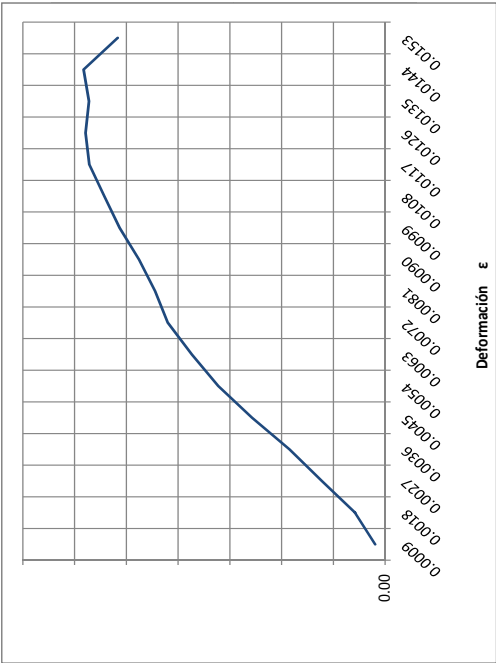
Probeta A2 reforzada

b x h	125
L n	588.3
Inercia 1	
Inercia 2	
Inercia total	3251.8
Y	8.4
E sin reforzar	46426
carga max	9018

100años

Rigidez	2728.12
---------	---------

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	Esfuerzo real
296	50	0.127	0.0009	17.71	19606.04	3700	5536.48	9.56
900	100	0.254	0.0018	53.84	29807.55	11250	2768.34	29.07
1890	150	0.381	0.0027	113.06	41732.83	23625	1845.66	61.04
2860	200	0.508	0.0036	171.08	47367.39	35750	1384.36	92.37
3982	250	0.635	0.0045	238.20	52765.32	49775	1107.6	128.61
4990	300	0.762	0.0054	298.49	55109.07	62375	923.12	161.17
5780	350	0.889	0.0063	345.75	54722.55	72250	791.36	186.68
6500	400	1.016	0.0072	388.82	53856.13	81250	692.56	209.94
6880	450	1.143	0.0081	411.55	50680.76	86000	615.73	222.21
7360	500	1.27	0.0090	440.26	48805.80	92000	554.28	237.71
7940	550	1.397	0.0099	474.96	47876.68	99250	504.01	256.44
8400	600	1.524	0.0108	502.47	46441.67	105000	462.13	271.30
8850	650	1.651	0.0117	529.39	45178.34	110625	426.7	285.84
8960	700	1.778	0.0126	535.97	42486.53	112000	396.35	289.39
8860	750	1.905	0.0135	529.99	39224.60	110750	370.05	286.16
9018	800	2.032	0.0144	539.44	37441.58	112725	347.04	291.26
8000	850	2.159	0.0153	478.55	31273.03	100000	326.75	258.38



PROBETA DE EUCALIPTO REFORZADA CON 50 AÑOS DE ANTIGÜEDAD

ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA

Probeta F3 reforzada

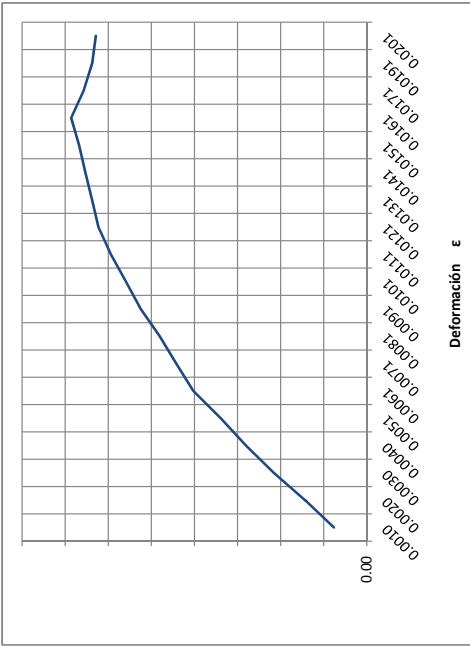
b x h	124.32
L n	407.7
Inercia 1	
Inercia 2	
Inercia total	3993
Y	8.85
carga max	12384

50años

Rigidez	3945.48
---------	---------

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E
1380	50	0.127	0.0010	74.87	74022.85
2587	100	0.254	0.0020	140.36	69385.52
3897	150	0.381	0.0030	211.43	69684.32
5060	200	0.508	0.0040	274.53	67866.04
6120	250	0.635	0.0051	332.04	65673.07
7270	300	0.762	0.0061	394.43	65019.79
7980	350	0.889	0.0071	432.96	61182.89
8670	400	1.016	0.0081	470.39	58174.07
9470	450	1.143	0.0091	513.80	56492.82
10085	500	1.27	0.0101	547.16	54157.43
10720	550	1.397	0.0111	581.62	52346.41
11244	600	1.651	0.0121	610.04	50342.87
11510	700	1.778	0.0131	624.48	47582.90
11790	750	1.905	0.0141	639.67	45273.66
12050	800	2.032	0.0151	653.77	43201.66
12384	850	2.159	0.0161	671.90	41638.34
11860	900	2.286	0.0171	643.47	37545.10
11500	950	2.413	0.0191	623.93	32600.57
11350	1000	2.54	0.0201	615.80	30579.77

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	Esfuerzo real
1380	50	0.127	0.0010	74.87	74022.85	17250	5536.48	38.23
2587	100	0.254	0.0020	140.36	69385.52	32337.5	2768.34	71.67
3897	150	0.381	0.0030	211.43	69684.32	48712.5	1845.66	107.97
5060	200	0.508	0.0040	274.53	67866.04	63250	1384.36	140.19
6120	250	0.635	0.0051	332.04	65673.07	76500	1107.6	169.55
7270	300	0.762	0.0061	394.43	65019.79	90875	923.12	201.41
7980	350	0.889	0.0071	432.96	61182.89	99750	791.36	221.08
8670	400	1.016	0.0081	470.39	58174.07	108375	692.56	240.20
9470	450	1.143	0.0091	513.80	56492.82	118375	615.73	262.36
10085	500	1.27	0.0101	547.16	54157.43	126062.5	554.28	279.40
10720	550	1.397	0.0111	581.62	52346.41	134000	504.01	296.99
11244	600	1.651	0.0121	610.04	50342.87	140550	462.13	311.51
11510	700	1.778	0.0131	624.48	47582.90	143875	426.7	318.88
11790	750	1.905	0.0141	639.67	45273.66	147375	396.35	326.64
12050	800	2.032	0.0151	653.77	43201.66	150625	370.05	333.84
12384	850	2.159	0.0161	671.90	41638.34	154800	347.04	343.10
11860	900	2.286	0.0171	643.47	37545.10	148250	326.75	328.58
11500	950	2.413	0.0191	623.93	32600.57	143750	292.6	318.60
11350	1000	2.54	0.0201	615.80	30579.77	141875	278.09	314.45





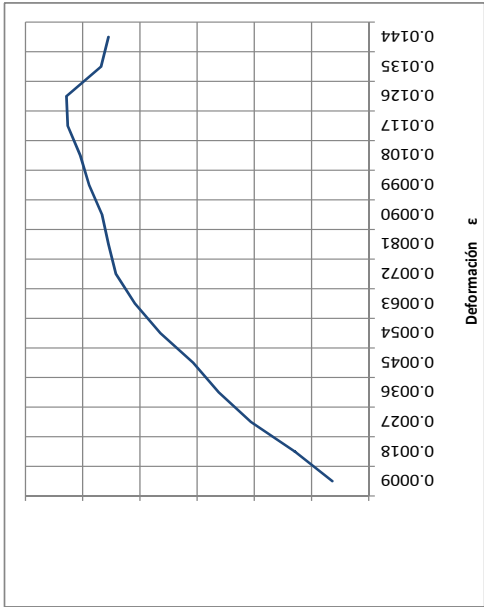
PROBETA NUEVA DE EUCALIPTO REFORZADA

ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA

Probeta L3 reforzada

b x h	100	nueva
L n	254.2	Rigidez 3130.11
Inercia 1	833.33	
Inercia 2	1.35	
Inercia total	2202	Inercia real 2202
Y	7.6	
carga max	14113	78663

carga	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	esfuerzo real
1700	50	0.127	127.29	140952.46	21250	5536.48	73.342416
3450	100	0.254	258.33	143030.46	43125	2768.34	148.841962
5500	150	0.381	411.83	152021.28	68750	1845.66	237.284287
7000	200	0.508	524.15	145123.28	87500	1384.36	301.998183
8200	250	0.635	614.01	136015.00	102500	1107.6	353.769301
9720	300	0.762	727.82	134373.75	121500	923.12	419.346049
10920	350	0.889	817.68	129415.63	136500	791.36	471.117166
11808	400	1.016	884.17	122468.32	147600	692.56	509.427793
12154	450	1.143	910.08	112072.63	151925	615.73	524.355132
12450	500	1.27	932.24	103344.78	155625	554.28	537.125341
13050	550	1.397	977.17	98500.78	163125	504.01	563.010899
13470	650	1.651	1008.62	93222.72	168375	462.13	581.13079
14050	700	1.778	1052.05	89781.94	175625	426.7	606.153497
14113	750	1.905	1056.77	83769.94	176412.5	396.35	608.87148
12500	800	2.032	935.99	69272.43	156250	370.05	539.28247
12150	850	2.159	909.78	63146.00	151875	347.04	524.182561



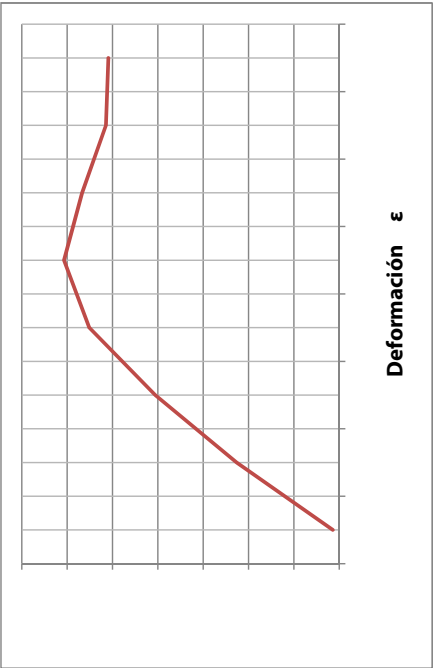
PROBETA DE EUCALIPTOSIN REFORZAR CON 100 AÑOS DE ANTIGÜEDAD

ENSAYO A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

probeta A1

b x h	L	rigidez(K)
125	60	226102

carga	deformacion	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E
894	25	0.0635	0.00106	7.152	6757.79528
14134	40	0.1016	0.00169	113.072	66774.8031
25350	50	0.127	0.00212	202.8	95811.0236
34458	60	0.1524	0.00254	275.664	108529.134
37930	70	0.1778	0.00296	303.44	102398.2
35450	80	0.2032	0.00339	283.6	83740.1575
32150	90	0.2286	0.00381	257.2	67506.5617
31820	110	0.2794	0.00466	254.56	54665.7122
carga max	38022				





PROBETA DE EUCALIPTO SIN REFORZAR CON 50 AÑOS DE ANTIGÜEDAD
ENSAYO A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

probeta F2

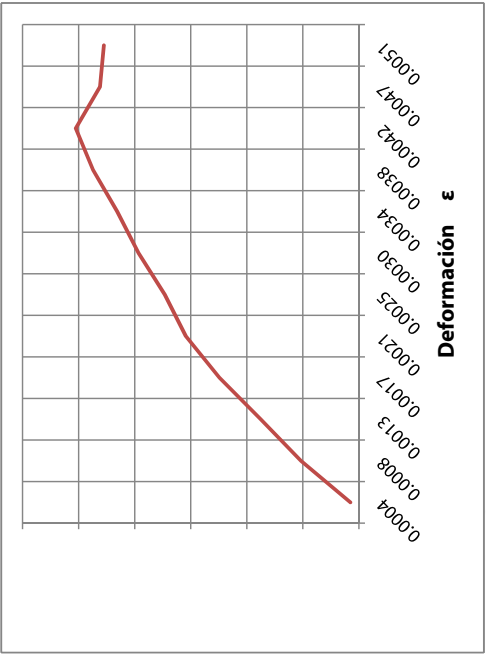
bxh	L	rigidez(K)
100	60	243070.9

carga deformacion

10	1519
20	10340
30	17530
40	24890
50	30870
60	34650
70	39320
80	43140
90	47430
100	50519
110	46190
120	45500

carga max 50519

def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E
0.0254	0.0004	15.19	35881.8898
0.0508	0.0008	103.40	122125.984
0.0762	0.0013	175.30	138031.496
0.1016	0.0017	248.90	146988.189
0.127	0.0021	308.70	145842.52
0.1524	0.0025	346.50	136417.323
0.1778	0.0030	393.20	132688.414
0.2032	0.0034	431.40	127381.89
0.2286	0.0038	474.30	124488.189
0.254	0.0042	505.19	119336.22
0.2794	0.0047	461.90	99191.1238
0.3048	0.0051	455.00	89566.9291



PROBETA NUEVA DE EUCALIPTO SIN REFORZAR
ENSAYO A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

probeta L2

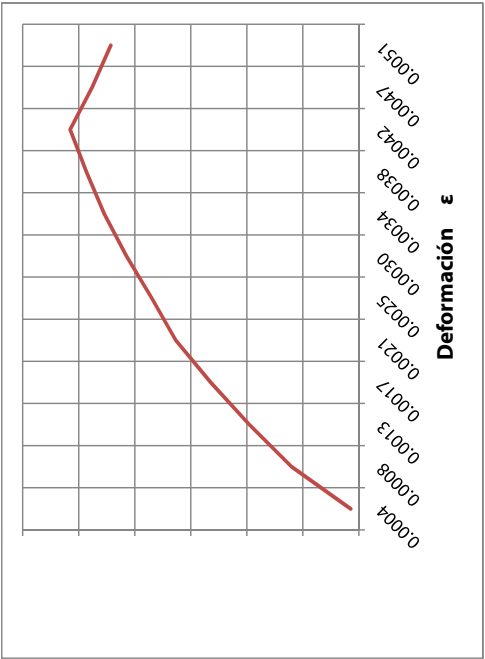
bxh	L	rigidez(K)
104	60	267637.8

carga deformacion

10	1505
20	12500
30	20350
40	27500
50	33990
60	38460
70	43150
80	47250
90	50580
100	53583
110	49500
120	46050

carga max 53593

def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E
0.0254	0.0004	14.47	34183.828
0.0508	0.0008	120.19	141959.419
0.0762	0.0013	195.67	154073.289
0.1016	0.0017	264.42	156155.36
0.127	0.0021	326.83	154406.42
0.1524	0.0025	369.81	145593.58
0.1778	0.0030	414.90	140012.547
0.2032	0.0034	454.33	134151.651
0.2286	0.0038	486.35	127649.909
0.254	0.0042	515.22	121705.784
0.2794	0.0047	475.96	102210.781
0.3048	0.0051	442.79	87163.083



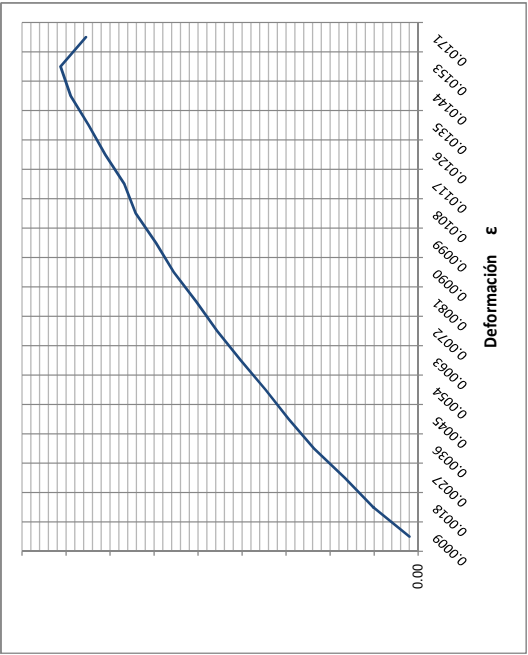
03ANEXO C1

En el siguiente anexo C1 se detallan todos los resultados obtenidos desde el laboratorio, con los sistemas de reforzamiento estructural existentes y con pruebas realizadas a flexión estática, perpendicular al grano.

Reforzamiento L, mediante piezas de madera

PROBETA L4	b x h	100	E	
			Rigidez	8053.19
Inercia total	Y	5665.33	Rigidez 100	4752.90
			Rigidez 50	5597.91
E sin reforzar	carga max	78663		
		20459		

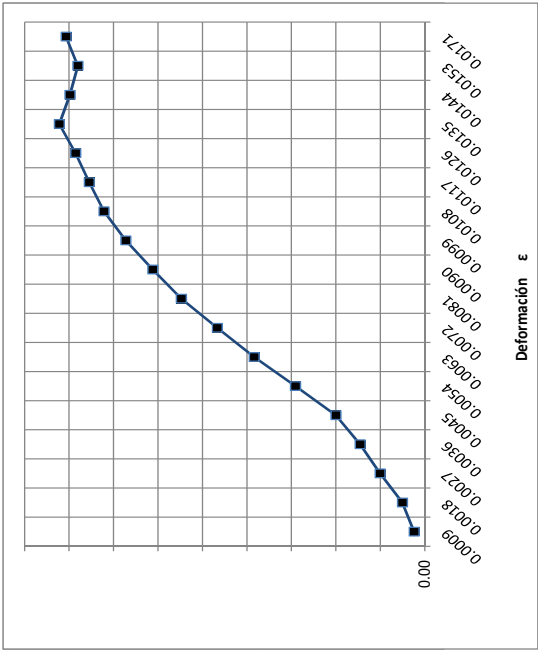
carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	ESFUERZO REAL
495	50	0.127	0.0009	37.14	41124.81	6187.5	5536.48	9.83
2567	100	0.254	0.0018	192.60	106637.59	32087.5	2768.34	50.98
4195	150	0.381	0.0027	314.75	116184.63	52437.5	1845.66	83.31
5963	200	0.508	0.0036	447.40	123873.63	74537.5	1384.36	118.42
7406	250	0.635	0.0045	555.67	123092.52	92575	1107.6	147.07
8730	300	0.762	0.0054	655.01	120930.94	109125	923.12	173.37
10150	350	0.889	0.0063	761.55	120532.77	126875	791.36	201.57
11500	400	1.016	0.0072	862.85	119514.41	143750	692.56	228.38
12700	450	1.143	0.0081	952.88	117343.50	158750	615.73	252.21
13980	500	1.27	0.0090	1048.92	116279.03	174750	554.28	277.63
14995	550	1.397	0.0099	1125.08	113409.81	187437.5	504.01	297.78
16150	600	1.524	0.0108	1211.73	111995.79	201875	462.13	320.72
16800	650	1.651	0.0117	1260.50	107571.43	210000	426.7	333.63
17900	700	1.778	0.0126	1343.04	106462.56	223750	396.35	355.47
18850	750	1.905	0.0135	1414.32	104673.51	235625	370.05	374.34
19875	800	2.032	0.0144	1491.22	103502.70	248437.5	347.04	394.69
20459	850	2.159	0.0153	1535.04	100314.80	255737.5	326.75	406.29
19000	900	2.286	0.0171	1425.57	83424.37	237500	292.6	377.32





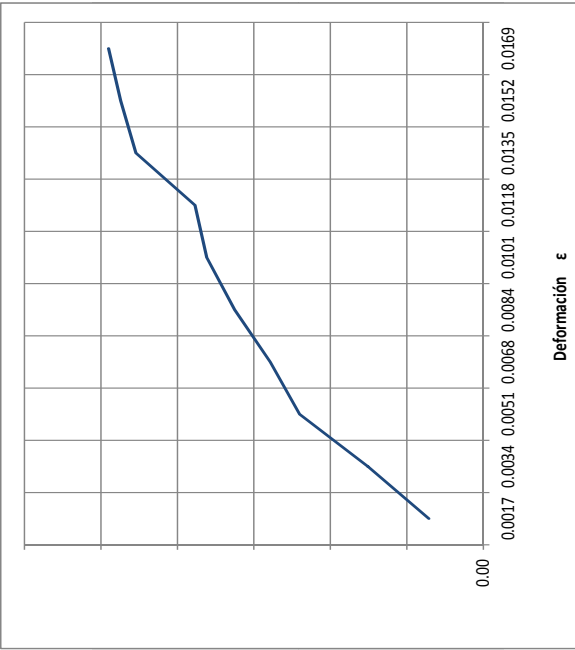
Reforzamiento 2, mediante Perfil C en la cara superior

PROBETA L5		100		Rigidez		5705.80	
b x h							
Inercia total		4013.97		Rigidez 100		3367.50	46426
Y		9.23		Rigidez 50		3966.20	54680
E sin reforzar		78663					
carga max		14296					
carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv
420	50	0.127	0.0009	31.51	34893.78	5250	5536.48
877	100	0.254	0.0018	65.80	36432.09	10962.5	2768.34
1750	150	0.381	0.0027	131.30	48467.96	21875	1845.66
2530	200	0.508	0.0036	189.83	52557.48	31625	1384.36
3480	250	0.635	0.0045	261.10	57839.86	43500	1107.6
5060	300	0.762	0.0054	379.65	70092.85	63250	923.12
6675	350	0.889	0.0063	500.83	79266.63	83437.5	791.36
8120	400	1.016	0.0072	609.24	84387.56	101500	692.56
9525	450	1.143	0.0081	714.66	88007.63	119062.5	615.73
10640	500	1.27	0.0090	798.32	88498.49	133000	554.28
11695	550	1.397	0.0099	877.48	88451.33	146187.5	504.01
12553	600	1.524	0.0108	941.85	87051.59	156912.5	462.13
13127	650	1.651	0.0117	984.92	84052.98	164087.5	426.7
13660	700	1.778	0.0126	1024.91	81244.61	170750	396.35
14296	750	1.905	0.0135	1072.63	79385.28	178700	370.05
13880	800	2.032	0.0144	1041.42	72282.64	173500	347.04
13570	850	2.159	0.0153	1018.16	66536.58	169625	326.75
14030	900	2.286	0.0171	1052.67	61602.31	175375	292.6



Reforzamiento 4, mediante fibra de carbono

PROBETA de ensayo ajeno		253.759		Rigidez		12201.26	
b x h							
Inercia total		8440		Rigidez 100		7080.70	46426
Y		9.03		Rigidez 50		8339.56	54680
E sin reforzar		80000					
carga max		31000					
carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv
4500	50	0.127	0.0017	71.12	42114.89	56250	5536.48
9557	100	0.254	0.0034	151.05	44722.95	119462.5	2768.34
15200	150	0.381	0.0051	240.24	47422.53	190000	1845.66
17625	200	0.508	0.0068	278.57	41244.65	220312.5	1384.36
20575	250	0.635	0.0084	325.19	38522.30	257187.5	1107.6
22875	300	0.762	0.0101	361.54	35695.11	285937.5	923.12
23850	350	0.889	0.0118	376.95	31904.50	298125	791.36
28750	400	1.016	0.0135	454.40	33657.72	359375	692.56
30000	450	1.143	0.0152	474.16	31224.90	375000	615.73
31000	500	1.27	0.0169	489.96	29045.60	387500	554.28



04

ANEXO D1

En el siguiente anexo D1 se detallan todos los resultados obtenidos desde el laboratorio, con los sistemas de reforzamiento desarrollados, de las pruebas realizadas a flexión estática, perpendicular al grano. Dichos datos han sido utilizados para determinar los resultados de cada método propuesto.

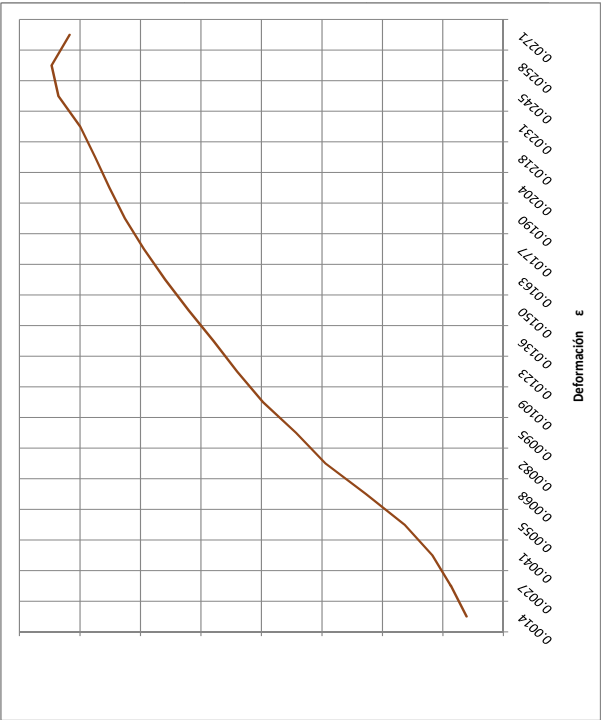
Reforzamiento con doble platina metálica I



Reforzamiento con doble platina metálica I

PROBETA L10	b x h	185.6	
		Rigidez	14800.52
Inercia total Y	10412	Rigidez 100	8735.10
		Rigidez 50	10288.09
		E sin reforzar	46426
		carga max	54680

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	ESF. UERZO REAL
2030	50	0.127	0.0014	58.93	43213.84	25375	5536.48	30.39
2900	100	0.254	0.0027	84.19	30868.14	36250	2768.34	43.41
3920	150	0.381	0.0041	113.80	27818.31	49000	1845.66	58.68
5460	200	0.508	0.0055	158.50	29062.62	68250	1384.36	81.74
7580	250	0.635	0.0068	220.04	32280.87	94750	1107.6	113.48
9830	300	0.762	0.0082	285.36	34890.30	122875	923.12	147.16
11450	350	0.889	0.0095	332.39	34839.56	143125	791.36	171.41
13270	400	1.016	0.0109	385.22	35336.32	165875	692.56	198.66
14700	450	1.143	0.0123	426.73	34801.72	183750	615.73	220.07
16010	500	1.27	0.0136	464.76	34120.36	200125	554.28	239.68
17380	550	1.397	0.0150	504.53	33680.77	217250	504.01	260.19
18670	600	1.524	0.0163	541.98	33174.28	233375	462.13	279.50
19850	650	1.651	0.0177	576.24	32566.88	248125	426.7	297.17
20900	700	1.778	0.0190	606.72	31850.64	261250	396.35	312.89
21750	750	1.905	0.0204	631.39	30946.58	271875	370.05	325.61
22540	800	2.032	0.0218	654.33	30076.44	281750	347.04	337.44
23370	850	2.159	0.0231	678.42	29360.76	292125	326.75	349.86
24570	900	2.286	0.0245	713.26	29165.07	307125	308.72	367.83
24949	950	2.413	0.0258	724.26	28068.58	311862.5	292.6	373.50
23950	1000	2.54	0.0271	695.26	25608.49	299375	278.09	358.55

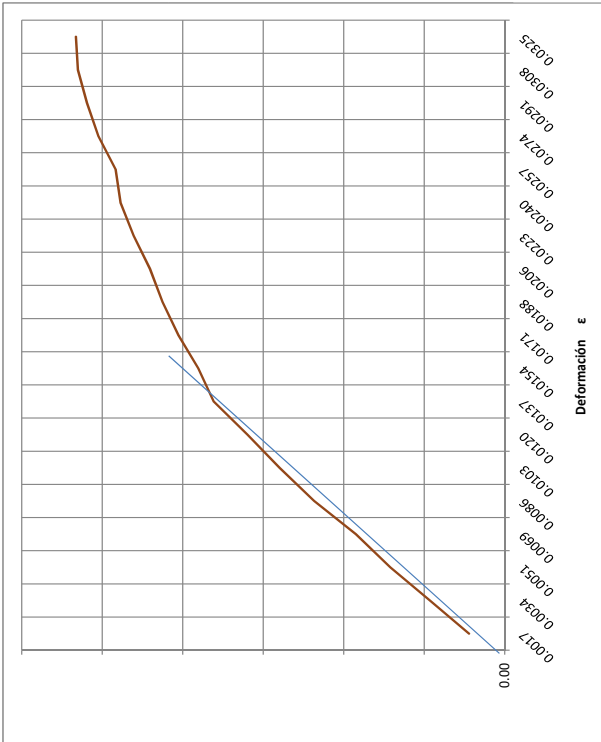




Reforzamiento con perfil metalico C (invertido), por la cara superior

PROBETA L10	
b x h	169
Inercia total	5652.5
Y	9.5
E sin reforzar	78663
carga max	18008
Rigidez	8034.95
Rigidez 100	4742.14
Rigidez 50	5585.23
E	46426
	54680

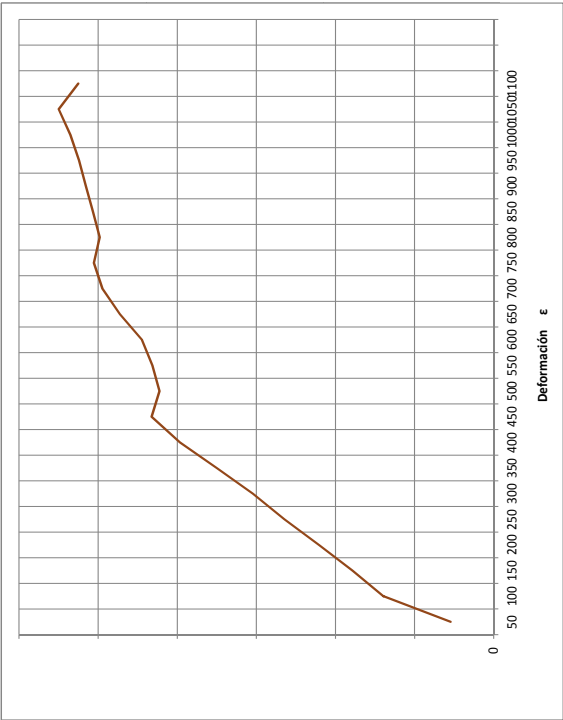
carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	ESFUERZO REAL
1500	50	0.127	0.0017	74.84	43617.23	18750	5536.48	44.38
3140	100	0.254	0.0034	156.67	45654.35	39250	2768.34	92.89
4802	150	0.381	0.0051	239.60	46548.63	60025	1845.66	142.06
6250	200	0.508	0.0069	311.84	45442.49	78125	1384.36	184.90
8002	250	0.635	0.0086	399.26	46549.45	100025	1107.6	236.73
9450	300	0.762	0.0103	471.51	45816.62	118125	923.12	279.57
10800	350	0.889	0.0120	538.87	44888.07	135000	791.36	319.51
12225	400	1.016	0.0137	609.97	44467.15	152812.5	692.56	361.67
12870	450	1.143	0.0154	642.15	41619.98	160875	615.73	380.75
13700	500	1.27	0.0171	683.56	39882.54	171250	554.28	405.30
14370	550	1.397	0.0188	716.99	38038.99	179625	504.01	425.12
14900	600	1.524	0.0206	743.43	36164.59	186250	462.13	440.80
15580	650	1.651	0.0223	777.36	34915.89	194750	426.7	460.92
16130	700	1.778	0.0240	804.81	33577.34	201625	396.35	477.19
16340	750	1.905	0.0257	815.28	31757.44	204250	370.05	483.41
17060	800	2.032	0.0274	851.21	31095.08	213250	347.04	504.71
17540	850	2.159	0.0291	875.16	30100.81	219250	326.75	518.91
17920	900	2.286	0.0308	894.12	29056.00	224000	308.72	530.15
18008	950	2.413	0.0325	898.51	27674.06	225100	292.6	532.75



Reforzamiento mixto, pieza de madera + platina I

PROBETA C	
b x h	150
Inercia total	9412
Y	5.8
E sin reforzar	46000
carga max	10996
Rigidez	7823.70
Rigidez 100	13606.43
Rigidez 50	9299.99
E	80000
	54680

carga	def.	def. cm	def. unitaria	esfuerzo	E	momento	radio curv	ESFUERZO REAL
1094	50	0.127	0.0010	23.50	22433.00	13675	5536.48	23.50
2790	100	0.254	0.0021	59.93	28606.18	34875	2768.34	59.93
3570	150	0.381	0.0031	76.69	24403.73	44625	1845.66	76.69
4420	200	0.508	0.0042	94.95	22662.49	55250	1384.36	94.95
5290	250	0.635	0.0052	113.64	21700.76	66125	1107.6	113.64
6090	300	0.762	0.0063	130.82	20821.48	76125	923.12	130.82
7000	350	0.889	0.0073	150.37	20516.74	87500	791.36	150.37
7930	400	1.016	0.0084	170.35	20340.74	99125	692.56	170.35
8650	450	1.143	0.0094	185.81	19726.16	108125	615.73	185.81
8450	500	1.27	0.0105	181.52	17346.91	105625	554.28	181.52
8630	550	1.397	0.0115	185.39	16109.65	107875	504.01	185.39
8890	600	1.524	0.0126	190.97	15216.06	111125	462.13	190.97
9450	650	1.651	0.0136	203.00	14934.50	118125	426.7	203.00
9890	700	1.778	0.0146	212.45	14518.15	123625	396.35	212.45
10105	750	1.905	0.0157	217.07	13849.46	126312.5	370.05	217.07
9960	800	2.032	0.0167	213.96	12801.92	124500	347.04	213.96
10130	850	2.159	0.0178	217.61	12259.18	126625	326.75	217.61
10310	900	2.286	0.0188	221.47	11788.53	128875	308.72	221.47
10480	950	2.413	0.0198	225.13	11357.21	131000	292.6	225.13
10700	1000	2.54	0.0209	228.85	11020.60	133750	278.09	228.85
10996	1050	2.667	0.0219	236.21	10791.15	137450	264.97	236.21
10500	1100	2.794	0.0229	225.56	9840.83	131250	253.05	225.56





AUTOR:
DANIÉL ERNESTO ENRÍQUEZ MOROCHO
CUENCA - ECUADOR
2014



FACULTAD DE
ARQUITECTURA
Y URBANISMO