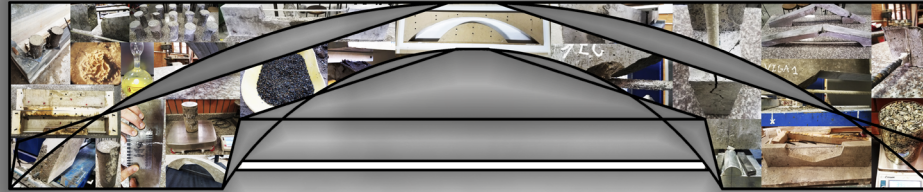




UNIVERSIDAD DE CUENCA



# Influencia de las varillas sintéticas en la capacidad resistente de los elementos tipo vigas

Autores : Edgar Francel Mora Bravo  
Juan Fernando Quevedo Flores

Tutor: Ing. Xavier Ricardo Cárdenas Haro





**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO  
Trabajo de Grado previo a la obtención de título de Arquitecto



2018

A u t o r e s :

Edgar Francel Mora Bravo

C.I 0105099089

Juan Fernando Quevedo Flores

C.I 0301891537

D i r e c t o r :

Ing. Msc. Xavier Ricardo Cárdenas Haro

C.I. 0103405338

# Resumen

La presente investigación se basa en determinar la influencia de las varillas de FRP (polímeros reforzados con fibras), en la capacidad resistente de elementos tipo viga, para ello se planteó el diseño de un hormigón de alta resistencia con el cual se elaboraron las vigas, se procedió a comparar diferentes geometrías de vigas elaboradas con refuerzo de FRP y con un refuerzo de varilla comúnmente usada de acero corrugado, con lo cual se evidenció que existen ciertos factores predominantes que influyen en la capacidad resistente de las vigas con refuerzo de FRP como son la adhesión de la varilla, el diámetro de la varilla, sus características físicas y mecánicas y la geometría de los elementos; Así mismo se concluye que un factor que se lo consideró como uno de los más importantes en la resistencia máxima que puede llegar a alcanzar una viga como es la resistencia del hormigón, no fue tan influyente en la resistencia última de estos elementos.

**Palabras clave:** FRP, polímeros reforzados con fibras, HAR, hormigón de alta resistencia, GFRP, polímeros reforzados con fibras de vidrio, varillas.

# Abstract

The present investigation is based on determining the influence of the FRP bars (fiber reinforced polymers) on the resistant capacity of beam elements. We proposed a high strength concrete for making the testing beams and proceeded to compare different geometries of beams made with FRP reinforcement bars and with a commonly used rebar of corrugated steel, which showed that there are certain predominant factors that influence the resistant capacity of beams with FRP reinforcement like the adherence of the bars, the diameter, their physical and mechanical properties and the geometry of the elements; Likewise it is concluded that a factor that was considered as one of the most important in the maximum resistance that a beam can reach such as the resistance of concrete was not as influential in the ultimate resistance of these elements.

**Keywords:** FRP, fiber reinforced polymers, HSC, high strength concrete, GFRP, polymers reinforced with fiber glass, bars.



# Índice

## Capítulo 1

Antecedentes y definiciones de materiales.

---

1.1	Introducción.....	2
1.2	Cemento.....	2
1.2.1	Historia del cemento en el mundo y en el país.....	2
1.2.2	Componentes del cemento.....	3
1.2.2.1	Clinker.....	3
1.2.2.2	Regulador de fraguado.....	4
1.2.2.3	Adiciones.....	4
1.2.3	Tipos de cemento.....	4
1.2.4	Proceso de fabricación del cemento.....	6
1.3	Agregados.....	8
1.3.1	Agregado fino.....	9
1.3.2	Agregado grueso.....	10
1.3.3	Granulometría.....	10
1.3.4	Forma.....	10
1.3.5	Densidad.....	11
1.3.6	Porosidad y absorción del agua.....	11
1.3.7	Peso unitario o peso volumétrico.....	11
1.3.8	Porcentaje de vacíos.....	11
1.3.9	Humedad superficial.....	11
1.4	Agua.....	12
1.4.1	Agua de mezclado.....	12
1.4.2	Agua de curado.....	13
1.5	Aditivos.....	14
1.5.1	Aditivos aceleradores.....	14
1.5.2	Aditivos retardadores.....	14
1.5.3	Aditivos plastificantes reductores de agua.....	15

1.5.4 Aditivos fluidificantes.....	15
1.6 Tipos de refuerzo.....	16
1.6.1 Varillas de acero.....	16
1.6.1.1 Introducción del acero como refuerzo del hormigón.....	16
1.6.1.2 Procesos de fabricación.....	16
1.6.1.3 Siderúrgica en Ecuador.....	19
1.6.2 Varillas de fibra sintética.....	20
1.6.2.1 Introducción.....	20
1.6.2.2 Historia.....	21
1.6.2.3 Uso de las varillas de FRP en la construcción.....	21
1.6.2.4 Ventajas de las varillas de FRP.....	23
1.6.2.5 Diferencias de las varillas de FRP con el acero.....	24
1.6.2.6 Propiedades de las varillas de FRP.....	25
1.6.2.7 Propiedades físicas.....	25
1.6.2.8 Propiedades mecánicas.....	26
1.6.2.9 Situación de FRP en el país.....	31
1.6.2.10 Concurso FRP Composites Competition.....	32
1.7 Conclusiones.....	33

## Capítulo 2

Ensayo de materiales de materiales y dosificación del H.A.R.

---

2.1 Hormigón de Alta Resistencia (H.A.R).....	36
2.1.1 Introducción al hormigón de alta resistencia.....	36
2.2 Ensayos de materiales.....	36
2.2.1 Densidad del cemento.....	37
2.2.2 Granulometría del agregado.....	41
2.2.3 Humedad.....	42
2.2.4 Absorción.....	42
2.2.5 Peso Específico.....	43

2.2.6 Forma.....	45
2.3 Diseño de la mezcla de hormigón de alta resistencia.....	46
2.3.1 Método de diseño de mezclas de hormigones de alta resistencia según el comité ACI211.4R.....	46 47
2.3.2 Procedimiento de diseño de mezcla planteada.....	51
2.3.3 Ensayos a compresión simple.....	54
2.3.4 Costo de producción.....	55
2.3.5 Resistencia final.....	56
2.4 Ensayo a tracción de varillas.....	58
2.5 Conclusiones.....	69

## Capítulo 3

### Vigas y Resultados

---

3.1 Planteamiento general.....	72
3.2 Geometrías planteadas.....	75
3.2.1 Geometría tipo 1.....	78
3.2.2 Geometría tipo 2.....	80
3.2.3 Geometría tipo 3.....	82
3.2.4 Geometría tipo 4.....	84
3.3 Elaboración de encofrados.....	86
3.4 Proceso de elaboración de los elementos.....	88
3.5 Fichas de resultados.....	90
3.6 Tablas resumen de resultados.....	116
3.7 Resumen.....	119



## Capítulo 4

### Análisis y comparación de resultados.

---

4.1 Introducción.....	122
4.2 Comparaciones entre vigas.....	122
4.2.1 Carga última vigas tipo "A".....	122
4.2.2 Carga última vigas tipo "B".....	123
4.2.3 Carga última vigas tipo "C".....	124
4.2.4 Comparativa de cargas últimas.....	126
4.2.5 Carga a los 3.5 mm vigas tipo "A".....	127
4.2.6 Carga a los 3.5 mm vigas tipo "B".....	128
4.2.7 Carga a los 3.5 mm vigas tipo "C".....	129
4.2.8 Comparación de cargas a los 3.5 mm.....	131
4.2.9 Relación de cargas 3.5 mm / final.....	133
4.2.10 Tipo de fallos.....	133
4.2.11 Relación Costo / Carga.....	135
4.2.12 Relación Peso / Carga.....	137
4.3 Variación de forma y diámetro de la varilla.....	140
4.3.1 Carga Última viga tipo D.....	140
4.3.2 Carga a los 3.5 mm vigas tipo "D".....	141
4.3.3 Relación Costo / Carga.....	142
4.3.4 Relación Peso / Carga.....	143
4.4 Conclusiones.....	144

Conclusiones y recomendaciones generales.....	146
---	-----

Líneas de investigación.....	147
------------------------------	-----

# Índice de figuras

## Capítulo 1

Antecedentes y definiciones de materiales.

Figura1. Vista de la cúpula del Panteón de Agripa.....	2
Figura2. Faro de Edystone.....	2
Figura3. Producción de cemento en el Ecuador.....	3
Figura4. Comercialización por empresa hasta el 2015.....	3
Figura5. Proceso de fabricación del cemento.....	6
Figura6. Agregado fino utilizado.....	10
Figura7. Agregado grueso utilizado.....	11
Figura8. Peso unitario compactado del agregado fino y grueso.....	12
Figura9. Diagrama de proceso de altos hornos.....	17
Figura10. Sección en perspectiva de proceso de altos hornos.....	17
Figura11. Explicación del proceso de hornos eléctricos.....	18
Figura12. Horno eléctrico.....	18
Figura13. Productos importados por Ecuador, costo y cantidad.....	18
Figura14. Restauración de columnas implementando refuerzos de varillas de FRP.....	22
Figura15. Puente Kattenbusch, Alemania.....	22
Figura16. Armado de refuerzos con varillas GFRP Aslan 100 del puente Floodway, Canada.....	22
Figura17. Armado de refuerzos con varillas GFRP Aslan 100 del puente Elkhorn, North Bridge, Washington, Nebraska.....	23
Figura18. Reconstrucción del muro de contención en la autopista de Lahaina Maui con GFRP Aslan 100.....	23
Figura 19. Reconstrucción de domos y arcos de la catedral de la Laguna, Teneri- fe, Islas Canarias con GFRP Aslan 100 .....	23
Figura 20. Ejemplo de hormigón ornamental prefabricado con varillas de GFRP Aslan 100.....	24

Figura 21. Ejemplo de estructuras de madera reforzadas con varillas de GFRP Aslan 100.....	24
Figura 22. Rieles de tranvia con GFRP Aslan 100.....	24
Figura 23. Variación con el diametro de la resistencia minima garantizada en varillas FRP.....	26
Figura24. Variacion con el diametro de carga ultima en varillas FRP.....	26
Figura25. Resistencia de adherencia según el homigon C1 o C2.....	29
Figura26. Varillas utilizadas para analisis.....	29
Figura27. Aumenrto de la adherencia debido al cambio de fuerza de compresion de hormigon representando a traves de la relacion max. (C2) max (C1).....	29
Figura28. Productos expuestos en Equisplast, Cuenca.....	31
Figura29. Productos expuestos en Equisplast, Cuenca.....	31
Figura30. Graficos explicativos del reglamento del concurso FRP Composites Competition.....	32
Figura31. Grupo ARQUC 2017, Detroit, MI.....	33
Figura32. Vigas Ensayadas en el concurso FRP 2017, Detroit, MI.....	33

## Capítulo 2

Ensayo de materiales de materiales y dosificación del H.A.R.

Figura33. Evolución de las resistencia del hormigon de alta resistencia.....	
Figura34. Ejemplo de variacion de las propiedades usadas en el hormigon.....	
Figura35. Cemento necesario para realizar el ensayo.....	
Figura36. Liquido no reactivo.....	
Figura37. Temperatura constante para introduccion del cemento.....	



Figura38. Rodamiento de la matraz de Le Chatelier luego de introducir el cemento.....	39
Figura39. Variación de liquido por introduccion del cemento.....	39
Figura40. Medicion de variacion con temperatura constante.....	39
Figura41. Resultado granulometrico de la arena.....	41
Figura42. Resultado granulometrico de la arena.....	42
Figura43. Material ocupado en ensayo con la matraz de Le Chatelier.....	43
Figura44. Masa del frasco más agua.....	44
Figura45. Introducción de la arena.....	44
Figura46. Masa del frasco más agua y arena.....	44
Figura47. Ensayo de densidad de agregado grueso.....	44
Figura48. Agregado grueso.....	45
Figura49. Tamaño máximo del agregado.....	47
Figura50. Curva tiempo - resistencia .....	56
Figura51. Probetas cilíndricas ensayadas.....	57
Figura52. Anclaje para el ensayo de tracción en varillas de FRP.....	58
Figura53. Varilla de GFRP colocada para el ensayo de traccion.....	58
Figura54. Varillas ensayadas a traccion.....	58
Figura55. Diagrama esfuerzo - elongación acero diámetro 10 mm #1.....	60
Figura56. Diagrama esfuerzo - elongación acero diámetro 10 mm #2.....	60
Figura57. Varilla de acero de diámetro 10 mm luego de la rotura.....	60
Figura58. Diagrama esfuerzo - elongación acero diámetro 10 mm #3.....	60
Figura59. Diagrama esfuerzo - elongación acero diámetro 12 mm #1.....	61
Figura60. Diagrama esfuerzo - elongación acero diámetro 12 mm #2.....	61
Figura61. Varilla de acero de diámetro 12 mm luego de la rotura.....	61
Figura62. Diagrama esfuerzo - elongación acero diámetro 12 mm #3.....	61
Figura63. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Aslan 100 diámetro 10 mm #1....	62
Figura64. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Aslan 100 diámetro 10 mm #2...	62
Figura65. Varilla Aslan 100 de diametro de 10 mm luego de la rotura.....	62
Figura66. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Aslan 100 diámetro 10 mm #3...	62

Figura67. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Marshall C- Bar diámetro 10 mm #1.....	63
Figura68. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Marshall C- Bar diámetro 10 mm #2.....	63
Figura69. Varilla Marshall C- Bar diámetro 10 mm luego de la rotura.....	63
Figura70. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Marshall C- Bar diámetro 10 mm #3.....	63
Figura71. Diagrama esfuerzo - elongación varilla ComBar diámetro 9 mm #1.....	64
Figura72. Diagrama esfuerzo - elongación varilla ComBar diámetro 9 mm #2.....	64
Figura73. Varilla ComBar diámetro 9 mm luego de la rotura.....	64
Figura74. Diagrama esfuerzo - elongación varilla ComBar diámetro 9 mm #3.....	64
Figura75. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Equisplast diámetro 12 mm #1...	65
Figura76. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Equisplast diámetro 12 mm #2...	65
Figura77. Varilla Equisplast diámetro 12 mm luego de la rotura.....	65
Figura78. Diagrama esfuerzo - elongación varilla Equisplast diámetro 12 mm #3...	65
Figura79. Varilla Equisplast luego del ensayo a tracción.....	66
Figura80. Extremo de la varilla Aslan 100 luego del ensayo a tracción.....	66
Figura81. Varilla de acero luego del ensayo a tracción.....	66
Figura82. Varilla Marshall luego del ensayo a tracción.....	66
Figura83. Varilla ComBar luego del ensayo a tracción.....	66
Figura84. Varilla Equisplast luego del ensayo a tracción.....	66
Figura85. Aplastamiento de los extremos de la varilla Equisplast.....	67
Figura86. Aplastamiento de los extremos de la varilla Marshall.....	67
Figura87. Rotura del extremo de la varilla Equisplast una vez retirada de la máquina.....	67

## Capítulo 3

### Vigas y Resultados

Figura88. Diagrama de fuerzas y momentos de vigas.....	74
Figura89. Ubicación de la varilla según el diagrama de fuerzas en viga B.....	74
Figura90. Máquina de ensayos del laboratorio de la facultad de Arquitectura con los elementos adecuados para los ensayos de vigas.....	74
Figura91. Descripción del modelo puntal-tensor.....	75
Figura92. Modelo puntal-tensor con las condiciones establecidas.....	75
Figura93. Modelo puntal-tensor adaptado a las relaciones dimensionales esta blecidas.....	75
Figura94. Viga tipo B resultante.....	75
Figura95. Viga tipo D resultante.....	77
Figura96. Viga tipo A resultante.....	77
Figura97. Viga tipo C resultante.....	77
Figura98. Representación 3d de la viga A.....	78
Figura99. Alzado y corte de la viga A.....	78
Figura100. Viga tipo A luego de 24 horas de fundido de hormigón.....	79
Figura101. Viga tipo A durante el proceso de ensayo.....	79
Figura102. Representación 3d de la viga B.....	80
Figura103. Alzado y corte de la viga B.....	80
Figura104. Viga tipo B luego de 24 horas de fundido de hormigón.....	81
Figura105. Viga tipo B durante el proceso de ensayo.....	81
Figura106. Representación 3d de la viga C.....	82
Figura107. Alzado y corte de la viga C.....	82
Figura108. Viga tipo C antes del ensayo a compresión.....	83
Figura109. Viga tipo C durante el proceso de ensayo.....	83
Figura110. Representación 3d de la viga D.....	84
Figura111. Alzado y corte de la viga D.....	84
Figura112. Viga tipo D luego de ser ensayada.....	85
Figura113. Viga tipo D durante el proceso de ensayo.....	85
Figura114. Representación 3d del armado de cofre de la viga tipo A.....	86
Figura115. Representación 3d del armado de cofre de la viga tipo B.....	86



Figura116. Representación 3d del armado de cofre de la viga tipo D.....	86
Figura117. Encofrados de la viga tipo C.....	86
Figura118. Encofrado de la viga tipo A.....	87
Figura119. 113: Encofrado de la viga tipo D.....	87
Figura120. Parte extraíble del encofrado de la viga tipo D.....	87
Figura121. Encofrado de la viga tipo B.....	87
Figura122. Lavado del agregado grueso.....	88
Figura123. Lavado del agregado fino.....	88
Figura124. Pesado del agregado grueso para la fundición del hormigón .....	88
Figura125. Lugar de fundición del hormigón con los materiales transportados al sitio. ....	88
Figura126. Probetas cilíndricas para ensayos de hormigón elaboradas en cada fundición. ....	89
Figura127. Medición de la viga tipo A antes de ser ensayada.....	89

## Capítulo 4

### Análisis y comparación de resultados

Figura128. Carga última viga tipo A.....	122
Figura129. Carga última viga tipo B.....	123
Figura130. Carga última viga tipo C.....	124
Figura131. Carga última viga tipo C fisuradas.....	125
Figura132. Comparación de cargas últimas.....	126
Figura133. Carga a 3.5 mm de deformación del tipo de viga tipo A.....	127
Figura134. Carga a 3.5 mm de deformación del tipo de viga tipo B.....	128
Figura135. Carga a 3.5 mm de deformación del tipo de viga tipo C.....	129
Figura136. Carga a 3.5 mm de deformación del tipo de viga tipo C fisuradas.....	130
Figura137. Comparación de cargas a 3.5 mm de deformación.....	131
Figura138. Relación de cargas de 3.5 mm de deformación con carga última.....	132

Figura139. Tipos de fallos generales.....	133
Figura140. Fallo por corte en viga tipo B.....	133
Figura141. Fallo por adherencia en viga tipo D.....	133
Figura142. Costo de producción de vigas.....	134
Figura143. Relación costo / carga de vigas con varillas sintéticas.....	134
Figura144. Relación costo / carga de vigas con varillas de acero.....	135
Figura145. Relación costo / carga.....	136
Figura146. Relación peso / carga de vigas con varillas sintéticas.....	137
Figura147. Relación peso / carga de vigas con varillas de acero.....	138
Figura148. Relación peso / carga.....	139
Figura149. Carga última viga tipo D.....	140
Figura150. Carga a 3.5 mm de deformación del tipo de viga tipo D.....	141
Figura151. Relación de cargas de 3.5 mm de deformación con carga última en viga tipo D.....	141
Figura152. Costo de producción de vigas en vigas tipo D.....	142
Figura153. Relación costo / carga en viga tipo D.....	142
Figura154. Barras de relación costo / carga en viga tipo D.....	142
Figura155. Barras de relación peso / carga en viga tipo D.....	143
Figura156. Relación peso / carga en viga tipo D.....	143

# Índice de tablas

## Capítulo 1

Antecedentes y definiciones de materiales.

Tabla 1: Densidades comunes de las varillas de refuerzo.....	25
Tabla 2: Coeficientes de expansión térmica comunes en varillas de refuerzo.....	25
Tabla 3: Propiedades de tracción comunes en varillas de refuerzo.....	26

## Capítulo 2

Ensayo de materiales de materiales y dosificación del H.A.R.

Tabla 4. Densidades de cementos ensayados.....	40
Tabla 5. Granulometría de la arena fina.....	41
Tabla 6. Humedad de agregados ensayados.....	42
Tabla 7. Absorción de agregados ensayados.....	43
Tabla 8. Pesos específicos.....	44
Tabla 9. Clasificación de áridos.....	45
Tabla 10. Tipo de áridos obtenidos.....	45
Tabla 11. Slump (asentamiento) recomendado para hormigones de Alta Resistencia con y sin superplastificante.....	47
Tabla 12. Tamaño máximo del agregado grueso.....	47
Tabla 13. Volumen de Agregado Grueso por unidad de volumen de hormigón ( Para Ag. Fino con modulo de finura entre 2.5 - 3.2).....	47
Tabla 14. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire del hormigón basado en el uso de una arena con 35% de vacíos...	48
Tabla 15. Relación Agua/Materiales cementicios para hormigones sin superplastificante.....	49

Tabla 16. Relación Agua/Materiales cementicios para hormigones con superplastificante.....	49
Tabla 17. Porcentajes de reemplazo de ceniza volante.....	50
Tabla 18. Datos para el diseño de H.A.R.....	51
Tabla 19. Uso del superplastificante.....	54
Tabla 20. Volumen necesario para ensayos.....	55
Tabla 21. Volumen necesario para ensayos considerando desperdicios.....	55
Tabla 22. Costo de producción de 1 m <sup>3</sup> de H.A.R.....	56
Tabla 23. Resistencia final del hormigón planteado.....	56
Tabla 24. Resultados de ensayo a tracción varilla de acero ø10mm.....	60
Tabla 25: Resultados de ensayo a tracción varilla de acero ø12 mm.....	61
Tabla 26: Resultados de ensayo a tracción varilla Aslan 100 ø10mm.....	62
Tabla 27: Resultados de ensayo a tracción varilla Marshall C-Bar ø 10mm.....	63
Tabla 28: Resultados de ensayo a tracción varilla ComBar ø 9mm.....	64
Tabla 29: Resultados de ensayo a tracción varilla Equisplast ø 12 mm.....	65

## Capítulo 3

### Vigas y Resultados

Tabla 30: Tipos de vigas planteadas y tipos de varillas usadas.....	72
Tabla 31: Especificaciones técnicas de las varillas Aslan 100 rebar.....	79
Tabla 32: Especificaciones técnicas de las varillas ComBar Fiberline.....	81
Tabla 33: Especificaciones técnicas de las varillas Marshall C-Bar.....	83
Tabla 34: Tabla resumen de los resultados obtenidos de cada viga elaborada.....	116
Tabla 35: Tabla resumen de los resultados obtenidos del hormigón de cada viga elaborada.....	118

## Capítulo 4

### Análisis y comparación de resultados

Tabla 36. Diseño de vigas.....	122
--------------------------------	-----

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan Fernando Quevedo Flores en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Influencia de las varillas sintéticas en la capacidad resistente de los elementos tipo vigas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de Enero de 2018



---

Juan Fernando Quevedo Flores

C.I: 0301891537

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan Fernando Quevedo Flores, autor/a del trabajo de titulación "Influencia de las varillas sintéticas en la capacidad resistente de los elementos tipo vigas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 26 de Enero de 2018



---

Juan Fernando Quevedo Flores

C.I: 0301891537



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Edgar Francel Mora Bravo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Influencia de las varillas sintéticas en la capacidad resistente de los elementos tipo vigas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de Enero de 2018



Edgar Francel Mora Bravo

C.I: 0105099089

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Edgar Francel Mora Bravo, autor/a del trabajo de titulación "Influencia de las varillas sintéticas en la capacidad resistente de los elementos tipo vigas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 26 de Enero de 2018



Edgar Francel Mora Bravo

C.I: 0105099089

# Nomenclatura

ACI:	American Concrete Institute.
AFRP:	Polímeros reforzados con fibras de aramida (Aramid fiber reinforced polymer).
CFRP:	Polímeros reforzados con fibras de carbono (Carbon fiber reinforced polymer).
FRP:	Polímeros reforzados con fibras (Fiber reinforced polymer).
GFRP:	Polímeros reforzados con fibras de vidrio (Glass fiber reinforced polymer).
HAR:	Hormigón de alta resistencia.
PUC:	Peso unitario compactado.
SH:	Seco al horno.
SP:	Súper plastificante.
SSS:	Saturado superficialmente seco.
TMN:	Tamaño máximo nominal.
TM:	Toneladas métricas.



# Introducción

El hormigón armado con refuerzo de acero ha sido el material más usado en la construcción a nivel mundial, sin embargo los avances tecnológicos han ido proponiendo nuevos materiales de reforzamiento del hormigón con el fin de que satisfagan ciertos requerimientos en elementos estructurales. Es así que durante ya varios años se ha propuesto el uso de varillas de polímeros reforzados con fibras (FRP) como se las denominará de ahora en adelante, como un sustituto del tradicional reforzamiento del hormigón con varillas de acero.

El American Concrete Institute (ACI), es una organización estadounidense que presenta avances técnicos, recomendaciones y normativas para el diseño de hormigón reforzado. Esta organización realiza cada dos años un concurso denominado "FRP Composites Competition" con el fin de incentivar a los estudiantes a nivel mundial a investigar, diseñar, proponer y ensayar elementos tipo viga reforzados con varillas de FRP que logren alcanzar valores bajos en su relación costo-carga.

Luego de la participación en este concurso que dio lugar en Detroit, Michigan en Estados Unidos en el año 2017 se decidió investigar cual es la influencia de las varillas de FRP en la capacidad resistente de los elementos tipo viga, para ello se planteó diseñar un hormigón de alta resistencia y hacer comparaciones de diferentes geometrías de vigas elaboradas con un refuerzo de varilla GFRP y con un refuerzo de varilla convencional de acero corrugado, con el fin analizar si únicamente la resistencia a tracción de la varilla es el único factor que influye en la resistencia de las vigas o si existen algunos otros factores que se debe tener en cuenta al momento de proponer un diseño de vigas y cuáles son estos factores. Un aporte que se pretende brindar con este trabajo de titulación es dar una pauta a los futuros participantes de este concurso organizado por el ACI a través de los resultados y conclusiones obtenidas.

# Objetivos

## Objetivo General

Determinar la influencia de las varillas de fibras sintéticas en la capacidad resistente de los elementos tipo vigas en comparación con elementos típicos de hormigón armado.

## Objetivos Específicos

- Encontrar una dosificación de mezcla de hormigón con una capacidad de resistencia alta para la fabricación de las vigas propuestas.
- Realizar los ensayos mecánicos correspondientes a las varillas de fibra sintética a utilizar.
- Determinar la capacidad de carga de elementos tipo viga de hormigón con refuerzo de varillas de fibra sintética.
- Elaborar un análisis comparativo de costos con los diferentes tipos de geometría de las vigas elaboradas y sus refuerzos.



# Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres Fernando y Marina y a mis hermanos Mónica y José que han sido mi fuente de apoyo, inspiración y fuerza durante los años de estudio para cumplir mi sueño.

A cada uno de mis amigos y compañeros que hemos compartido una etapa grandiosa de nuestras vidas.

A los profesores que nos han enseñado y nos han inculcado el conocimiento para nuestras vidas.

Juanfer.



## Dedicatoria

Le dedico este trabajo de investigación a mi mami Ruth Paulina Bravo, mi hermana Ana Karen, mis abuelitos por siempre apoyarme en todo, dándome ánimos para superarme y a mi papá Edgar Gustavo Mora, sin la ayuda de todos ellos nada de esto hubiese sido posible.

Además agradezco a mi enamorada María Isabel Andrade brindarme su apoyo incondicional, a mis amigos y compañeros que he compartido excelentes experiencias durante todo este tiempo.

Edgar.



# Agradecimientos

Ing. Xavier Cárdenas  
Arq. Edison Castillo  
Arq. Stalin Cabrera  
Arq. Jonnathan Aguirre  
Empresa SIKA ECUATORIANA S.A.  
Empresa EQUISPLAST S.A.  
Narcisa Arias







## Capítulo 1

### **Antecedentes y definiciones de materiales.**

Se darán a conocer conceptos fundamentales que se debe tener en cuenta acerca de los materiales utilizados para la elaboración del hormigón que fue empleado en los elementos tipo viga. Además de especificaciones técnicas y comparaciones de las varillas de refuerzo de fibras sintéticas con las varillas comunes de acero utilizadas como refuerzo en las vigas planteadas.



## 1.1 Introducción

En este capítulo se explicará los conceptos básicos de los elementos ocupados para la elaboración de las vigas, dado que van a ser utilizados en este trabajo, por lo que hablaremos de sus características más importantes, los componentes del hormigón utilizados serán: cemento, agregado fino y grueso, agua y aditivos, mientras que se dará conocimiento al lector sobre las varillas de fibra sintética y de acero puesto que es el material que más se utiliza en nuestro medio para la elaboración de vigas de hormigón armado y a su vez servirán para poder realizar comparaciones entre estos dos tipos de refuerzos que serán determinantes para esta investigación.

## 1.2 Cemento

El cemento en la actualidad es un material indispensable para toda construcción, ya que sin el difícilmente se logra arrancar algún tipo de obra civil. Por lo tanto, es un elemento conglomerante hidráulico, que al ser amasado con agua en una cantidad determinada forma una pasta, la misma que fragua y se endurece, esta pasta tiene propiedades de adherencia y cohesión dando lugar a un producto con una determinada resistencia mecánica y una durabilidad adecuada, por lo cual permite juntar varios componentes minerales entre sí para crear un nuevo material con resistencia y durabilidad creado por el hombre. (Sánchez de

Guzmán, 2001).

Cabe indicar que, en el mundo de la construcción al nombrar al cemento, implícitamente se refiere al cemento portland, el mismo que al ser dosificado de manera adecuada con agua y distintos tipos de áridos crean el hormigón, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua puesto que experimenta una reacción química, por lo que tendrá una trabajabilidad adecuada y alcanzará niveles de resistencia que ha sido establecido con anterioridad.

### 1.2.1 Historia del cemento en el mundo y en el país

Se conoce que el cemento es un material que ha sido utilizado desde la antigüedad cuando se emplearon pastas y morteros elaborados con arcilla, yeso o cal para unir bloques en las construcciones de edificaciones. Se tiene registro que desde la Antigua Grecia se empezó a ocupar tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, los primeros cementos naturales. Cabe mencionar que en el siglo I a. C. se empezó a utilizar el cemento natural en la Antigua Roma, obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio por lo que la bóveda del Panteón es un claro ejemplar de ello como se aprecia en la figura 1. En el siglo XVIII John Smeaton construye la cimentación de un faro en el acantilado de Edystone, en



Figura 1. Vista de la cúpula del Panteón de Agripa. Tomado de <http://www.arqhys.com/obras-del-antiguo-imperio-romano.html>



Figura 2. Faro de Edystone. Tomado de [https://elviajero.elpais.com/elviajero/2014/09/09/actualidad/1410287794\\_625021.html](https://elviajero.elpais.com/elviajero/2014/09/09/actualidad/1410287794_625021.html)

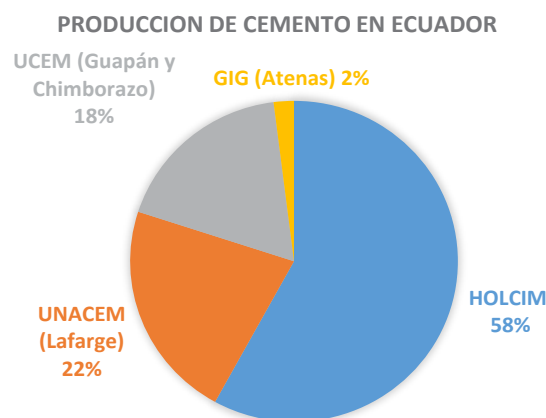


Figura 3. Producción de cemento en el Ecuador. Tomado de [www.inecyc.org.ec/comercializacion-anual-cemento-gris-por-empresa/](http://www.inecyc.org.ec/comercializacion-anual-cemento-gris-por-empresa/) y consultado a funcionarios de Cemento Atenas, 2018.

Año	EMPRESA				IMPORTADO (*)	TOTAL CEMENTO (TON)
	HOLCIM	UNACEM (LAFARGE)	GUAPÁN	UCEM CHIMBORAZO		
2005	2,422,542	665,644	392,352	234,962	0	3,715,500
2006	2,754,605	731,812	424,720	229,871	0	4,141,008
2007	3,019,218	788,947	410,935	227,561	409	4,447,070
2008	3,336,146	954,714	416,775	283,540	74	4,991,249
2009	3,480,298	1,061,221	430,931	346,485	0	5,318,935
2010	3,328,877	1,176,458	432,966	348,824	0	5,287,126
2011	3,614,755	1,313,075	430,868	345,989	0	5,704,687
2012	3,915,512	1,346,059	442,962	327,823	0	6,032,356
2013	4,263,969	1,465,164	475,963	395,224	0	6,600,320
2014	3,993,611	1,452,512	1,069,501	0	0	6,515,624
2015	3,434,413	1,380,785	1,033,040	0	0	5,848,238

Figura 4. Comercialización por empresa en toneladas hasta 2015. Tomado de [www.inecyc.org.ec/comercializacion-anual-cemento-gris-por-empresa/](http://www.inecyc.org.ec/comercializacion-anual-cemento-gris-por-empresa/)

la costa Cornwall, empleando un mortero de cal calcinada como se ve en la figura 2. (IECA, 2017).

El siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron el producto en 1824 y lo bautizaron como el Portland Cement, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura. En el siglo XX surge el auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaelis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar hormigón fresco ideados por Juergen Hinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907. (IECA, 2017).

Los países que son productores importantes del cemento son: La antigua Unión Soviética, China, Japón y Estados Unidos, pero Alemania, Francia, Italia, España y Brasil son también productores reconocidos mundialmente. Según (Camaniero, 2009) afirma que "En el Ecuador la primera fábrica se instaló en la ciudad de Guayaquil, en Junio de 1923 a cargo de Industrias y Construcciones, con una producción de alrededor de 3000 toneladas anuales, con la marca Cóndor." (p. 9). Raul Camaniero (2009) también hace hincapié en que en el

año 2008 en nuestro país el consumo estuvo muy cercano a los 5000000 ton. del material cementicio.

Actualmente en nuestro país tenemos 4 fábricas que prácticamente abarcan la demanda del producto como se ve en la figura 3, los cuales son HOLCIM, UNACEM (con su empresa Lafarge), UCEM (fusión de las cementeras, Cementos Chimborazo y Guapán) y GIG con su producto Cemento Atenas los cuales los valores actualizados hasta el año 2015 según la INECYC son 5850000 toneladas con un ligero decrecimiento en relación a años anteriores como se aprecia en la figura 4.

## 1.2.2 Componentes del cemento

Los componentes que actúan de forma general para la conformación del cemento son el clinker tanto portland como aluminosis, regulador de fraguado y adiciones que pueden ser: escorias siderúrgicas, puzolanas naturales, cenizas volantes, humo de sílice y filleres calizos.

### 1.2.2.1 Clinker

El principal elemento del cemento es el clinker, el cuál puede ser de dos tipos, el Clinker Portland y el Clinker de Cemento Aluminoso que serán explicados a continuación:

**Clinker Portland:** Es el resultado que se consigue al calcar hasta fusión parcial mezclas muy íntimas, preparadas artificialmente, de calizas y arcillas, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes.

Según (Martínez, 2008) indica que este clinker está formado por unos compuestos que en función de su proporción en el clinker crearán una característica u otra, los compuestos más importantes dentro del clinker son: el Silicato Tricálcico (SC3), Silicato Bicálcico (SC), Aluminato Tricálcico (AC3) y Aluminoferrito Tetracálcico (AFC).

**Clinker de cemento aluminoso:** Se logra por fusionar una mezcla de calizas y aluminio de composición y granulometría adecuadas para conseguir un contenido mínimo de alúmina del 36%, se debe realizar un estudio específico para el uso de este clinker puesto que se presentan patologías (aluminosis) que pueden presentar estos cementos. (Martínez, 2008).

#### 1.2.2.2 Regulador de fraguado

Pueden ser productos tanto naturales como artificiales que conjuntamente al clinker en cantidades pequeñas y molidos conjuntamente, proveen cementos con un fraguado adecuado. El regulador de fraguado que usualmente es más ocupado en

la fabricación del cemento es el sulfato cálcico (cal o yeso) en alguna de sus variedades o en una mezcla de ellas.

#### 1.2.2.3 Adiciones

Según las características que se necesiten en un determinado momento, se le pueden añadir al clinker adiciones para obtener así cemento con características y propiedades especiales, estas adiciones pueden ser añadidas al clinker hasta un máximo del 5% y pueden ser escorias siderúrgicas, puzolanas naturales, cenizas volantes y otros. (Martínez, 2008).

#### 1.2.3 Tipos de cemento

Una vez revisada toda la biografía pertinente se expone que existen varios tipos de cementos entre los cuales resaltan los siguientes: cemento Portland normal, cemento Portland puzolánico, cemento de alto horno y cemento con alto contenido de alúmina.

##### Cemento Portland normal

Este cemento es el más ocupado en la mayoría de obras de construcción, puesto que no requiere condiciones especiales y requerimientos en resistencia por lo que resulta ser el más conocido.



Esta clase de cemento se da mediante una síntesis de mezclas de pasta finamente dividida. (González, 2014).

### **Cemento Portland puzolánico**

Son una mezcla de Clinker portland, yeso y puzolana que se obtiene mediante la pulverización conjunta de los elementos mencionados. Los materiales puzolánicos son sustancias naturales con una composición silíceo o silicoaluminosas, dichos compuestos no endurecen por si mismos cuando se mezclan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan a temperatura ambiente y son capaces de desarrollar resistencia. Cuando se fabrican hormigones con este tipo de cemento se llegan a obtener resistencias altas, ensayándolas a los 56 o 90 días luego de haber realizado la fundición ya que a edades avanzadas, los concretos de cemento puzolánico generalmente exhiben resistencias a la compresión que se aproximan a las de los concretos correspondientes conteniendo cemento portland sin puzolana. (Campoverde y Muñoz, 2015).

Estas características varían del cemento portland normal lo que genera que tenga algunas ventajas con respecto a este como por ejemplo: una mejor economía en el costo del conglomerante, menor calor de hidratación lo que conlleva a una menor

tendencia a la fisuración, una mejor resistencia de los elementos a largo plazo, etc. (Sánchez de Guzmán, 2001).

### **Cemento de alto horno**

A este tipo de cemento se le agrega escoria granulada finamente molida de alto horno entre 20 y 85% de la masa de la mezcla, este material se consigue del desperdicio que generan de la manufactura de lingotes de hierro. (Sánchez de Guzmán, 2001)

### **Cemento con alto contenido de alúmina**

Este tipo de cemento se conforma de cal y bauxita, dicha bauxita está formada por alúmina hidratada de titanio y hierro. Este cemento tiene una resistencia a los sulfatos esto se debe a la ausencia de hidróxido de calcio, esta fusión debe ser correctamente proporcionada y homogeneizada ya que en el clinker que se forme debe tener mas del 30% de óxido de aluminio y el óxido de hierro debe ser menor al 20%. (Campoverde y Muñoz, 2015).

En los productos de hidratación, además posee un índice alto de desarrollo de resistencia, pero es un cemento de endurecimiento rápido, el cual no está acompañado de un fraguado rápido; es decir es lento, este tiempo de fraguado lento puede deberse por la adición de yeso, cal, materia orgánica

nica. (Campoverde y Muñoz, 2015).

### 1.2.4 Proceso de fabricación del cemento

Para la fabricación del cemento se debe cumplir con ciertos procesos descritos a continuación y explicados mediante un ejemplo gráfico como se puede apreciar en la figura 5.

#### Área de trituración

Se consigue las materias primas generalmente de minerales calcáreos y a continuación se proceder a realizar la disminución del tamaño de las materias primas provenientes de las diferentes canteras o depósitos que generalmente son extraídas por arrastre, es decir mediante palas mecánicas, cargador y traíllas, siempre tomando en cuenta de que se minimice el impacto ambiental. Dicha reducción va desde un tamaño promedio de partícula de 100 cm hasta la reducción de tamaño sea del 96%, o que su tamaño promedio sea menor o igual a 25 mm. Un triturador de martillos es utilizado para la trituración del material que acto seguido son transportadas a la fábrica de cemento. (González, 2014).

#### Prehomogenización

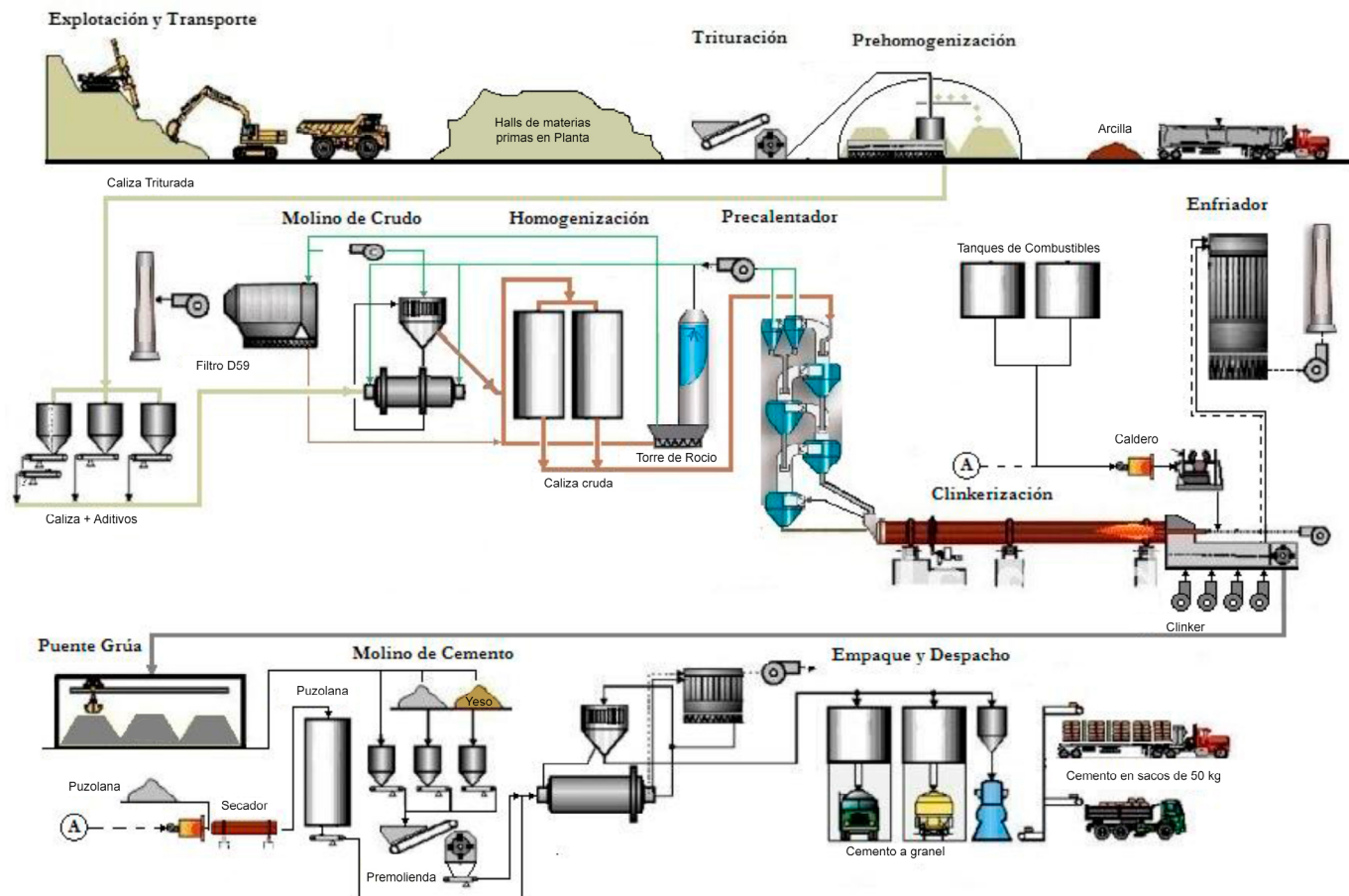


Figura 5. Proceso de fabricación del cemento. Tomado de la tesis: Estudio experimental del uso de diferentes aditivos como plastificantes reductores de agua en la elaboración de hormigón y su influencia en la propiedad de resistencia a la compresión p. 6

Luego de haber realizado la trituración de la materia prima llega a la zona de prehomogenización mediante una banda transportadora destinada al almacenamiento del material triturado. El material se guarda mediante apilamiento y cada uno posee un sistema de recuperación a través de un sistema de rastrillos, este proceso del transporte se lo realiza previo a la dosificación y molienda de crudo. (Campoverde y Muñoz, 2015).

### **Molienda de crudo**

En la molienda de crudo se dosifica y prepara las materias primas de manera adecuada siempre rigiéndose a los requerimientos físicos y químicos, a normas existentes como a requerimientos del mercado para la producción de Clinker de cemento. En este punto el material debe ser lo suficientemente fino como para que las reacciones en el horno cumplan la temperatura y el tiempo establecidos por las normas. Una de las funciones secundarias de esta etapa es evaporar el agua de las materias primas, dicha evaporación se realiza mediante los gases que provienen de la torre del precalentador del horno rotativo. (González, 2014).

### **Homogenización**

El producto de la molienda de crudo debidamente proporcionadas por el punto anterior es transpor-

tado hasta los silos de homogenización y estos a la vez tienen la función de mezclar todo el material molido de la mejor forma posible, esto se lo realiza mediante un sistema de inyección de aire a altas presiones conocido por el nombre de vía seca, esta inyección genera un movimiento del material molido que está en el interior de los silos, y así asegurar una correcta homogeneidad del producto, o por el contrario la vía húmeda especifica que la mezcla se bombea a tanques de homogenización que son grandes tanques cilíndricos que giran en torno a un eje central y que con sus aspas al interior de estos evitan la sedimentación de los sólidos mediante agitación mecánica y burbujeo de aire comprimido. Una vez que se haya comprobado mediante un muestreo que la composición esté entre los rangos exigidos por las normas para su fabricación, este material está listo para ser alimentado al horno, la alimentación al horno se lo realiza de forma controlada mediante un panel de funciones. (Sánchez de Guzmán, 2001).

### **Clinkerización y enfriamiento**

Es la etapa fundamental del proceso de fabricación de cemento, puesto que luego de seguir un proceso de dosificación, pulverización, de ser mezclada y homogeneizada se procede a un tratamiento térmico con temperaturas de alrededor de 300 y 1500 grados centígrados para dar lugar a la

formación de Clinker de cemento. En el proceso de clinkerización la harina cruda procedente de los silos de almacenamiento es inyectado al ducto de salida de los gases de combustión de la segunda etapa del precalentador, dicho precalentador actúa como un intercambiador de calor entre los gases de combustión y el material de alimentación, a medida que el material desciende por el precalentador ya que tiene una pequeña inclinación con respecto a la horizontal aumenta su temperatura mejorando la eficiencia del horno rotativo donde se produce la clinkerización a una temperatura de 1400 a 1500 grados centígrados cumpliendo así el proceso de vía seca. (Sánchez de Guzmán, 2001).

En cambio, mediante el proceso de vía húmeda se utiliza cuando las materias primas poseen un alto rango de humedad, esta pasta es bombeada a la parte más alta del horno que por gravedad comienza a descender y sentir mayores temperaturas conforme sigue cayendo el material. (González L., 2014).

El enfriamiento del material debe ser un proceso rápido ya que si no se realiza adecuadamente el clinker afecta negativamente en la molienda del cemento como también se puede hidratar en presencia de humedad, este cambio de temperaturas se da entre los 1300 o 1200 grados centígrados a 50

o 70 grados centígrados, este tipo de enfriamiento se logra conseguir haciendo pasar aire frío por el clinker en enfriadores de tipo parrilla. (Sánchez de Guzmán, 2001).

### **Molienda De Cemento**

La molienda del cemento es el punto final de todo el proceso de fabricación, lo que realiza esta área es mezclar y moler Clinker, puzolana y yeso mediante prensas de rodillos, molinos verticales y horizontales de rodillos, molinos horizontales de bolas para elaborar cemento de acuerdo a las normas ecuatorianas que rigen la producción de cemento. (Campoverde y Muñoz, 2015).

### **Empaque Y Despacho De Material**

En esta zona existen máquinas ensacadoras rotativas con sus respectivos dosificadores lo cual permite un flujo continuo y estable en la emisión de sacos de cemento como también se puede realizar la distribución del material a granel en camiones especiales. El control de calidad se lo realiza a la salida del vehículo de transporte por básculas electrónicas y certificadas por el INEN relacionando la variable de peso de cada saco (50+- 0.5 kg/saco). (Campoverde y Muñoz, 2015).

### 1.3 Agregados

Los agregados también conocidos por áridos son materiales granulares, naturales o artificiales, que sirven como material de relleno en las mezclas de hormigón que se supondría que son utilizados para reducir costos en la fabricación del hormigón pero terminan siendo muy importantes dentro de la fabricación del mismo, están formados por arena y grava, es decir, son materiales pétreos que conforman el 75% de volumen del hormigón y que la pasta de cemento sin ellos sufriría muchos contracciones que resultarían en el fracaso de los elementos. (Quiróz & Salamanca, 2006).

Según (Campoverde y Muñoz, 2015) indican que los agregados tienen varias características que son necesarias para obtener un hormigón adecuado para el trabajo en el que se lo va a aplicar, algunas de estas características son:

- Proveer una masa de partículas que son idóneas para resistir la abrasión y las variaciones climáticas a las que estará expuesto el hormigón.
- Resisten los cambios de volumen que se producen a causa del proceso de fraguado y endurecimiento evitando agrietamientos en el hormigón.

- Influyen en la trabajabilidad, el acabado, calidad y la economía del hormigón.

- Los agregados gracias a su resistencia propia contribuyen con parte de la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón.

Los áridos aseguran una buena adherencia con la pasta de cemento endurecido. Según (Sánchez de Guzmán, 2001), existen 3 tipos de clasificaciones para los agregados los cuales son por su procedencia, por su tamaño y por su gravedad específica.

Por su procedencia tenemos a los naturales que se forman por proceso geológicos y a los artificiales que vienen de un proceso de transformación de los agregados naturales (piedras trituradas y escoria siderúrgica) en cambio por su tamaño se definen en agregados grueso y fino que será hablado con detenimiento posteriormente y por su gravedad específica que los clasifican por rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas. (Quiróz & Salamanca, 2006).

#### 1.3.1 Agregado Fino

El agregado o árido fino natural contiene la mayor parte de porcentaje en peso del hormigón, usualmente es de 60% o más, está constituido de arena natural pero debe ser libre de materias impuras como polvo, limo, pizarra álcalis y materias orgá-



nicas como se observa en la figura 6, sus granos o partículas deben ser cúbicas o esféricas más no de forma alargada o planada para que se ocupe muy poca demanda de agua y entregar mas docilidad al hormigón, su tamaño está comprendido desde los 0,0074 mm hasta 4,76 mm, además, en el análisis granulométrico las partículas no deben tener más de un 45% de peso de pasante en cualquier tamiz, al igual que su módulo de finura debe estar próximo a 3 y deberán quedar retenidas en el tamiz No. 200. (Martínez, 2008).

### 1.3.2 Agregado Grueso

El agregado o árido grueso natural adecuado para la fabricación de un hormigón puede consistir de grava, grava triturada, piedra triturada o una mezcla de estas tal como se aprecia en figura 7, y sus características condicionan fuertemente a las propiedades del hormigón, su tamaño está comprendido desde los 4,76 mm hasta 51 mm por tanto las partículas del agregado grueso deben ser duras y estables tanto en su estado fresco como endurecido y también es muy recomendable no estar cubiertas por materiales extraños ni polvo y deberán cumplir parámetros para una mejor adaptación a los elementos que ocuparán hormigón, Se recomienda que tanto el agregado grueso como el agregado fino no contengan más de un 5% de arcillas y finos y ni más de 1.5% de materias orgá-

nicas ya que afectan en la dosificación del hormigón. (Harmsen, 2002).

### 1.3.3 Granulometría

La granulometría es un aspecto fundamental en este trabajo, este término se refiere a la diferencia de tamaños que existe en las partículas que conforma la masa de un árido grueso o fino y que se define como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados, por tanto, es necesario el uso de tamices normalizados de malla de alambre con abertura cuadrada con la finalidad de distribuir en fracciones de igual tamaño los granos que conforman el árido, a este proceso se lo llama análisis granulométrico, el mismo que es muy importante ya que con este análisis se diseña estructuralmente el hormigón. (Campoverde y Muñoz, 2015).

### 1.3.4 Forma

Siempre que la forma del árido sea redonda (piedra de río) o cúbica (piedra triturada) será la mejor selección, más no partículas alargadas y laminadas de textura áspera ya que este tipo de partículas requieren mayor cantidad de agua para obtener un hormigón trabajable. Al tener partículas redondas o cubicas, el grado de acomodamiento, de estas partículas será mucho mayor que el aco-



Figura 6. Agregado fino utilizado, proceso de cuartamiento para selección de material a ensayarse. Fuente propia.



Figura 7. Agregado grueso utilizado, proceso de cuartamiento para selección de material a ensayarse. Fuente propia.

modamiento de otra forma de partículas con esto se lograría una alta densidad y por lo tanto una mayor resistencia. (Sánchez de Guzmán, 2001).

### 1.3.5 Densidad

Según (Campoverde y Muñoz, 2015, p. 11). indican que "Entre menor sea la densidad de un agregado, mayor porosidad tendrá el mismo, esta densidad responde a la relación que existen entre el peso la masa del material y el volumen que ocupa la misma" siempre y cuando se estimen los poros saturables y no saturables por tanto esta será la densidad aparente del agregado.

### 1.3.6 Porosidad y absorción del agua

La porosidad del árido es muy importante ya que si una partícula es porosa será menos dura y resistente que una partícula maciza, por tanto, la porosidad, es decir el volumen de espacios dentro de la partícula del agregado afectara a propiedades como la resistencia a la compresión, densidad, absorción, etc. Para poder medir la porosidad se lo calcula mediante una diferencia de pesos y se la expresa en porcentaje, varía entre 0 % y 5 % en los agregados pétreos. (Sánchez de Guzmán, 2001).

### 1.3.7 Peso unitario o peso volumétrico

Cuando se elabora hormigón la calidad y la ap-

titud que posee un agregado para ser ocupado viene dada por el peso unitario o peso volumétrico, este parámetro se lo define como la relación existente entre el peso de las partículas de un agregado y el volumen que ocupan dichas partículas incluyendo los vacíos. Existen dos tipos de pesos volumétricos, el compacto como se aprecia en la figura 8 que es cuando los agregados son varillados y el suelto cuando el material se encuentra en estado normal de reposo, estos dos tipos de masas unitarias oscilan entre valores de 1100 kg/m<sup>3</sup> y 1600 kg/ m<sup>3</sup> en agregados naturales. (Campoverde y Muñoz, 2015).

### 1.3.8 Porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos es la medida del volumen de los espacios entre las partículas de una masa de agregado, este parámetro es expresado en porcentaje, y esto depende de la forma en que las partículas se acomoden o mejor dicho depende del tipo de peso volumétrico. (Campoverde y Muñoz, 2015).

### 1.3.9 Humedad superficial

La cantidad de agua superficial que retienen las partículas de un agregado es la humedad, se logra calcular mediante la diferencia de pesos que se obtiene por un proceso de secado en el que el



## 1.4 Agua

agregado pasa del estado húmedo al seco. La humedad de un agregado también es expresada en porcentaje. (Campoverde y Muñoz, 2015).

El agua es el elemento que además de participar en las reacciones de hidratación del cemento, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. Se pueden hacer dos distinciones básicas, el agua de mezclado y el agua de curado. (Martínez, 2008).

### 1.4.1 Agua de Mezclado

El agua de mezclado es un tipo de agua que ha sido pensada para la utilización en la dosificación del hormigón y está definida como la cantidad de agua por volumen unitario del hormigón, el agua de mezclado tiene dos funciones principales que es permitir la hidratación del cemento y que permita producir una pasta suficientemente hidratada y con una trabajabilidad adecuada lo que permitirá un correcto mezclado de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico. (Sánchez de Guzmán, 2001).

Según (Harmsen, 2002). indica que esta agua puede extraerse de fuentes naturales siempre y cuando sea limpia y considerando que no contengan elementos orgánicos indeseables o un alto contenido de sales inorgánicas. Se considera que el agua potable es apta para la elaboración de hor-

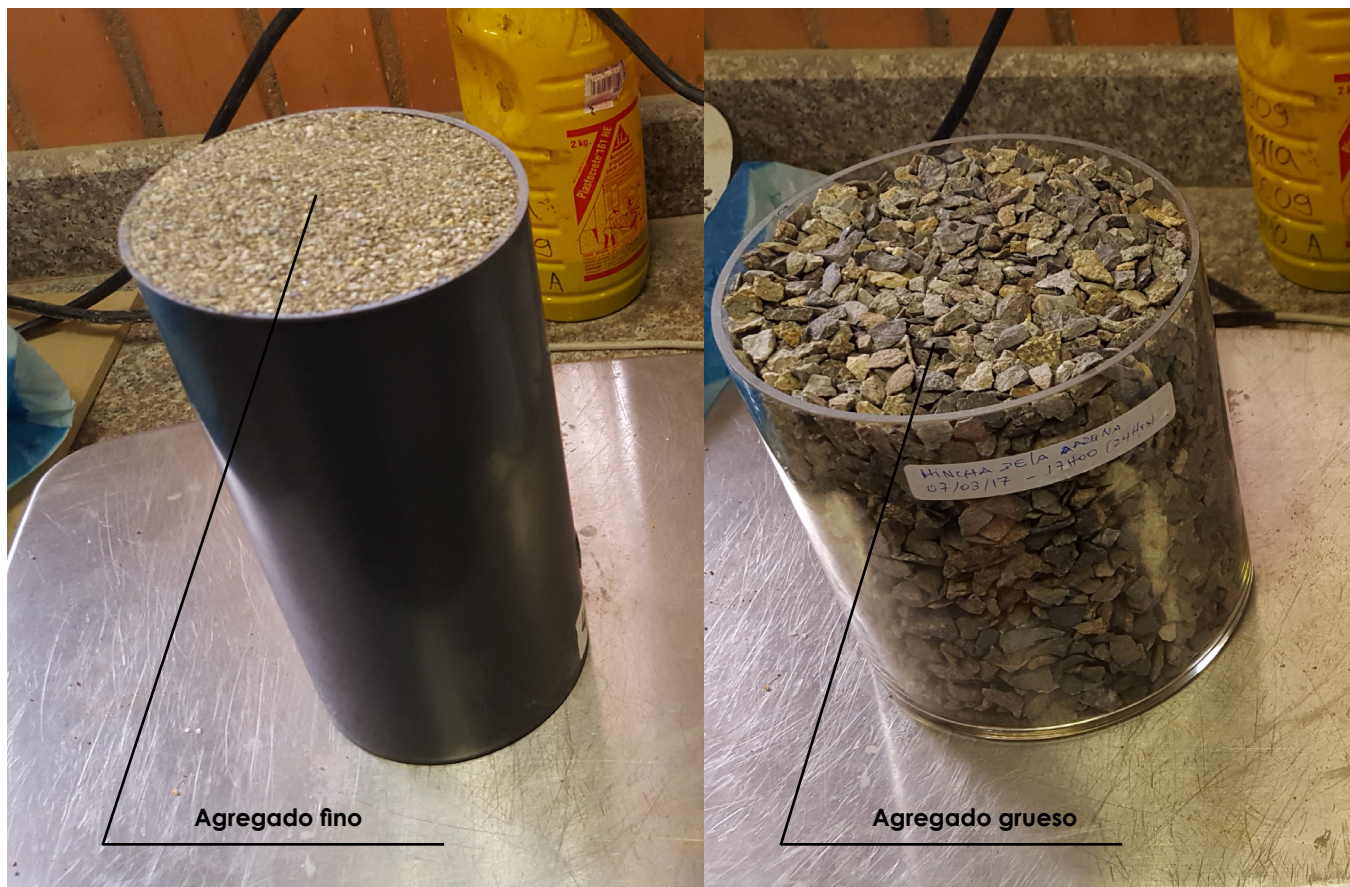


Figura 8. Peso unitario compactado del agregado fino y grueso. Fuente propia.



migones por lo que para nuestro estudio se utilizó el agua proporcionada por la empresa ETAPA EP, la cual es utilizada por la ciudadanía en general ya que es apta para el consumo humano y también ocupada en la industria.

#### 1.4.2 Agua de Curado

El agua de curado es un conjunto de condiciones óptimas para que la pasta de cemento no sufra alteraciones y por lo tanto fisuras, por lo que se utiliza para evitar la desecación del hormigón, esta agua constituye un suministro adicional de agua para permitir y mejorar la hidratación del cemento. (Campoverde y Muñoz, 2015).

Durante el proceso de fraguado y en sus primeros días de endurecimiento, se producen pérdidas de agua por evaporación, creándose una red capilar en el hormigón, la cual disminuye su resistencia. Para compensar estas pérdidas y permitir que se desarrollen nuevos procesos de hidratación, aumentando su resistencia, el hormigón debe curarse de forma adecuada añadiéndole abundante agua o sumergiéndolo siempre que sus dimensiones lo permita y cuando aún se encuentre en proceso de consolidación. (Martínez, 2008).

### 1.5 Aditivos

Los aditivos son sustancias que añadidas al hormi-

gón y que pueden ser líquidas o polvo alteran sus propiedades tanto en estado líquido como endurecido como también en el fraguado produciendo que se acentúen y mejoren, de manera que podamos obtener un hormigón de calidad, económico y adecuado para el trabajo a emplear. (Harsem, 2002).

Los aditivos tienen una función principal que se caracteriza por producir una modificación determinada en el hormigón, pudiendo tener, además, una función secundaria y accesorio de modificar alguna o algunas de las características de estos materiales, independientemente de la que defina la función principal. También puede ser que un aditivo produzca modificaciones inevitables de ciertas propiedades de los hormigones, que no se requieran como función secundaria. (Martínez, 2008).

Según (González, 2014) las dosis de los aditivos que se le agrega al hormigón son proporciones no superiores al 5% del peso del cemento y siempre se aconseja seguir las recomendaciones y respetar los límites de las dosis de las casas productoras de los aditivos. El uso de un aditivo es justificado previamente por medio de la experimentación a base de ensayos oportunos elaborados a nivel de laboratorio, en donde se preparan hormigones patrón (sin aditivo) y hormigones con aditivo, con el fin de verificar que al adicionar un aditivo en el hormigón

se obtenga las características requeridas y que no se produce efectos negativos en las otras propiedades del hormigón. (Campoverde y Muñoz, 2015). Tanto como (Campoverde y Muñoz, 2015) y (Sánchez de Guzmán, 2001) concuerdan en que los aditivos controlan o modifican propiedades del hormigón como:

- Trabajabilidad y exudación en estado fresco.
- Tiempo de fraguado y resistencia inicial de la pasta de cemento.
- Penetración y el bombeo.
- Aceleración de la resistencia a corta edad, impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido.
- Reducir o evitar el asentamiento.
- Retardar o reducir el desarrollo del calor.

Existen diferentes tipos de aditivos entre los cuales se pueden diferenciar los siguientes aditivos: aceleradores, retardadores, plastificantes reductores de agua y fluidificantes. El aditivo utilizado en nuestro trabajo es proveniente de la casa comercial Sika, y es un reductor de agua de alto rango e hiperplastificante que cumple a totalidad la norma (ASTM C494, 2008).

### 1.5.1 Aditivos aceleradores

Este tipo de aditivo añadido al hormigón, adelanta el fraguado o el endurecimiento del mismo, y en general, ambos procesos a la vez. Estos aceleradores favorecen la disolución de los constituyentes anhidros del cemento tales como la alúmina o el óxido de hierro como también en su velocidad de hidratación, su acción no está muy bien definida, aunque parece ser que provocan una cristalización rápida de silicatos y aluminatos cálcicos en la pasta del cemento hidratada. Se logra a través de estos aditivos reducir el tiempo de desencofrado, y para el hormigonado en tiempo frío consiguiendo que el hormigón adquiera resistencia rápidamente y contrarrestar el efecto retardador de las bajas temperaturas. (Martínez, 2008).

### 1.5.2 Aditivos retardadores

Son productos que conjuntamente al hormigón ayudan a retardar el fraguado del mismo, es decir, retardan la disolución de los constituyentes anhidros del cemento o su difusión. Los retardadores pueden actuar de dos formas distintas según su naturaleza, una es favoreciendo la solubilidad del sulfato cálcico, que de por sí es retardador de fraguado y, la otra, formando sales cálcicas que son adsorbidas por las partículas de cemento, retrasando de esta forma su hidratación. (Martínez, 2008).

El empleo de retardadores es de sumo cuidado ya que si se emplean en dosis incorrectas, pueden inhibir el fraguado y endurecimiento del hormigón, por esta razón se utilizan con más frecuencia fluidificantes o reductores de agua de amasado, que al mismo tiempo actúan como retardadores. Debido a esto, la resistencia a compresión a edades tempranas disminuye, pero no así a los 28 días que puede incluso resultar más elevada de la esperada. (Martínez, 2008).

Los retardadores son útiles en tiempo caluroso, cuando la distancia de transporte del hormigón fresco es grande o incluso cuando son proyectados, debido a que los retardadores aumentan el tiempo durante el cual el hormigón es trabajable. Suele aumentar la retracción del hormigón, siendo el aumento dependiente de la dosificación del hormigón, y de las condiciones de curado del mismo. (Martínez, 2008).

#### 1.5.3 Aditivos plastificantes reductores de agua

Son aditivos que en su mayoría son líquidos, comúnmente de color marrón, que tiene por objetivo incrementar la trabajabilidad, fluidez del hormigón, acelerando el fraguado, aumentando las resis-

tencias en todas las edades del concreto, reduce agua, gana resistencia a la compresión, aumenta el asentamiento del hormigón con un contenido dado de agua. Por todas estas características mencionadas anteriormente este tipo de aditivos se los suele utilizar en hormigones que van a ser bombeados o empleados en donde existe una alta concentración de armadura de hierro. (Cam-poverde y Muñoz, 2015).

#### 1.5.4 Aditivos fluidificantes

Los fluidificantes son productos líquidos de naturaleza orgánica formados por macromoléculas tensoactivas que tienden a mejorar la cohesión y reología del hormigón, sin introducir aire en su masa. (Martínez, 2008).

Estas moléculas tienen un extremo de su cadena hidrófilo con afinidad por el agua y otro hidrófobo, con lo cual quedan absorbidas y orientadas en la superficie de los granos provocando un efecto lubricante y una dispersión de las partículas de cemento, haciendo que estas requieran menos agua para su mojado e hidratación. Debido al carácter dispersante de estos compuestos se obtienen mezclas de menor viscosidad si se emplea la misma cantidad de agua o bien, mezclas en las que se puede reducir la cantidad de agua a igualdad de viscosidad. (Martínez, 2008).

## 1.6 Tipos de refuerzo

### 1.6.1 Varillas de acero.

#### 1.6.1.1 Introducción del acero como refuerzo del hormigón

El acero como material de refuerzo del hormigón tuvo sus inicios durante el siglo XIX cuando en la antigua Roma surgió la necesidad de un material complementario a la albañilería que resistiera las cargas de tracción que surgían en los elementos estructurales de uso común en aquella época como bóvedas y arcos. Para controlar estos esfuerzos se usaban piezas de acero en forma de U ubicadas en las partes traccionadas de estos elementos, con el fin de controlar la separación de las juntas de los bloques del material que fuese utilizado. (Nistal, Retana, & Ruiz, 2012)

Aquel uso que se le dio al acero en esa época abrió la mente de los antiguos constructores para implementar al acero como material complementario al hormigón y que formando un solo cuerpo sea capaz de soportar los esfuerzos de tracción y compresión a los cuales están sometidos los elementos estructurales. Así es como surgen las primeras patentes de elementos fabricados con hormigón y acero como cubiertas, jardineras y luego se aplica esta unión de materiales para la fabricación de elementos estructurales fundamentales en las edificaciones como vigas y losas. (Nistal, Retana, & Ruiz, 2012)

Hasta que "En el año 1898. Hennebique desarrolla con el conjunto de sus patentes un sistema integral de construcción, en el que plantea por primera

vez un sistema completo, desde la cimentación hasta la cubierta, es decir, una forma constructiva autónoma." (Nistal, Retana, & Ruiz, 2012 p.6). Luego de esta implementación completa del acero en la construcción de edificaciones se dieron muchos casos similares a nivel mundial, y con esto la construcción se veía en la necesidad de establecer normas para el cálculo, diseño y ejecución de este sistema. Estas normas se dieron en los países más importantes como Suiza en 1903, Francia 1906, Estados Unidos en 1910 y en varios países a nivel mundial, con el fin de presentar un sistema correcto y seguro de construcción. (Nistal, Retana, & Ruiz, 2012)

#### 1.6.1.2 Procesos de fabricación.

Una vez revisadas las referencias del tema deducimos que actualmente existen dos procesos para la obtención del hierro que posteriormente se refinará transformándose en acero, el primero es mediante altos hornos o ruta BF/BOF que da como resultado el arrabio y el segundo por reducción directa del hierro o ruta DR/EF, ambos procesos se denominan siderurgia integrada.

#### Ruta BF/BOF o altos hornos.

Antiguamente se había descubierto que si se hacía una hoguera sobre minerales que sean ricos

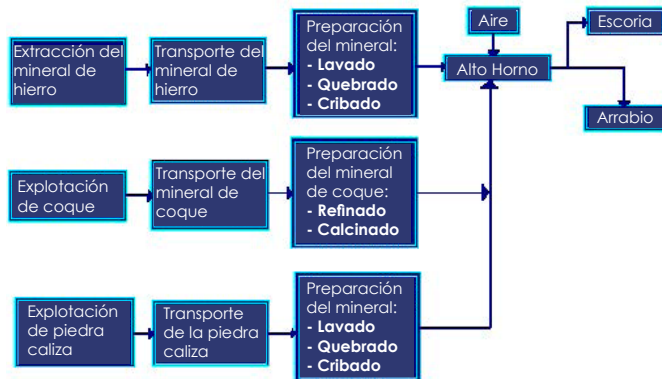


Figura 9: Diagrama de proceso de altos hornos (Tomada de Salazar, 2017).

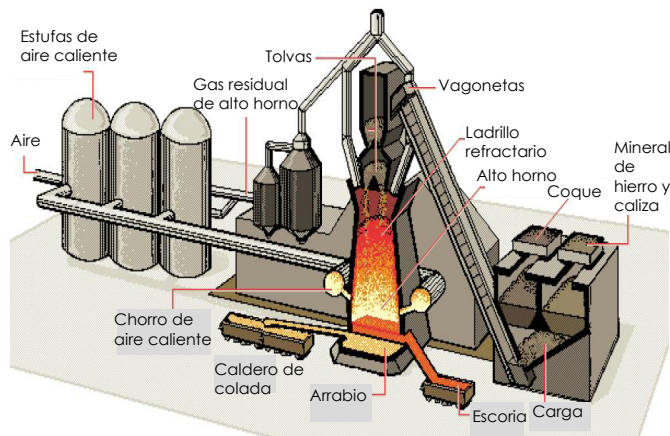


Figura 10: Sección en perspectiva de proceso de altos hornos (Tomada de Salazar, 2017).

en hierro este metal se tornaba blando y se podía extraer, se fueron practicando varias técnicas avivando la llama de la hoguera con una corriente de aire para conseguir mejores resultados del material extraído.

Este proceso ha ido evolucionando de la mano de la ingeniería química y hoy en día este material se obtiene con la combinación exacta de materiales obtenidos con la experiencia que dan como resultado hierro de alta calidad. (Salazar, 2017)

Se lleva a cabo en una planta química llamada "alto horno" en la cual se desprende el oxígeno del óxido de hierro existente en el mineral para liberar el hierro. Está formado por un cilindro de acero revestido de ladrillos refractarios y placas refrigerantes, su tamaño es bastante considerable para que se obtenga una buena inversión de recursos de materia prima. (Salazar, 2017).

En la parte inferior cuenta con toberas que son aberturas tubulares por donde pasa el aire, cerca del fondo una abertura por donde sale el arrabio y encima cuenta con otro agujero para retirar la escoria además de respiraderos para los gases que se escapan por la producción de dicho material. (Salazar, 2017).

De igual manera en la parte superior cuenta con dos tolvas en forma de campana en las cuales se introducen la materia prima al horno por medio de

vagonetas o cucharas que suben inclinadamente por un elevador al exterior del alto horno. (Salazar, 2017).

En la parte baja se encuentran toberas que inyectan gases y aire precalentados a gran velocidad para realizar la combustión y reducción de hierro produciendo la combustión completa del coque a temperaturas máximas entre 1700 y 1800°C. (Salazar, 2017).

Este proceso tiene como resultado un hierro de primera fusión o arrabio, este material se coloca en las lingoteras de donde se obtienen los lingotes de hierro. (Claudio, 2014)

Posteriormente se someten a enfriamiento para convertirse mediante procesos metalúrgicos en hierro de segunda fundición, hierro dulce, hierro maleable o acero mediante un proceso denominado refinación del arrabio. (Salazar, 2017).

Según el (Instituto Nacional de Preinversión, 2013) El consumo de materias primas para esta ruta, por tonelada de producto es de 1.74 toneladas de mineral de hierro + pellets / tonelada de arrabio; 0.48 toneladas de coque + combustible / tonelada de arrabio; 0.33 toneladas de caliza / tonelada de arrabio. Los costos de inversión de una siderúrgica basada en altos hornos son de 1500 dólares aproximadamente, por tonelada producida.

## Reducción directa del hierro o ruta DR/EF.

La reducción directa del hierro es uno de los métodos más utilizados en América Latina, ya que muchos países son productores importantes de la materia prima para la fabricación del hierro (mineral de hierro) pero no cuentan con los materiales necesarios para la combustión por el método BF/BOF. Esto es debido a que el método de obtención de hierro por reducción directa o ruta DR/EF (DirectReduction / ElectricalFurnace) o Reducción Directa / Horno Eléctrico emplea agentes reactivos como combustible, gas natural entre otros para dar origen a un producto de alto contenido mineral llamado hierro esponja que se puede obtener en forma de pellets (Instituto Nacional de Preinversión, 2013).

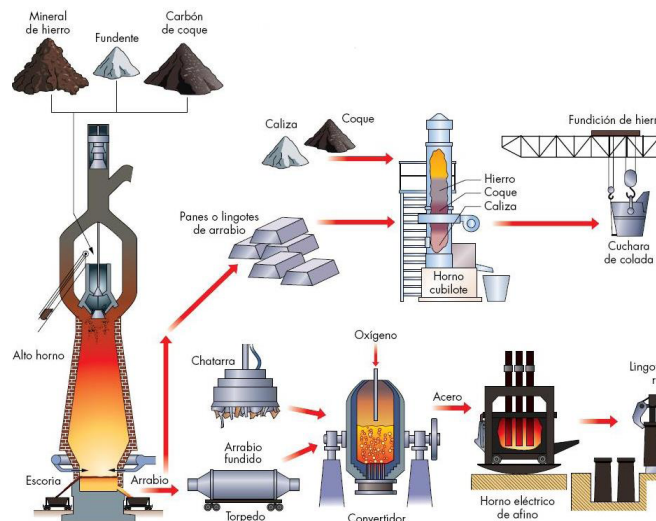


Figura 11: Explicación del proceso de hornos eléctricos (Tomada de Salazar, 2017).

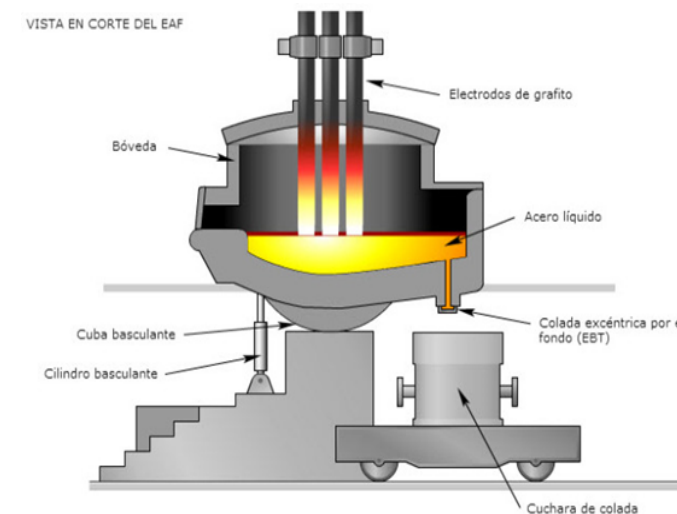


Figura 12: Horno eléctrico (Tomada de Salazar, 2017).

Según el (Instituto Nacional de Preinversión, 2013) el consumo de materias primas para esta ruta, para una producción de 500 000 TM (toneladas métricas) anuales de producto (hierro esponja), es de 1.42 ton de mineral de hierro / tonelada de producto; 0.30 ton de gas natural (combustible y reformado)/ tonelada de producto; 0.84 ton de vapor de agua a 12 atm / tonelada de producto.

Para la refinación del arrabio las acerías utilizan hornos eléctricos en los cuales se reemplaza el oxígeno puro utilizado en el proceso del arrabio por la chatarra con el fin de crear un arco eléctrico entre los electrodos y la carga metálica. (Salazar, 2017)



Figura 13: Productos importados por Ecuador, Costo y Cantidad (Tomada de Instituto Nacional de Pre inversión, 2013).



### 1.6.1.3 Siderúrgica en Ecuador.

Según el (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015) nuestro país actualmente no cuenta con sistemas de siderúrgica integrada debido a que la producción mínima para que una planta así sea rentable es de 4 millones de TM siendo esta producción superior la demanda de nuestro país que es de 2 millones de TM anuales.

Además de que no se cuenta con las reservas suficientes de materia prima para cubrir esta producción. Aunque se plantea la construcción de una planta que produzca acero plano, utilizando gas natural y mineral de hierro importado con una fecha estimada de inicio en el 2018 y una planta de acero plano utilizando arenas ferrotitaníferas de origen local y carbón importado para el año 2019.

Esto debido a que Ecuador importa grandes cantidades de hierro de otros países, según el (Instituto Nacional de Preinversión, 2013). En el 2010 se importaron 796 000 TM (toneladas métricas) clasificadas dentro de la partida arancelaria 72, lo que implicó una salida de divisas por un valor de 571 millones de dólares.

El único método con el que se cuenta actualmente para la elaboración de acero es por medio un proceso de industria semi-integrada de horno de arco eléctrico, el cual se basa en tres electrodos de grafito que forman un arco eléctrico que ca-

lienta la chatarra (que puede ser proveniente de embarcaciones navales, desperdicios de laminación, desagüe, etc.) y la funden para obtener un producto semi-elaborado denominado palanquilla.

Estos productos semi-elaborados de la industria siderúrgica, (la palanquilla), cuyos productos derivados son generalmente laminados largos como varillas, barras, alambrones y tubos sin costura. El tocho, cuyos derivados son perfiles estructurados utilizados para infraestructuras, barras, rieles y tubos sin costura. El planchón que tiene como derivados productos laminados planos, chapas gruesas, bobinas laminadas, hojalatas, laminados galvanizados, entre otros.

Al ser nuestro país únicamente productor de palanquilla como producto semi-elaborado se debe recurrir obligadamente a la importación de productos derivados de los demás semi-elaborados para cumplir con la demanda de sectores como el automotriz y manufacturero que requieren fundamentalmente productos planos laminados, perfiles estructurales, chapas, etc. (Instituto Nacional de Preinversión, 2013).

Para obtener los productos finales derivados de la palanquilla esta pasa a través del horno de laminación que cuenta con tres zonas de calentamiento

en las cuales alcanzan temperaturas de 130°C, una vez expuesta a estas temperaturas la palanquilla pasa al tren desbastador en el cual se reduce la sección de la materia prima un 60% al pasar por tres cilindros de laminación, posteriormente pasan al tren de laminación que se compone de varias cajas laminadoras compuestas por cilindros de 340 mm y un final de 280 mm de diámetro que reducen la sección del material de un 11 a un 13% y va adquiriendo formas como rombos, óvalos, cuadrados y círculos hasta que finalmente se llega a la forma y diámetro requerido (Cabrera, 2014).

Como proceso final todos los materiales pasan a la mesa de enfriamiento que consiste en un equipo transportador que permite el enfriamiento al ambiente del producto terminado y al final las barras llegan a la cizalla en donde se cortan en longitudes comerciales de 6, 9 y 12 metros (Cabrera, 2014).

Según el (Instituto Nacional de Preinversión, 2013) actualmente Ecuador posee tres grandes empresas acereras como son:

- **Acería del Ecuador ADELCA**, con una capacidad instalada de 250 000 toneladas métricas al año.
- **Acería Nacionales del Ecuador ANDEC**, con una capacidad instalada de 135 000 toneladas métricas al año.
- **NOVACERO**, con una capacidad instalada de 250 000 toneladas métricas al año.

## 1.6.2 Varillas de fibra sintética

### 1.6.2.1 Introducción

El termino FRP proviene de las siglas en inglés (fiber reinforced polymer), que es en español polímeros reforzados con fibras, sugerimos al lector familiarizarse con este término ya que será usado a lo largo de este trabajo de titulación. Los materiales fabricados con fibras incrustadas en resina polimérica conocidos como FRP son una alternativa que sustituye al acero de refuerzo utilizado en cualquier tipo de estructuras.

Los diferentes materiales que se pueden utilizar como polímeros reforzados con fibras son de aramida (AFRP), de carbono (CFRP) y fibra de vidrio

(GFRP), todos ellos incrustados con una matriz de resina. (ACI Committee 440, 2015). Cabe recalcar que para las pruebas realizadas en este trabajo de titulación se utilizó varillas de GFRP.

Los refuerzos con FRP al no ser magnéticos ni corrosivos a diferencia del acero presentan grandes ventajas al utilizarlos en combinación con el hormigón, además cuentan con una gran resistencia a la tracción que es el esfuerzo al cual se prevé que estén sometidos estos elementos. (ACI Committee 440, 2015).

Los refuerzos de FRP son materiales anisotrópicos, es decir que presentan diferentes características según su dirección, en este caso solo en la dirección de las fibras presentan una alta resistencia a la tracción. Para los diseños que se realicen con elementos de hormigón reforzados con varillas de FRP se debe tener en cuenta la falta de ductilidad que presentan la cual se mencionara posteriormente. (ACI Committee 440, 2015).

Las varillas de FRP se constituyen de fibras de un material con alta resistencia a la tensión unidas por una resina que funciona como matriz de la varilla, transmitiendo los esfuerzos entre las fibras y permitiéndoles trabajar juntas (ACI Committee 440, 2015).

Esta definición que nos presenta el ACI es muy general ya que abarca cualquier varilla hecha con fibras que presenten alta resistencia a la tensión que use resina como matriz para unir las fibras. Sin embargo las propiedades de las varillas dependen de algunos factores adicionales que se considerara posteriormente en esta investigación.



### 1.6.2.2 Historia.

El desarrollo de los polímeros reforzados con fibras se remonta al uso de los mismos después de la segunda guerra mundial en la década de 1940. Luego que la industria aeroespacial reconociera las ventajas de la alta resistencia y la ligereza de los materiales compuestos, así se incrementó el uso de estos materiales. Así mismo las industrias aeroespacial y defensiva presentaron importantes avances científicos de este material en la época de la guerra fría (ACI 440. 1r-15, 2015).

En esa época se dio a conocer el proceso de pultrusion que según (Fiber Profil, 2017) es un proceso de fabricación continua de perfiles de plástico reforzado compuestos por una matriz que son las resinas termoestables y por elementos de refuerzo que son las fibras, que consiste en el “arrastre” de las fibras mojadas en la resina a través de un molde. Este método ofrecía la fabricación de perfiles compuestos de una manera rápida y económica, pero no fue hasta la década de 1960 que se consideró este material para ser utilizado como refuerzo del hormigón (ACI 440. 1r-15, 2015).

Sin embargo las varillas de FRP no fueron consideradas como una opción viable ni comercial hasta finales de 1970. Las varillas GFRP en el hormigón polimérico se consideraron como un remplazo al acero como refuerzo de este hormigón, debido a que su uso eliminaba la incompatibilidad de ca-

racterísticas que producía la expansión térmica entre el hormigón polimérico y el acero (ACI 440. 1r-15, 2015).

En la década de 1980 el mercado de equipamientos médicos requería estructuras con refuerzos no metálicos y no conductores de electricidad para ciertos avances tecnológicos y estos refuerzos se convirtieron en los más usados para este tipo de requerimientos. Es así como las varillas de FRP se empezaron a usar en ciertas estructuras como muros de contención marinos, autopistas de aeropuertos, laboratorios electrónicos, puentes y otras estructuras. (ACI 440. 1r-15, 2015).

### 1.6.2.3 Uso de las varillas de FRP en la construcción.

El primer país en utilizar refuerzos de FRP en la construcción fue Japón a mediados de la época de 1990 con más de 100 proyectos de demostración y proyectos comerciales, así incluyeron el uso de este material como recomendado en la sociedad japonesa dentro de la ingeniería civil. Luego China en el 2000 se dio a conocer como el mayor usuario de refuerzos compuestos utilizados en nuevas construcciones, desde puentes hasta obras subterráneas (ACI 440. 1r-15, 2015).

En Europa empezó su uso en el país de Alemania con la construcción del puente Kattenbusch fabricado con hormigón pretensado con FRP en 1986. Desde la construcción de este puente se han implementado varios programas para aumentar la investigación y uso de refuerzos de FRP en Europa (ACI 440. 1r-15, 2015).

Un proyecto que vale la pena mencionar es el puente Floodway en Winnipeg Canada que atraviesa el Río Rojo. Este puente fue concluido en el 2006, consta de 16 tramos y cuenta con refuerzos de varillas de GFRP (aproximadamente 140,000kg) en todos los elementos de hormigón sobre las vigas, denominándolo el puente más largo del mundo fabricado con refuerzos no metálicos, cabe mencionar que fue fabricado con varillas de GFRP Aslan 100, las cuales fueron probadas en los ensayos junto con otras marcas comerciales (ACI 440. 1r-15, 2015).

Todos los puentes que se han construido utilizando este método de refuerzo han estado en servicio por más de 10 años y no han presentado ningún signo de deterioro del refuerzo GFRP. En Canadá se han utilizado varillas de GFRP en más de 200 puentes presentando resultados muy satisfactorios (ACI 440. 1r-15, 2015). En general se ha utilizado las varillas de GFRP en diferentes estructuras como parqueaderos, pavimento de autopistas, tanques de agua, incineradores, un uso muy común es en salas de radiología, muros de contención en playas y hasta en hormigón arquitectural y ornamental (ACI 440. 1r-15, 2015).



Figura 15: Puente Kattenbusch, Alemania (Tomada de Klawikowski, 2015).



Figuras 14: Restauración de columnas implementando refuerzos de varillas de FRP (Tomada de Hughes Brothers, 2017).



Figuras 16: Armado de refuerzos con varillas GFRP Aslan 100 del puente Floodway, Canada (Tomadas de Hughes Brothers, 2017).





Figura 17: Armado de refuerzos de GFRP Aslan 100 del puente Elkhorn North Bridge, Washington, Nebraska (Tomada de Hughes Brothers, 2017).

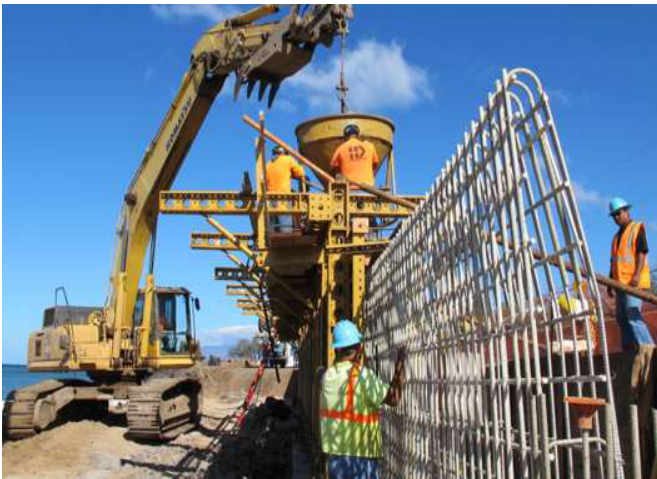


Figura 18: Reconstrucción del muro de contención en la autopista de Lahaina Maui con GFRP Aslan 100 (Tomada de Hughes Brothers, 2017).



Figura 19: Reconstrucción de domos y arcos de la Catedral de la Laguna, Tenerife, Islas Canarias con GFRP Aslan 100 (Extraído de Hughes Brothers, 2017).

#### 1.6.2.4 Ventajas de las varillas de FRP.

El (ACI Committee 440, 2015) nos presenta algunas características de las varillas de FRP y las ventajas que presentan como material teniendo en cuenta las necesidades y condiciones de estos elementos estructurales hoy en día.

- Es Impermeable al cloruro y a ataques químicos.
- La resistencia a la tracción es mayor que la del acero.
- Su peso es mucho más ligero, de una cuarta a una quinta parte el peso de una varilla de acero.
- Comportamiento transparente ante campos eléctricos y frecuencias de radio (solo GFRP).
- No son conductores térmicos ni eléctricos (solo GFRP).
- Es posible que se use menos recubrimiento de hormigón.
- No necesita añadir componentes para reducir la corrosión.
- Presenta alta resistencia al agotamiento.
- Se remueve fácilmente con la maquinaria cuando se utiliza en estructuras temporales.



### 1.6.2.5 Diferencias de las varillas de FRP con el acero.

Según el (ACI Committee 440, 2015) las diferencias entre el material de FRP y el acero son las siguientes:

- El FRP tiene una vida útil más alta que la del acero en ambientes corrosivos.
- El FRP es más resistente a posibles daños en obra que el acero.
- El material de FRP es anisotrópico mientras que el acero es isotrópico. Anisotrópico se refiere a que tiene propiedades direccionalmente dependientes, es decir que la variación de sus propiedades físicas es observada en diferentes direcciones. Mientras que isotrópico es cuando presenta un comportamiento uniforme direccionalmente, es decir que sus propiedades físicas no varían en diferentes direcciones. (Schlumberger, 2017). Esto afecta negativamente la resistencia a cortante en el sentido transversal ya que las fibras no actúan en esa dirección.
- Las varillas de FRP tienen un límite de ruptura por fluencia menor que el del acero.
- Presentan un coeficiente de expansión termal diferente en dirección longitudinal como en dirección radial.
- Resiste más tiempo a temperaturas elevadas que lo que resiste el acero.
- En caso que ocurra una degradación de las varillas de FRP, esta degradación es benigna para el hormigón que la recubre debido a las fibras que las componen, a diferencia del acero.



Figura 20: Ejemplo de hormigón ornamental prefabricado con varillas de GFRP Aslan 100 (Tomada de Hughes Brothers, 2017).



Figura 21: Ejemplo de estructuras de madera reforzadas con varillas de GFRP Aslan 100 (Tomada de Hughes Brothers, 2017).



Figura 22: Rieles de tranvía con GFRP Aslan 100 (Tomada de Hughes Brothers, 2017).

### 1.6.2.6 Propiedades de las varillas de FRP.

A continuación se analizarán las propiedades físicas y mecánicas de las varillas de FRP con la finalidad de que el lector tenga un conocimiento fundamental del comportamiento de estas varillas y de las propiedades que las afectan en las estructuras de hormigón.

El (ACI Committee 440, 2015) expone que las varillas de FRP se pueden fabricar utilizando varias técnicas como pultrusión, trenzado y tejido, además las características de las varillas dependen de diferentes factores como el volumen de la fibra, el tipo de fibra, el tipo de resina, la orientación de las fibras, los efectos de orientación dimensional y el control de calidad durante la fabricación. Así como también se especifica que las características de material descritas a continuación pueden no aplicarse a todos productos comerciales debido a las características únicas que presenta cada fabricante. Por lo tanto es aconsejable que se consulten de manera individual las propiedades específicas de los materiales proporcionadas por los fabricantes.

### 1.6.2.7 Propiedades físicas.

#### Densidad

La densidad de los FRP varía de 1.25 a 2.1 g/cm<sup>3</sup>, es decir de un sexto a un cuarto de la del acero. Esta es una ventaja debido a que disminuye la carga muerta presente en la estructura y al reducir el

peso del material reducen los costos de transporte y facilita el manejo de las varillas en obra. (ACI Committee 440, 2015). En la tabla 1 se aprecia que el material de menor rango de densidad es el AFRP seguido por el GFRP, el CFRP y el acero como se menciono anteriormente.

**Tabla 1:** Densidades comunes de las varillas de refuerzo.

	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
lb/ft <sup>3</sup>	493.00	77.8 a 131.00	93.3 a 100.00	77.80 a 88.10
g/cm <sup>3</sup>	7.90	1.25 a 2.10	1.50 a 1.60	1.25 a 1.40

Nota: Tomada de (ACI Committee 440, 2015).

#### Coeficiente de expansión térmica.

Según el (ACI Committee 440, 2015) el coeficiente de expansión térmica de las varillas de FRP varía, según su dirección y depende del tipo de fibra, de resina y de fracción volumétrica. Así el coeficiente de expansión térmica en dirección longitudinal depende de las propiedades de la fibra, mientras que el coeficiente de expansión térmica transversal esta dominado por la resina. Como podemos apreciar en la tabla 2 se encuentran los valores del coeficiente de expansión térmica del acero, de materiales de FRP y del hormigón en sus direcciones longitudinal y transversal.

**Tabla 2:** Coeficientes de expansión térmica comunes en varillas de refuerzo.

Dirección	Unidades	Acero	GFRP	CFRP	AFRP	Hormigón
Longitudinal, $\alpha_L$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	3.3 a 5.6	3.3 a 5.6	-4.0 a 0.0	-3.3 a -1.1	4 a 6
	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	6.0 a 10.0	6.0 a 10.0	-9.0 a 0.0	-6 a -2	7.2 a 10.8
Transversal, $\alpha_T$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	11.7 a 12.8	11.7 a 12.8	41 a 58	33.3 a 44.4	4 a 6
	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	21.0 a 23.0	21.0 a 23.0	74.0 a 104.0	60.0 a 80.0	7.2 a 10.8

Nota: Tomada de ACI Committee 440, 2015.

Analizando así los coeficientes de expansión térmica del acero son los mismos sin importar su dirección, esto se debe a que el acero presenta un comportamiento isotropico como se explico anteriormente. Las varillas de GFRP (las que se tomaran en consideración como refuerzo de los elementos tipo viga elaborados) presentan un coeficiente mucho menor en dirección longitudinal, sin embargo su coeficiente es mucho mas alto en dirección transversal inclusive mucho mayor que el del acero. Según el (ACI Committee 440, 2015) la diferencia del coeficiente de temperatura transversal de las varillas de FRP y el del hormigón puede causar fisuras en el hormigón cuando existan cambios de temperatura y hasta el fallo del recubrimiento de hormigón si el mismo no se encuentra bien confinado. Sin embargo los resultados experimentales no muestran una reducción significativa de la resistencia de la unión de los dos materiales para temperaturas de hasta 140 °F (60°C).

### 1.6.2.8 Propiedades mecánicas.

#### Comportamiento a tracción.

Las varillas de FRP al ser sometidas a un esfuerzo de tensión no presentan ningún comportamiento plástico (flexibilidad) antes de la ruptura. La resistencia a la tracción y rigidez de las varillas de FRP dependen de varios factores, por ejemplo la resina. De-

**Tabla 3:** Propiedades de tracción comunes en varillas de refuerzo.

	Unidades	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Limite de elasticidad nominal, ksi (MPa)	× 10 <sup>-6</sup> /°F × 10 <sup>-6</sup> /°C	40 a 75 276 a 517	NA NA	NA NA	NA NA
Resistencia a la traccion, ksi (MPa)	× 10 <sup>-6</sup> /°F × 10 <sup>-6</sup> /°C	70 a 100 483 a 1600	70 a 230 483 a 690	87 a 535 600 a 3690	250 a 368 1720 a 2540
Modulo de elasticidad × 103 ksi (GPa)	× 10 <sup>-6</sup> /°F × 10 <sup>-6</sup> /°C	29.0 200.0	5.1 a 7.4 35.0 a 51.0	15.9 a 84.0 120.0 a 580.0)	6.0 a 18.2 41.0 a 125.0

Nota: Tomada de ACI Committee 440, 2015.

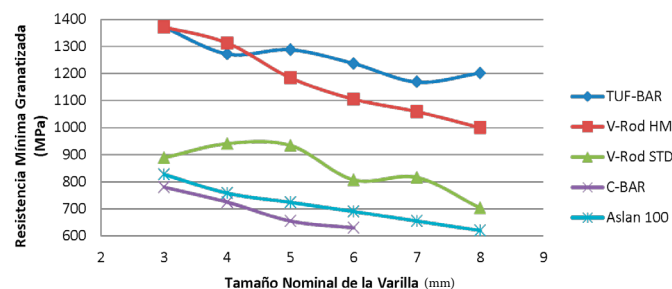


Figura 23: Variación con el diámetro de la Resistencia mínima garantizada en varillas FRP ( Tomada de Cifuentes, 2015).

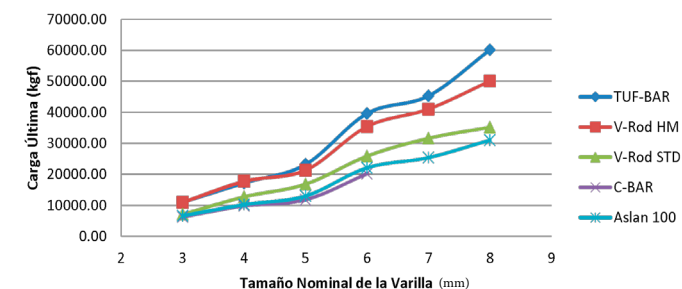


Figura 24: Variación con el diámetro de carga última en varillas FRP ( Tomada de Cifuentes, 2015).

bido a que la resina resiste una fuerza menor que las fibras que componen la varilla, la relación entre el volumen de fibra y el volumen total de la varilla (acción del volumen de fibra) afecta significativamente las propiedades de tracción de una varilla de FRP (ACI Committee 440, 2015).

Otros factores que afectan la resistencia a la tracción son la velocidad de curado, el proceso de fabricación y el control de calidad de fabricación de las varillas (ACI Committee 440, 2015), es decir que depende de la empresa fabricante las características mecánicas que estas obtengan como se mencionó anteriormente.

A diferencia del acero la resistencia a la tracción de las varillas de FRP varía con el diámetro de forma negativa, es decir que la resistencia tiende a disminuir mientras aumenta el diámetro. (ACI Committee 440, 2015). Como podemos apreciar en las figuras elaboradas por (Cifuentes, 2015), se realizó dos gráficos comparando en la figura 23 la variación de la resistencia mínima garantizada en las varillas de FRP con el diámetro, aquí se puede apreciar que depende de cada fabricante el comportamiento a tracción de las varillas pero en general se observa una tendencia a disminuir según aumenta el diámetro de la varilla. Mientras que en la figura 24 la variación de la carga última de las

varillas de FRP con respecto al diámetro varillas de diámetro incrementa según aumenta el área de la sección transversal. Estos datos son tomados de los catálogos publicados por los diferentes fabricantes de varillas de FRP.

El (ACI Committee 440, 2015) comenta que una varilla de FRP no puede doblarse una vez que ha sido fabricada, sin embargo se pueden fabricar varillas curvas. Estas varillas curvas pueden presentar una reducción de la resistencia de 40% a 50% en comparación a la resistencia a la tracción de una varilla recta debido a concentraciones de flexión y tensión de las fibras.

### **Comportamiento a compresión.**

A pesar que el (ACI Committee 440, 2015) no recomienda el diseño de varillas de FRP para resistir cargas de compresión, describe completamente este comportamiento para tener claros estos conceptos aplicados en las varillas de FRP que se describen a continuación. Nos indica que técnicamente no hay una manera directa de medir la relación del tiempo con la fluencia que presentan las varillas de FRP sujetas a fuerzas de compresión, pero la evidencia obtenida experimentalmente nos indica que la relación entre la deformación por fluencia y la deformación inicial es baja, de hasta niveles de 26% de la carga última de compresión. Por lo tanto



la fluencia no daña la integridad geométrica de las varillas cuando esta sometida a niveles típicos de cargas a compresión. Los ensayos realizados en varillas de FRP han demostrado que la resistencia a la compresión es menor que la resistencia a la tracción, aproximadamente valores de 55% la resistencia a la tracción para varillas de GFRP, de 78% varillas de CFRP y 20% para varillas de AFRP. (ACI Committee 440, 2015). Lo que nos dice que la resistencia a compresión es mayor para varillas con mayor resistencia a la tracción excepto para las varillas de AFRP (ya que las fibras presentan comportamiento no lineal a compresión).

### Comportamiento a cortante.

El (ACI Committee 440, 2015) no nos ofrece ningún dato específico de resistencia a cortante de las varillas, sin embargo aclara que las varillas de FRP presentan comportamientos débiles ante el corte interlaminar debido a que la resina resiste menos a corte que las fibras. Para aumentar la resistencia a corte propone orientar capas de fibra en sentido transversal a las fibras principales dependiendo del grado de desplazamiento de las fibras.

Además nos aclara que si se requieren las propiedades de resistencia a corte de las varillas se debe comunicar con el fabricante, ya que el proporcionará esos datos además una descripción del método de ensayo utilizado para los valores indicados.

### Comportamiento de adherencia.

Según el (ACI Committee 440, 2015) el rendimiento de los enlaces de las varillas de FRP con el hormigón depende del diseño, fabricación y propiedades mecánicas que presentan las propias varillas, es decir la autenticidad del modelo de las diferentes fabricas como se mencionó anteriormente y de las condiciones ambientales. Además cuando una varilla adherida en el hormigón se deforma es sujeta a un incremento de tensión, la adherencia entre la varilla y el recubrimiento de hormigón se rompe y las deformaciones en la superficie de la varilla provocan fuerzas de contacto inclinadas entre el recubrimiento de hormigón y la varilla.

(Muñoz, 2008) en su artículo científico presenta de manera experimental las dependencias de la resistencia a la adherencia del hormigón con las varillas de FRP tras haber realizado 91 ensayos con varillas de diferentes tipos de fibras (CFRP, GFRP y acero) con diferentes acabados superficiales, diferentes diámetros y probado con diferentes resistencias de hormigón. Nos indica además que el comportamiento adherente entre el hormigón y las varillas de FRP es diferente que el comportamiento con varillas de acero ya que el acero depende únicamente de la resistencia del hormigón mientras que el otro presenta dependencias adicionales. Estos estudios confirman que como en el caso de las varillas de refuerzo de acero la resistencia adherente media de las varillas de FRP incrementa cuando se reduce el diámetro de la varilla.



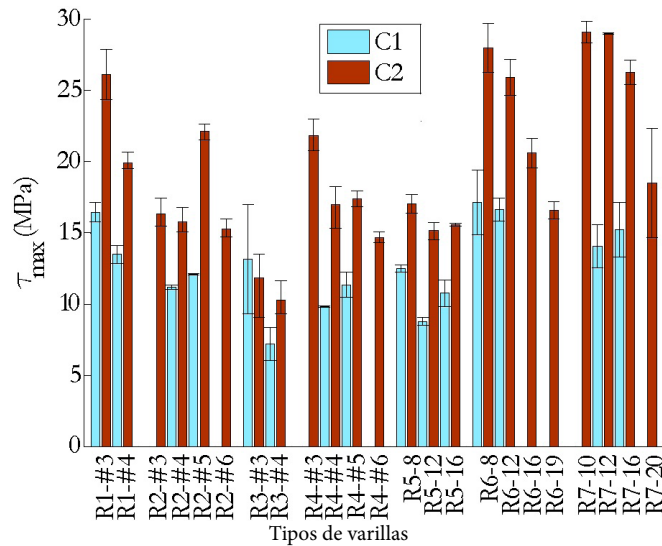


Figura 25: Resistencia de adherencia según el hormigón C1 o C2 (Tomada de (Muñoz, 2008)).

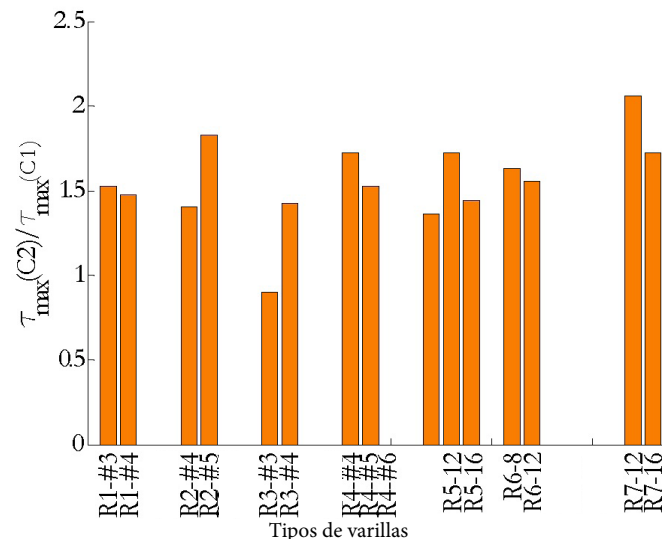


Figura 27: Aumento de la adherencia debido al cambio de fuerza de compresión del hormigón representada a través de la relación  $\tau_{max}(C2)/\tau_{max}(C1)$ . Tomada de (Muñoz, 2008).

Las varillas que (Muñoz, 2008) analiza se presentan en la figura 25, la varilla A-C/R1 es una varilla de CFRP con un acabado arenoso, la varillas A-G/R2 de GFRP igualmente con un acabado superficial arenoso, la B-C/R3 siendo varilla de CFRP con superficie texturizada, B-G/R4 de GFRP con una combinación de acabado arenoso y nervadura con envoltura helicoidal, la C-G/R5 de GFRP con un acabado con nervaduras, DG/R6 de GFRP con un acabado de nervadura con envoltura helicoidal y E-S/R7 de acero con el acabado de las varillas corrugadas.

Cabe recalcar que la autora no presenta los fabricantes de los distintos tipos de varillas sin embargo se deduce por las características de las varillas y las imágenes que las varillas tipo B-G/R4, C-G/R5 y E-S/R7 son tres de los tipos que se utilizara para los ensayos de vigas que se explicara posteriormente.

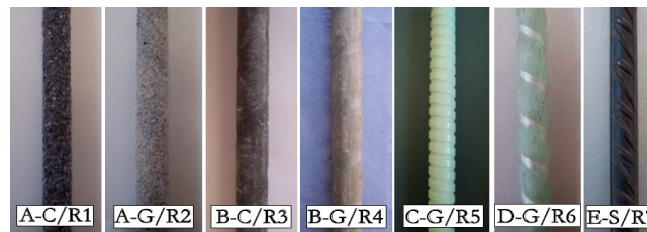


Figura 26: Varillas utilizadas para análisis (Tomada de Cifuentes, 2015).

Es por eso que vale la pena analizar la figura 26 que nos indica la resistencia de adherencia según el hormigón C1 o C2 (C1 de 28.63 MPa de resistencia a compresión y C2 de 52.19 MPa ), el diámetro

de las varilla utilizadas expresado con # cuando es en pulgadas, sin # cuando esta en mm y el ratio de incremento de la resistencia de adherencia por cambio de hormigón expresado con diferentes colores. Mientras que en la figura 27 (Muñoz, 2008) nos indica la relación de tensión máxima C2/C1.

Por medio de estos gráfico podemos resumir que las varillas de acero presentan mayor adherencia cuando están combinadas con un hormigón de mayor resistencia y como se expresó anteriormente la adherencia disminuye si el diámetro de la varilla aumenta.

La varilla B-G/R4 de GFRP de la misma manera presenta un incremento de adherencia con un hormigón de mayor resistencia y un decrecimiento de la adherencia según aumenta el diámetro de la varilla y lo mismo sucede con el tipo C-G/R5. Sin embargo el tipo C-G/R5 según (Muñoz, 2008) presenta mayor resistencia a la adherencia que la varilla B-G/R4 y de la misma manera la E-S/R7 de acero presenta mayor adherencia que la C-G/R5.

Ademas nos aclara que si se requieren las propiedades de resistencia a corte de las varillas se debe comunicar con el fabricante, ya que el proporcionara esos datos ademas una descripción del método de ensayo utilizado para los valores indicados. Las dependencias de la resistencia a la adherencia según (Muñoz, 2008) son:

### Efecto del acabado superficial.

Según los estudios realizados sobre adherencia de (Muñoz, 2008) se demuestra que los acabados superficiales activan diferentes mecanismos de transferencia. En el caso de las varillas de CFRP las varillas con acabado superficial arenoso desarrollan resistencias de adherencia superiores que las varillas con una superficie texturizada, independientemente del hormigón que se utilice. Para las varillas de GFRP los resultados no permiten definir una tendencia global, sin embargo se puede decir que las varillas con nervaduras profundamente marcadas por una envoltura helicoidal obtienen resistencias de adherencia superiores que se le atribuyen a una mayor altura de las nervaduras.

La resistencia a la adherencia de las varillas D-G/R6 con acabado de envoltura helicoidal de diámetros de 16 y 19 mm presentan menor resistencia a la adherencia debido a un fallo por fisuración longitudinal. Por lo tanto concluye que el acabado superficial es un factor importante a la hora de determinar la adherencia entre la varilla y el hormigón, pudiendo obtener valores similares de resistencias de adherencia dependiendo del diseño del acabado superficial del refuerzo.

### Efecto de la resistencia del hormigón.

De igual manera con los resultados obtenidos de la investigación de (Muñoz, 2008) para hormigones con resistencia de compresión superiores a 30

MPa aproximadamente el fallo de adherencia se produce en la superficie de la varilla, por lo tanto la resistencia adherente en estas probetas no tiene que ver con la resistencia al hormigón sino a las propiedades de la varilla. Mientras que las probetas con hormigón de menor resistencia de alrededor de 15 MPa se produjo un cambio en el modo de fallo, siendo este en la matriz del hormigón, en este caso la resistencia la adherencia se relaciona con la resistencia del hormigón y no con las características de la varilla. Por lo tanto se puede concluir que para hormigones con resistencias bajas se encuentra menos daño en la superficie de la varilla que en la del hormigón y viceversa.

### Efecto del diámetro de la varilla.

Con los resultados obtenidos (Muñoz, 2008) confirma la tendencia que concluyen otros autores que indica una disminución en la tensión de adherencia con el incremento del diámetro de la varilla utilizada. Una explicación para esta reducción es que a medida que se incrementa el diámetro de la varilla se incrementa la longitud de adherencia, la distribución de la adherencia entre la varilla y el hormigón se produce de manera no lineal sobre toda la longitud, es por eso que diámetros mayores provocan menores tensiones de adherencia medidas.



Figura 28: Productos expuestos en Equisplast, Cuenca. Fuente propia.



Figura 29: Productos expuestos en Equisplast, Cuenca. Fuente propia.

Una posible segunda influencia puede ser el efecto de Poisson, al producirse mayores reducciones en la dimensión transversal para diámetros superiores. Como tercera es el efecto “shear lag “ que dice que las varillas de FRP muestran una baja rigidez a cortante en su dirección axial, lo que provoca un movimiento relativo entre las fibras del núcleo de la barra y las fibras superficiales resultando en una distribución no uniforme de la tensión normal de la sección transversal de la barra.

#### 1.6.2.9 Situación de FRP en el país.

Actualmente nuestro país cuenta con una gran empresa distribuidora de elementos fabricados con materiales compuestos de plástico reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V), la empresa EQUISPLAST lleva más de 10 años en el mercado ecuatoriano e incluso ha establecido operaciones en Argentina, Perú y Colombia.

La empresa EQUISPLAST cuenta con su debida certificación de calidad, con estudios, auditorias y licencias ambientales realizadas por el municipio de Cuenca, además de sellos, premios y reconocimientos a la innovación y calidad.

Actualmente distribuye productos como postes, perfiles, tanques, laminas, canales, rejillas, barras e

inclusive cualquier tipo de producto bajo pedido especial, fabricado con fibra de vidrio. Esta empresa cuenta con su matriz principal y su planta de fabricación en la ciudad de Cuenca.

Las varillas de FRP que comercializa la empresa EQUISPLAST se muestran en la figura 29, estas varillas se pueden solicitar con un recubrimiento de sílice a partir del diámetro de 12mm.

Las varillas se fabrican mediante un proceso de pultrusion y pasan por varias pruebas de desempeño, resistencia al fuego, resistencia al impacto, absorción de agua, etc. Sin embargo no nos brindan resultados específicos de las pruebas realizadas a las varillas de FRP en concreto.

**Tabla 3:** Varillas disponibles de la empresa Equisplast.

Tipo	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Area secc. (cm2)	Peso Aprox (kg/m)
Varilla de 25.4	25.40	–	5.067	0.978
Varilla de 19	19.00	–	2.835	0.547
Varilla de 16	16.00	–	2.011	0.388
Varilla de 12	12.00	–	1.131	0.218
Varilla de 7.9	7.90	–	0.490	0.9095

Nota: Tomada de (Equisplast, s.f.).

### 1.6.2.10 Concurso FRP Composites Competition

El A.C.I. (American Concrete Institute) organiza cada dos años este evento que tiene lugar en una convención donde se exponen nuevas tecnologías acerca de avances en las tecnologías científicas del hormigón y materiales similares en la cual participan profesionales y estudiantes de carreras afines a nivel mundial.

El objetivo de esta competencia es diseñar, elaborar y probar estructuras reforzadas con varillas de FRP para lograr la menor relación de carga-costos. Así como una acertada predicción de la carga última de la estructura, y de la carga que resultará cuando el elemento alcance una deformación de 3.5 mm. En esta competencia se divide en dos categorías, la A que son estructuras de sección regular y la categoría B de sección irregular. Las especificaciones detalladas de estas categorías se podrán revisar en la sección de anexos de este trabajo de titulación.

Las reglas aclaran que cada equipo debe tener un supervisor de la facultad, que los equipos deben estar integrados por 5 estudiantes de cualquier universidad a nivel mundial, cada universidad puede participar con no más de dos equipos a la competencia (uno en cada una de las categorías) y previo al concurso se debe enviar la hoja de registro y la hoja de la relación de costo de la mezcla. Las dimensiones máximas de la estructura deben ser de

200 mm de ancho, 200 mm de alto y 1000 mm de largo como se muestra en la figura 30.

La estructura debe tener un peso total de entre 5 kg y 15 kg. Se puede usar como materiales cualquier tipo de agregado no metálico y agregados químicos como aditivos que se encuentren en el ASTM C260, C494, o en el C1017.

Las varillas de FRP van a ser proporcionadas por la organización de la competencia y serán enviadas a cualquier parte de Estados Unidos y Canadá en un kit con diferentes varillas de los principales fabricantes en Estados Unidos, los datos técnicos de las varillas se encuentran en los catálogos de los fabricantes que son publicados por el ACI.

Además la estructura no debe tener más de 56 días desde que fue fabricada y se debe presentar un cilindro de 75x150mm con la mezcla del mismo hormigón con el que se fabricó la estructura. Para mayor información sobre el reglamento del concurso revisar la página de anexos.

Los autores de este trabajo de titulación participamos en la competencia FRP Composites Competition que tuvo lugar en la ciudad de Detroit, MI, USA como parte de la convención organizada por el American Concrete Institute que se dio del 26 al 30 de Marzo del 2017. El grupo ARQUC conformado por Silvana Carolina Jurado Mogrovejo, Edgar

#### Requerimientos geométricos de la estructura

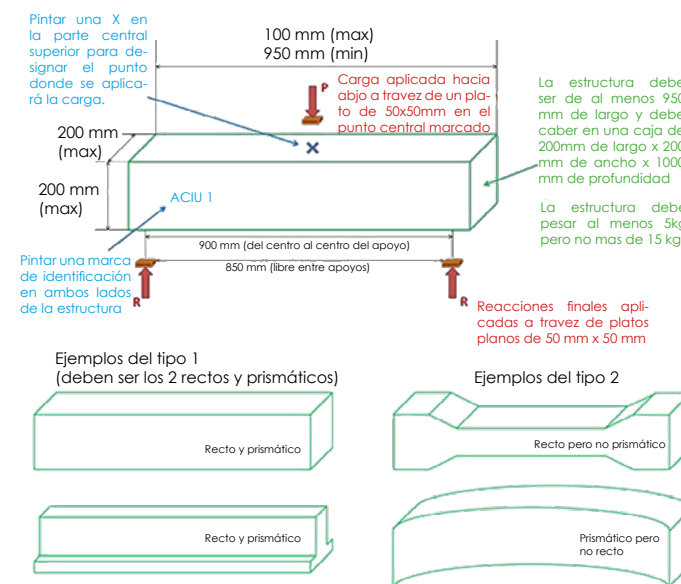


Figura 30: Gráficos explicativos del reglamento del concurso FRP Composites Competition (Tomada de ACI Committee 440, 2015)





Figura 31: Grupo ARQUC 2017, Detroit, MI. Fuente propia.



Figura 32: Vigas ensayadas en el concurso FRP 2017, Detroit, MI. Fuente propia.

Francel Mora Bravo, Nicole Sarmiento Moscoso, Karina Belen Tituana Tituana y Juan Fernando Quevedo con la dirección del Ingeniero Xavier Ricardo Cárdenas Haro como tutor, representamos a la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca y obtuvo el sexto lugar a nivel mundial en la categoría de estructuras tipo B de sección irregular.

En la participación se pudo observar elementos reforzados con FRP de diferentes geometrías y con varillas de GFRP utilizadas en las vigas de las distintas fábricas. Se pudo observar una tendencia geométrica de los elementos al arco e inclusive vigas de arco completo. Todas estas variantes de estructuras nos motivaron a probar con diferentes geometrías y refuerzos de FRP con el fin de brindarles toda la información que obtuvimos durante y previa la participación en este concurso futuros participantes.

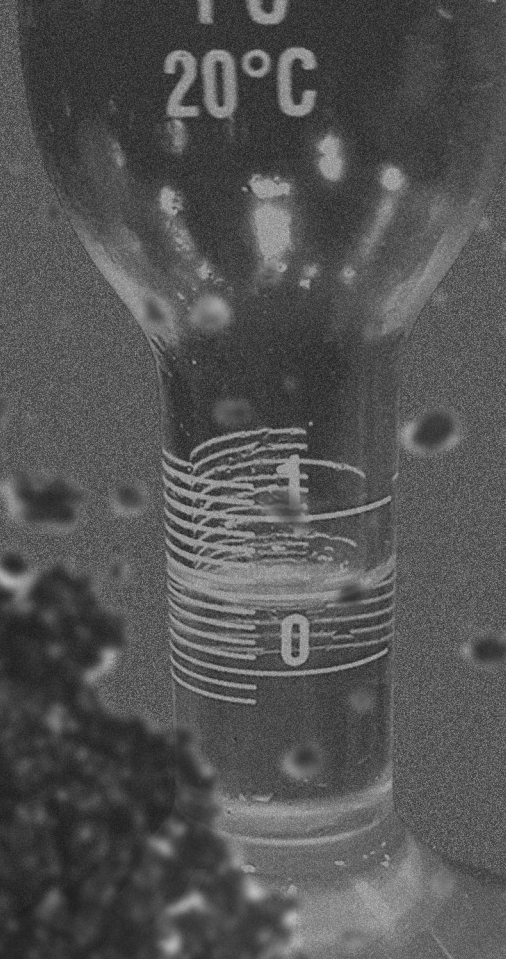
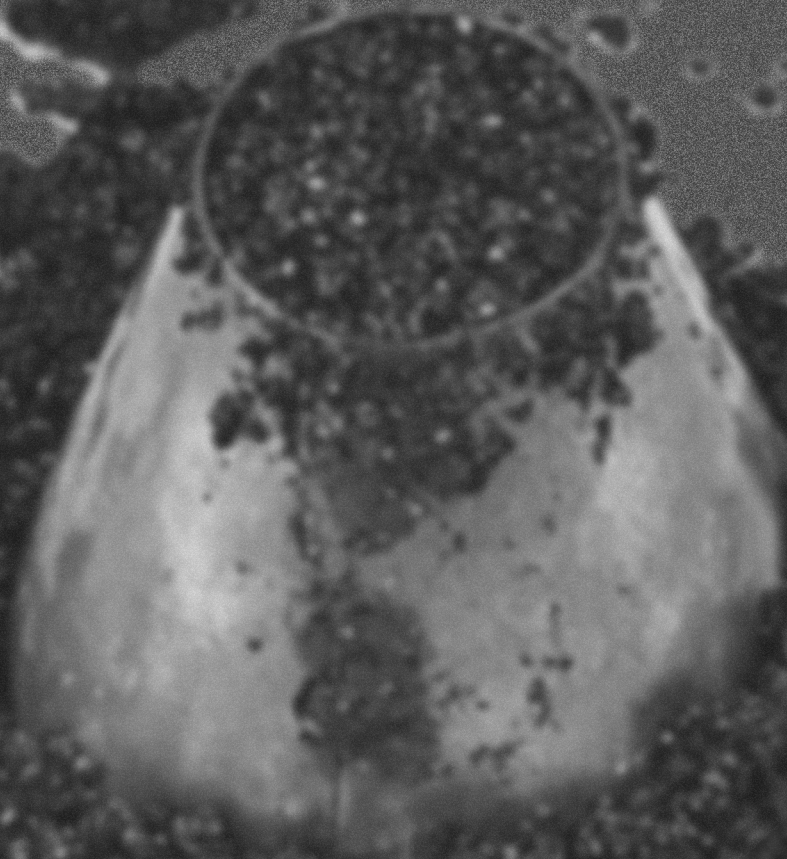
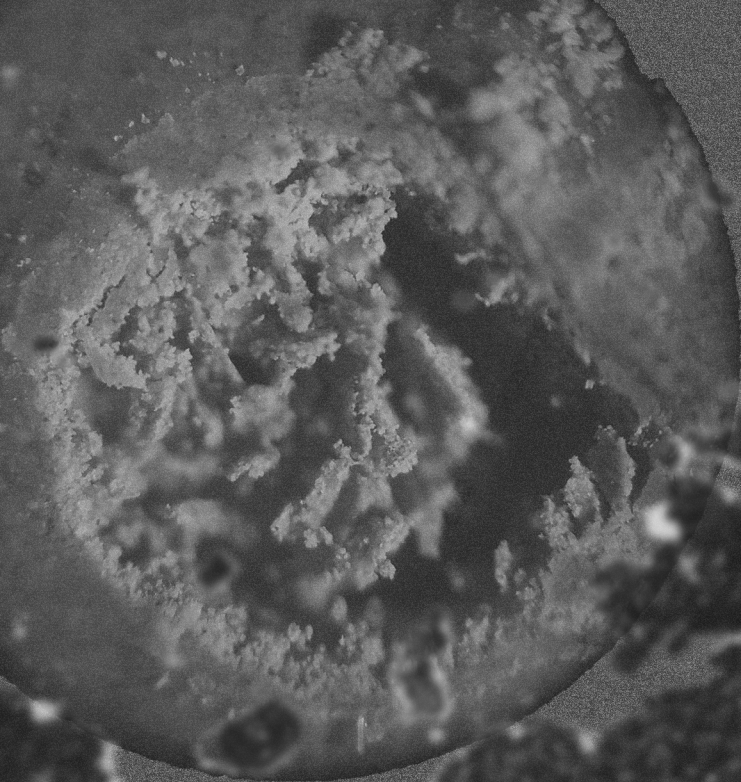
### 1.7 Conclusiones.

- El método de reforzamiento con varillas de FRP es desconocido por la gran mayoría de gente afín a la construcción.
- Actualmente Ecuador no es un productor directo de acero a pesar de tener a su alcance la materia prima para su elaboración, es por eso que se busca procesos alternos para su obtención. Por ello se

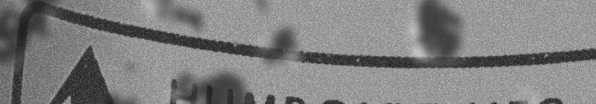
debería optar por métodos alternativos de refuerzo que replacen al acero como las fibras ya que se cuenta con fábricas que producen este material.

-El método de refuerzo de estructuras con FRP debería tomarse en cuenta ya que las varillas de este material presentan mejores propiedades que las varillas de acero en cierto tipo de construcciones las cuales se especificó anteriormente.

- Las especificaciones técnicas de varillas de FRP presentadas por el fabricante son muy importantes a la hora del diseño de elementos estructurales con este refuerzo ya que las propiedades de las varillas dependen directamente del fabricante y varían considerablemente de uno a otro. Es por ello que los fabricantes nacionales de varillas de FRP deberían presentar detalladamente la información técnica necesaria para poder diseñar apropiadamente en el ámbito de la construcción con estos productos.



183







## Capítulo 2

### **Ensayo de materiales de materiales y dosificación del H.A.R.**

Se procederá con la explicación de los ensayos realizados a los materiales que componen el Hormigón de Alta Resistencia (H.A.R.) Se dará a conocer el método de diseño del hormigón mencionado, teniendo en consideración normas y procesos establecidos por el A.C.I. y la dosificación del hormigón que se utilizó para la elaboración de los elementos tipo viga.



## 2.1 Hormigón de Alta Resistencia (HAR)

### 2.1.1 Introducción al hormigón de alta resistencia

Se considera Hormigón de Alta Resistencia (HAR) a un tipo de hormigón el cual posee una capacidad resistente a compresión muy superior a los hormigones habituales y que se emplea en muchas infraestructuras actuales. Se puede diferenciar dos tipos de H.A.R. los cuales son: Hormigones de Alta Resistencia Final y Hormigones de Alta Resistencia Inicial, el primero se verifica con resistencias superiores a los 500 kg/cm<sup>2</sup> ensayados en probetas cilíndricas a los 28 días y el segundo con resistencias temprana mayores a la normal en edades inferiores a los 28 días. (Ready Mix, s.f.)

La evolución de la resistencia del hormigón a través del tiempo ha ido aumentando paulatinamente, a partir del 1970 como se ve en la figura 33, la cual llegó a la conclusión que a menor relación agua-cemento se eleva la resistencia del hormigón. Hoy en día los usos que brinda este tipo de hormigón son aplicados en algunos elementos prefabricados, como también en hormigones pretensados y postensados, al igual en hormigones que necesitan un desmolde anticipado además en aquellos que se necesita una alta durabilidad. (ETSICCP, 2012)

Las propiedades que se puede valorar son especialmente la resistencia a la compresión que permite tener cifras sobre los 500 kg/cm<sup>2</sup> algo indispensable cuando se requiere estas características en obra, una alta durabilidad en el tiempo como

también una baja permeabilidad, al igual permite mayores luces entre apoyos y menor esbeltez en columnas. Actúa de una manera óptima cuando existen condiciones desfavorables de exposición de la estructura tales como obras marítimas o plantas de tratamiento de aguas residuales. (Ready Mix, s.f.)

Según (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Jussara, 2004) mencionan que los hormigones de alta resistencia se producen con materiales de alta calidad, cuidadosamente seleccionados y con la optimización del diseño de la mezcla como se puede apreciar en la figura 34. Estos materiales se dosifican, se mezclan, se colocan, se compactan y se curan con los más altos niveles de la industria. Típicamente, estos hormigones tienen una relación agua - materiales cementantes de 0.20 a 0.45. Comúnmente se utilizan reductores de agua para que la mezcla sea fluida y trabajable.

### 2.2 Ensayos de materiales

Se procede a realizar los ensayos correspondientes a los materiales seleccionados los cuales serán indicados a continuación por lo que nos servirán para poder desarrollar efectivamente una dosificación adecuada, ya que estos materiales serán indispensables para realizar una correcta dosificación para el hormigón de alta resistencia y que nos servirán

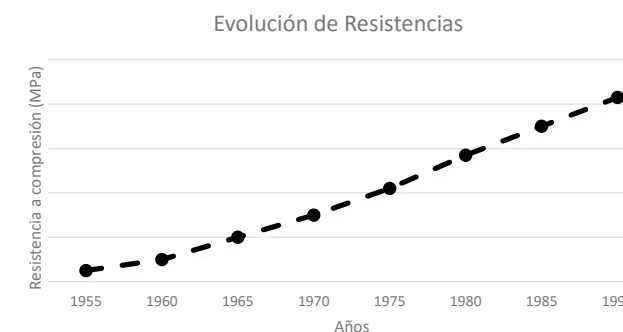


Figura 33. Evolución de las resistencias del hormigón de alta resistencia. Tomado de [http://ceres.udc.es/ITS\\_Caminos/Optativas/Materiales\\_Sistemas\\_Constructivos/har\\_msc\\_apuntes\\_20112012\\_CERES.pdf](http://ceres.udc.es/ITS_Caminos/Optativas/Materiales_Sistemas_Constructivos/har_msc_apuntes_20112012_CERES.pdf)

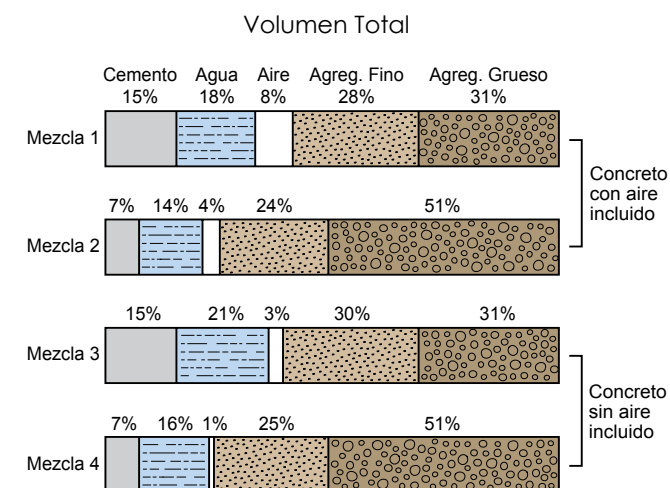


Figura 34. Ejemplo de variación de las proporciones usadas en el hormigón. Tomado de (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Jussara, 2004)



para la elaboración y fabricación de las vigas con refuerzos de acero y fibras sintéticas que será hablado en el próximo capítulo.

Hemos creído conveniente realizar este tipo de hormigón ya que por alcanzar una resistencia alta al momento de aplicar carga a las vigas necesitamos un elemento con un hormigón de alta resistencia.

### 2.2.1 Densidad de cemento

Este ensayo es muy importante para saber manejar la dosificación del hormigón puesto que de este elemento se conforma esta mezcla. Para la densidad del cemento nos hemos basado en la norma INEN 156 para lo cual hemos considerado someter a pruebas de laboratorio a los 3 tipos de cemento más comunes en nuestro medio los cuales son: Cemento Holcim, Cemento Guapán y Cemento Atenas.

Según la (NTE INEN 156, 2009) indica que la densidad del cemento hidráulico está definida como la masa de un volumen unitario de los sólidos. Aquel documento indica también que la determinación de la densidad de cemento hidráulico consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que está desplazado en el frasco de Le Chatelier. El líquido que ha sido empleado en el ensayo ha sido diésel ya que

este no fragua con el cemento y así se evita perder el equipo ocupado en laboratorio.

Se procedió a pesar alrededor de 64g de cemento tal como indica la norma y se aprecia en la figura 35 posterior a esto se realiza la introducción del líquido no reactivo en el frasco de Le Chatelier manejando cuidadosamente a que este se posicione entre las marcas de 0 cm<sup>3</sup> hasta 1 cm<sup>3</sup> tal como lo indica la figura 36, hay que procurar mantener una temperatura constante del diésel respecto al cemento por lo que se regulariza este mediante un baño de agua para evitar variaciones en el contenido del frasco como se aprecia en la figura 37.

Luego se coloca el cemento en pequeños incrementos a la misma temperatura que el líquido evitando salpicaduras al igual impidiendo que el material se pegue a las paredes laterales interiores para lo cual se debe poner el tapón en el utensilio y hacerlo rodar en posición inclinada y dar pequeños y controlados golpes para que este llegue al fondo de la matriz como se ve en la figura 38.

Cuando ya se ha introducido la cantidad deseada el nivel del líquido se hallará entre las graduaciones en la parte superior del cuello como se aprecia en la figura 39, se procede a registrar la lectura final luego de haber sumergido nuevamente en el baño de agua para evitar cambios de temperatu-



Figura 35. Cemento necesario para realizar el ensayo. Fuente: Propia

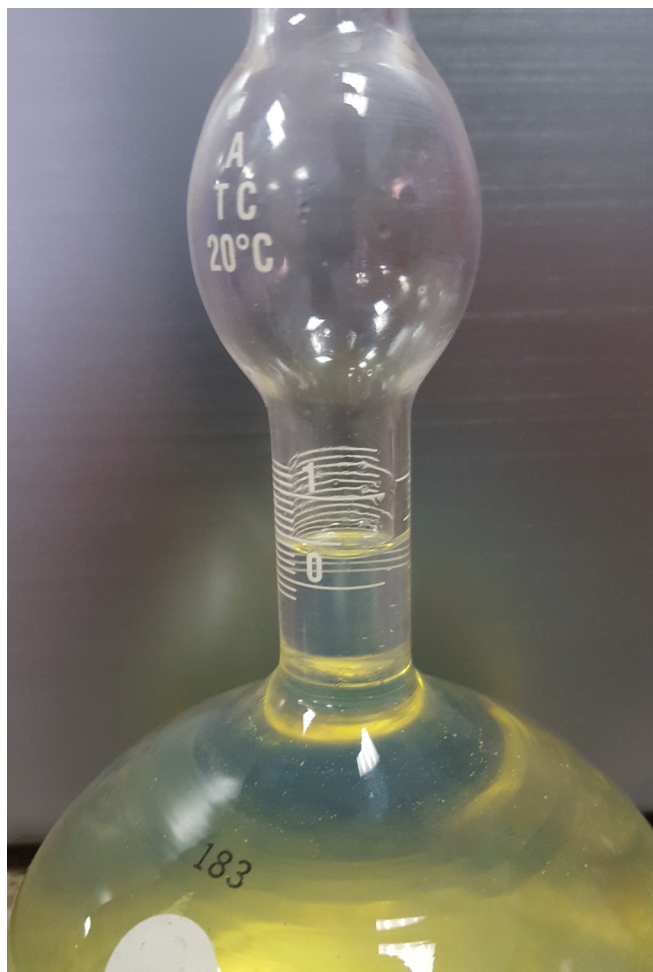


Figura 36. Líquido no reactivo. Fuente: Propia

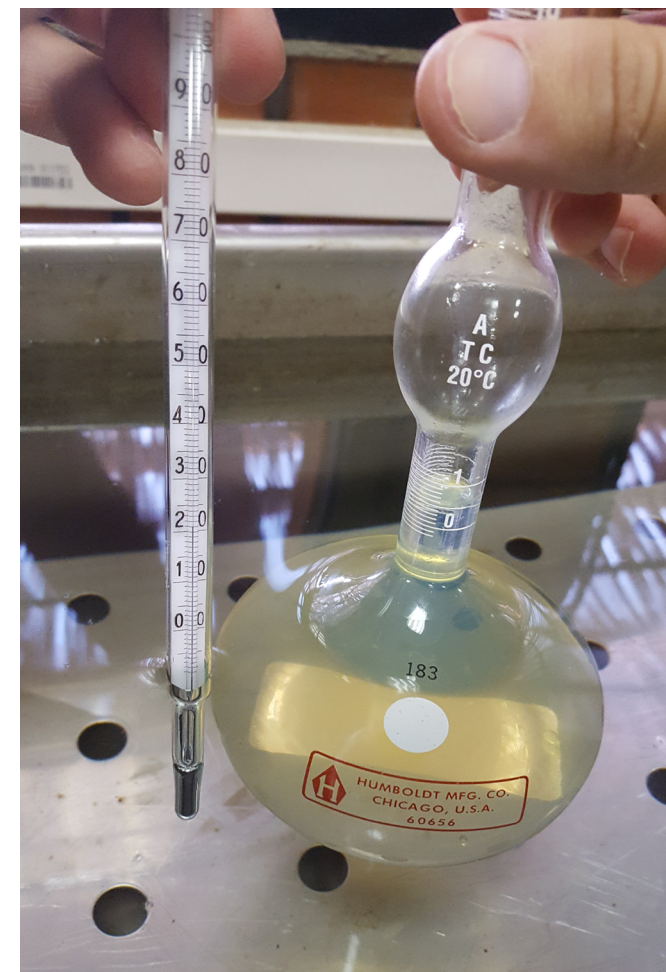


Figura 37. Temperatura constante para introducción del cemento. Fuente: Propia





Figura 38. Rodamiento de la matraz de Le Chatelier luego de introducir el cemento.  
Fuente: Propia

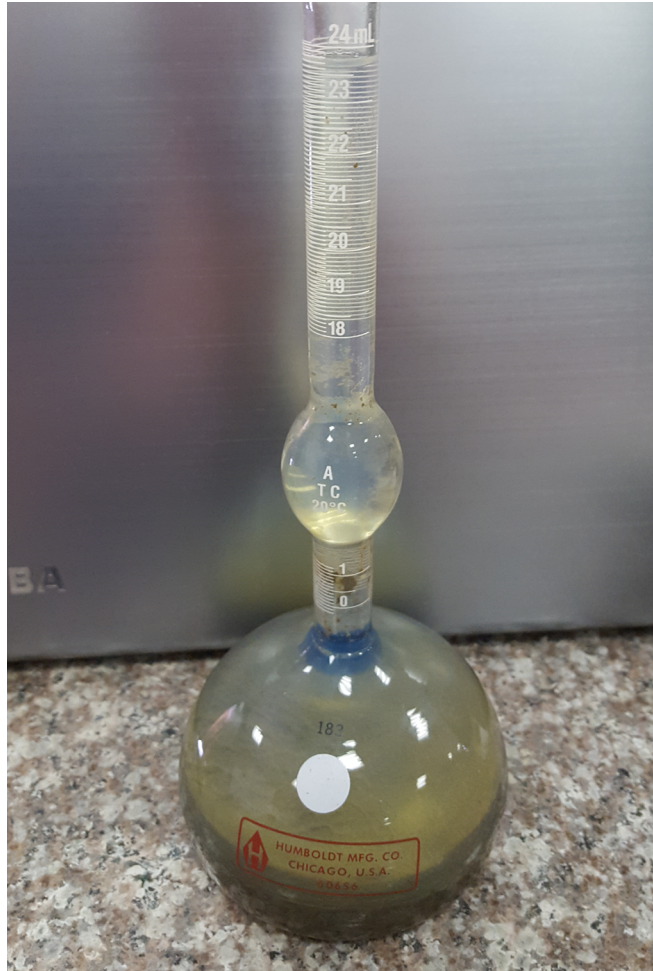


Figura 39. Variación de líquido por introducción del cemento. Fuente: Propia

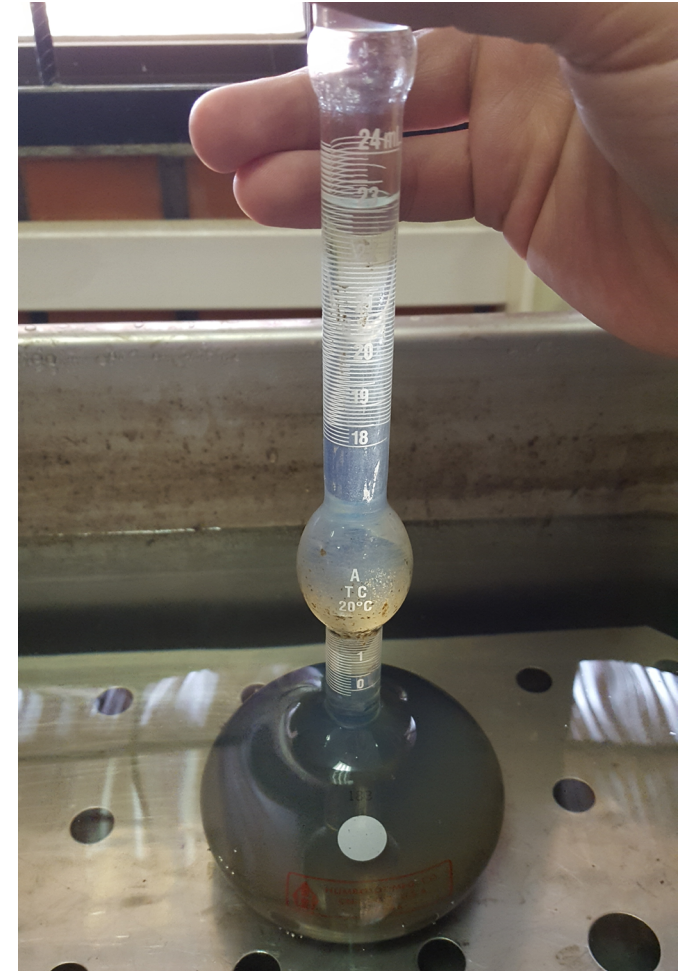


Figura 40. Medición de variación con temperatura constante. Fuente: Propia

ra tal como lo indica la figura 40.

Para calcular la densidad del cemento,  $p$ , se ocupa la siguiente fórmula:

$$p = \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \left( \frac{Mg}{m^3} \right) = \left( \frac{\text{masa del cemento, g}}{\text{volumen desplazado, cm}^3} \right)$$

Dando como resultado los valores obtenidos en la siguiente tabla:

**Tabla 4:** Densidades de cementos ensayados.

DENSIDAD DEL CEMENTO							
Empresa	Tipo de Cemento	Masa del cemento (g)	Lectura inicial (cm3)	Lectura final (cm3)	Volumen desplazado (cm3)	Densidad promedio ensayo individual (g/cm3)	Densidad promedio (g/cm3)
Holcim	GU	64	0.8	23.6	22.8	2.81	2.83
		64	0.8	23.3	22.5	2.84	
		64	0.8	23.5	22.7	2.82	
		64	0.6	23.1	22.5	2.84	
Guapán	GU	64	0.8	22.9	22.1	2.90	2.89
		64	0.8	23	22.2	2.88	
		64	0.7	22.8	22.1	2.90	
Atenas	GU	64	0.8	22.8	22	2.91	2.89
		64	0.7	22.9	22.2	2.88	
		64	0.8	23	22.2	2.88	

Nota: Fuente propia.

## 2.2.2 Granulometría del agregado

Cabe indicar que la granulometría es indispensable para determinar qué tipo de material se maneja, las características que este posee y cómo afectará en la preparación del hormigón. Se dispuso obtener muestras como se indica en la normativa (ASTM C 33, 2016) y la (ASTM C136, 2014). Se prepara 300 gramos de árido fino en condición seca, a continuación se utilizan los tamices N4, N8, N16, N30, N50, N100, N200, con esta serie de instrumentos se obtiene el módulo de finura el cual se define como: *“Un factor empírico que se obtiene por la suma de los porcentajes totales de la muestra de arena, retenidos en cada uno de los tamices especificados y dividiendo la suma por 100.”* (Asociación de Productores de Cemento, 1983).

Por lo que se ocupan los valores de porcentaje acumulado de la serie de tamices desde el N4 hasta el N100 ya que es un parámetro muy importante para el diseño del hormigón como se ve en la tabla 5 y resultando la segregación del material que se queda en cada tamiz lo que se aprecia en la figura 41, dando como resultado granulométrico un módulo de finura de la arena de 3.01. Se puede apreciar en la figura 42 la curva producida por la tabla anterior. Para el árido grueso se estableció de antemano ocupar un material proveniente de la trituración en la mina con un tamaño máximo nominal de 3/8" (9.5mm) el cual luego de ser cribado se obtiene el material necesario.

**Tabla 5:** Granulometría de la arena fina

GRANULOMETRÍA DE LA ARENA FINA					
Nro de Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	0.00	0.00	0.00	100.00
16	1.18	102.32	34.13	34.13	65.87
30	0.60	113.80	37.96	72.09	27.91
50	0.30	69.16	23.07	95.16	4.84
100	0.15	13.44	4.48	99.64	0.36
200	0.08	0.77	0.26	99.90	0.10
Base	<	0.38	0.10	100.00	0.00
Total		299.80	100.00		

Módulo de finura: 3.01

Nota: Fuente propia.



Figura 41. Resultado granulométrico de la arena. Fuente Propia.

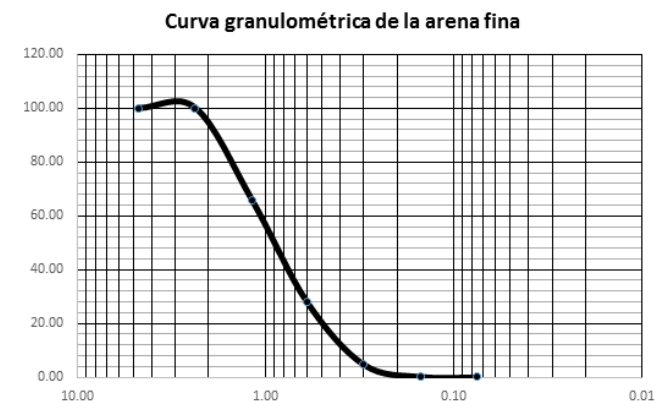


Figura 42. Resultado granulométrico de la arena. Fuente: propia



### 2.2.3 Humedad

Este factor es muy importante ya que afecta ampliamente la cantidad de agua que será utilizada para producir el hormigón por lo que se dispuso trabajar con materiales secados en el horno para obtener una humedad aproximada al 0% y así establecer que este parámetro no varíe e influya en el diseño de la mezcla. Para alcanzar el contenido de humedad se utiliza la fórmula:

$$\%H = \frac{100 (W - D)}{D} \quad (\text{EC. 1})$$

Donde:

%H= Porcentaje de humedad

W= Masa de la muestra húmeda

D= Masa de la muestra seca

Resultados:

**Tabla 6:** Humedad de agregados ensayados.

Agregado	Humedad
Agregado Fino	1.38%
Agregado Grueso	0.00%

Nota: Fuente propia.

### 2.2.4 Absorción

La absorción es prácticamente indispensable al momento de calcular el agua que necesita la dosificación, ya que el agua añadida debe ser sufi-

ciente para substituir la absorción de los áridos y la cantidad necesaria para hidratar el cemento según el diseño de la dosificación planteada. Mediante la norma (ASTM C 128, 2004) y (ASTM C 127, 2004) se determina el porcentaje de absorción para agregado fino y grueso respectivamente, las normas también explican el ensayo para la determinación de densidad y densidad relativa (gravedad específica).

La muestra de árido fino a ser utilizada tiene que ser secada y posteriormente debe permanecer sumergida en agua por 24 horas, para luego esparcirla sobre una superficie plana no absorbente y secar el árido hasta que se encuentre en condición saturado superficialmente seco (SSS), para verificar la condición SSS se debe colocar el material en el molde para ensayo y compactar con 25 golpes ligeros, posteriormente se retira el molde y si el árido se desprende ligeramente se ha llegado a la condición SSS, para finalizar se obtiene la masa del árido en condición SSS.

El árido grueso debe ser secado hasta tener una masa constante y luego permanecer sumergido por 24 horas, posteriormente debe ser colocado sobre un paño absorbente el mismo que sirve para eliminar la capa visible de agua sobre el árido, una vez realizado esto el árido se encuentra en condición SSS y se debe determinar su masa.



Figura 43. Material ocupado en ensayo con la matraz de Le Chatelier. Fuente propia

El porcentaje de absorción se obtiene según la siguiente fórmula tanto para el árido fino como para el árido grueso.

$$\text{Absorción \%} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (\text{EC. 2})$$

Donde:

Absorción % = Porcentaje de absorción

S = Masa de la muestra saturada superficialmente seca

A = Masa de la muestra seca al horno

Resultados:

**Tabla 7:** Absorción de agregados ensayados.

Agregado	Absorción
Agregado Fino	3.77%
Agregado Grueso	1.15%

Nota: Fuente propia.

## 2.2.5 Peso Específico

Basados en la norma NTE 856 (2010) nos indica que la muestra de árido fino se proyecta para llegar a condición SSS, se llena el frasco de Le Chatelier con agua y se introduce 55 gramos de árido fino en condición SSS como se indica en la figura 43, se elimina todas las burbujas de aire y se toma la masa del frasco con muestra y agua, a continuación se retira el árido fino y se seca hasta conseguir una

masa constante, se toma la masa de la muestra seca, para finalizar se obtiene la masa del frasco con agua como se indica en las figuras 44, 45, y 46.

$$\text{Densidad Relativa (SH)} = \frac{S1 (A/S)}{0.9975 (R2 - R1)} \quad (\text{EC. 3})$$

$$\text{Densidad Relativa (SSS)} = \frac{S1}{0.9975 (R2 - R1)} \quad (\text{EC. 4})$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente(SSS)} = \frac{S1 (A/S)}{0.9975 (R2 - R1) - [(S1/S)(S-A)]} \quad (\text{EC. 5})$$

$$\text{Densidad Relativa (SH)} = \frac{997.5 S1 (A/S)}{0.9975 (R2 - R1)} \quad (\text{EC. 6})$$

$$\text{Densidad Relativa (SSS)} = \frac{997.5 S1}{0.9975 (R2 - R1)} \quad (\text{EC. 7})$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente(SSS)} = \frac{997.5 S1 (A/S)}{0.9975 (R2 - R1) - [(S1/S)(S-A)]} \quad (\text{EC. 8})$$

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno, gramos

R1 = lectura inicial del nivel de agua en el frasco de Le Chatelier, cm<sup>3</sup>

R2 = lectura final del nivel de agua en el frasco de Le Chatelier, cm<sup>3</sup>

S = masa de muestra saturada superficialmente seca (utilizada en el procedimiento gravimétrico, para determinar la densidad y la densidad relativa (gravedad específica) o para determinar la absorción, con ambos procedimientos), gramos

S1 = masa de la muestra saturada superficialmente seca (utilizada en el procedimiento volumétrico, para determinar la densidad y la densidad relativa (gravedad específica), gramos

Para preparar el árido grueso en condición SSS y tomar su masa, se coloca la muestra en el recipiente y determinar su masa aparente en agua como se aprecia en figura 47, retirar la muestra del recipiente y secar hasta tener una masa constante para finalizar obtener la masa de la muestra seca.

$$\text{Densidad Relativa (SH)} = \frac{A}{B - C} \quad (\text{EC. 9})$$

$$\text{Densidad Relativa (SSS)} = \frac{B}{B - C} \quad (\text{EC. 10})$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente(SSS)} = \frac{A}{A - C} \quad (\text{EC. 11})$$

$$\text{Densidad Relativa (SH)} = \frac{997.5 A}{B - C} \quad (\text{EC. 12})$$

$$\text{Densidad Relativa (SSS)} = \frac{997.5 B}{B - C} \quad (\text{EC. 13})$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente(SSS)} = \frac{997.5 A}{A - C} \quad (\text{EC. 14})$$

Donde:

A= masa de la muestra seca

B= masa de la muestra saturada superficialmente seca

C= masa aparente en agua de la muestra saturada

Resultados:



Figura 44. Masa del frasco más agua. Fuente propia.



Figura 45. Introducción de la arena. Fuente propia.



Figura 46. Masa del frasco más agua y arena. Fuente propia.



Figura 47. Ensayo de densidad agregado grueso. Fuente propia.

**Tabla 8:** Pesos Específicos

Tipo de agregado	Densidad Relativa (SH) (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Relativa (SSS) (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Relativa Aparente (SSS) (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Relativa (SH) (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Relativa (SSS) (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Relativa Aparente (SSS) (kg/m <sup>3</sup> )
Arido Fino	2.52	2.61	2.78	2511.85	2610.12	2775.60
Arido Grueso	2.30	2.32	2.36	2298.78	2320.09	2354.57

Nota: Fuente propia.



## 2.2.6 Forma

Según la norma (NTE INEN 0872, 2011) nos muestra la tabla 9 como una manera simple de catalogar el árido según su forma, este método simplifica la definición de las características superficiales. Basándonos en el material obtenido en la cantera como se observa en la figura 48, se tiene por resultado los valores de la tabla 10:

**Tabla 10:** Tipo obtenido de áridos.

Agregado	Forma
Agregado Fino	Redondeada
Agregado Grueso	Angular

Nota: Fuente propia.



Figura 48. Agregado grueso. Tomado de <http://www.avena.co/tienda/agregado/1341/>

**Tabla 9:** Clasificación de áridos.

Clasificación	Descripción	Ejemplo
Redondeada	Formadas completamente por desgaste	Gravas de río, mar, desierto, arenas de mar o transportadas por el viento
Irregular o parcialmente redondeada	Formadas parcialmente por desgaste, tienen algunos bordes redondeados. Irregulares por naturaleza	Gravas y arenas de canteras tierra y pedernal de pozos excavados
Angular	Poseen bordes bien definidos, formados en la intersección de caras planas ásperas	Rocas trituradas de todos los tipos, pedregullo
Laminar	Partículas en las cuales el espesor es relativamente pequeño comparado con el ancho y/o longitud	Rocas laminadas
Alargada	Partículas usualmente angulares en las cuales la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones	
Laminar y Alargada	Partículas que tienen la longitud considerablemente mayor que el ancho, y este considerablemente mayor que el espesor	

Nota: Tabla de la norma NTE INEN 0872, 2011 para la clasificación de los áridos.

## 2.3 Diseño de la mezcla de hormigón de alta resistencia

El diseño de la mezcla es un factor sumamente importante ya que de él dependerá el manejo del hormigón, el cual se basará en la introducción detallada del método de diseño de mezclas de hormigón de alta resistencia del comité ACI 211.4, este método sirvió de base para realizar la mezcla definitiva de la investigación, por lo que se cumple uno de los objetivos planteados dentro de este trabajo de titulación que fue encontrar una dosificación de mezcla de hormigón con una capacidad de resistencia alta para la fabricación de las vigas propuestas, este objetivo representó uno de los objetivos a cumplir, dado que la predicción del comportamiento del hormigón en su estado fresco y endurecido, es aún uno de los temas principales de investigación alrededor del mundo.

Previo a la utilización de él diseño planteado se tuvo conocimiento del grupo en la participación del concurso de hormigones, por lo que se utilizó una granulometría ideal con respecto al agregado fino y se utilizó el cemento que dio mejores resultados.

### 2.3.1 Método de diseño de mezclas de hormigones de alta resistencia según el comité ACI 211.4R

El método planteado por el comité 211.4 del ACI plantea el rango de resistencia entre 450 kg/cm<sup>2</sup> y

840 kg/cm<sup>2</sup>, este método es aplicable a hormigones de peso normal, tanto hormigones convencionales como hormigones de alta resistencia por lo que se centran en encontrar la cantidad necesaria para producir hormigones que tengan propiedades deseables y sean económicos. Este manual indica unos pasos a seguir para poder cumplir correctamente el objetivo de desarrollar un hormigón de alta resistencia que permita ser trabajable y cumpla las resistencias planteadas, por lo cual se debe realizar ensayos en el laboratorio y en campo para encontrar la dosificación correcta.

Procedimiento:

**Paso 1:** Escoger el slump (*asentamiento*) y la resistencia del hormigón requeridos, valores recomendados para el slump se muestran en la tabla 11. Aunque sin tener un slump inicial se puede realizar un hormigón de alta resistencia con la adición de un aditivo superplastificante y producirse satisfactoriamente es recomendable un slump de 1 a 2" antes de agregar el superplastificante. Esto certifica una adecuada cantidad de agua para la dosificación y hace que el aditivo sea efectivo.

Para un hormigón elaborado sin superplastificante es recomendado un asentamiento entre 2 a 4", este puede ser escogido de acuerdo al trabajo a realizarse. Se recomienda siempre ocupar un su-

perplastificante ya que cuando el hormigón tiene menos de 2" de asentamiento se dificulta hacer que se consolide el material ya que por el alto contenido de agregado grueso y materiales cementicios la mezcla se vuelve difícilmente trabajable.

**TABLA 11.:** Slump (asentamiento) recomendado para hormigones de Alta Resistencia con y sin superplastificante

Slump con SP	Slump sin SP
1" - 2"	2" - 4"

Antes de la adición del SP

Nota: Tomado de ACI Comité 211.4R

**Paso 2:** Seleccionar el tamaño máximo del agregado, basados en los requerimientos el tamaño máximo del árido grueso es dado en la tabla 12. El ACI 318 indica que el tamaño máximo del agregado no debe superar una quinta partes de la dimensión menor entre los lados del elemento, una tercera parte de la profundidad de la viga, o tres cuartas partes del mínimo espacio entre las barras de refuerzo como se ve en la figura 49.

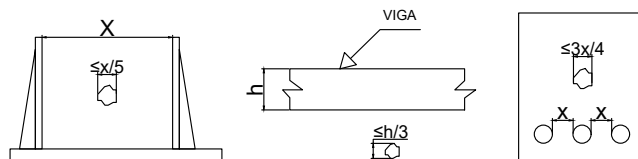


Figura 49. Tamaño máximo del agregado. Fuente: ACI 318

**TABLA 12.:** Tamaño máximo del agregado grueso

Resistencia requerida del hormigón (Kg/cm²)	Tamaño máximo del agregado
< 630	3/4" - 1"
> 630	3/8" - 1/2"

Nota: Tomado de ACI Comité 211.4R

**Paso 3:** Seleccionar el contenido óptimo de agregado grueso, Para seleccionar la cantidad necesaria de agregado grueso depende su resistencia característica y tamaño máximo. El contenido óptimo recomendado de agregado grueso, expresado como una fracción del peso unitario compactado, es dado en la tabla 13 como una función del tamaño máximo nominal.

El peso seco del agregado grueso por m³ de hormigón puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$W_{\text{seco}} = (\% \text{ Vol}) \times (\text{Peso seco compactado}) \quad (\text{EC. 15})$$

**TABLA 13.:** Volumen de Agregado Grueso por unidad de volumen de hormigón ( Para Ag. Fino con modulo de finura entre 2.5 - 3.2)

Tamaño nominal máximo	3/8"	1/2"	3/4"	1"
Fracción volumétrica Psag	0.65	0.68	0.72	0.75

Nota: Tomado de ACI Comité 211.4R

**Paso 4:** Estimar el agua de mezcla y el contenido de aire, la cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón requerida para producir un asentamiento dado es dependiente del tamaño máximo, forma de las partículas, gradación del agregado, cantidad de cemento y tipo de plastificante o superplastificante usados.

Si se usa un superplastificante, el contenido de agua en este aditivo es tomado en cuenta para el cálculo de la relación agua/cemento: La tabla 14 enseña una primera estimación del agua de mezclado requerida para hormigones elaborados con agregados de tamaño máximo entre 1" y 3 / 8", esta cantidad de agua es estimada sin la adición del aditivo, en la misma tabla también se da los valores estimado de aire atrapado. Estas cantidades de agua de mezclado son máximas para un agregado bien gradado, angular y limpio que cumple con los límites de la norma ASTM C 33.

Dado que la forma de las partículas y la textura superficial del agregado fino puede influenciaren el contenido de vacíos, el requerimiento de agua de mezclado puede ser diferente de los valores dados. Los valores dados en la tabla 14, son aplicables cuando el agregado fino usado tiene un contenido de vacíos igual a 35%, el contenido de vacíos del agregado fino puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de vacíos, } V\% = \left(1 - \frac{\text{PUC}}{\text{Peso específico}}\right) \cdot 100 \quad (\text{EC. 16})$$

Cuando el contenido de vacíos del agregado fino no es 35%, es necesario un ajuste a la cantidad de agua de mezclado, este ajuste puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$\text{Ajuste del agua de mezclado, } A \text{ kg/m}^3 = 4.72 \times (V-35) \quad (\text{EC. 17})$$

Usando la ecuación 17 obtenemos un ajuste de 4.72 kg/m<sup>3</sup> por cada punto porcentual del contenido de vacíos de la arena.

**TABLA 14.:** Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire del hormigón basado en el uso de una arena con 35% de vacíos.

Asentamiento	Agua de mezclado en kg/m <sup>3</sup> para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
	3/8"	1/2"	3/4"	1"
1'' - 2''	183	174	168	165
2'' - 3''	189	183	174	171
3'' - 4''	195	189	180	177
Aire Atrapado				
Sin superplastificante	3	2.5	2	1.5
Con superplastificante	2.5	2	1.5	1

Nota: Tomado de ACI Comité 211.4R

**Paso 5:** Seleccionar la relación agua/materiales cementicios, en las tablas 15 y 16 valores máximos

recomendados para la relación agua/materiales cementicios son mostrados como una función del tamaño máximo del agregado para alcanzar diferentes resistencias a compresión en 28 o 56 días. Los valores dados en la tabla 15 son para hormigones elaborados sin superplastificantes y los dados en la tabla 16 para hormigones con superplastificante.

La relación agua/materiales cementicios puede limitarse por requerimientos de durabilidad. Cuando el contenido de material cementicio excede los

**TABLA 15.:** Relación Agua/Materiales cementicios para hormigones sin superplastificante

Promedio f'cr* Kg/ cm <sup>2</sup>	Edad (días)	Máximos de agregados gruesos indicados			
		3/8"	1/2"	3/4"	1"
500	28	0.41	0.40	0.39	0.38
	56	0.44	0.43	0.42	0.42
550	28	0.36	0.35	0.34	0.34
	56	0.39	0.38	0.37	0.36
600	28	0.32	0.31	0.31	0.30
	56	0.35	0.34	0.33	0.32
650	28	0.29	0.28	0.28	0.27
	56	0.32	0.31	0.30	0.29
700	28	0.26	0.26	0.25	0.25
	56	0.29	0.28	0.27	0.26

\* La resistencia promedio deberá ser reajustada para usar esta tabla con un valor de 0.9.

Nota: Tomado del ACI Comité 211.4R

**TABLA 16.:** Relación Agua/Materiales cementicios para hormigones con superplastificante

Promedio f'cr* Kg/cm <sup>2</sup>	Edad (días)	Máximos de agregados gruesos indicados			
		3/8"	1/2"	3/4"	1"
500	28	0.49	0.47	0.45	0.42
	56	0.54	0.51	0.47	0.45
550	28	0.44	0.42	0.40	0.39
	56	0.49	0.46	0.43	0.41
600	28	0.40	0.38	0.36	0.35
	56	0.44	0.41	0.39	0.37
650	28	0.36	0.35	0.33	0.32
	56	0.40	0.38	0.36	0.34
700	28	0.33	0.32	0.31	0.30
	56	0.37	0.35	0.33	0.32
750	28	0.31	0.30	0.28	0.28
	56	0.34	0.32	0.30	0.30
800	28	0.29	0.28	0.26	0.26
	56	0.32	0.30	0.28	0.28
850	28	0.27	0.26	0.25	0.25
	56	0.30	0.28	0.27	0.26

\* La resistencia promedio deberá ser reajustada para usar esta tabla con un valor de 0.9.

Nota: Tomado del ACI Comité 211.4R

450 kg, se debe considerar el uso de un material cementicio alternativo ya que al resistir grandes esfuerzos se necesita una mejor composición y trabajo.

**Paso 6:** *Cálculo del contenido de material cementicio*, el peso del material cementicio requerido por m<sup>3</sup> de concreto puede ser determinado por la división de la cantidad de agua de mezclado entre la relación a/m.c. seleccionada. Sin embargo si las especificaciones incluyen un límite mínimo en la cantidad de material cementicio por m<sup>3</sup>, este debe ser cumplido.

**Paso 7:** *Proporcionamiento de la mezcla de prueba base*, para determinar las proporciones óptimas primero se debe realizar una mezcla base, los siguientes pasos deben ser seguidos para completar la mezcla:

1. Contenido de cemento.- Para esta mezcla, el peso del cemento será igual al calculado en el paso 6.
2. Contenido de arena.- Después de determinar los pesos por m<sup>3</sup> de agregado grueso, cemento, agua, y contenido de aire atrapado, el contenido de arena puede ser calculado usando el método de volúmenes absolutos.

**Paso 8:** *Proporcionamiento de mezclas usando ceniza volante*, este método incluye el uso de ceniza volante como adición al hormigón, la adición de este reducirá la demanda de agua, reduce la temperatura, y reduce el costo. Este paso se describe

**TABLA 17.:** Porcentajes de reemplazo de ceniza volante

Tipo Porcentaje por peso	Tamaño máximo del agregado
ASTM Clase F 15 - 25	3/4" - 1"
ASTM Clase C 20 - 35	3/8" - 1/2"

Nota: Tomado de ACI Comité 211.4R

la manera de adicionar al hormigón este material y los pasos para su proporcionamiento, recomendando al menos dos pruebas con diferentes contenidos de este material basándose en la tabla 17.

**Paso 9:** *Mezclas de prueba*, para cada mezcla el proporcionamiento se hará siguiendo los pasos del 1 al 8, una mezcla de prueba debe ser producida determinando su trabajabilidad y características de resistencia.

**Paso 10:** *Ajuste de las proporciones de la mezcla*, si las propiedades deseadas del hormigón no han sido obtenidas en las mezclas de prueba, las proporciones de la mezcla base deben ser modificadas siguiendo el procedimiento siguiente:

1. Slump inicial.- Si el slump inicial no se encuentra en los rangos deseados, el agua de mezclado debe ser ajustada, el contenido de cemento debe ser corregido para mantener constante la relación a/mc, y el contenido de arena debe ser ajustado para asegurar el flujo del hormigón.



2. Dosis de superplastificante.- Si un superplastificante es usado, debe ser determinado su efecto en la trabajabilidad y resistencia. Se debe seguir las indicaciones dadas por el fabricante en cuanto a su tasa máxima de uso. El uso en laboratorio de superplastificantes debe ser ajustado para su uso en campo.

3. Contenido de agregado grueso.- Una vez que las mezcla de prueba de hormigón han sido ajustadas para el slump deseado, se debe determinar si la mezcla es demasiado áspera. Si es necesario el contenido de agregado grueso puede ser reducido y el contenido de arena ajustado. Sin embargo este incremento del contenido de arena incrementara la demanda de agua, y por lo tanto el contenido de cemento.

4. Contenido de aire.- Si el contenido de aire difiere significativamente de las proporciones deseadas, el contenido de arena puede ser ajustado.

5. Relación a/mc.- Si la resistencia requerida no es alcanzada, mezclas adicionales con una menor relación a/mc deben ser elaboradas.

**Paso 11:** Selección de la mezcla optima, una vez que las proporciones de mezcla han sido ajustadas para producir la trabajabilidad y resistencia desea-

das, es necesario realizar pruebas en las condiciones de campo de acuerdo a los procedimientos recomendados por el ACI 211.1.

### 2.3.2 Procedimiento de diseño de mezcla planteada

A continuación se planteará el procedimiento para la mezcla base en el trabajo de titulación por lo que se seguirán los pasos indicados anteriormente en el método del ACI 211.4R. Los datos que se poseen como información obtenida en el laboratorio son los siguientes que serán presentados en la tabla 18:

Resistencia Específica del hormigón: 650 kg/cm<sup>2</sup>

**Tabla 18.:** Datos para el diseño de H.A.R.

Ensayos	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> ) (SSS)	2.61	2.32
Peso Unitario Compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1624	1342
Contenido de Humedad (%)	1.38%	0%
Absorción (%)	3.77%	1.15%
Módulo de finura	3.01	-
Tamaño Máximo Nominal	-	3/8"

Nota: Fuente propia.

**Paso 1:** Se procede a seguir metódicamente los pasos establecidos, por lo que, como primer punto seleccionamos un asentamiento de 1 a 2 '' puesto que así lo indica la tabla 11 y también no se posee un registro de pruebas anteriores de la resistencia promedio del hormigón a los 28 días.

$$f'_{cr} = \frac{f'_c + 98}{0.9}$$

$$f'_{cr} = \frac{650 + 98}{0.9}$$

$$f'_{cr} = 831.11 \text{ Kg/cm}^2$$

**Paso 2:** Escogemos los datos previstos de la tabla 12, que nos indica que para resistencias superiores a 630 kg/cm<sup>2</sup>, se debe seleccionar un agregado grueso de tamaño máximo entre 3/8'' y 1/2''.

$$TMN = 3/8''$$

**Paso 3:** Mediante la tabla 13, tenemos el volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen de hormigón cuyo valor es **0.65**, procedemos a determinar el peso seco del agregado grueso/m<sup>3</sup> de hormigón:

$$W_{seco} = (\%Vol) \times (\text{Peso seco compactado})$$

$$W_{seco} = (0.65) \times (1342)$$

$$W_{seco} = 872.3 \text{ Kg}$$

**Paso 4:** A través de la tabla 14 la primera estimación de agua de mezclado requerida es de 189 Kg/m<sup>3</sup> de hormigón y el contenido de aire se sitúa en 2.5%.

Se procede a revisar si el valor contenidos de vacíos es igual a 35% por lo que:

$$\text{Contenidos de Vacíos, } V\% = \left(1 - \frac{P.U.C}{\text{Peso Especifico}}\right) * 100$$

$$V\% = \left(1 - \frac{1624}{2610}\right) * 100$$

$$V = 37.8 \%$$

$$\text{Ajuste de agua de mezclado, } A \frac{kg}{m^3} = 4.72 * (V - 35)$$

$$A \frac{kg}{m^3} = 4.72 * (37.8 - 35)$$

$$A = 13.2 \frac{kg}{m^3}$$

Por lo que el agua de mezclado sera:

$$W = 189 + 13.2$$

$$W = 202.2 \text{ Kg}$$

**Paso 5:** Basándonos en la tabla 15 llegamos a obtener el valor de la relación a/cm, la resistencia promedio debe ser ajustada con anterioridad para utilizar las tablas 15 y 16.

$$f'_{cr} = 0.9 \times 831.11 = 748 \text{ kg/cm}^2$$

Se obtiene de la tabla 16 para agregado de 3/8'':

$$\text{Relación a/cm} = 0.31 \text{ por interpolación}$$

**Paso 6:** Realizamos el cálculo de contenido de material cementante, por lo que:

$$\begin{aligned} \text{Contenido de agua: } 202.2 \text{ kg} \\ \text{cm} &= 202.2 / 0.31 \\ \text{cm} &= 650 \text{ kg} \end{aligned}$$

**Paso 7:** Se determina las proporciones de todos los materiales por m<sup>3</sup> a excepción de la arena y son las siguientes:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cemento} &= & 650 / (2.83 \times 1000) = 0.23 \text{ m}^3 \\ \text{Ag. Grueso} &= & 872.3 / (2.32 \times 1000) = 0.38 \text{ m}^3 \\ \text{Agua} &= & 202.2 / 1000 = 0.20 \text{ m}^3 \\ \text{Aire} &= & 0.025 = 0.02 \text{ m}^3 \\ & & 0.83 \text{ m}^3 \\ \hline \text{Ag. Fino} &= & 1 - 0.83 = 0.17 \text{ m}^3 \end{array}$$

La cantidad de agregado fino por m<sup>3</sup> será:

$$\text{Ag. Fino} = (1 - 0.83) \times 2.61 \times 1000 = 443.7 \text{ kg}$$

Las proporciones de mezcla en peso son:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cemento} &= & 650 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Ag. Fino} &= & 444 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Ag. Grueso} &= & 872 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Agua} &= & 202 \text{ kg/m}^3 \\ \hline \text{Total} &= & 2168 \text{ kg/m}^3 \end{array}$$

**Paso 8:** Este paso no fue considerado por los autores ya que no se ocupará adiciones como ceniza volante puesto que para el diseño de este hormigón nos propusimos obtener una mezcla sin ella.

**Paso 9:** A continuación se procede a realizar el ajuste por el contenido de agua de los agregados:

$$\begin{array}{rcl} \text{Contenido de Humedad del Ag. Grueso} &= & 0 \% \\ \text{Contenido de Humedad del Ag. Fino} &= & 3.7\% \end{array}$$

Se corrige el contenido de agregado considerando su humedad, para la mezcla con respecto solo al cemento por lo que tendremos:

$$\begin{array}{rcl} \text{Ag. Grueso corregido} &= & 872(1 + 0) = 872 \text{ kg} \\ \text{Ag. Fino corregido} &= & 444(1 + 0.037) = 460 \text{ kg} \end{array}$$

Procedemos a corregir el agua del mezclado tomando en cuenta la absorción de los agregados:

Agua de mezclado corregida

$$= 202 - 444(0.013-0.037) - 872(0-0.011) \\ = 224 \text{ kg}$$

Los valores corregidos serán:

Cemento=	650 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Fino=	460 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Grueso=	872 kg/m <sup>3</sup>
Agua=	224 kg/m <sup>3</sup>
Total=	2168 kg/m <sup>3</sup>

Dando una proporción en peso de:

Cemento :	Ag. Fino :	Agua
1 :	0.70 :	1.34

Para el uso del aditivo superplastificante se optó por seguir las indicaciones del fabricante, el cual especifica que se debe utilizar entre el 0.19% y el 0.9%, aunque se realizó ensayos y se determinó que la mejor relación que permitía una trabajabilidad aceptable era con 1.2% del peso del cemento por lo que los valores ocupados fueron los siguientes que se observan en la tabla 19:

**Tabla 19:** Uso del superplastificante

Aditivo: Viscocrete 4100	
Porcentaje	1.2%
Peso del cemento	650 kg
Peso del aditivo	7.8 kg

Nota: Fuente propia.

Entonces la dosificación final para la mezcla definitiva será:

Cemento=	650 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Fino=	460 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Grueso=	872 kg/m <sup>3</sup>
Agua=	224 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo=	7.8 kg/m <sup>3</sup>

Luego de haber realizado el proceso de diseño del hormigón se procedió a ocupar el volumen apropiado para los cilindros de ensayos los cuales permitieron cumplir con los ensayos correspondientes.

### 2.3.3 Ensayos a compresión simple

Se ocupan cilindros que cumplan la norma (ASTM C 39, 2016). Las probetas deben ensayarse lo más pronto posible luego de ser retirados de la piscina de curado sin que pierda su humedad. El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a una velocidad de 50 kgf/s hasta que ocurra la

falla de la probeta y la resistencia de la probeta se calcula dividiendo la carga para el área de la sección transversal de la probeta. El ensayo se ha realizado en el laboratorio ocupando neoprenos y ensayandolas a los 28 días de fraguado de las probetas, asegurando que el hormigón ha alcanzado su mayor resistencia.

Volumen del cilindro

Datos:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H$$

$$V = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 20$$

Altura: 20 cm

Diámetro: 10 cm

$$V = 1570.80 \text{ cm}^3$$

$$V = 0.00157 \text{ m}^3$$

Se procede a realizar 6 ejemplares para la determinación de la curva de resistencia del hormigón a los 7, 14 y 28 días. Dado este parámetro se procede a determinar el volumen que será necesario para cumplir esta cantidad de cilindros.

$$V = 0.00157 \cdot 6 = 0.00942 \text{ m}^3$$

Entonces los datos necesarios para la cantidad de volumen de los 6 cilindros será la siguiente como se ve en la tabla 20:

**Tabla 20.:** Volumen necesario para ensayos

Materiales	Dosificación 1m <sup>3</sup>	Dosificación 0.00942 m <sup>3</sup>
Cemento	650 kg/m <sup>3</sup>	6.123 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Fino	460 kg/m <sup>3</sup>	4.333 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Grueso	872 kg/m <sup>3</sup>	8.214 kg/m <sup>3</sup>
Agua	224 kg/m <sup>3</sup>	2.110 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo	7.8 kg/m <sup>3</sup>	0.073 kg/m <sup>3</sup>

Nota: Fuente propia.

La dosificación planteada no contempla desperdicios, por lo que se plantea un 20 % de ellos dando como resultado lo visto en la tabla 21:

**Tabla 21.:** Volumen necesario para ensayos considerando desperdicios.

Materiales	Dosificación 0.00942 m <sup>3</sup> + 20 % de desperdicio
Cemento	7.348 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Fino	5.200 kg/m <sup>3</sup>
Ag. Grueso	9.857 kg/m <sup>3</sup>
Agua	2.532 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo	0.088 kg/m <sup>3</sup>

Nota: Fuente propia.

### 2.3.4 Costo de producción

Se pretende saber el costo de producción del hormigón de alta resistencia por lo que se verificará a continuación:

**Tabla 22:** Costo de producción de 1m<sup>3</sup> de HAR con IVA

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Costo (\$)
Agua	m <sup>3</sup>	0.224	0.16	0.04
Cemento	saco	13	8.50	110.50
Grava	m <sup>3</sup>	0.872	20	17.44
Arena	m <sup>3</sup>	0.460	20	9.20
Aditivo	m <sup>3</sup>	0.0078	4.24	0.03
Total				<b>137.21 \$</b>

Nota: Fuente propia.

### 2.3.5 Resistencia final

Se procede a indicar los resultados que se han obtenido en este trabajo de titulación teniendo un ejemplo gráfico en las figuras 50 y 51 y los valores en la tabla 23.

**Tabla 23:** Resistencia final del H.A.R. planteado

Mezcla Definitiva						
Tiempo	Cilindro	Díámetro (cm)	Peso (kg)	Carga (kgf)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
7 Días	1	10.1	3.780	32489	405.51	419.44
	2	10.2	3.760	35412	433.37	
14 Días	3	10.1	3.785	44345	553.49	548.85
	4	10.2	3.769	44469	544.21	
28 Días	5	10.1	3.758	50976	636.25	642.36
	6	10.1	3.790	51953	648.44	

Nota: Fuente propia.

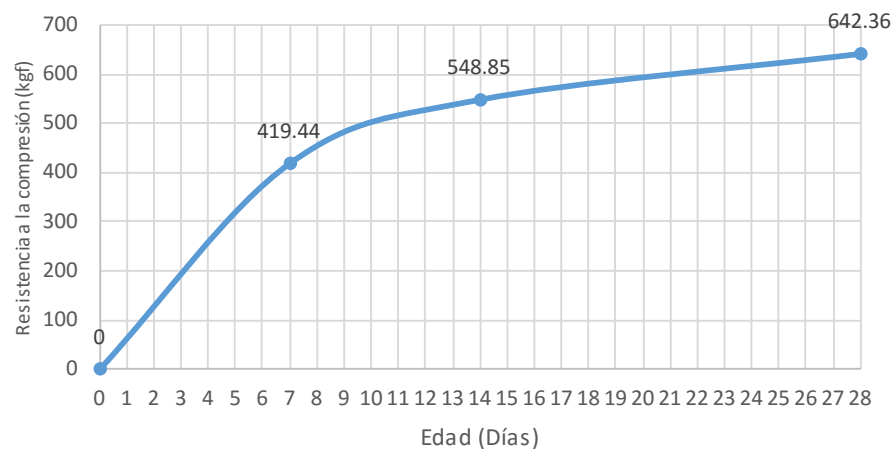
**Curva Tiempo Resistencia**

Figura 50. Curva tiempo-resistencia . Fuente propia.



Estos valores obtenidos hemos conseguido mediante el ensayo de cilindros el cual es el más ocupado a nivel mundial para realizar pruebas de resistencia mecánica a la compresión y procedimos a calcular estos valores con probetas elaboradas en moldes especiales de acero o hierro que tienen 10 cm de diámetro en su base y 20 cm de altura correspondiendo a una relación diámetro: altura 1:2.

Para la elaboración de los cilindros de hormigón primero se procede a limpiar las probetas y a colocar aceite para evitar que el hormigón se adhiera al metal, acto seguido se coloca el hormigón en tres capas iguales y se apisona 25 veces con una varilla lisa con uno de sus extremos redondeados procurando solo compactar la capa que se a vertido al interior del molde. Cuando se finaliza este proceso se continua dando ligeros golpes con un martillo de goma a las paredes del molde esto con el fin de eliminar todo tipo de burbujas de aire que se han introducido en la mezcla del hormigón y se enrasa la superficie para tener una horizontalidad en la capa superior del hormigón. (Sánchez de Guzmán, 2008 y NTE INEN 1763, 2010).

Luego de haber sido desencofradas y curadas las probetas se procede a realizar los ensayos de compresión a los determinados días a los que han sido previstas utilizando los equipos necesarios para este procedimiento. (Inecyc, 2009).



Figura 51. Probetas cilíndricas Ensayadas. Fuente propia.



## 2.4 Ensayo a tracción de varillas

El ensayo a tracción de las varillas se lo planteó como parte fundamental de este trabajo de titulación ya que para conocer la influencia de las varillas en la resistencia de elementos estructurales tipo viga se debe partir de un conocimiento amplio de las partes que al unirse conforman este cuerpo unitario que es la viga en sí. Este ensayo se utilizó para determinar el porcentaje de elongación total después de la rotura, el porcentaje de reducción de área y la resistencia máxima a tracción de varillas de refuerzo.

La normativa que se utilizó para este ensayo fue la NTE INEN 109:2009 Ensayo de Tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente, del (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2009). Esta norma específicamente establece que es solo para elementos metálicos, sin embargo fue utilizada como guía para el ensayo a tracción de varillas tanto de acero como de GFRP.

Se dio uso de esta norma debido a que la normativa para ensayos de tracción de varillas de FRP establecida por el (ASTM International, 2006) indica en la sección 7 de instrumental en el apartado 7.3 que es necesario un tipo de anclajes como se especifica en la figura 52, de forma tubular que estén ubicados en ambos extremos de la probeta de tal manera que eviten la sesgadura de las probetas bajo la parte media, al momento no se cuenta con

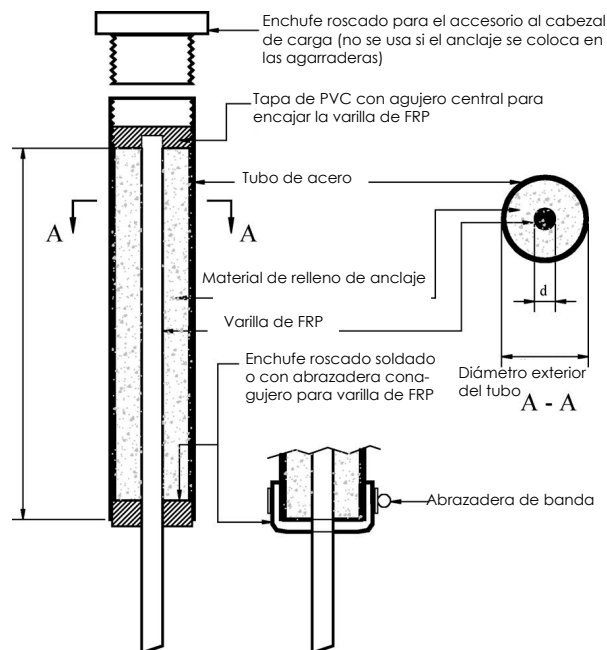


Figura 52: Anclaje para el ensayo de tracción en varillas de FRP (Tomada de ASTM International, 2006)



Figura 53: Varilla de GFRP colocada para el ensayo a tracción. Fuente Propia



Figura 54: Varillas ensayadas a tracción. Fuente propia

este tipo de anclajes, es por esto que sacando provecho a los medios que estaban a nuestro alcance se tomó la decisión de someter las varillas de acero y GFRP al ensayo antes mencionado del (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2009).

El ensayo empieza con la preparación de las probetas, fijando la longitud calibrada inicial que según nos indica para alambres, barras y secciones de diámetro o espesor inferior a 4 mm es de 200 mm. Aparte se suman 50 mm de distancia entre mordazas, lo que da un total de 250 mm entre mordazas. Se procede a marcar estos valores en cada probeta a ensayar además de tomar la medida del diámetro inicial antes del ensayo. Se coloca en la máquina de ensayo a tracción centrando la probeta en las mordazas y colocándolas en las marcas determinadas anteriormente.

Si la máquina cuenta con una computadora de registro digital nos brindará automáticamente la curva de esfuerzo-porcentaje de elongación, cuando la máquina no cuenta con este aditamento como fue nuestro caso se debe dibujar la curva manualmente punto por punto con la ayuda de un deformímetro. Una vez ensayadas las varillas se procede a encajar las dos secciones y a tomar una medida final con el fin de determinar el porcentaje de elongación, y una medida luego de la rotura del diámetro para determinar el porcentaje de reducción de su área.

Las fórmulas utilizadas establecidas por el (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2009) son:

$$At(\%) = (Lu - Lo / Lo) * 100$$

At: Porcentaje de elongación después de la rotura (%)

Lu: Longitud calibrada final (mm)

Lo: Longitud calibrada inicial (mm)

$$Z(\%) = (So - Su / So) * 100$$

Z: Porcentaje de reducción de área (%)

So: Área de la sección transversal inicial de la longitud paralela (mm<sup>2</sup>)

Su: Área mínima de la sección transversal después de la rotura (mm<sup>2</sup>)

El planteamiento de este ensayo fue realizarlo con 3 probetas de cada tipo de varilla de tal manera que se pueda realizar un promedio de los resultados obtenidos y llegar a un valor más exacto de la resistencia a la tracción de todos los tipos de varillas. En la figura 54 se puede apreciar todas las varillas ensayadas, tanto de GFRP como de acero. Las varillas ensayadas fueron las mismas que se implementaron en las vigas con el fin de poder determinar la influencia de la resistencia a tracción de cada varilla en la capacidad resistente de las vigas.

**Tabla 24:** Resultados de ensayo a tracción varilla de acero  $\phi$  10mm

**Varilla de Acero Corrugado Novacero  $\Phi$  10 mm**

Probeta N°	Porcentaje de elongación después de la rotura (At)	Porcentaje de reducción de área (Z)	Carga Máxima (Kgf)	Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio de Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
#1	28,83%	19,00%	4912	6254,14	<b>6398,01</b>
#2	33,78%	22,56%	5085	6474,41	
#3	30,73%	20,79%	5078	6465,50	

Nota: Fuente Propia



Figura 57: Varilla de acero de  $\phi$  10 mm luego de la rotura. Fuente propia

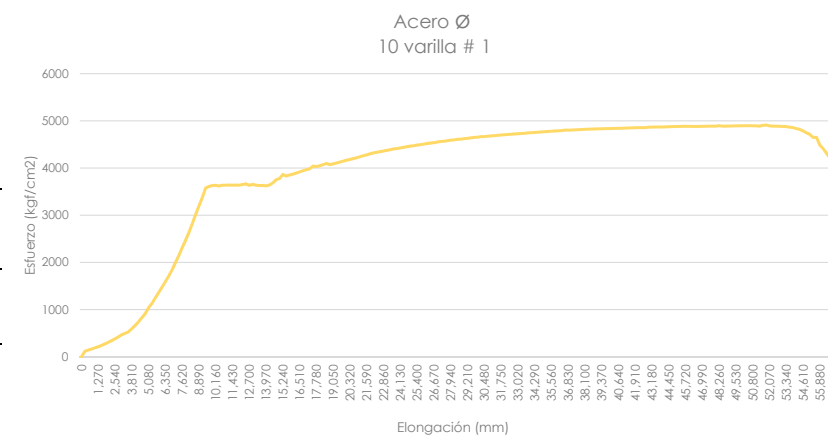


Figura 55: Diagrama esfuerzo - elongación acero  $\phi$  10mm #1. Fuente Propia

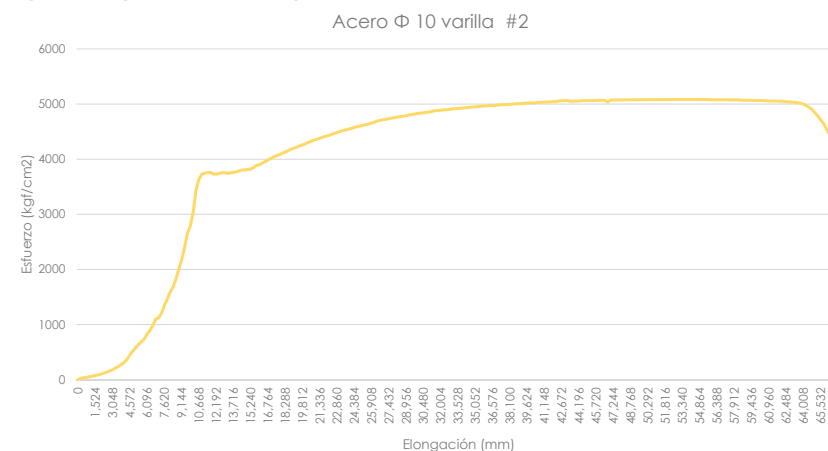


Figura 56: Diagrama esfuerzo - elongación acero  $\phi$  10mm #2. Fuente Propia

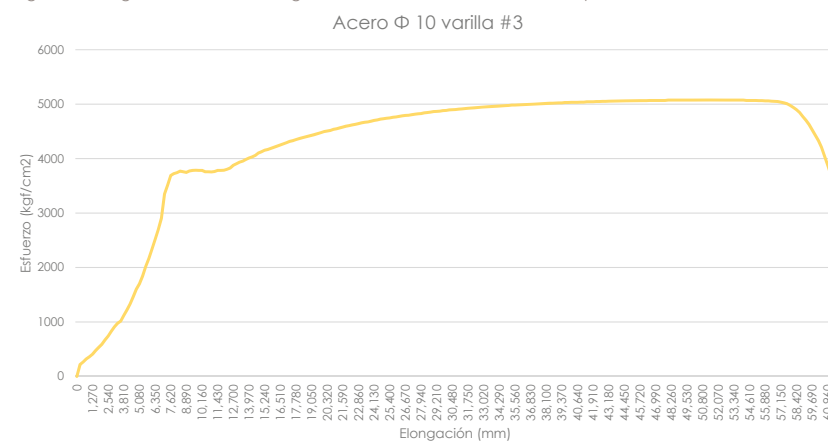


Figura 58: Diagrama esfuerzo - elongación acero  $\phi$  10mm #3. Fuente Propia

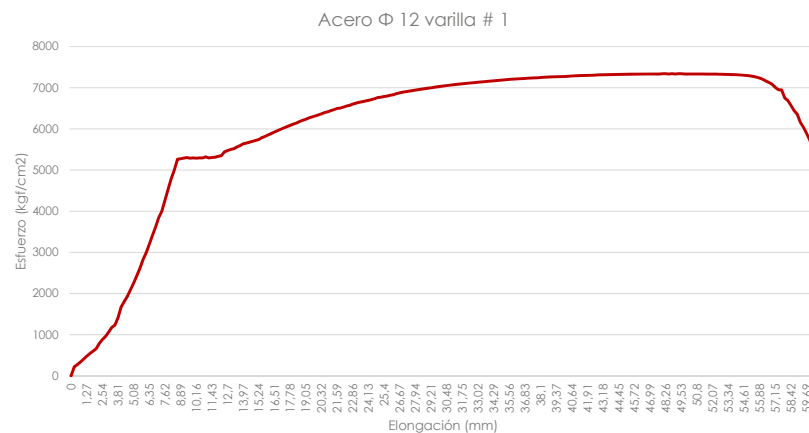


Figura 59: Diagrama esfuerzo - elongación acero  $\Phi$  12 mm #1. Fuente Propia

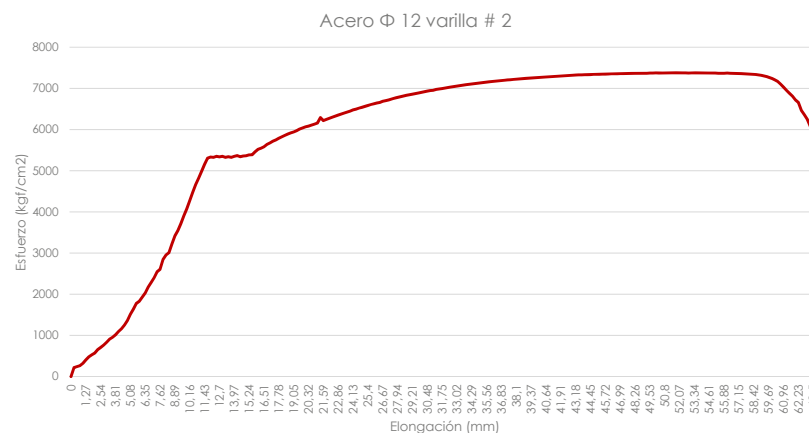


Figura 60: Diagrama esfuerzo - elongación acero  $\Phi$  12 mm #2. Fuente Propia

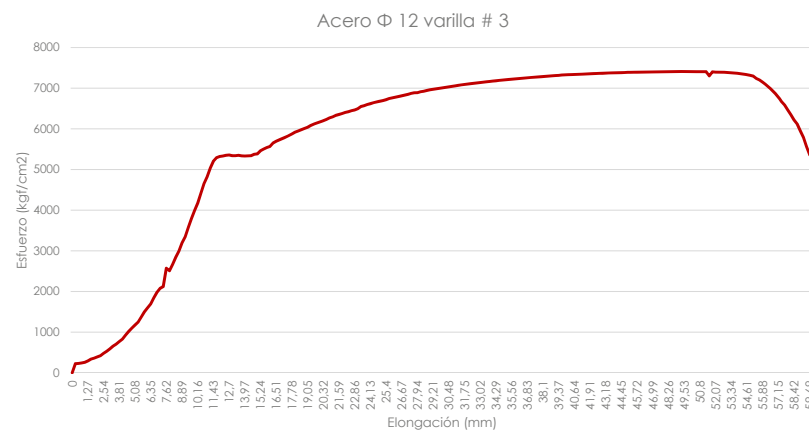


Figura 62: Diagrama esfuerzo - elongación acero  $\Phi$  12 mm #3. Fuente Propia

**Tabla 25:** Resultados de ensayo a tracción varilla de acero  $\Phi$  12 mm

**Varilla de Acero Corrugado Novacero  $\Phi$  12 mm**

Probeta N°	Porcentaje de elongación después de la rotura (At)	Porcentaje de reducción de área (Z)	Carga Máxima (Kgf)	Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio de Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
#1	30,23%	19,00%	7342	6491,74	<b>6522,68</b>
#2	32,00%	15,97%	7379	6524,45	
#3	30,73%	19,00%	7410	6551,86	

Nota: Fuente Propia



Figura 61: Varilla de acero de  $\Phi$  12 mm luego de la rotura. Fuente propia



**Tabla 26:** Resultados de ensayo a tracción varilla Aslan 100  $\varnothing$  10mm

**Varilla de GFRP Aslan 100 series FIBERGLASS REBAR  $\Phi$  10 mm**

Probeta N°	Porcentaje de elongación después de la rotura (At)	Porcentaje de reducción de área (Z)	Carga Máxima (Kgf)	Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio de Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
#1	19,56%	16,03%	3800	3998,59	<b>4116,80</b>
#2	16,00%	14,02%	4273	4496,31	
#3	15,24%	10,61%	3664	3855,49	

Nota: Fuente Propia



Figura 65: Varilla Aslan 100 de  $\varnothing$  10 mm luego de la rotura. Fuente propia

GFRP Aslan 100 #1

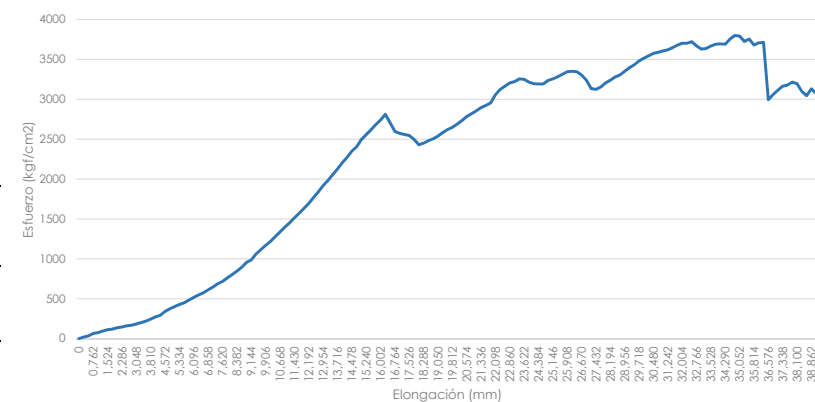


Figura 63: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Aslan 100  $\varnothing$  10mm #1. Fuente Propia

GFRP Aslan 100#2

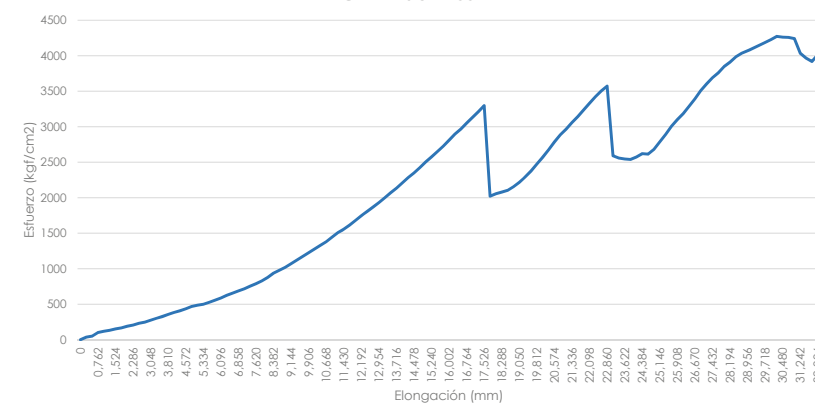


Figura 64: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Aslan 100  $\varnothing$  10mm #2. Fuente Propia

GFRP Aslan 100 #3

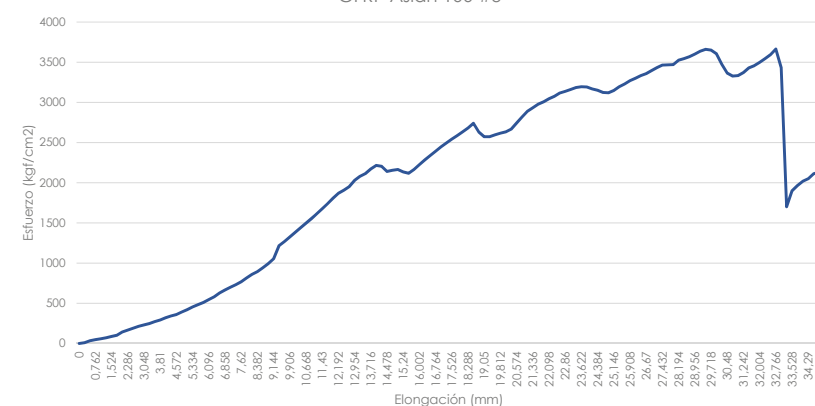


Figura 66: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Aslan 100  $\varnothing$  10mm #3. Fuente Propia

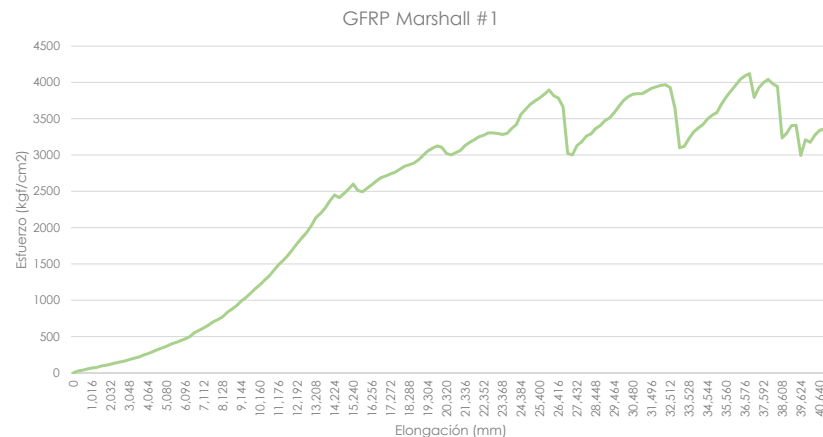


Figura 67: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Marshall C-Bar  $\varnothing$  10mm #1. Fuente Propia

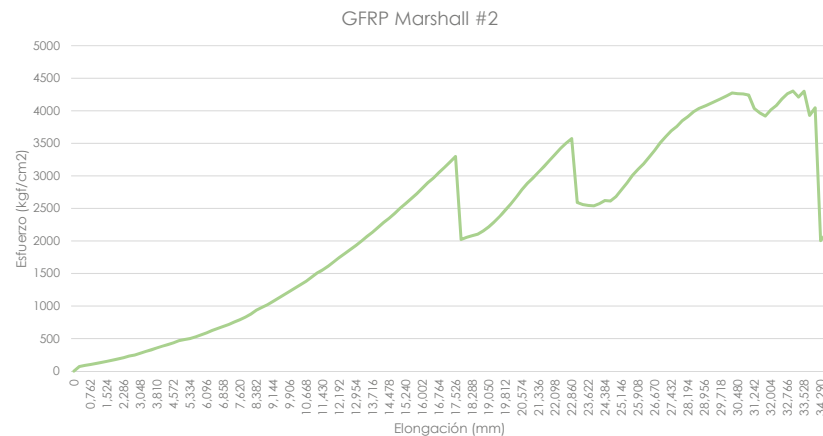


Figura 68: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Marshall C-Bar  $\varnothing$  10mm #2. Fuente Propia

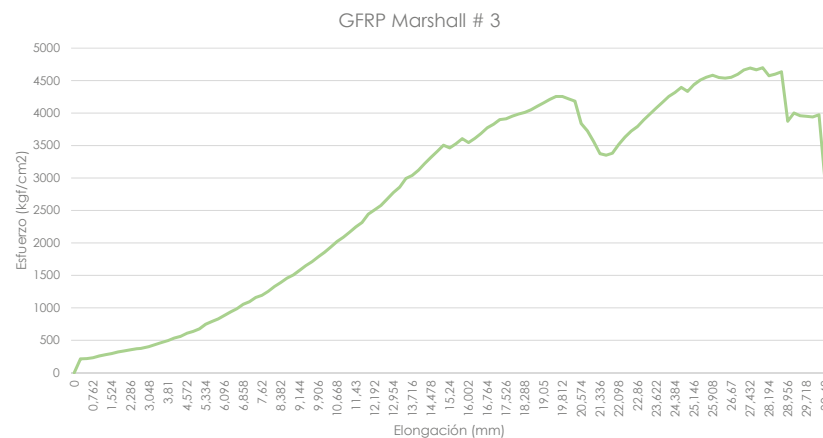


Figura70: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Marshall C-Bar  $\varnothing$  10mm #3. Fuente Propia

**Tabla 27:** Resultados de ensayo a tracción varilla Marshall C-Bar  $\varnothing$  10mm

**Varilla de GFRP Marshall Composite Technologies C-Bar  $\Phi$  10 mm**

Probeta N°	Porcentaje de elongación después de la rotura (At)	Porcentaje de reducción de área (Z)	Carga Máxima (Kgf)	Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio de Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
#1	20,57%	-18,81%	4120	5245,73	<b>5513,96</b>
#2	17,27%	-21,00%	4273	5440,54	
#3	15,24%	18,28%	4599	5855,61	

Nota: Fuente Propia



Figura 69: Varilla Marshall C-Bar  $\varnothing$  10mm luego de la rotura. Fuente propia

**Tabla 28:** Resultados de ensayo a tracción varilla ComBar  $\varnothing$  9 mm

**Varilla de GFRP Fiberline ComBar  $\Phi$  9 mm**

Probeta N°	Porcentaje de elongación después de la rotura (At)	Porcentaje de reducción de área (Z)	Carga Máxima (Kgf)	Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio de Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
#1	16,00%	-13,78%	3481	5471,77	<b>5358,07</b>
#2	16,76%	-4,49%	3161	4968,77	
#3	18,29%	-49,38%	3584	5633,68	

Nota: Fuente Propia



Figura 73: Varilla ComBar de  $\varnothing$  9 mm luego de la rotura. Fuente propia

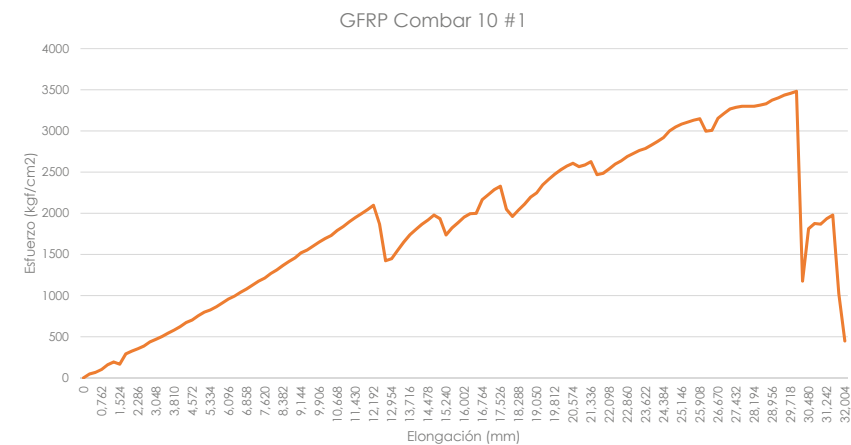


Figura 71: Diagrama esfuerzo - elongación varilla ComBar  $\varnothing$  9 mm #1. Fuente Propia

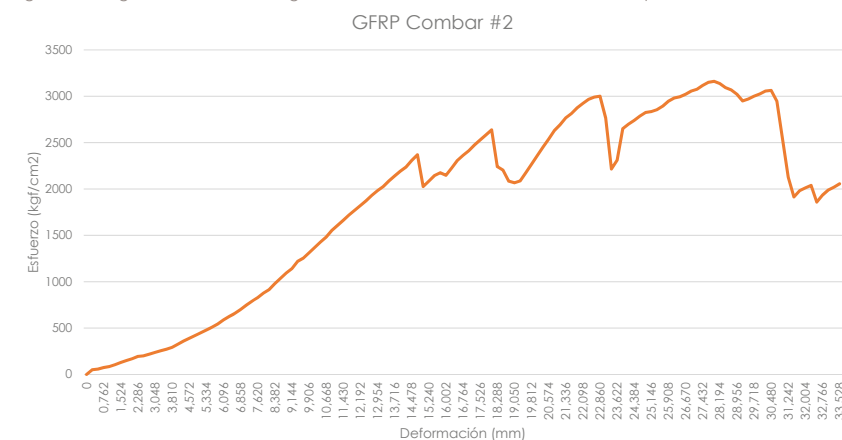


Figura 72: Diagrama esfuerzo - elongación varilla ComBar  $\varnothing$  9 mm #2. Fuente Propia

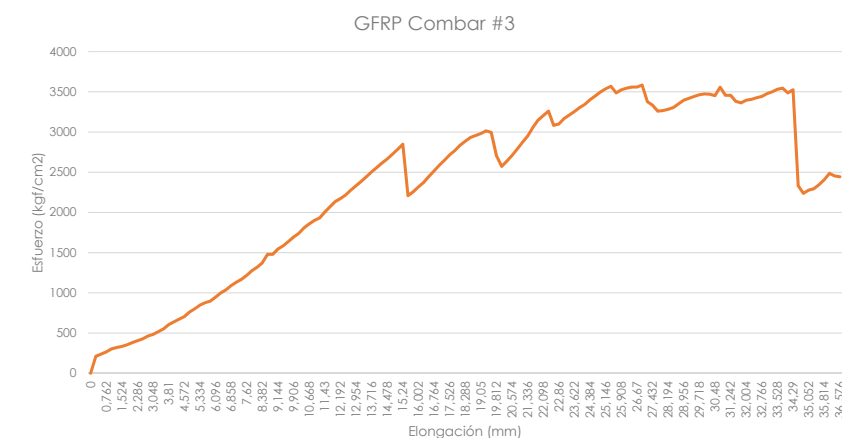


Figura 74: Diagrama esfuerzo - elongación varilla ComBar  $\varnothing$  9 mm #3. Fuente Propia

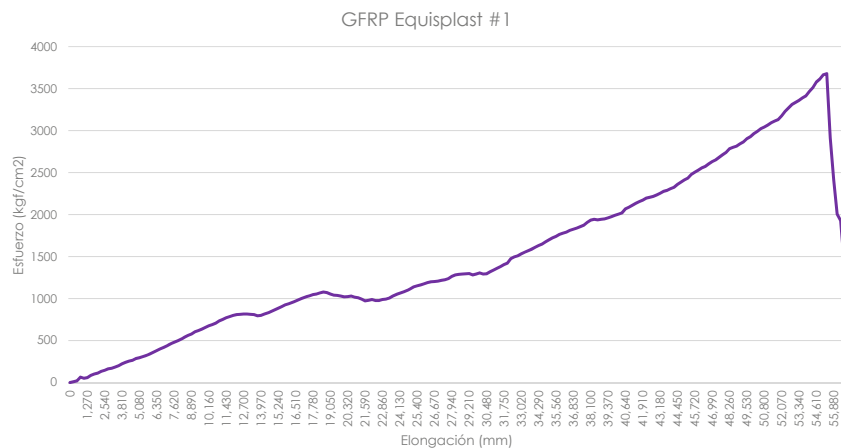


Figura 75: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Equisplast  $\varnothing$  12 mm #1. Fuente Propia

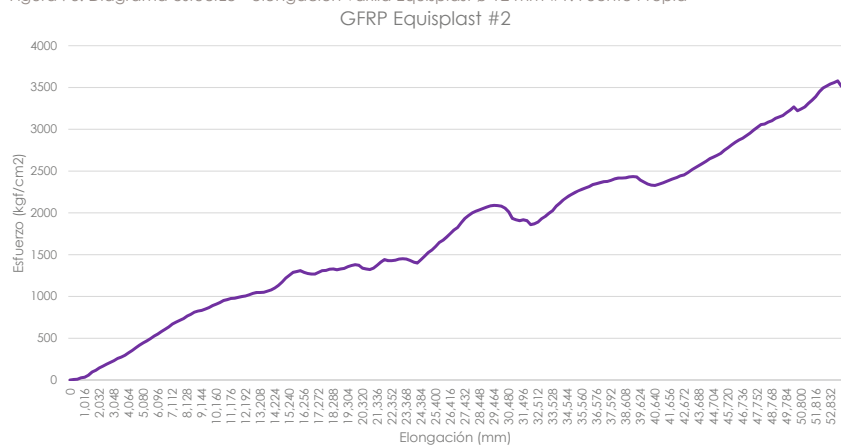


Figura 76: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Equisplast  $\varnothing$  12 mm #2. Fuente Propia

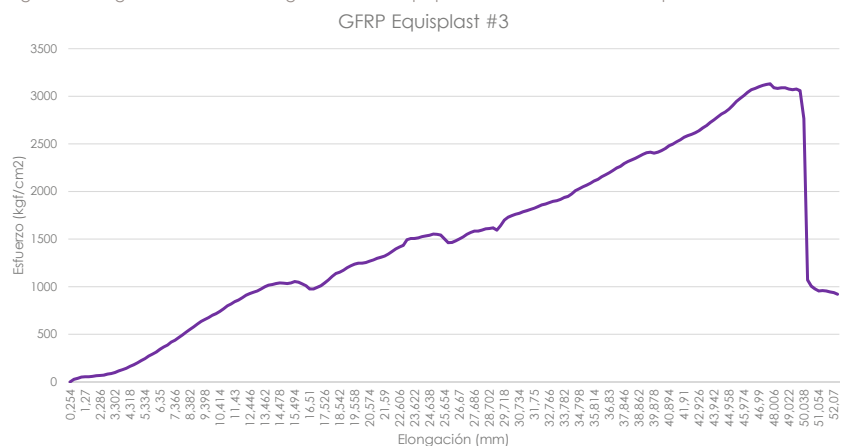


Figura 78: Diagrama esfuerzo - elongación varilla Equisplast  $\varnothing$  12 mm #3. Fuente Propia

**Tabla 29:** Resultados de ensayo a tracción varilla Equisplast  $\varnothing$  12 mm

**Varilla de GFRP Varilla EQUISPLAST  $\varnothing$  12 mm**

Probeta N°	Porcentaje de elongación después de la rotura (At)	Porcentaje de reducción de área (Z)	Carga Máxima (Kgf)	Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )	Promedio de Resistencia a la Tracción (kgf/cm <sup>2</sup> )
#1	27,69%	-35,56%	3678	2389,27	<b>2249,38</b>
#2	26,80%	-11,76%	3579	2324,96	
#3	26,04%	-4,33%	3131	2033,93	

Nota: Fuente Propia



Figura 77: Varilla Equisplast de  $\varnothing$  12 mm luego de la rotura. Fuente propia





Figura 79: Varilla Equisplast luego del ensayo a tracción. Fuente propia

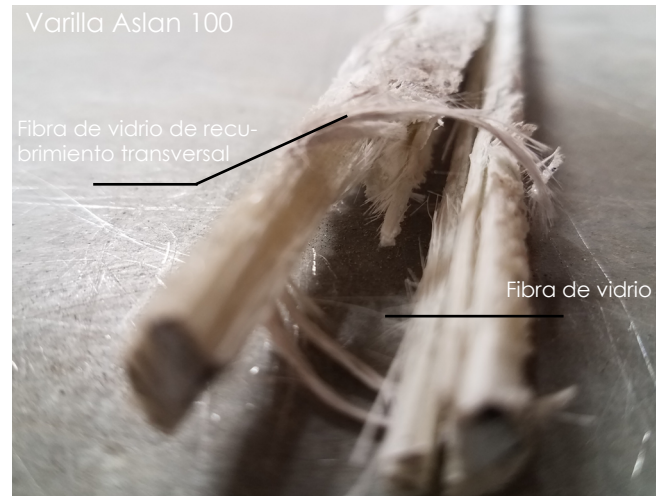


Figura 80: Extremo de la varilla Aslan 100 luego del ensayo a tracción. Fuente propia



Figura 81: Varilla de acero luego del ensayo a tracción. Fuente propia



Figura 82: Varilla Marshall luego del ensayo a tracción. Fuente propia

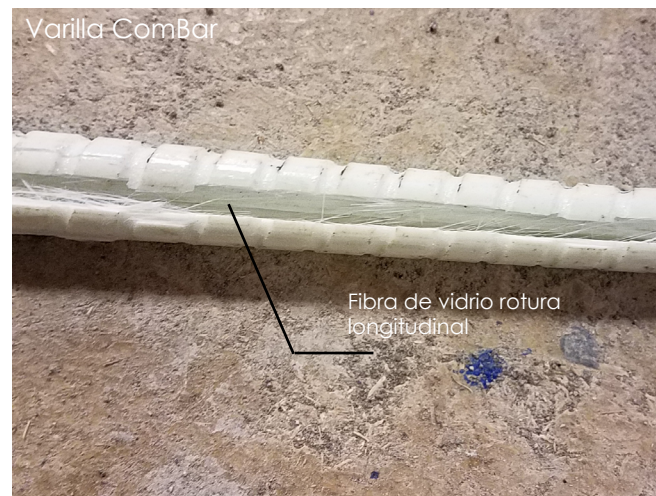


Figura 83: Varilla ComBar luego del ensayo a tracción. Fuente propia

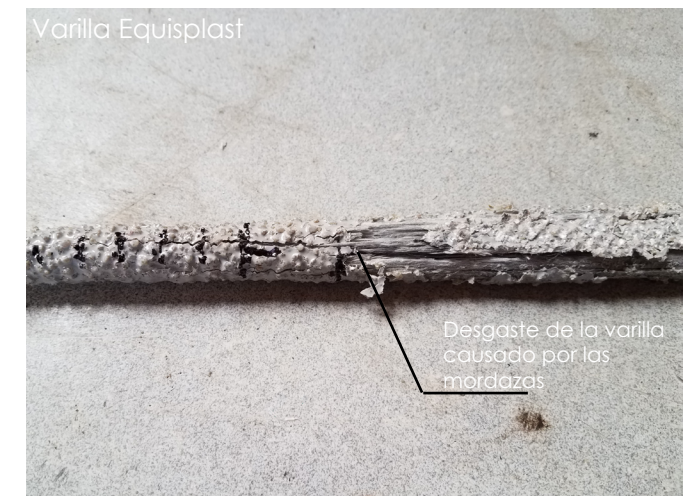


Figura 84: Varilla Equisplast luego del ensayo a tracción. Fuente propia





Figura 85: Aplastamiento de los extremos de la varilla Equisplast. Fuente propia



Figura 86: Aplastamiento de los extremos de la varilla Marshall. Fuente propia

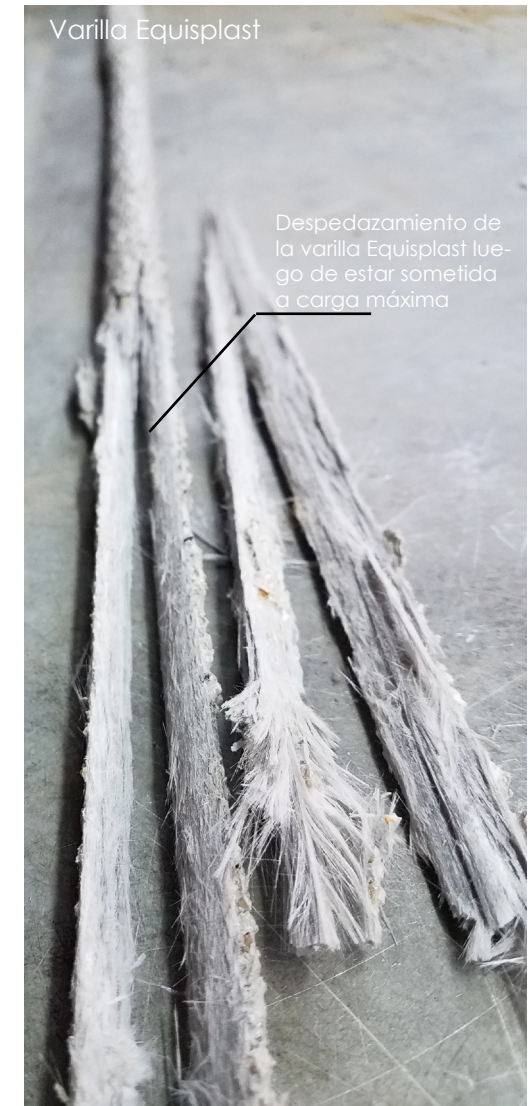


Figura 87: Rotura de el extremo de la varilla Equisplast una vez retirada de la máquina. Fuente propia

Una vez realizado en ensayo se pudo apreciar que se produjo un aplastamiento en la parte de las mordazas que fijaban las varillas de GFRP, esto ocasionó que no se logre determinar la resistencia a la tracción real de las varillas ya que al producirse fisuraciones en la varilla disminuía radicalmente la resistencia a la tracción y continuaba subiendo y bajando con cada fisura que se continuaba produciendo como se puede apreciar en los gráficos de esfuerzo-deformación de las varillas de GFRP.

Debido a este comportamiento no se pudo concluir con un valor exacto de resistencia de las varillas de GFRP, sin embargo se logró determinar un valor acertado para las varillas de acero utilizadas en las vigas.

Concluido este ensayo podemos resumir que los resultados de la resistencia de las varillas de acero a tracción dieron valores mucho mas elevados que las de GFRP debido a que no sufrieron aplastamiento en sus extremos por las mordazas y se llevo a cabo el ensayo con toda normalidad. En cuanto a las varillas de GFRP analizando su resistencia máxima la que presento el valor mas alto fue la Varilla de GFRP Marshall Composite Technologies C-Bar de  $\Phi$  10 mm con un valor de 5513,96 kgf/cm<sup>2</sup> la siguiente fue la varilla de GFRP Fiberline ComBAR de  $\Phi$  9 mm con 5358,07 kgf/cm<sup>2</sup>, cabe mencionar que esta varilla es 1mm menor en su diámetro que el resto de varillas de GFRP ensayadas.

Le sigue la "Varilla de GFRP Aslan 100 series FIBER-GLASS REBAR  $\Phi$  10 mm con 4116,80 kgf/cm<sup>2</sup>. Por último la de menor resistencia fue la varilla de GFRP EQUISPLAST de  $\Phi$  12 mm con 2249,38 kgf/cm<sup>2</sup>, esta varilla es la que podemos conseguir comercialmente en nuestro medio, ademas es la varilla de GFRP con mayor diámetro de todas las ensayadas.

En cuanto al porcentaje de elongación después de la rotura, las varillas de acero presentaron una elongación mucho mayor que las de GFRP y en cuanto al porcentaje de reducción de área podemos apreciar que si existe cierta reducción de área en el acero mientras que en las varillas de GFRP este valor es negativo debido a que una vez ensayadas estas varillas de produjeron grietas en el eje longitudinal dando como resultado un aumento del diámetro de la varilla.

Como se puede ver en los gráficos de esfuerzo deformación, el acero presenta características diferentes a las varillas de GFRP y es que una vez alcanzada su resistencia máxima disminuye la capacidad resistente hasta producirse una rotura violenta del material. Mientras que en las varillas de GFRP su rotura es progresiva empezando por fisuras longitudinales que van destruyendo el material lentamente según aumenta la carga. En ese ensayo y bajo las condiciones expuestas anteriormente en ningún caso se produjo una rotura transversal de las varillas de GFRP.

## 2.5 Conclusiones.

- Al conocer cada uno de los materiales se puede estar seguro de la trabajabilidad que al unir las partes en un todo, serán beneficiosas para alcanzar las metas previstas desde un inicio.
- El diseño del HAR conlleva seguir un procedimiento que siempre debe ser guiado en las normas de seguridad y manipulación de los elementos en un estado puro para lograr resultados esperados , ya que si se trabaja con suciedad e impurezas será complicado cumplir esa resistencia deseada.
- El hormigón tiende a mejorar sus resistencia con relaciones de agua cemento bajas pero si se aumenta agua a la dosificación inicial tiende a disminuir su resistencia y varia la relación citada lo que conlleva a menores resistencias que no son necesarias para abordar este tema de titulación.
- La resistencia a tracción de las varillas de acero dio resultados mas altos que la resistencia de las varillas de GFRP debido a un aplastamiento en los extremos de la varilla ya que no se cuenta con los aditamentos necesarios para realizar el ensayo dispuesto por la ASTM para varillas de FRP.