

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE ARQUITECTO/A

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DEL ADOBE EN EL CANTÓN CUENCA

AUTORES: EDDY DANIEL AGUILAR-ALBERCA - ROSA ANGELICA QUEZADA ZAMBRANO
C.I. 1104033897 C.I. 0940601834

DIRECTOR: ING. HERNÁN ALFREDO GARCÍA ERAZO
C.I. 0102116654

CUENCA - ECUADOR

2017



ABSTRACT

The raw earth is one of the oldest and most widely used construction materials worldwide, it has been popular for its easy production, workability, also for its important thermal properties, fire retardant, moisture balance inside the building, as well as being economic and reusable.

Despite benefits of raw earth as construction material, it became obsolete by the appearance of new building materials (steel, concrete, etc.) more polluting and energy-demanding, but which, unlike land it can have a better seismic behavior. That is why it is important to study the behavior and physical and mechanical characteristics of adobe, one of the most widespread raw-earth construction techniques in our region.

The study has physical tests (granulometry, liquid limit, plastic limit, index of plasticity and content of organic matter) and mechanical (compression, flexion and indirect traction). Important information for structural design of new buildings, conservation of existing buildings and to determine the vulnerability of this type of construction to seismic forces. Providing a tool in the structural field, allowing the designer to have data for basic calculations or software modeling and analysis of structures by means of finite elements, especially in nonlinear calculations, and thus better approximate the behavior of buildings.

Keywords: adobe, heritage buildings, physical characterization, mechanical characterization, numerical model.

RESUMEN

La tierra cruda es uno de los materiales de construcción más antiguos y de uso más difundido a nivel mundial, ha sido popular por su fácil obtención, trabajabilidad, también por sus importantes propiedades térmicas, ignífugas, balance de humedad en el interior de la edificación, además de ser económica y reutilizable.

A pesar de las bondades de la tierra cruda como material de construcción, entró en desuso por la aparición de nuevos materiales de construcción (acero, concreto, etc.) más contaminantes y demandantes de energía, pero que a diferencia de la tierra pueden tener un mejor comportamiento sísmico. He ahí la importancia de estudiar la caracterización físicas y mecánicas del adobe, una de las técnicas constructivas en tierra cruda más difundidas en nuestra región.

El estudio cuenta con ensayos técnicos de carácter físico (granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contenido de materia orgánica) y mecánico (compresión, flexión y tracción indirecta), importante información para el diseño estructural de nuevas edificaciones, conservación de edificios existentes y para determinar la vulnerabilidad de este tipo de construcción ante fuerzas sísmicas. Brindando una herramienta en el campo estructural, permitiendo al diseñador tener datos para cálculos básicos o modelamiento con software y análisis de estructuras por medio de elementos finitos, especialmente en cálculos no lineales, y así aproximar mejor el comportamiento de las edificaciones.

Palabras clave: adobe, edificaciones patrimoniales, caracterización física, caracterización mecánica, modelo numérico.



Introducción
Objetivos

CAPÍTULO 1. Relevancia del estudio del adobe

Introducción

1.1. Antecedentes y justificación

1.1.1. Construcciones con adobe en el contexto internacional	7
1.1.2. Construcción con adobes en Cuenca	12

CAPÍTULO 2. Marco teórico

Introducción

2.1. El adobe como material de construcción

2.1.1. Composición del adobe	19
2.1.1.1. Tierra	19
2.1.1.2. Agua	21
2.1.1.3. Fibras naturales	22
2.1.2. Fabricación de adobes	23
2.1.2.1. Mezclado	23
2.1.2.2. Moldeado de adobes	23
2.1.2.3. Secado y almacenamiento	24
2.1.3. Técnica constructiva para la conformación de muros de adobe	24
2.1.4. Vulnerabilidad sísmica del adobe	26
2.1.5. Sismicidad del Ecuador	27

2.2. Principales modelos utilizados en el análisis numérico de mamposterías como el adobe

2.2.1. Métodos para el cálculo de la mampostería	28
2.2.1.1. Micro-modelos	28
2.2.1.2. Macro-modelos	29

CAPÍTULO 3.

Obtención de las propiedades físicas y mecánicas del adobe

Introducción

3.1. Selección del área de estudio

3.1.1. Fábricas de adobes (adoberas)	33
3.1.1.1. Fabricación de adobes en las adoberas seleccionadas	34
3.1.2. Edificaciones patrimoniales	38
3.1.2.1. Extracción de adobes de la edificación 2	39

3.2. Selección de normativas de construcción con adobe

3.3. Caracterización física del adobe

3.3.1. Clasificación del suelo	41
--------------------------------------	----

3.4. Caracterización mecánica del adobe

3.4.1. Módulo de elasticidad	48
3.4.2. Resistencia a la compresión	49
3.4.2.1. Resistencia a la compresión del adobe	49
3.4.2.2. Resistencia a la compresión del mortero	52
3.4.2.3. Resistencia a la compresión del murete de adobe	54
3.4.3. Resistencia a tracción indirecta	57
3.4.3.1. Tipologías de falla	57
3.4.3.2. Resistencia a tracción indirecta del murete	57
3.4.4. Resistencia a flexión del adobe	60
3.4.5. Comparación de resistencias según distintas normativas	61

CAPÍTULO 4. Aplicación de resultados

4.1. Distribución de probabilidad aproximada	68
4.2. Aplicación del modelo de análisis numérico	72

CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones

¿Que relación existe entre las propiedades físicas y mecánicas del adobe y propiedades mecánicas del murete de adobe?	79
¿Que relación existe entre el módulo elástico del adobe y su capacidad a compresión?	82
¿Que relación existe entre el módulo elástico del adobe y el modulo elástico del murete del adobe?	82
¿Entre que valores se encuentra el módulo elástico del murete característico del cantón Cuenca y que dispersión de datos se puede esperar?	83
¿Que relación existe entre los valores obtenidos del módulo elástico en las pruebas de laboratorio sobre muretes y el propuesto en normativas?	84
¿En qué grado el modelo numérico se aproxima al modelo ensayado?	85
¿Como se puede utilizar los resultados obtenidos de los ensayos para modelar edificaciones existentes?	86

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Anexo 1: Entrevista para fabricantes de adobe	96
Anexo 2: Ensayos y especificaciones técnicas del equipo e instrumentos utilizados	100
Anexo 3: Resultados de ensayos físicos y mecánicos de la adobera 1	124
Anexo 4: Resultados de ensayos físicos y mecánicos de la adobera 2	178
Anexo 5: Resultados de ensayos físicos y mecánicos de la adobera 3	216
Anexo 6: Resultados de ensayos físicos y mecánicos de la edificación 1	270
Anexo 7: Resultados de ensayos físicos y mecánicos de la edificación 2	298

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Complejo al sur de Gonur.....	7
Imagen 2. Bóveda del Templo mortuario de Ramses II.....	7
Imagen 3. Torre de la mezquita de Al-Mudar Tarim, Yemen.	7
Imagen 4. Ciudad de tierra Shibam, Yenem, "La Manhattan del desierto".....	8
Imagen 5. La ciudad de Chan Chan fabricada a base de adobe	8
Imagen 6. Ciudad Sagrada de Caral.....	9
Imagen 7. Modelo de una vivienda Inca levantada en Pumapungo, Cuenca	12
Imagen 8. Casa de las posadas.....	12
Imagen 9. La Casa Azul	12
Imagen 10. Hostal de la Colonia	12
Imagen 11. Pasaje Mata.....	12
Imagen 12. Casa Tarqui	12
Imagen 13. Edificación patrimonial rural de la parroquia Baños (Inventario 1988)	13
Imagen 14. Remanente de edificación de la parroquia rural Baños, Cuenca (actualización inventario, 2014)	13
Imagen 15. Adobe	19
Imagen 16. Capas del suelo.....	19
Imagen 17. Composición granulométrica de la tierra.....	19
Imagen 18. Esquema de un cristal de arcilla coloidal, con su estructura laminar, cargas negativas y cationes absorbidos.....	20
Imagen 19. Método visual para verificar la presencia de arcilla.....	20
Imagen 20. Método visual para verificar la presencia de arcilla a través del brillo.....	20
Imagen 21. Expansión y retracción causada por el agua.....	21
Imagen 22. Dosificación de agua para la fabricación de adobes	21
Imagen 23. Propiedades de las fibras naturales.....	22
Imagen 24. Zarandeo de la tierra.....	22
Imagen 25. Mezclado para la fabricación de adobes.....	23
Imagen 26. Moldeado del adobe.....	23
Imagen 27. Dimensiones del adobe.....	23
Imagen 28. Secado del adobe.....	23
Imagen 29. Edificación sismo-resistente.....	24
Imagen 30. Cimiento y sobrecimiento.....	25
Imagen 31. Tipos de traba de adobe.....	25
Imagen 32. Terremoto de Ecuador y Colombia del año 1906	26
Imagen 33. Micro-modelo detallado	29
Imagen 34. Micro-modelo simplificado	29
Imagen 35. Macro-modelo.....	29
Imagen 36. Muestreo de bola de nieve.....	33
Imagen 37. Método de bola de nieve, para identificar los productores de adobe.....	33
Imagen 38. Torsión y fisuras en el adobe.....	35
Imagen 39. Fábricas de adobe 1.....	35
Imagen 40. Fábricas de adobe 2.....	35
Imagen 41. Fábricas de adobe 3.....	35
Imagen 42. Edificación 1	38
Imagen 43. Edificación 2.....	38
Imagen 44. Extracción de adobes edificación 2.....	38
Imagen 45. Casos de estudio.....	39
Imagen 46. Ensayo de granulometría de adoberas y edificaciones patrimoniales.....	41
Imagen 47. Ensayo para determinar el límite líquido (casa grande) de adoberas y edificaciones patrimoniales.....	41
Imagen 48. Ensayo para determinar el límite de plasticidad de adoberas y edificaciones patrimoniales.....	41
Imagen 49. Ensayos para determinar las características mecánicas.....	47
Imagen 50. Cubos de adobe ensayados a compresión.....	49
Imagen 51. Cubos de mortero ensayados a compresión.....	52
Imagen 52. Muretes previos al ensayo a compresión.....	54
Imagen 53. Fisura previa al ensayo.....	54
Imagen 54. Fisuras en muretes a compresión.....	54
Imagen 55. Fisuras en muretes ensayados a compresión.....	55

Imagen 56. Muretes ensayados a compresión de la adobera 1.....	55
Imagen 57. Muretes ensayados a compresión de la adobera 2.....	55
Imagen 58. Muretes ensayados a compresión de la adobera 3.....	55
Imagen 59. Modos de falla en muretes ensayados a tracción indirecta.....	57
Imagen 60. Muretes previos al ensayo de tracción indirecta	57
Imagen 61. Agregado grueso en fisura nueva.....	57
Imagen 62. Muretes ensayados a tracción indirecta de la adobera 1	57
Imagen 63. Muretes ensayados a tracción indirecta de la adobera 2.....	58
Imagen 64. Muretes ensayados a tracción indirecta de la adobera 3	58
Imagen 65. Lugar de fisura de los adobes ensayados a flexión	60
Imagen 66. Presencia de paja en los adobes ensayados a flexión.....	60
Imagen 67. Fibras naturales presentes en la edificación 1 y 2	79
Imagen 68. Fibras naturales presentes en la adobera 1, 2 y 3.....	81
Imagen 69. Material disgregado.....	103
Imagen 70. Cuarteo de la muestra.....	103
Imagen 71. Lavado de muestra en el tamiz #200	105
Imagen 72. Colocación de tamices en orden ascendente.....	105
Imagen 73. Colocación de tamices en la tamizadora.....	105
Imagen 74. Peso de tamiz mas la muestra retenida	105
Imagen 75. Granulometría adobera 1	105
Imagen 76. Granulometría adoberas y edificaciones patrimoniales.....	106
Imagen 77. Cuchara de casa grande	107
Imagen 78. Muestra que pasa el tamiz #40	108
Imagen 79. Muestra cortada.....	108
Imagen 80. Muestra en la ranura	108
Imagen 81. Muestras secas	108
Imagen 82. Elaboración de los rollos de tierra	109
Imagen 83. Comprobando que el rollo se desmorona a los 3.2mm.....	109
Imagen 84. Rollo de tierra desmoronado	109
Imagen 85. Muestra pesada.....	109
Imagen 86. Especímenes de adobe.....	110
Imagen 87. Peso de cubos.....	111
Imagen 88. Axonometría de esquema de ensayo a compresión en cubo de adobe.....	111
Imagen 89. Esquema de ensayo a compresión en cubo de adobe	111
Imagen 90. Preparación de los moldes.....	112
Imagen 91. Orden de apisonado al moldear los especímenes de ensayo.....	112
Imagen 92. Mortero de barro adobera 1.....	112
Imagen 93. Desmolde de los cubos de mortero de barro	112
Imagen 94. Resistencia última	112
Imagen 95. Murete para ensayar a compresión.....	113
Imagen 96. Esquema ensayo resistencia del murete a la compresión	113
Imagen 97. Determinación del peso de los muretes	113
Imagen 98. Aplicación de la carga a compresión	113
Imagen 99. Esquema de ensayo a tracción indirecta.....	114
Imagen 100. Murete para ensayo a tracción indirecta de la adobera	114
Imagen 101. Colocación del murete en la prensa mecánica.....	115
Imagen 102. Murete ensayado a tracción indirecta.....	115
Imagen 103. Adobe, ensayo a flexión	116
Imagen 104. Esquema ensayo a flexión (Posición inicial)	116
Imagen 105. Verificación de la irregularidad del adobe.....	116
Imagen 106. Colocación de masilla en puntos de contacto	116
Imagen 107. Ubicación del deformímetro durante el ensayo a Flexión	117
Imagen 108. Apoyos en los tercios nivelado con masilla en el adobe	117
Imagen 109. Acabado final de la superficie de la masilla, mediante lijado.....	117
Imagen 110. Adobes fracasados	117
Imagen 111. Fisura provocada por las cargas en los tercios.....	117

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Tipos de construcción con tierra en el mundo	9
Gráfico 2. Tipos de construcción con tierra en América Latina y el Caribe	9
Gráfico 3. Sistema constructivo de las edificaciones de mampostería no reforzada en el centro histórico de Cuenca ..	26
Gráfico 4. Vulnerabilidad de las Edificaciones de Mampostería No Reforzada en Cuenca, Ecuador	27
Gráfico 5. Daño en las Edificaciones de Mampostería No Reforzada (EMNR) de paredes de material tradicional como el adobe en Cuenca, Ecuador	27
Gráfico 6. Granulometría casos de estudio	42
Gráfico 7. Límite líquido de los casos de estudio	42
Gráfico 8. Límite plástico de los casos de estudio	42
Gráfico 9. Índice de plasticidad de los casos de estudio	43
Gráfico 10. Carta de plasticidad	44
Gráfico 11. Carta de plasticidad de los casos de estudio	45
Gráfico 12. Contenido de materia orgánica de los casos de estudio	46
Gráfico 13. Módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos de compresión	48
Gráfico 14. Esfuerzo vs deformación de la unidad de adobe a compresión	50
Gráfico 15. Resistencias promedio del adobe a compresión	51
Gráfico 16. Esfuerzo vs deformación del mortero a compresión	53
Gráfico 17. Resistencias promedio del mortero y adobe a compresión	53
Gráfico 18. Esfuerzo vs deformación del murete a compresión	56
Gráfico 19. Resistencias promedio del murete a compresión	56
Gráfico 20. Resistencias promedio del murete a tracción indirecta	58
Gráfico 21. Esfuerzo a compresión vs esfuerzo a cortante del muretes a tracción indirecta	59
Gráfico 22. Resistencias promedio del adobe a flexión	61
Gráfico 23. Distribución de probabilidad normal vs lognormal	67
Gráfico 24. Distribución de probabilidad aproximada del murete de adobe a compresión	68
Gráfico 25. Distribución de probabilidad aproximada del mortero de barro a compresión	69
Gráfico 26. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del adobe a compresión	71
Gráfico 27. Elemento del muro de adobe representado en el modelo numérico	72
Gráfico 28. Muro de adobe representado en el modelo numérico	73
Gráfico 29. Curva de capacidad de los muros de adobe	74
Gráfico 30. Características mecánicas del adobe de las edificaciones patrimoniales	79
Gráfico 31. Características mecánicas y físicas del adobe, mortero y muretes de adoberas	80
Gráfico 32. Relación entre el módulo elástico del adobe y su capacidad a compresión	82
Gráfico 33. Relación entre el módulo elástico del adobe y del murete de adobe	82
Gráfico 34. Función de densidad de probabilidad del módulo elástico del muro de adobe característico de Cuenca ..	83
Gráfico 35. Modelo numérico vs modelo ensayado adobera 2, espécimen 2	85
Gráfico 36. Modelo numérico vs modelo ensayado adobera 2, espécimen 4	85
Gráfico 37. Modelo numérico vs modelo ensayado adobera 2, espécimen 5	85
Gráfico 38. Límites de Atterberg	106
Gráfico 39. Muestra de tierra pasada por el tamiz #40	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actualización del inventario de edificaciones patrimoniales en las parroquias rurales de Cuenca	13
Tabla 2. Permisos de construcción con tierra (adobe y tapial) en Ecuador y la provincia del Azuay en los últimos 10 años	13
Tabla 3. Características generales de los productores de adobe (adoberos) en Sinincay	34
Tabla 4. Buenas practicas en la fabricación de adobes	34
Tabla 5. Formato de los adobes de los casos de estudio	40
Tabla 6. Normas, procedencia y tamaño de muestra	40
Tabla 7. Clasificación SUCS según el tamaño de las partículas del adobe	43
Tabla 8. Clasificación SUCS según el tamaño de las partículas del mortero de barro	43
Tabla 9. Límites de Atterberg de los casos de estudio	43
Tabla 10. Parámetros indicados en documentos y normas	43
Tabla 11. Clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)	45
Tabla 12. Contenido de materia orgánica de los casos de estudio	46
Tabla 13. Resistencia a la compresión del adobe	51
Tabla 14. Resistencia a la compresión del mortero	53
Tabla 15. Formatos de adobe para la conformación de muretes de adobe	54
Tabla 16. Resistencia a la compresión del murete	56
Tabla 17. Resistencia a tracción indirecta del murete	58
Tabla 18. Resistencia a flexión del adobe	61
Tabla 19. Resistencias mínimas según normativas	62
Tabla 20. Cumplimiento de normas según resultados obtenidos	62
Tabla 21. Media y desviación estándar de los muretes de las fábricas de adobe estudiadas	68
Tabla 22. Media y desviación estándar del mortero de barro de las fábricas de adobe estudiadas	70
Tabla 23. Media y desviación estándar de los adobes de los casos de estudio	70
Tabla 24. Clasificación SUCS según el tamaño del árido	79
Tabla 25. Clasificación SUCS según el tamaño del árido	80
Tabla 26. Relación entre el módulo elástico del adobe y su capacidad a compresión	82
Tabla 27. Relación entre el módulo elástico del adobe y del murete de adobe	82
Tabla 28. Módulo elástico de los especímenes de muretes de adobe ensayados	83
Tabla 29. Valores aleatorios del módulo elástico representativo del muro de adobe en Cuenca	83
Tabla 30. Módulo elástico del murete de adobe	84
Tabla 31. Módulo elástico sugerido en normativas	84
Tabla 32. Muretes y tipos de falla	84
Tabla 33. Especificaciones características de tamices	105
Tabla 34. Formatos de adobe para la conformación de muretes de adobe	113
Tabla 35. Formatos de adobe para la conformación de muretes para el ensayo de compresión diagonal	114

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Arquitectura en tierra alrededor del mundo	7
Mapa 2. Mapa de ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial con inmuebles construidos con tierra	10
Mapa 3. Plano Cuenca con edificaciones patrimoniales según el material de construcción	14
Mapa 4. Arquitectura en tierra alrededor del mundo vs mapa sísmico global	26
Mapa 5. Área de estudio	36
Mapa 6. Edificaciones de estudio	37



Universidad de Cuenca
Cláusula de Licencia y Autorización para Publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Eddy Daniel Aguilar Alberca, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Caracterización física y mecánica del adobe en el cantón Cuenca", 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, 11 de septiembre del 2017

Eddy Daniel Aguilar Alberca
Ci: 1104033897



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

Yo, Eddy Daniel Aguilar Alberca, autor del trabajo de titulación “Caracterización física y mecánica del adobe en el cantón Cuenca”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de septiembre del 2017

Eddy Daniel Aguilar Alberca
Ci: 1104033897



Universidad de Cuenca

Cláusula de Licencia y Autorización para Publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Rosa Angelica Quezada Zambrano, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Caracterización física y mecánica del adobe en el cantón Cuenca", 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, 11 de septiembre del 2017

Rosa Angelica Quezada Zambrano
Ci: 0940601834



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

Yo, Rosa Angelica Quezada Zambrano, autora del trabajo de titulación "Caracterización física y mecánica del adobe en el cantón Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 11 de septiembre del 2017

Rosa Angelica Quezada Zambrano
CI: 0940601834

Agradecimientos

Arq. Estebán Ávila Mendez
Arq. Gabriela Barsallo Chávez
Ing. Xavier Cardenas Haro
Arq. César Piedra Landivar
Arq. Edison Castillo Carchipulla
Arq. David Jara Ávila
Ing. Hernán García Erazo
Ing. William Lema Tamay
Arq. Tatiana Rodas Avilés
Arq. Edison Sinchi Tenesaca
Sr. Anthony Aguilar Alberca
Sr. David Aguilar Alberca
Sr. Daniel Aucapiña Maldonado
Sr. Christian Carrión Alberca
Srta. Jacqueline Quezada Zambrano
Sr. Andrés Reyes Ochoa
Srta. Karina Velázquez Nieves

Gracias a nuestros familiares y aquellos que nos guiaron, aconsejaron y acompañaron en este camino, gracias por ayudarnos a cumplir este sueño





INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación consiste en determinar las características físicas y mecánicas del adobe fabricado artesanalmente y de adobes extraídos de edificaciones patrimoniales del cantón Cuenca, analizando especímenes de unidades de adobe y muretes, estableciendo la relación entre las propiedades físicas y mecánicas de la unidad de adobe con el comportamiento mecánico del murete, además de la aplicación de un modelo numérico que simula el trabajo del muro de adobe ante fuerzas provocadas por sismos, obteniendo la fuerza cortante y desplazamiento superior que soporta el muro de adobe para cada caso de estudio.

La pertinencia de esta investigación en Cuenca se debe que desde 1999 la ciudad está catalogada como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, debido, entre otras razones por su gran cantidad de edificaciones históricas construidas principalmente de adobe, ubicadas en el centro de la ciudad. A pesar de la gran relevancia del adobe, una de las mayores problemáticas de la conservación de las edificaciones de adobe en Cuenca es el desconocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas, particularmente en Cuenca la falta de esa información ha dificultado el determinar con mayor precisión la vulnerabilidad de las edificaciones de adobe ante cargas permanentes, cargas variables, cargas sísmicas o cargas producidas por el tráfico. A esto se suma un análisis de vulnerabilidad de la ciudad, realizado en 2000 por el grupo de investigación de la red sísmica de la Universidad de Cuenca, que mostró un alto nivel de riesgo para todas las estructuras, especialmente para los edificios históricos. He ahí la pertinencia de este trabajo de titulación.

La metodología aplicada en la presente investigación consta de diferentes fases: en la primera fase se analiza la presencia, importancia y vigencia en el contexto internacional y local del adobe, una de las técnicas constructivas en tierra cruda más usada. La segunda fase muestra brevemente las características del adobe como material de construcción, es decir, su composición, fabricación y especificaciones técnicas para la construcción de edificaciones, además, se expone su vulnerabilidad sísmica, la sismicidad del Ecuador y se estudia los métodos de análisis-numérico empleados para la predicción del comportamiento de mamposterías como el adobe. En la tercera fase se determina el área de estudio y las fábricas de adobe a analizar, se realizó un seguimiento en la fabricación de los adobes y se describe la extracción de los mismos de las edificaciones patrimoniales, también se argumentan las normativas usadas para el análisis en laboratorio del adobe como unidad y murete, así tras una campaña experimental se obtienen finalmente las propiedades físicas (granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contenido de materia orgánica) y mecánicas (compresión, flexión, tracción indirecta y módulo de elasticidad).

En la cuarta fase se analizaron los resultados obtenidos y se determinó la dispersión de datos mediante la curva de densidad de probabilidad (PDF) del módulo de elasticidad de cada adobera y edificación patrimonial, todos los datos obtenidos se ingresaron en el modelo numérico para simular como trabaja el muro ante fuerzas provocadas por sismos, así se determinó la fuerza cortante y desplazamiento superior que soporta cada caso de estudio, importante información para el diseño estructural. Gracias al presente trabajo de titulación será posible el diseño estructural de nuevas edificaciones de adobe, conservación de edificios existentes y para determinar la vulnerabilidad de este tipo de construcción ante fuerzas sísmicas.





OBJETIVOS

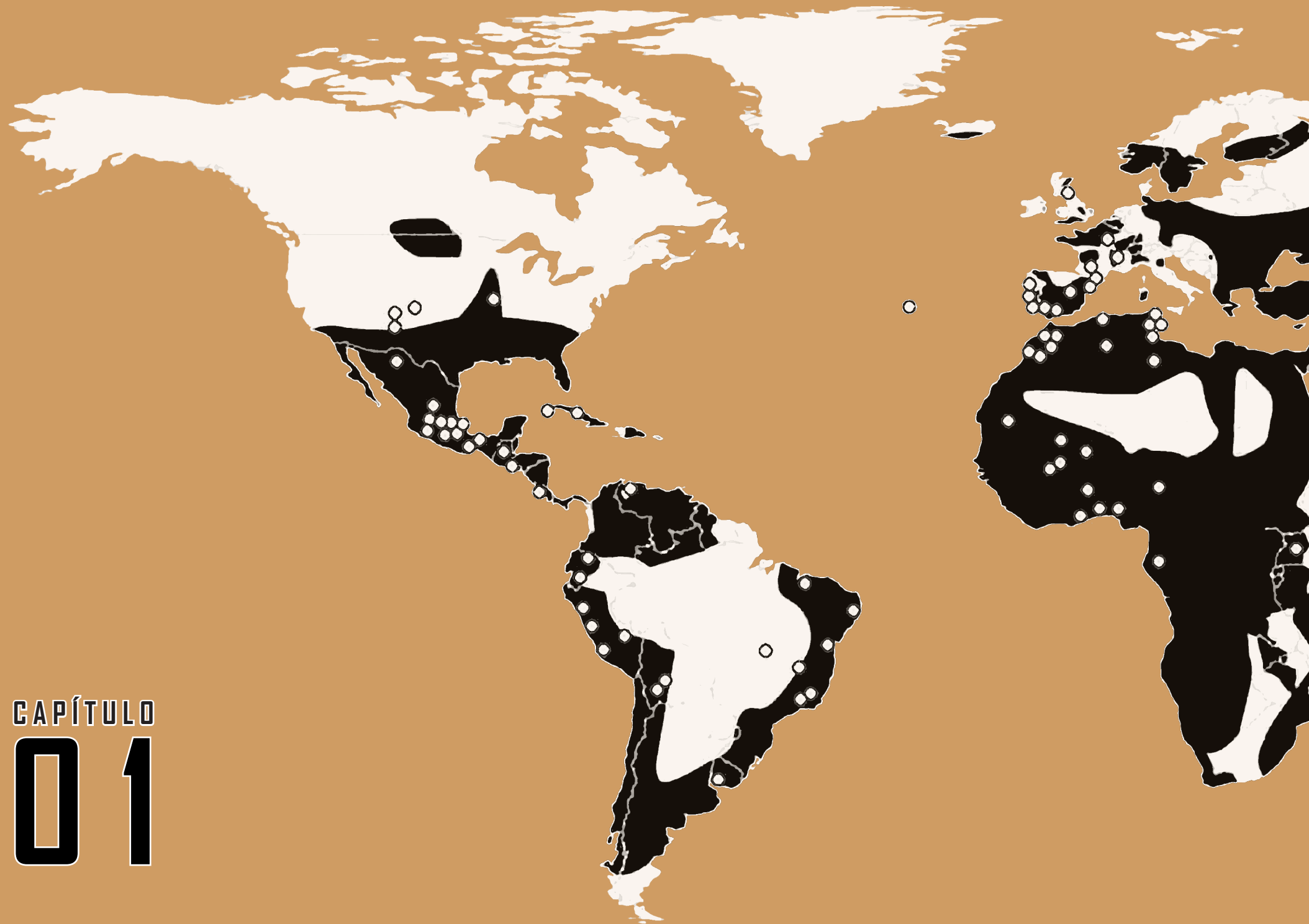
Objetivo general

Determinar las características físicas y mecánicas del adobe para su uso en el diseño estructural de edificaciones en el cantón Cuenca.

Objetivos específicos

1. Estudiar, determinar, analizar y generar una base de datos con las propiedades físicas (granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contenido de materia orgánica) y mecánicas (compresión y flexión) del adobe; y las propiedades mecánicas (compresión y tracción indirecta) del murete de adobe.
2. Analizar la relación entre las propiedades físicas y mecánicas del adobe y las propiedades mecánicas del murete de adobe.
3. Describir los modos de falla del murete ante cargas aplicadas en los ensayos de laboratorio.
4. Estudiar los principales modelos utilizados en el análisis numérico de muros de adobe.
5. Aplicar un modelo numérico con los resultados de las propiedades mecánicas de los muretes de adobe
6. Determinar cómo se pueden utilizar en el modelo numérico los resultados obtenidos de los ensayos para modelar edificaciones existentes.

CAPÍTULO
01



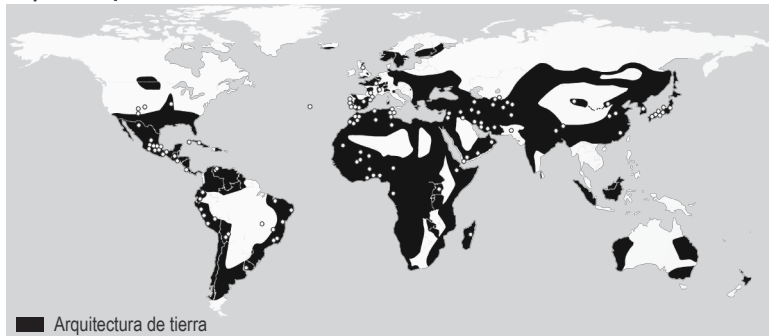


**Relevancia del
estudio del adobe**

Introducción

El presente capítulo expone la presencia, importancia y vigencia en el contexto internacional y local de una de las técnicas constructivas en tierra cruda más usadas, el adobe, con el objetivo de justificar la pertinencia de este trabajo de titulación.

Mapa 1. Arquitectura en tierra alrededor del mundo



Blon (De Sensi, 2003). Distribución Mundial de Arquitectura de Adobe [Figura]. Recuperado el 11 de octubre, 2016, de http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe_Tutorial_Spanish_Blondet.pdf

1.1 Antecedentes y justificación

1.1.1 Construcciones con adobe en el contexto internacional

La tierra es uno de los materiales de construcción más antiguos y de uso más difundido a nivel mundial (Mapa 1) al ser utilizado por todas las culturas ancestrales, siendo el adobe una de las técnicas más usadas, con hallazgos que datan del periodo Neolítico¹ en Turquestan 8000 a 6000 a.C. (Pumpelly, 1908), hace 9000 años en Çatalhöyük (Çatalhöyük Side Bookguide, 2014) el conjunto urbano más grande y mejor preservado del neolítico en el Oriente Medio, y del 2500 a 1600 a.C. en Gonur Depe - Turkmenistan la ciudad oasis desarrollada en 28 hectáreas rodeada por una fortaleza (Imagen 1) (Amaya, García & Ordoñez, 2016).

El adobe ha estado presente en viviendas y obras monumentales como: fortalezas, tumbas, mastabas², palacios y obras religiosas; ejemplo de ello es la bóveda del templo mortuario de Ramses II en Egipto, construido con adobes de hace 3000 años (Imagen 2), y en la ciudad de Tarim, Yemen, que entre sus mezquitas más importantes esta Al-Mudar construida principalmente en adobe y con una torre construida en tierra de 38 m de altura (Imagen 3) (Minke, 2005).

¹ Neolítico significa Nueva Edad de Piedra, es el periodo que abarcó aproximadamente desde el año 6 mil hasta el año 3 mil antes de nuestra era, se le dio este nombre en razón de los hallazgos de herramientas de piedra pulimentada. Portillo, L. (s/f). *Historia Universal*. Recuperado el 20 de noviembre del 2016 de <http://www.historialuniversal.com/2009/04/prehistoria-neolitico-edad-de-piedra.html>

² Mastaba es una construcción funeraria del antiguo Egipto, cuya forma exterior es troncopiramidal de base rectangular. Algunas de estas tumbas alcanzaron una altura cercana a los 20 m, pero la mayoría no superaba los 12 m de altura. Las mastabas en Egipto. (s/f). n/a. *Universo Arquitectura*. Recuperado el 14 de enero del 2017 de <http://www.universoarquitectura.com/la-mastaba-en-egipto/>

Imagen 1. Complejo al sur de Gonur

Gonur south complex. (s.f.). Aerial view of Gonur-Tepe's southern complex. [Fotografía]. Recuperado el 5 de noviembre, 2016 de <http://www.heritageinstitute.com/zoroastrianism/merv/gonur.htm>



Imagen 2. Bóveda del Templo mortuario de Ramses II

Bóvedas del templo de Ramses II. (s.f.). n/a [Imagen]. Recuperado el 20 de octubre, 2016 de <http://www.egipto.com/cgi-bin/forum2004/showthread.php?t=11656>



Imagen 3. Torre de la mezquita de Al-Mudar Tarim, Yemen.

Herrero, J. (1995). La mezquita Al Muhdhar [Imagen] Recuperado el 20 de octubre, 2016 de http://dejamepensarotavez.blogspot.com/2013_05_01_archive.html





También hay ciudades construidas en su totalidad con tierra como Shibam, la llamada “Manhattan del desierto” en Yemen (Imagen 4), siendo el hogar de los primeros rascacielos del mundo, un grupo denso de 500 casas-torre de 9 a 10 pisos de altura construidas totalmente con adobes construidos desde el año 300 dC hasta después de 1532 (Gatti, 2012).

Asimismo, el adobe ha estado presente en América (México, Centroamérica y Sudamérica); en América del Sur desde hace 3800 años en su forma más primitiva dentro de las diversas culturas prehispánicas (PNUD - UNESCO, 1983, p.13).

Ejemplos representativos de la arquitectura en tierra en América se ubican en Perú, donde se sitúa la ciudad de barro más grande del continente, la Ciudad de Chan Chan del año 600 d.C. (Imagen 5), perteneciente a la cultura Chimú construida principalmente de adobe; y la Ciudad Sagrada de Caral del año 3000 a 1800 a.C. (Imagen 6), construida con bases de adobes, considerada como el asentamiento humano más antiguo de América.

Pese a la popularidad de las técnicas constructivas en tierra, los avances tecnológicos y nuevos paradigmas de progreso establecidos en el siglo XX, asociaron las construcciones de tierra con pobreza, retraso y consecuentemente entraron en desuso. Ante ello se construyeron pocos ejemplos de arquitectura en tierra, algunos de la mano de arquitectos de influencia mundial, como Frank Lloyd Wright diseñando entre otros la Burlingham House en 1942 con adobes (Gatti, 2012).

Pero los efectos de la industrialización y los nuevos materiales concibieron edificaciones de alto consumo energético en sistemas de calefacción, enfriamiento, etc.; contrario a los sistemas tradiciones de construcción con tierra, que demandan bajo consumo energético (Amaya, García & Ordoñez, 2016).

Sumado a la preocupación mundial por la depredación de los recursos naturales no renovables del planeta, cambio climático, etc.; entre otros movimientos, resurge el interés por la arquitectura en tierra a inicios de los setentas (Maldonado & Vela-Cossío, 2011).

Imagen 4. Ciudad de tierra Shibam, Yenem, “La Manhattan del desierto”

Macleod, F. (s.f.). Manhattan del desierto: Shibam, la antigua ciudad de rascacielos de Yemen [Imagen]. Recuperado el 12 de noviembre del 2016 de <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/771311/manhattan-del-desierto-shibam-la-antigua-ciudad-de-rascacielos-de-yemen>



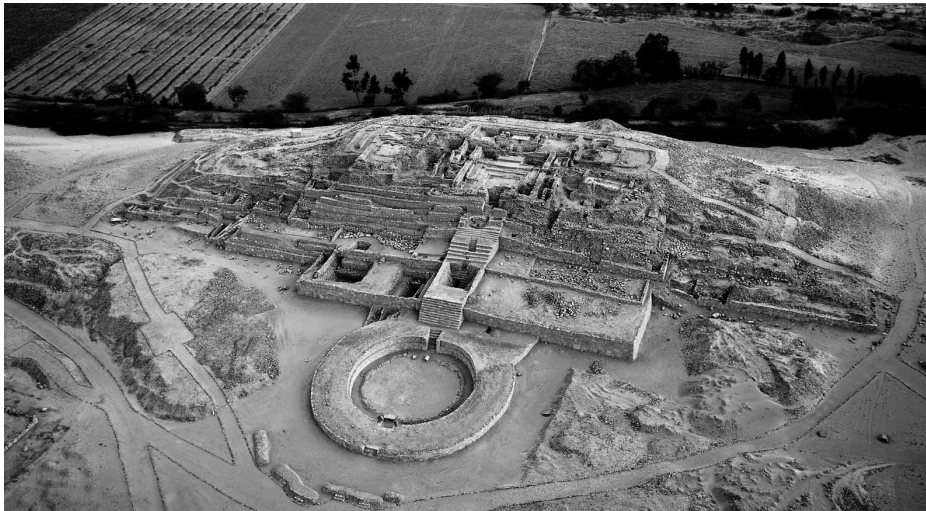
Imagen 5. La ciudad de Chan Chan fabricada a base de adobe

Debord, V. (2011). Chan Chan, el reino chimú de Perú [Imagen]. Recuperado de <http://viajerosblog.com/chan-chan-el-reino-chimu-de-peru.html>



Imagen 6. Ciudad Sagrada de Caral.

Recuperado de <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/db/21/44/db21444d7f940f545b11a0e995be844e.jpg>



Esta tendencia se refleja en las investigaciones y asociaciones que surgen a partir de la década de los 70, algunos ejemplos:

- Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú (1970),
- Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales (FEB) en Kassel - Alemania (1974),
- Rammed Earth Work en California - USA (1978),
- Craterre en Grenoble - Francia (1979),
- Ramtec Perth en Australia (1979),
- Instituto Nacional de Patrimonio Cultural en Ecuador (1978), (Gatti, 2012, p.21).

En el siglo XXI el interés por modernizar las técnicas de construcción en tierra y conservar las edificaciones patrimoniales en tierra dieron lugar al Programa Mundial de Patrimonio de la Arquitectura de Tierra (WHEAP) (WHEAP, 2012).

El WHEAP elaboró una lista de ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial con inmuebles construidos con tierra, incluyendo a Ecuador (Quito y Cuenca) (Mapa 2), cabe aclarar que muchos de dichos inmuebles son de construcción mixta, es decir, pueden estar constituidas de varios sistemas constructivos con tierra (adobe, bahareque, tapial, etc.), el WHEAP generó diversos datos a nivel mundial y Latinoamericano, revelando que el adobe es la técnica constructiva predominante en las edificaciones patrimoniales en tierra, con una presencia del 50% en las 150 ciudades inscritas como patrimonio mundial y del 60% en América Latina y el Caribe (Gráfico 1 y 2). Dada la importancia de la construcción con tierra cruda cada vez más proyectos de innovación constructiva con adobe de alta calidad estética y técnica, como el presente trabajo de titulación, emergen en los cinco continentes.

Gráfico 1. Tipos de construcción con tierra en el mundo

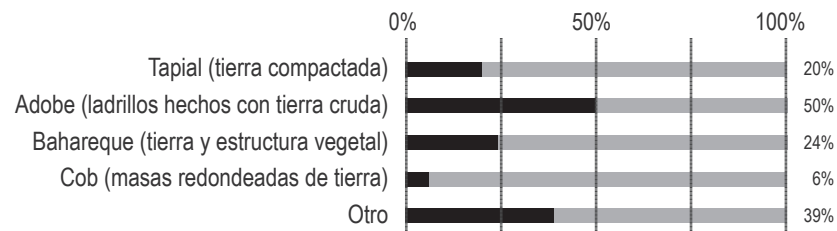
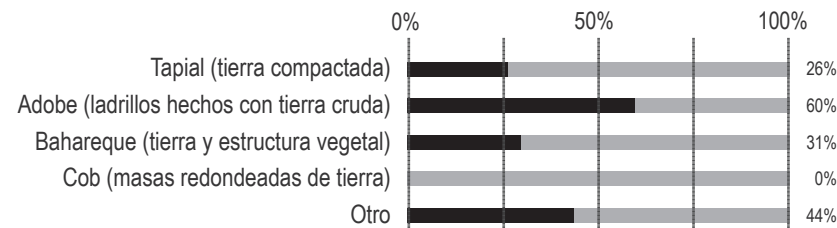


Gráfico 2. Tipos de construcción con tierra en América Latina y el Caribe



World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP). (2012). Statistics World: TYPES AND CONSTRUCTION MODES 150 PROPERTIES [Gráfico]. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002170/217020e.pdf>

Mapa 2. Mapa de ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio Mundial con inmuebles construidos con tierra

World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP). (2012). World Heritage - Inventory of earthen architecture [Mapa].. Recuperado el 15 de septiembre del 2016 de <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002170/217020e.pdf>

MAPA DE PROPIEDADES CONSTRUIDAS CON TIERRA

ÁREAS GEOGRÁFICAS DONDE ESTA
PRESENTE LA ARQUITECTURA EN TIERRA

PROPIEDADES CONSTRUIDAS CON TIERRA INSCRITAS
EN LA LISTA DE PATRIMONIO MUNDIAL (150)

REGIONES

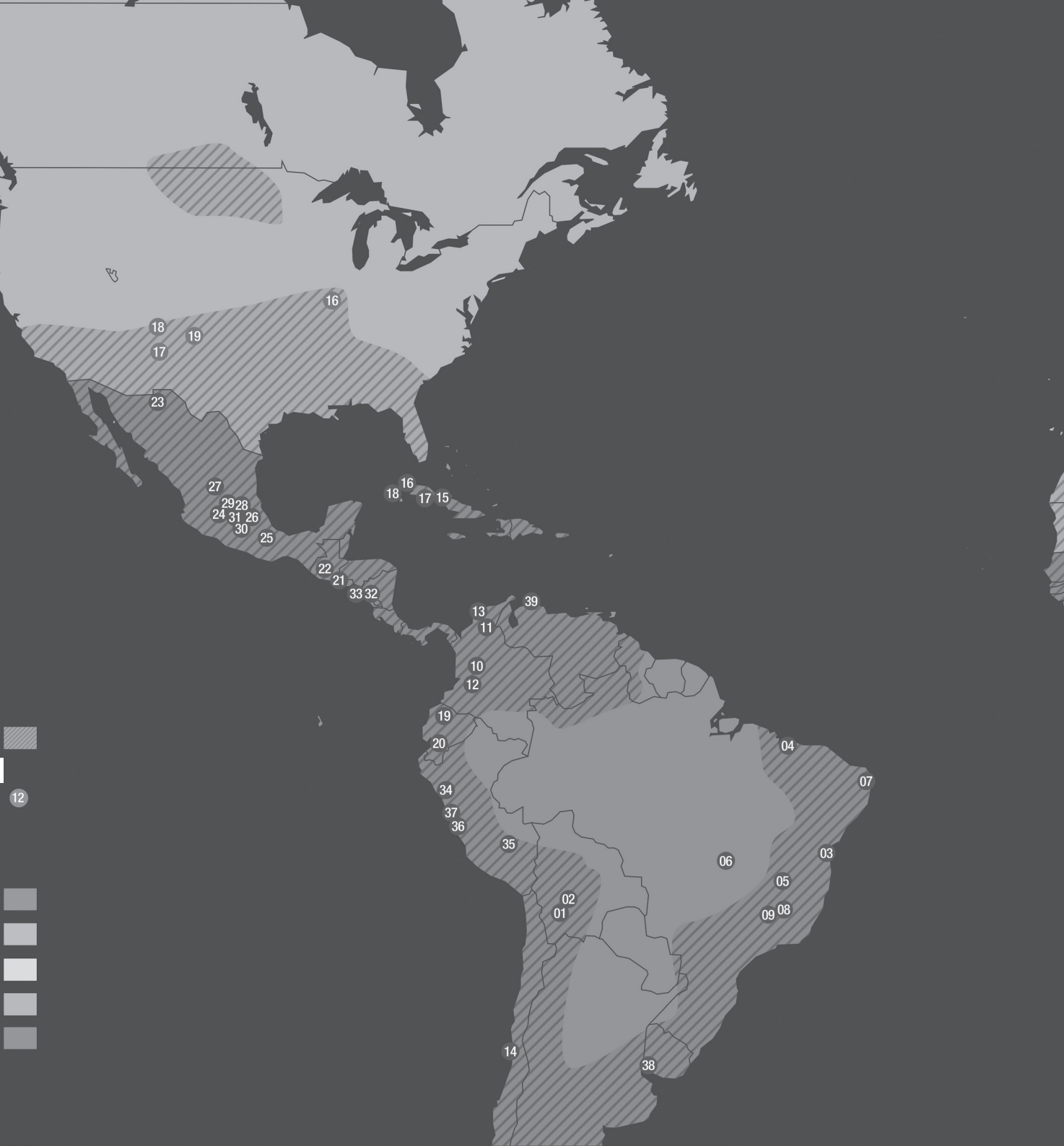
1 ÁFRICA, 15 propiedades

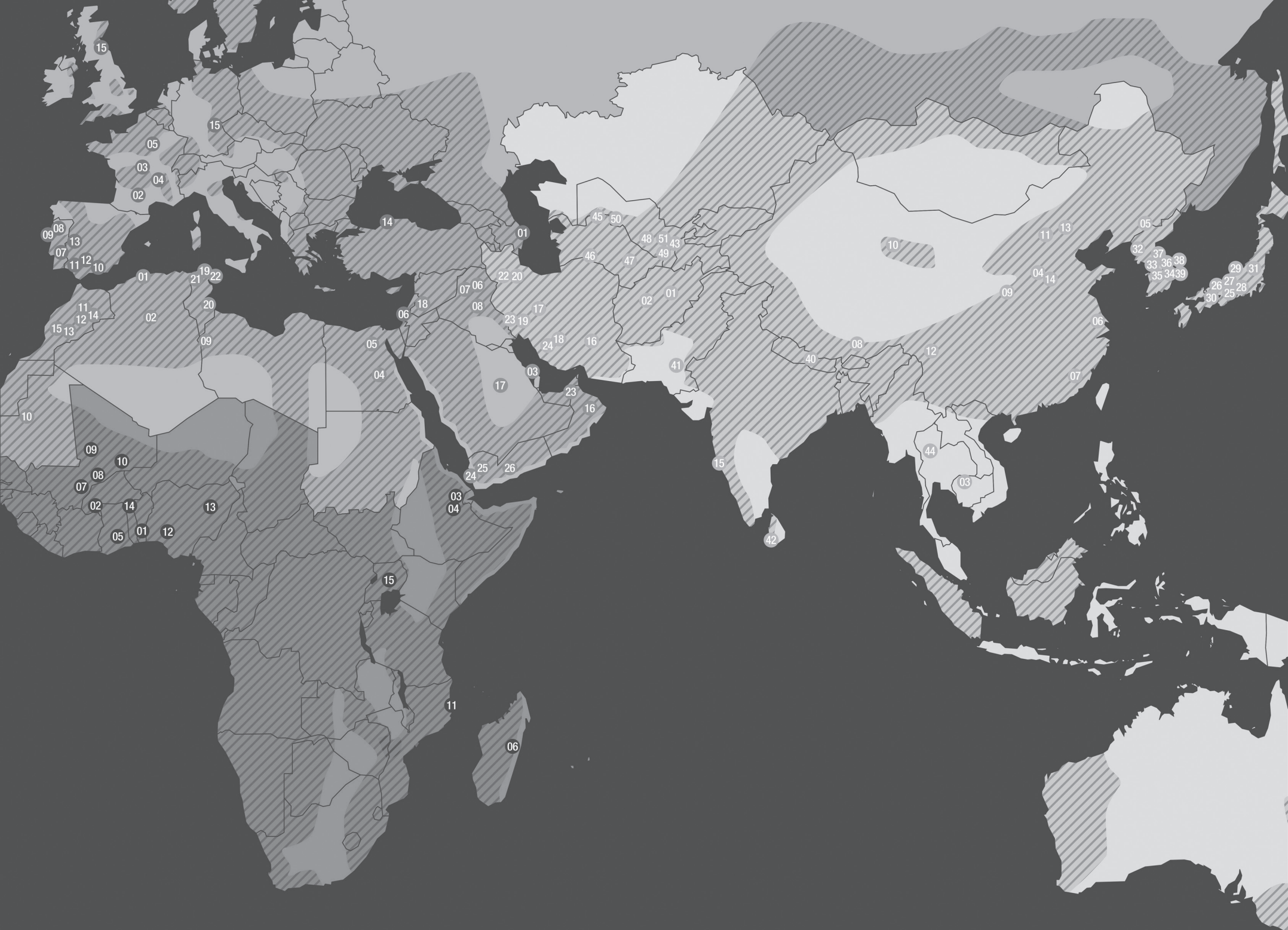
2 ESTADOS ÁRABES, 25 propiedades

3 ASIA Y EL PACIFICO, 51 propiedades

4 EUROPA Y NORTEAMÉRICA, 10 propiedades

5 LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE, 39 propiedades







1.1.2 Construcción con adobes en Cuenca

Cuenca, Ecuador, tiene gran parte de su patrimonio construido actual, con adobes que datan desde el periodo colonial, pero el adobe fue ampliamente usado desde antes de acoger a la cultura española e incluso antes de la cultura Inca que empleaba el adobe en la construcción de viviendas (Imagen 7).

Posteriormente con la llegada de los españoles el uso de la tierra persistió en el periodo colonial, del que actualmente se conserva la Casa de las Posadas (1806) (Imagen 8) y la Casa Azul (1830) (Imagen 9) construidas principalmente con adobes (Carnevale, Rakotomamonjy, Sevillano & Abad, 2015, p.7).

En el periodo republicano (1822-1875) se añadieron tratamientos decorativos de los órdenes clásicos en las fachadas, manifiesto en el Hostal de la Colonia (Imagen 10), construido con adobes (Carnevale et al., 2015, p.9). Durante el periodo neoclásico francés (1875-1935), Cuenca tuvo un importante desarrollo económico, llevando a un cambio de materiales y estilos influenciado por Europa, ejemplo de ello es el Pasaje Mata (Imagen 11) construido con adobes, vidrio y mármol (Carnevale et al., 2015, p.11).

En el periodo de 1930 a 1940, el Art Déco consistió en sustituir las fachadas de tierra por ladrillo y las nuevas edificaciones fueron construidas totalmente con ladrillo, además se usó hormigón armado en balcones y pequeños aleros como se observa en la Casa Tarqui 6-116 (Imagen 12) construida con adobe y bahareque (Carnevale et al., 2015, p.13).

A inicios del siglo XX la falta de conocimiento sobre conservación, el abandono y la introducción de nuevos materiales, provocaron el desuso del adobe y graves pérdidas del patrimonio edificado, que se expone en la actualización del inventario patrimonial rural de 1998 (Imagen 13 y 14) realizada en 2014 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Ecuador, indicando que el 34% de las edificaciones han perdido su valor patrimonial (Tabla 1) (Barzallo & Rodas, s/f).

En 1999, Cuenca fue declarada Patrimonio de la Humanidad, debido, entre otras razones por sus numerosas edificaciones históricas en su centro de la ciudad,

Imagen 7. Modelo de una vivienda Inca levantada en Pumapungo, Cuenca

Propia, 2017.



Imagen 8. Casa de las posadas

Propia, 2015.



Imagen 9. La Casa Azul

Propia



Imagen 10. Hostal de la Colonia

Propia



Imagen 11. Pasaje Mata

Propia



Imagen 12. Casa Tarqui

Propia

Tabla 1. Actualización del inventario de edificaciones patrimoniales en las parroquias rurales del cantón Cuenca

Estado del bien patrimonial	Cantidad de edificaciones	
	[u]	[%]
Conservadas	356	66%
Demolidas	34	6%
Reemplazada, alteradas y reconstruidas	150	28%

Barzallo, G. Rodas, P. (2015). Transformación de las edificaciones patrimoniales en las áreas rurales del cantón Cuenca a partir de un análisis de la actualización de los inventarios de 1988. (SIACOT)

Tabla 2. Permisos de construcción con tierra (adobe y tapial) en Ecuador y la provincia del Azuay en los últimos 10 años.

Año	Total permisos de construcción en Ecuador	Total permisos de construcción con tierra en Ecuador		Total permisos de construcción en Azuay	Total permisos de construcción con tierra en Azuay	
	[u]	[u]	[%]	[u]	[u]	[%]
2006	26.584	16	0,06	2.921	3	0,10
2007	34.787	12	0,03	3.288	8	0,24
2008	34.653	16	0,05	2.909	10	0,34
2009	38.835	10	0,03	2.999	3	0,10
2010	39.657	16	0,04	2.758	3	0,11
2011	42.042	15	0,04	3.420	6	0,18
2012	36.617	30	0,08	2.590	6	0,23
2013	33.385	17	0,05	2.794	7	0,25
2014	27.199	33	0,12	2.636	7	0,27
2015	28.379	19	0,07	2.637	4	0,15

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Recuperado el 20 de octubre, 2016 de <http://www.ecuadoren-cifras.gob.ec/edificaciones/>

construido tres cuartas partes de adobe (WHEAP, 2012) (Mapa 3).

A demás el INPC registra 57 edificaciones construidas con tierra en los últimos 10 años (2006 a 2015) en la provincia del Azuay (Cuenca) (Tabla 2), esto denota que el adobe es una técnica constructiva vigente en Cuenca, por ello existen estudios acerca de: características de unidades de adobe con materiales añadidos para mejorar su comportamiento mecánico, configuración de las edificaciones en tierra, el estado de conservación, sus afectaciones, entre otros.

Sin embargo, localmente no existe estudios que expongan las características físicas y mecánicas del adobe fabricado de manera artesanal y tradicional, ni de los adobes con los que están construidas las edificaciones patrimoniales de Cuenca, tampoco de las propiedades mecánicas del murete de adobe, propiedades variables que obedecen a muchos factores (composición, fabricación del adobe, entre otros), por tanto no es posible determinar la capacidad resistente de una edificación. Ante esta carencia, el presente trabajo de titulación crea una base de datos que expone los resultados obtenidos de ensayos físicos y mecánicos a unidades y muretes de adobe, imprescindible información para el diseño estructural de nuevas edificaciones, conservación de edificios existentes y para determinar la vulnerabilidad de este tipo de construcción ante fuerzas sísmicas.

Imagen 13. Edificación patrimonial rural de la parroquia Baños (Inventario 1988)

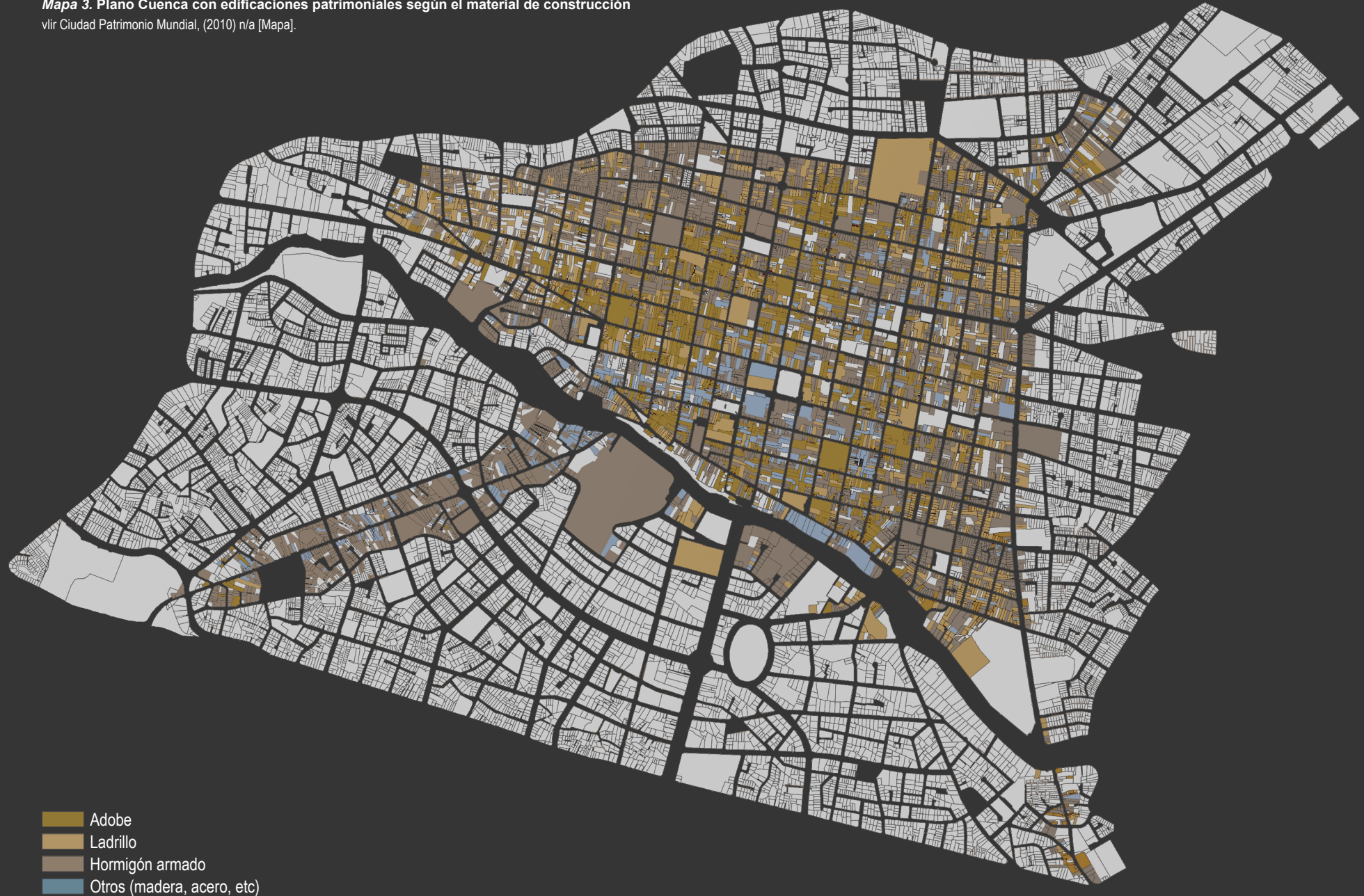


Imagen 14. Remanente de edificación de la parroquia rural Baños, Cuenca (actualización inventario, 2014)



Edificación patrimonial rural de la parroquia Baños (Inventario 1988) e Remanente de edificación de la parroquia rural Baños, Cuenca (actualización inventario, 2014). 1988. n/a. Transformación de las edificaciones patrimoniales en las áreas rurales del cantón Cuenca a partir de un análisis de la actualización de los inventarios de 1988. (SIACOT)

Mapa 3. Plano Cuenca con edificaciones patrimoniales según el material de construcción
ver Ciudad Patrimonio Mundial, (2010) n/a [Mapa].





CAPÍTULO

02

Marco teórico

Introducción

El presente capítulo describe al adobe en cuanto a: su composición, fabricación y especificaciones técnicas para la construcción de edificaciones. Además se expone la vulnerabilidad sísmica del adobe, la sismicidad del Ecuador y se estudia los métodos de análisis numérico empleados para la predicción del comportamiento de mamposterías como el adobe.

En definitiva, el presente capítulo tiene el fin de dar a conocer brevemente las características del adobe como material de construcción.

Imagen 16. Capas del suelo

Los horizontes de suelo. (s.f.). n/a [Imagen]. Recuperado el 29 de diciembre del 2016 de <http://www.diccionario-medioambiente.org/diccionariomedioambiente/es/verInformacion.aspx?id=1178>

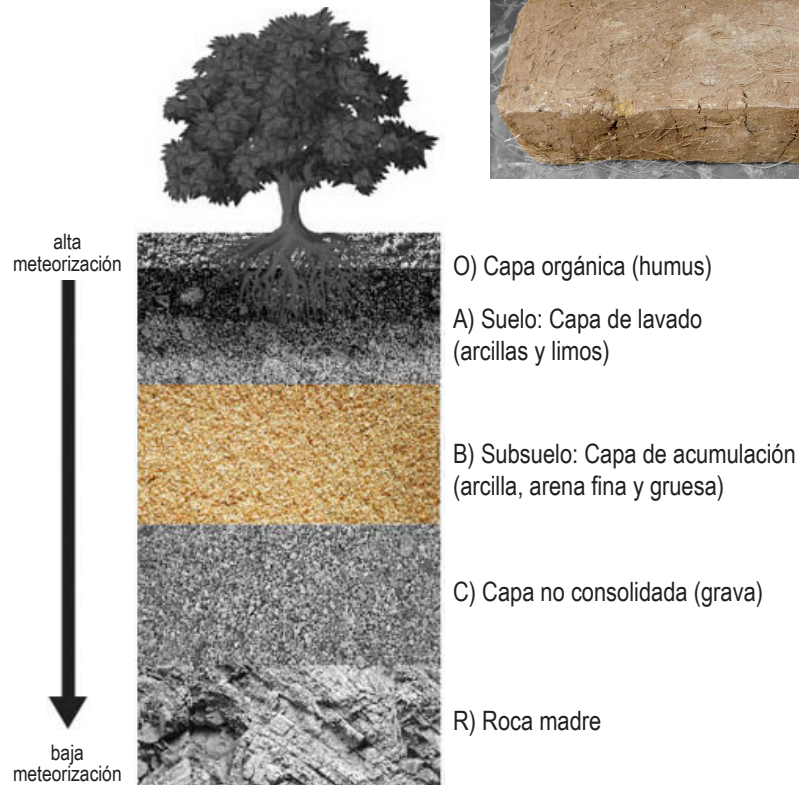


Imagen 15. Adobe

Propia



2.1. El adobe como material de construcción

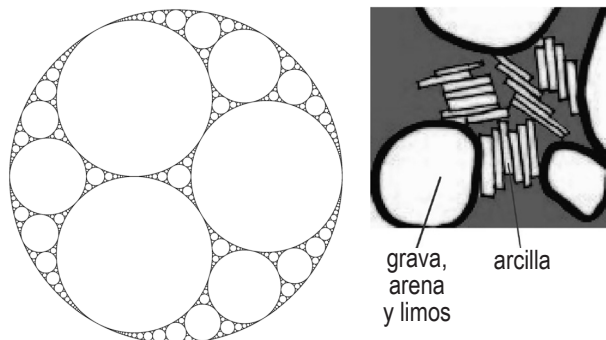
La palabra adobe proviene del árabe *albut* (Lajo, 1990), es un material de construcción producido a mano, conformando por una masa de barro humedecida, frecuentemente mezclada con paja, relleno en moldes de forma prismática y secados al aire libre, es decir sin cocción (Imagen 15). Es considerado un material de construcción de bajo costo, si la materia prima principal (tierra) se obtiene del lugar de la construcción y si es autoconstruido; como técnica constructiva su colocación sucesiva y ordenada conforma muros auto portantes.

2.1.1. Composición del adobe

Al adobe, tradicionalmente está compuesto por tierra (arcilla y agregados como la arena y grava), fibras naturales y agua, materiales accesibles y económicos, he ahí una de las razones de la popularidad de este sistema.

Imagen 17. Composición granulométrica de la tierra

Carnevale, E. Rakotomamonjy, B. Sevilla, E. Abad M. (2015). Granulometría de la tierra. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) [Imagen]. Recuperado el 15 de octubre del 2016 de <http://whc.unesco.org/document/142073>



2.1.1.1. Tierra

La tierra se compone de arcilla, limo, arena y algunas veces agregados mayores como grava y piedras. Pero la composición y propiedades de la tierra depende del lugar donde se encuentra; generalmente las tierras apropiadas para la construcción están ubicadas en el subsuelo a una profundidad mayor de 40cm según Minke, porque están libres de materia orgánica, grandes piedras y raíces (Carnevale et al., 2015, p.25) (Imagen 16).



La tierra apropiada para la construcción deberá tener estas propiedades:

- En la selección: su composición granulométrica será variada (Imagen 17) (partículas de todos los tamaños, arcilla, limo, arena y grava, para no dejar vacíos y ser más resistente), plasticidad y retracción.
- En la ejecución: humedad y grado de compactación (Carnevale et al., 2015, p.25).

Otras características importantes de las tierras aptas para la construcción que se determinan por observación son:

- Suelos inorgánicos, de colores claros y brillantes, aptos para construir.
- Suelos orgánicos, de colores café oscuro, verde oliva o negro, no son aptos para construir (Carnevale et al., 2015, p.26).

Arcilla

Las partículas de arcilla tienen un tamaño inferior a 0,002 mm, está compuesta por minerales arcillosos (Imagen 18) como los cationes, iones con carga eléctrica positiva, que pueden proveer la capacidad aglutinante y resistencia a la compresión (Minke, 2005, p.24).

Además es responsable en gran medida de características como plasticidad, adherencia, contracción, retención de humedad, conductividad hidráulica, succión de agua, temperatura, conductividad térmica (Carnevale et al., 2015, p.23), y en contacto con el agua genera la adherencia entre los diferentes tamaños de agregado (arena y grava) formando el barro para la fabricación de adobe, entre otras técnicas de construcción con tierra (Besoain, 1985, p.20).

Para verificar la presencia de arcilla de manera empírica existen varias opciones:

1. Al untar las manos con tierra húmeda y lavarlas, observamos (Imagen 19):
 - Si se escurre sin problema, es señal de que la tierra contiene poca arcilla.
 - Si es difícil de lavar y queda el tono de la tierra impregnada en las manos, significa que la tierra contiene bastante arcilla (Carnevale et al., 2015, p.24).
2. Puede ser evaluada a través del brillo, para observarlo es necesario:
 - 2.1. Tomar material bien fino y amasar con agua hasta formar una pequeña bola.

Imagen 18. Esquema de un cristal de arcilla coloidal, con su estructura laminar, cargas negativas y cationes absorbidos

Besoain, E. (1985). Esquema de un cristal de arcilla coloidal, con su estructura laminar, cargas negativas y cationes absorbidos [Imagen]. Recuperado el 02 de enero del 2017 de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pfL7oUpz11Q-C&oi=fnd&pg=PP13&dq=qu%C3%ADmica+arcilla&ots=Fi_sxJefMv&sig=qPcBNeTCrTuoA-I712DJZEyS6_Xw#v=onepage&q&f=true

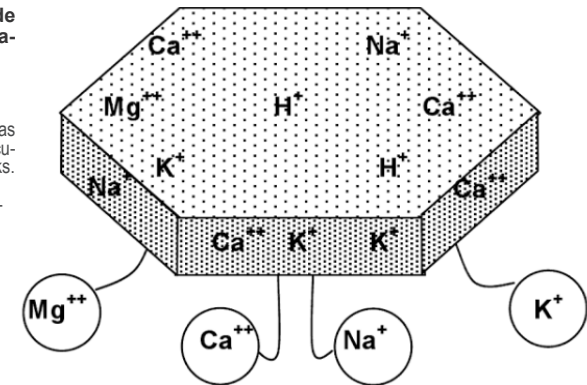


Imagen 19. Método visual para verificar la presencia de arcilla

Carnevale, E. Rakotomamonjy, B. Sevillano, E. Abad M. (2015). Método visual para verificar la presencia de arcilla. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) [Imagen]. Recuperado el 15 de octubre del 2016 de <http://whc.unesco.org/document/142073>



Imagen 20. Método visual para verificar la presencia de arcilla a través del brillo

Carnevale, E. Rakotomamonjy, B. Sevillano, E. Abad M. (2015). Método visual para verificar la presencia de arcilla a través del brillo. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) [Imagen]. Recuperado el 15 de octubre del 2016 de <http://whc.unesco.org/document/142073>



Imagen 21. Expansión y retracción causada por el agua

Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook [Imagen]. Recuperado el 10 de noviembre del 2016 de http://www.unevoc.unesco.org/e-forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf

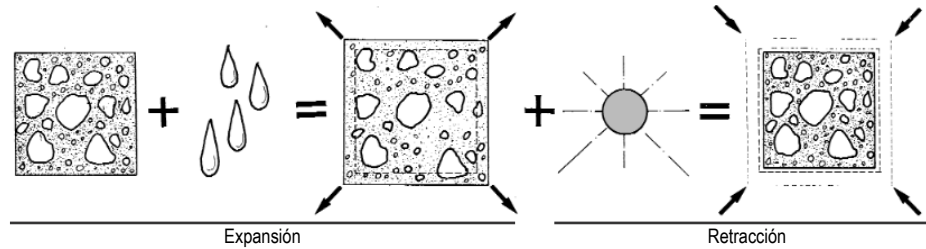
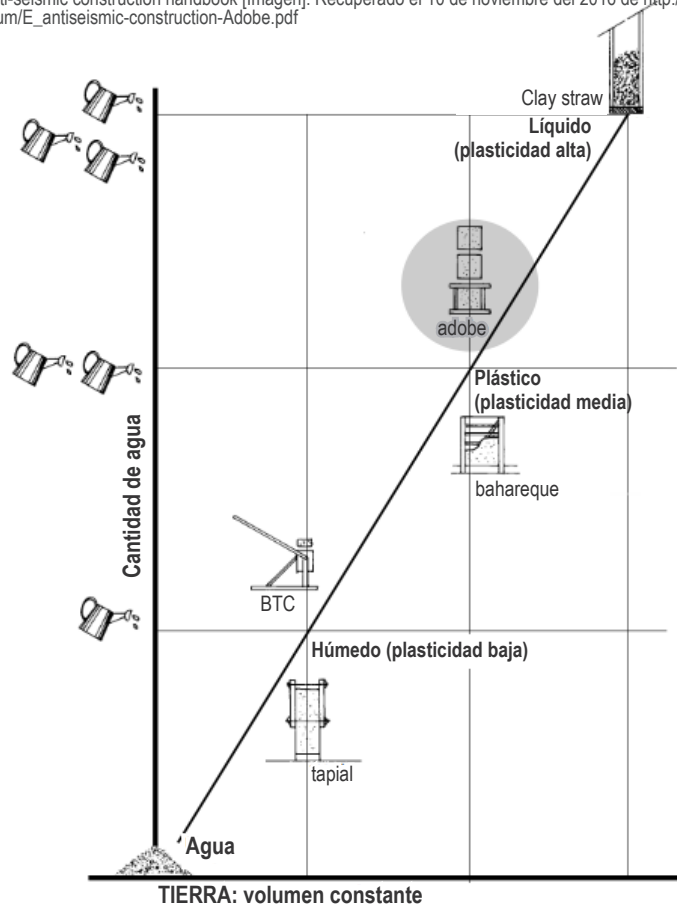


Imagen 22. Dosificación de agua para la fabricación de adobes

Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook [Imagen]. Recuperado el 10 de noviembre del 2016 de http://www.unevoc.unesco.org/e-forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf



2.2. Cortar por la mitad la bola y observar las superficies del corte (Imagen 20):

- Si son brillantes, la tierra es generalmente arcillosa
- Si presentan poco brillo, la tierra es a menudo limosa
- Si son opacas, la tierra es probablemente arenosa.

Limos

Los limos son partículas de arenas microscópicas, entre 0,05 mm y 0,002 mm de diámetro. Los limos le dan al suelo capacidad impermeable, además, los suelos donde predominan los limos son fértiles, una condición negativa para la construcción (Navarro, 2003, p. 34). Se pueden identificar mediante el tacto puesto que el limo cubre los dedos con partículas suaves, como si fuera talco (Carnevale et al., 2015, p.24).

Arena y grava

La arena (0,05 a 3 mm) y grava (> 3 mm) son partículas inertes, sin cohesión y de alta resistencia que dan al adobe su capacidad portante (Carnevale et al., 2015, p.23).

2.1.1.2. Agua

El agua, indispensable que sea libre de materia orgánica, permite que se integren las partículas de la tierra y activa las fuerzas aglutinantes de la arcilla dándole la plasticidad necesaria para la construcción de adobes. El agua hace que dependiendo si la arcilla orgánica se expanda y al secarse se retraiga provocando las características fisuras del adobe (Imagen 21).

A demás la cantidad de agua es determinante para decidir la técnica constructiva para la que es apto el barro; por ejemplo un barro con poca agua, es decir plasticidad baja es adecuado para hacer tapial, para fabricar adobes el barro debe tener plasticidad media y con plasticidad alta o alto contenido de agua es apto para el revoque de los muros de tierra (Imagen 22).



2.1.1.3. Fibras naturales

Las fibras naturales son estabilizadores que proveen rigidez, tiene baja densidad, favorece los procesos de retracción y refuerza los compuestos del adobe otorgando mayor resistencia al adobe (Caballero, Silva & Montes, 2010, p.2). Además, las fibras de paja u otras fibras dan mayor resistencia a los bloques de adobe húmedos durante el período de curado (Peace Corps Handbook For Building Earth Homes, (s.f.)).

Es importante que las fibras naturales usadas en la fabricación de adobes estén secas para que su capacidad hidrofílica³ no afecte las propiedades del material de construcción, además su longitud debe estar comprendida entre 1 y 3 cm (Imagen 23).

Tradicionalmente en la elaboración de adobes, se ha usado la paja como fibra rigidizadora, esta se encuentra sobre los 3500 metros sobre el nivel del mar, pero su extracción afecta el ecosistema de los páramos donde naturalmente crecen, por ello nuevas investigaciones han probado fibras naturales alternativas (Imagen 23) proveniente de plantas o arboles como las siguientes:

- Hierbas y cañas: hierbas y paja de trigo, arroz, cebada, entre otras.
- Hojas: abacá, sisal, henequén, cabuya, entre otras.
- Tallos: lino, yute, cáñamo, kenaf, paja, entre otras (Tapia, Paredes, Simbaña & Bermúdez, 2006, p. 1-2).

³ hidrofílica es el comportamiento de toda materia o sustancia que absorbe agua con gran facilidad. Real Academia Española. (2014). Diccionario de la lengua española (23.a ed.). Recuperado el 08 de enero del 2017 de <http://dle.rae.es/?id=KKJDjH1>

Imagen 23. Propiedades de las fibras naturales

Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A. & Bermúdez, D. (2006). Clasificación de las fibras de celulosa basado en la materia prima [Imagen]. Recuperado el 08 de enero del 2017 de <http://learningobjects2006.espol.edu.ec>

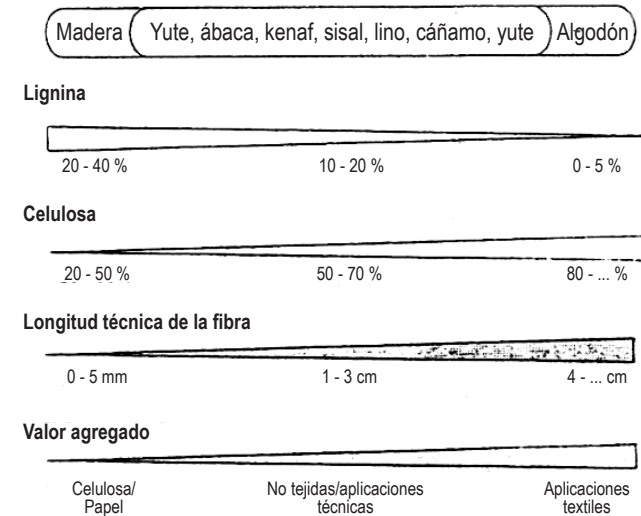


Imagen 24. Zarandeo de la tierra

Zarandeo de la tierra. (s.f.). n/a [Imagen]. Recuperado el 8 de enero del 2017 de <http://www.tierraalsur.com/ecotienda/gde/eco-01.jpg>



Imagen 25. Mezclado para la fabricación de adobes

Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook [Imagen]. Recuperado el 10 de noviembre del 2016 de http://www.unevco.unesco.org/e-forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf

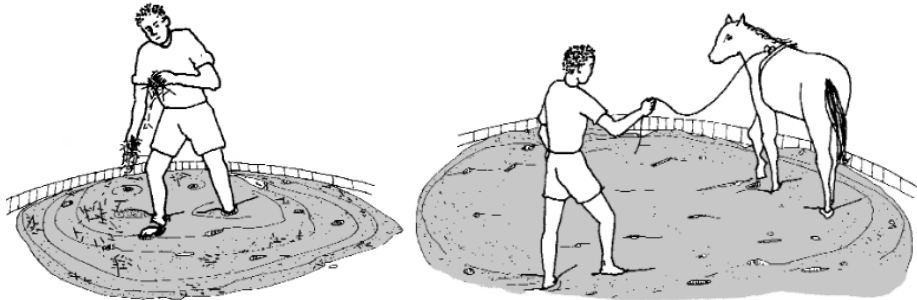


Imagen 26. Moldeado del adobe

Minke, G. (2001). Proceso de elaboración de adobes en Ecuador [Imagen]. Recuperado de: http://www.itacanet.org/esp/construccion/Construccion_tierra.pdf



Imagen 27. Dimensiones del adobe

Arancibia, F. (s/f). Ingeniería sísmica y la construcción civil [Imagen]. Recuperado el 15 de enero del 2017 de <http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com>

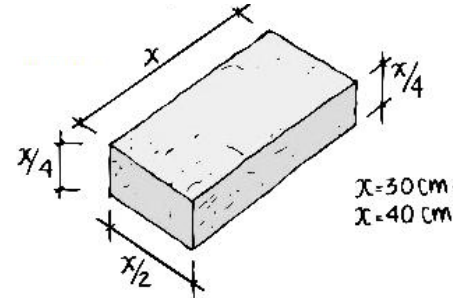
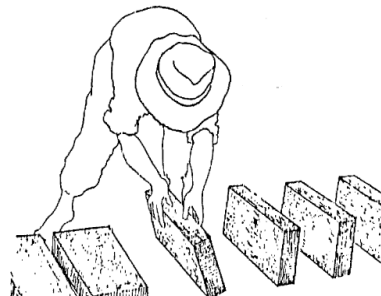


Imagen 28. Secado del adobe

Irala, C., Morales, R., Rengifo, L & Torres, R. (1993). Manual para la construcción de viviendas de adobe [Imagen]. Recuperado de <http://ecocosas.com>



2.1.2. Fabricación de adobes

2.1.2.1. Mezclado

La fabricación de adobes se inicia retirando de la tierra los áridos mayores a 2 cm (Pesántez & González, 2011, p.61) mediante el zarandeo (Imagen 24); luego se bate con agua obteniendo un barro (Imagen 25). A ese barro se incorpora la paja o pasto seco picado, se realiza un primer y segundo batido al cual se cubre y se deja dormir el barro⁴, luego se bate nuevamente (Pesántez & González, 2011), esto permite una mayor integración y distribución del agua entre las partículas de arcilla para activar sus propiedades cohesivas.

Las características físicas y mecánicas de un adobe entre otros factores dependerán de la dosificación de sus componentes; según especialistas en Venezuela debe ser 20% de arcilla y 80% de arena; en Perú se recomienda arcilla del 10-20%, limo 15-25% y arena 55-70%; en México 50 y 70% de arena, y entre 40 y 30% de arcilla; en Chile, arcilla entre 35 y 45% y arena entre el 55 y el 65% (Barreto, 2014, p. 7 y 8). Sin embargo, la dosificación no es una constante y varía de acuerdo al tipo de tierra a utilizar para la fabricación de adobes.

2.1.2.2. Moldeado de adobes

Una vez listo el barro se coloca en moldes limpios y humedecidos para desmoldar con facilidad, los moldes deben estar asentados en el suelo plano y limpio, y la masa debe ser comprimida a mano o con los pies, luego se procede a retirar el molde (Imagen 26). Los moldes serán de madera cepillada y tener las proporciones detalladas en la imagen 27 (Pesántez & González, 2011, p.63).

⁴ dormir el barro es el proceso de humedecer la tierra ya zarandeada (cernida o tamizada para eliminar piedras y terrones), mínimo 48 horas, para activar la mayor cantidad de partículas de arcilla, antes de ser amasada con o sin paja para hacer adobes o morteros (Norma E080 Adobe, 2014).

2.1.2.3. Secado y almacenamiento

Una vez desmoldado el adobe, se procede a su secado entre 20 a 40 días bajo cubierta para evitar un acelerado secado que produce grietas y/o torceduras en el adobe, incluso para un secado homogéneo es conveniente girar los adobes (Imagen 28) (Pesántez & González, 2011, p.63).

Después de una semana los adobes pueden ser apilados (Irala, Morales, Rengifo, & Torres, 1993) manteniendo una traba y de modo que no exceda 1,20 m de altura; los adobes deben seguir cubiertos ya sea por hojas (plátano, palmera, etc.), planchas de zinc, plástico, etc. (Carazas, (s.f.), p.17).

2.1.3. Técnica constructiva para la conformación de muros de adobe

Construir con adobe debe considerar sus características mecánicas y vulnerabilidad a la humedad; por ello se debe construir una edificación sismo-resistente usando una serie de técnicas de construcción y diseño, por esto se debe pretender por una construcción simétrica (Imagen 29) para un mejor comportamiento sismo-resistente (Carazas, (s.f.), p.6).

Además, la edificación requiere cimientos, sobre-cimientos (Imagen 30) y vigas corridas, que protegen de la humedad por capilaridad y distribuyen uniformemente la carga de los muros hacia el suelo (Carazas, (s.f.), p.6); toda cimentación debe tener una profundidad mínima de 60 cm medida a partir del terreno natural y un ancho mínimo de 40 cm (Norma E080 Adobe, 2014).

Para construir los muros de adobe se emplea un mortero de barro con fibras vegetales picadas, y se deja dormir el barro que generalmente está compuesto de la misma tierra que se fabricó los adobes. (Carnevale et al., 2015, p.64).

Las juntas no pueden ser mayores a 2cm, y antes de colocar el barro se humedece-

Imagen 29. Edificación sismo-resistente

Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook [Imagen]. Recuperado el 10 de noviembre del 2016 de http://www.unevoc.unesco.org/e-forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf

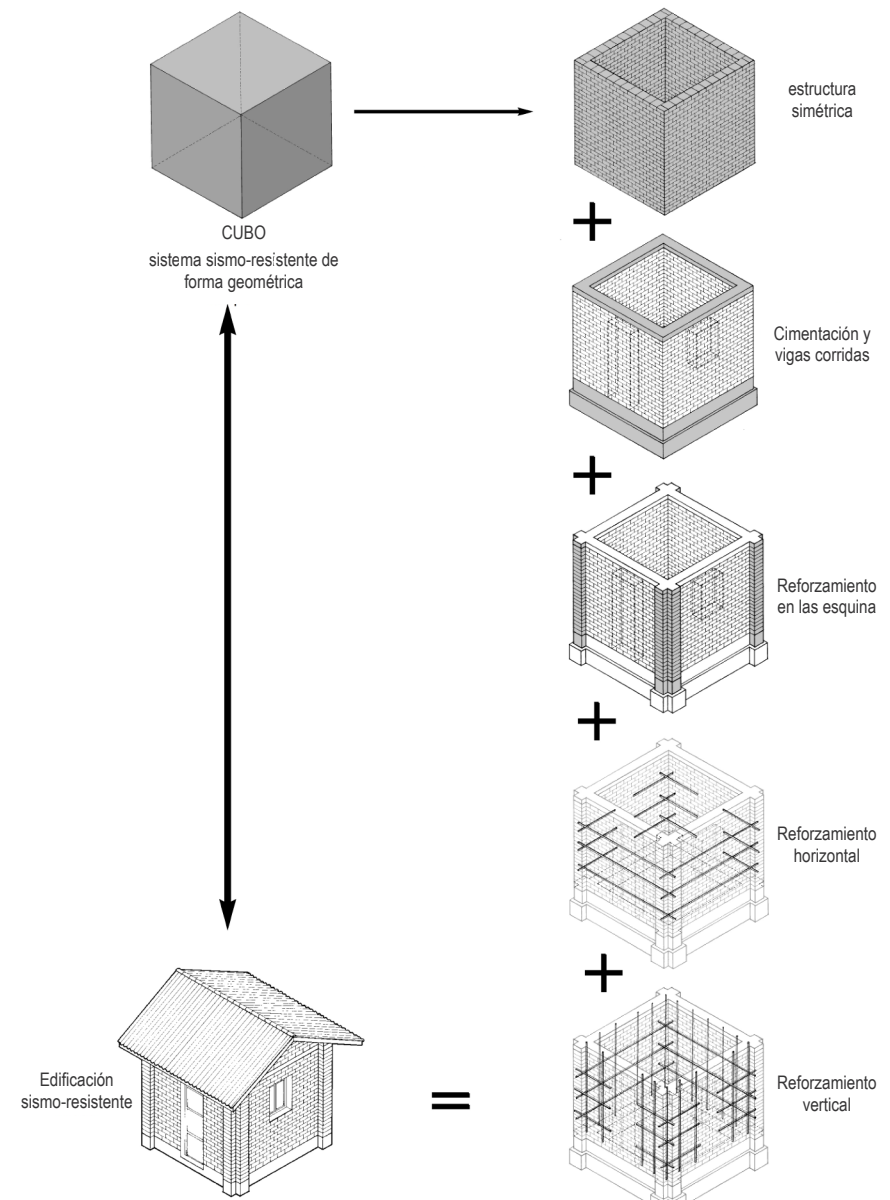


Imagen 30. Cimiento y sobrecimiento

Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook [Imagen]. Recuperado de http://www.unevoc.unesco.org/forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf

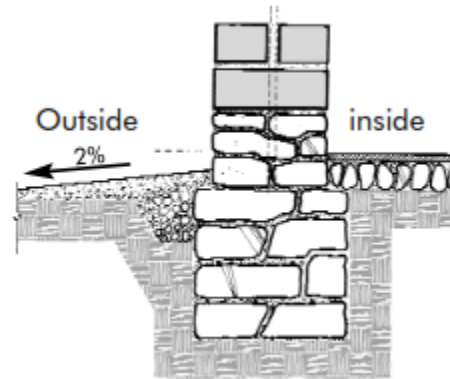
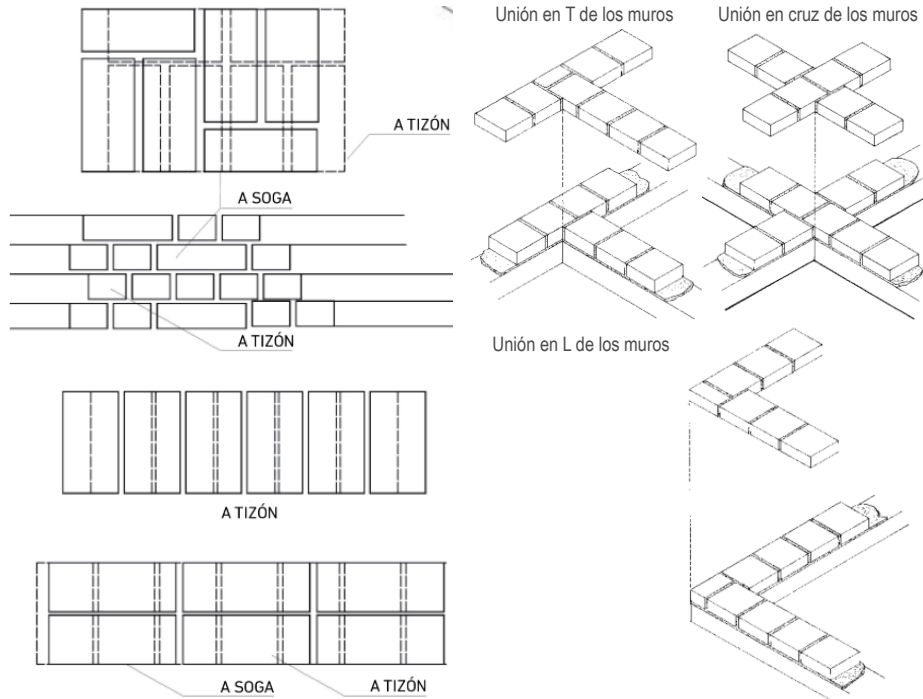


Imagen 31. Tipos de traba de adobe

CRATERre. (2015). Tipos de traba de adobe [Imagen]. Recuperado de <http://craterre.org/diffusion/ouvrages-telechargeables/view/id/7176dde3e64aac5b7f89f98786f82fb8>

Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook [Imagen]. Recuperado de http://www.unevoc.unesco.org/forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf



ce moderadamente los adobes para que se genere una buena adherencia con el mortero. Además, no se puede subir más de 3 hiladas por día, para dar tiempo al barro que se asiente (Carnevale et al., 2015).

Además, la norma NTE E. 080 de Perú recomienda que la humedad del mortero no debe pasar el 20 %, para evitar el agrietamiento, ya que la cantidad de agua es la menor posible para disminuir las probabilidades de agrietamiento. El barro para unir los adobes debe tener la proporción entre paja cortada y tierra en volumen entre 1:1 y 1:2.

También el muro de adobe debe tener traba (Imagen 31) para no perjudicar la estabilidad del muro y su resistencia a compresión; y en cuanto a las dimensiones del muro la norma peruana E-080 recomienda un ancho de muro mínimo de 40cm y alto del muro máximo a 8 veces su ancho, además se debe evitar el secado violento de la albañilería mediante la protección del sol y del viento.

El refuerzo es muy importante para un comportamiento sismo-resistente, se sugiere colocar estructuras de madera horizontal en el interior de los muros como rigidizadores intermedios y vigas collar⁵ se debe colocar en las esquinas (Imagen 29) y a lo largo del muro de manera horizontal y vertical (Carazas, (s.f.), p.6).

En lo que respecta a la apertura de vanos, el dintel debe tener una traba no inferior al 1/4 de la longitud del vano (no menor a 40cm.); se recomienda que los dinteles de puertas y ventanas se encuentren a un mismo nivel, uniendo los vanos con el mismo dintel, mejorando notablemente su estabilidad, y el dintel actúa también como cadena de amarre o soleras (Carnevale et al., 2015).

Finalmente, una vez levantados los muros hasta la altura establecida, se da inicio a la cubierta; en temas sismo-resistente la teja no es una buena opción por su gran peso, por eso se debe optar por materiales de cubierta liviana.

⁵ villas collar son elementos de uso obligatorio que generalmente conectan a los pisos y techos con los muros. Adecuadamente rigidizados en su plano, actúan como elemento de arriestre horizontal. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. (2010). Manual de construcciones/Edificaciones antisísmicas de adobe. Recuperado el 04 de junio del 2017 de http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Manuales_guias/MANUAL%20ADOBE.pdf.

2.1.4. Vulnerabilidad sísmica del adobe

La mampostería no reforzada, como el adobe, ante sismos ha reportado daños y alto número de colapsos, debido a la baja resistencia a tensión de la mampostería que limita fuertemente la capacidad de los muros para resistir cargas laterales (Meli, 1994, p.17), la fisuración comienza en las esquinas laterales de los muros, donde las tensiones de tracción son más altas, se producen así grandes grietas verticales que separan los muros entre sí. Las fuerzas sísmicas laterales que actúan dentro del plano de los muros generan fuerzas cortantes que producen grietas diagonales, que usualmente siguen patrones escalonados a lo largo de las juntas de mortero (Vargas, Blondet & Tarque, 2005, pg. 45).

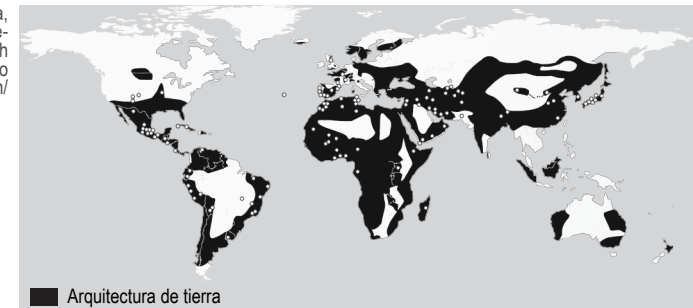
Las grietas diagonales comienzan en las esquinas de las puertas y ventanas debido a la concentración del esfuerzo en estos lugares. Si el movimiento sísmico continúa después de que las paredes de adobe se han agrietado, la pared se rompe en pedazos separados, que pueden colapsar independientemente. En la mayoría de los casos, las paredes de adobe pueden sostener las tensiones sísmicas debido a la sacudida vertical. Sin embargo, durante los terremotos superficiales, las fuertes fuerzas sísmicas verticales pueden debilitar las paredes y los techos y acelerar el colapso estructural (Vargas, 2005, pg.45).

La vulnerabilidad de la mampostería de adobe no reforzada ante sismos, ha provocado que su uso disminuya en las zonas de alta sismicidad (Mapa 4); no obstante, hay ejemplos ancestrales que han superado estas dificultades y que hoy se convierten en paradigmas icónicos de estudio, tales como la Huaca Pucllana perteneciente a la Cultura Lima (Perú), construida hace 1.500 años, un ejemplo que la arquitectura de tierra puede ser sismorresistente.

⁶ fenómenos naturales son aquellos procesos permanentes de movimientos y de transformaciones que sufre la naturaleza y que pueden influir en la vida humana (epidemias, condiciones climáticas, desastres naturales, etc); tales como sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, movimientos en masas, descenso de temperatura (heladas y friajes), erosión de suelos, etc. (CENEPRED, 2013, p.8) (Programa Regional de Meteorología / IANIGLA - CONICET, s/f.)

Mapa 4. Arquitectura en tierra alrededor del mundo vs mapa sísmico global

De Sensi B. (2003). Terracruda, la diffusione dell'architettura di terra – Soil, Dissemination of Earth Architecture [Mapa]. Recuperado de: <http://www.terracruda.com/architetturadiffusione.htm>



Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP). (1999). Global Seismic Hazard Map [Mapa]. Recuperado de: <https://mitnse.files.wordpress.com/2011/09/globalseismic-hazardmap.jpg>

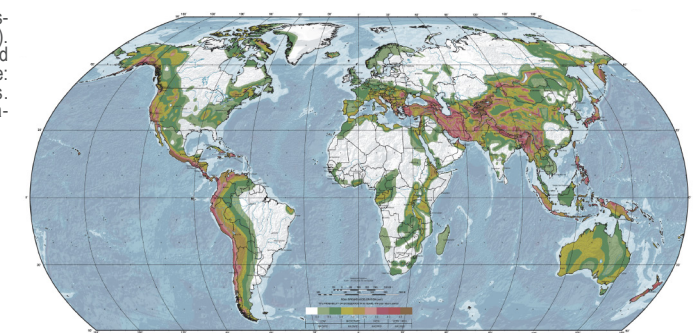


Gráfico 3. Sistema constructivo de las edificaciones de mampostería no reforzada en el centro histórico de Cuenca

Jiménez, Yépez, García, Peñafiel, Chérrez, Loaiza, Bermeo. (2002). Tipologías constructivas en Centro Histórico (MNR) [Gráfico]. XV Jornadas nacionales y primeras binacionales de ingeniería estructural, Loja – Ecuador. Pg. 131 – 155.

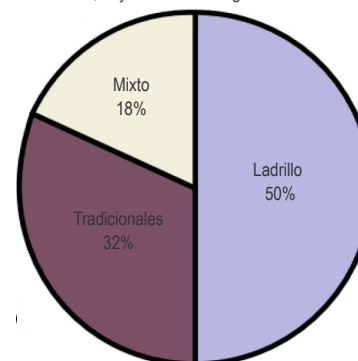


Imagen 32. Terremoto de Ecuador y Colombia del año 1906

GuybrushThreepwood. (2015). n/a [Imagen]. Recuperado el 18 de diciembre del 2016 de http://www.youbioit.com/es/article/25400/terremoto-de-ecuador-y-colombia-del-ano-1906?size=_original



Gráfico 4. Vulnerabilidad de las Edificaciones de Mampostería No Reforzada en Cuenca, Ecuador

Jiménez, Yépez, García, Peñafiel, Chérrez, Loaiza, Bermeo. (2002). Funciones de vulnerabilidad para las edificaciones de MNR (Cuenca) [Gráfico]. XV Jornadas nacionales y primeras binacionales de ingeniería estructural, Loja – Ecuador. Pg. 131 – 155.

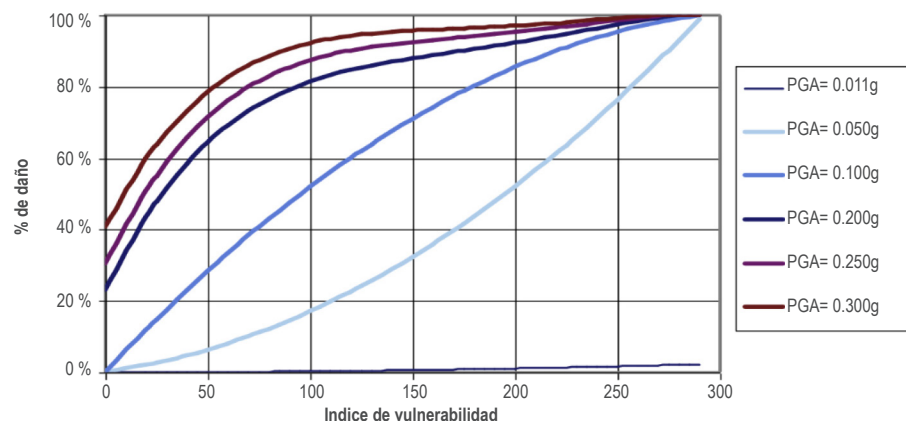
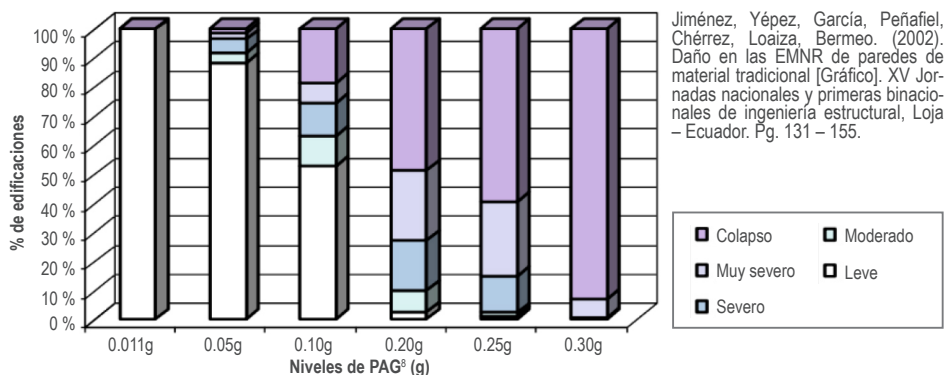


Gráfico 5. Daño en las Edificaciones de Mampostería No Reforzada (EMNR) de paredes de material tradicional como el adobe en Cuenca, Ecuador



Jiménez, Yépez, García, Peñafiel, Chérrez, Loaiza, Bermeo. (2002). Daño en las EMNR de paredes de material tradicional [Gráfico]. XV Jornadas nacionales y primeras binacionales de ingeniería estructural, Loja – Ecuador. Pg. 131 – 155.

2.1.5. Sismicidad del Ecuador

Ecuador se encuentra ubicado en el borde oriental del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico; siendo el proceso de subducción⁷ de la Placa de Nazca en la Placa Sudamericana la principal fuente de sismos tectónicos en el Ecuador (Jiménez, Yépez, García, Peñafiel, Chérrez, Loaiza & Bermeo. 2002, pg.132), registrando uno de los 10 terremotos más fuertes de la historia, ocurrido en las costas del Pacífico entre Ecuador y Colombia el 31 de enero de 1906 con una magnitud de 8,8° en la escala Richter que además provocó un tsunami (Imagen 32) (Los terremotos más fuertes de la historia. *20 minutos*. 2016).

Ante las condiciones sísmicas de Ecuador, Cuenca no ha sufrido sismos destructores en el transcurso del siglo XX, sin embargo, ha tenido sismos importantes en 1758, en febrero de 1856 y 1913 (Jiménez et. al, 2002, pg. 135).

Por ello en el 2002 un estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la zona urbana de Cuenca, Ecuador, mediante técnicas de simulación estudiaron aproximadamente 56 mil edificaciones categorizadas como Edificaciones de Mampostería No Reforzada (EMNR) (Gráfico 3), o edificaciones de hormigón armado (EHA). Se determinó que las EMNR, están construidas con sistemas constructivos con poco potencial sismorresistente, de hecho alrededor del 52% de las edificaciones cuentan con insuficiente grado de confinamiento (Jiménez et. al, 2002, pg. 135). Además según el estudio las EMNR de materiales tradicionales como el adobe exhiben daños severos en todos los escenarios de daño sísmico y para los sismos severos (0.20g, 0.25g y 0.30g) han colapsado en su gran mayoría (Gráfico 4 y 5) (Jiménez et. al, 2002, pg. 132-150).

⁷ subducción: proceso donde parte de la corteza oceánica, individualizada en una placa litosférica, se sumerge bajo otra placa de carácter continental. Las placas se separan o se aproximan unas a otras arrastradas por las corrientes convectivas generadas bajo ellas (UCLM. (s/f). (n.a). Recuperado el 14 de marzo del 2017 de <https://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/subduccion.html>).

⁸ PGA: es la aceleración máxima del suelo y está relacionada con la fuerza de un terremoto en un sitio determinado. Es variable de un lugar a otro y por medio de ella se puede identificar la mayor o menor fuerza del movimiento sísmico al observar geográficamente su distribución. Entre mayor es este valor, mayor es el daño probable que puede causar un sismo. (Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (s/f). (n.a). Recuperado el 18 de marzo del 2017 de http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/inicio/faq/proyecto.html).



2.2. Principales modelos utilizados en el análisis numérico de mamposterías como el adobe

Gran parte del centro histórico de Cuenca se encuentra construido con un sistema de mampostería portante, los cuales en muchos casos no fueron diseñados y construidos para resistir acciones sísmicas, es por ello que la evaluación de la vulnerabilidad de estas edificaciones es de suma importancia, cabe señalar que el análisis de la mampostería es compleja debido a su falta de homogeneidad y estandarización de las piezas que lo componen (Quinteros, 2014), su comportamiento estructural está ligada a la interacción entre las unidades y juntas de mortero las cuales actúan como plano de debilidad, lo que provoca que la mampostería presente distintos comportamientos ante diferentes cargas (Lourenco, 1996).

En consecuencia es trascendental contar con un análisis estructural que permita la predicción del comportamiento de la mampostería ante cargas, este es el caso de los modelos numéricos que permiten simular experimentos, sin embargo estos modelos deben ser nutridos de información experimental sobre las propiedades mecánicas de los materiales y ser validados mediante resultados experimentales (Quinteros, 2014).

2.2.1. Métodos para el cálculo de la mampostería

Los modelos numéricos destinados al estudio del comportamiento de la mampostería tienen distintos niveles de complejidad y coste computacional, esto se debe a que son muchos los parámetros que pueden ser estudiados dentro de ellos, por lo que según su nivel de detalle y precisión se dividen en micro-modelos y macro-modelos que están basados en la utilización del Método de Elementos Finitos utilizado para el cálculo del comportamiento de la mampostería (Quinteros, 2014).

2.2.1.1. Micro-modelos

Los micro-modelos analiza la mampostería mediante el modelado de los componentes individuales (adobe) conectados mediante mortero (Lourenco, 1996) en su posición real en la mampostería.

Dependiendo del nivel de detalles que se desee obtener en el análisis este método se divide en dos estrategias de modelado: micro-modelos detallados y micro modelos simplificados (Lourenco, 1996) (Quinteros, 2014).

1. Micro-modelos detallados: los elementos que componen la mampostería (mortero y adobe) son estudiados a detalle, para así poder determinar de forma precisa la interacción entre ellos, el modelado representa el adobe y el mortero mediante elementos finitos de comportamiento continuos, mientras que el comportamiento de la interfaz mortero-adobe (junta horizontal) se representa con elementos finitos continuos (Lourenco, 1996) (Imagen 33).

2. “Micro-modelos simplificados: cada unión que consta de mortero y las dos interfaces de unidad mortero se agrupan en una interfaz promedio, mientras las unidades se expanden para mantener la geometría sin cambios, las unidades expandidas están simplificadas a través de elementos de comportamiento continuo mientras la interfaz adobe-mortero se agrupan en elementos discontinuos” (Lourenco, 1996) (Imagen 34).

Imagen 33. Micro-modelo detallado

Propia

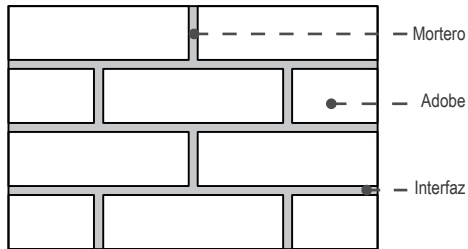


Imagen 34. Micro-modelo simplificado

Propia

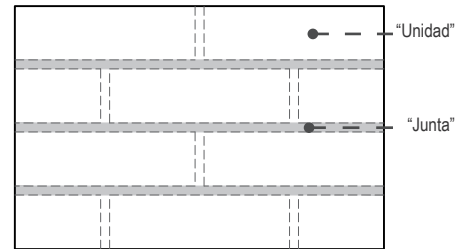
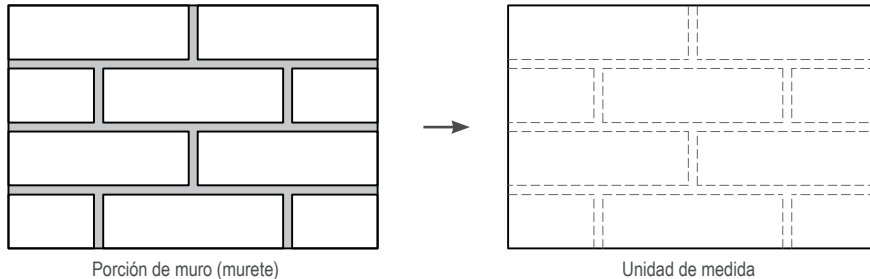


Imagen 35. Macro-modelo

Propia

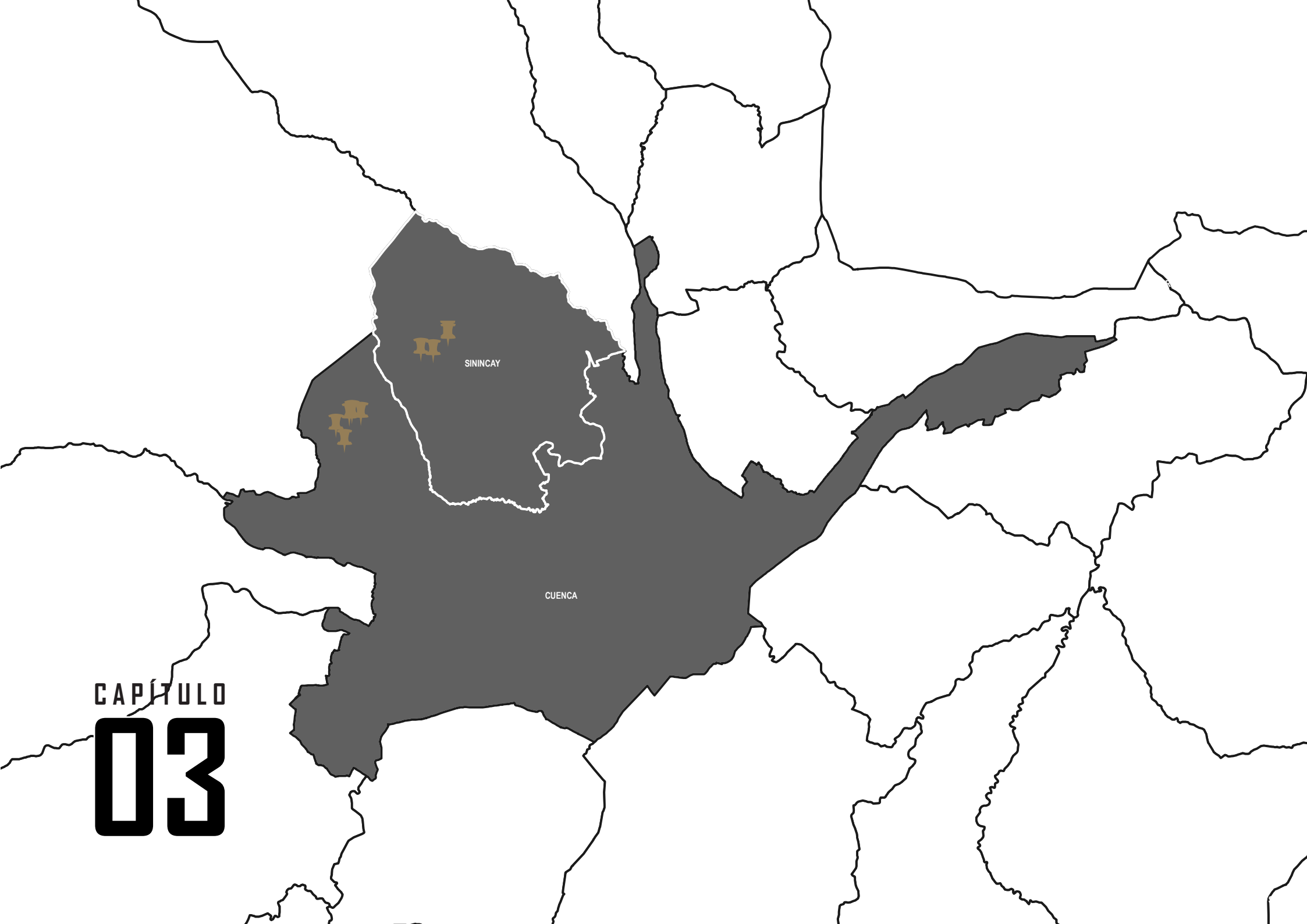


2.2.1.2. Macro-modelos

En este método, el adobe, el mortero y la interfaz estarían representados por un mismo elemento finito siendo una sola unidad de medida (macro-elemento), es decir que no se hace distinción entre las unidades de adobe y las articulaciones de mortero, tratando a la mampostería como un material anisotrópico homogéneo (Lourenco, 1996) (Imagen 35).

Lourenco (1996) menciona que ninguno de estos métodos de análisis de la mampostería prevalece sobre otro, debido a que cada una de ellas tiene un enfoque diferente en el estudio de la mampostería, el micro-modelo es empleado para poder entender de forma detallada una parte específica de la mampostería lo que supone un alto costo computacional, es por ello que se emplea mayormente en detalles estructurales como vanos de puerta y ventanas, mientras que los macros-modelos se utilizan cuando la estructura está compuesta de paredes sólidas y de gran envergadura donde las tensiones a lo largo de ellas se mantendrían uniformes, este análisis reduce drásticamente los tiempos y requerimientos computacionales que tomaría modelar toda una estructura.

Por esta razón en esta tesis se empleará el método de macro-modelo, que es el método útil en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de adobe en Cuenca.



SININCAY

CUENCA

CAPÍTULO

03

Obtención de las propiedades físicas y mecánicas del adobe

Introducción

El presente capítulo presenta la metodología empleada con el fin de obtener las propiedades físicas y mecánicas del adobe en el cantón Cuenca.

Se argumenta la ubicación del área de estudio y la selección de los casos de estudio, descubriendo las condiciones presentes en la fabricación de adobe en los casos de estudio y la extracción de los mismos en las edificaciones patrimoniales, también se expone las normativas usadas para el análisis en el laboratorio del adobe como unidad y murete.

Finalmente se presentan los resultados y análisis de los mismos determinando las propiedades físicas y mecánicas de la unidad y murete de adobe.

3.1. Selección del área de estudio

Imagen 36. Muestreo de bola de nieve

Muestreo de bola de nieve. (s.f.). (n/a). Universo fórmulas [Imagen]. Recuperado el 02 de mayo del 2017 de <http://www.universoformulas.com/estadistica/inferencia/muestreo-bola-nieve/>

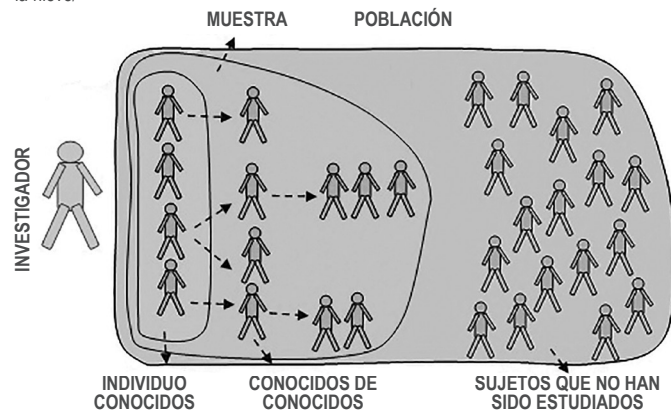
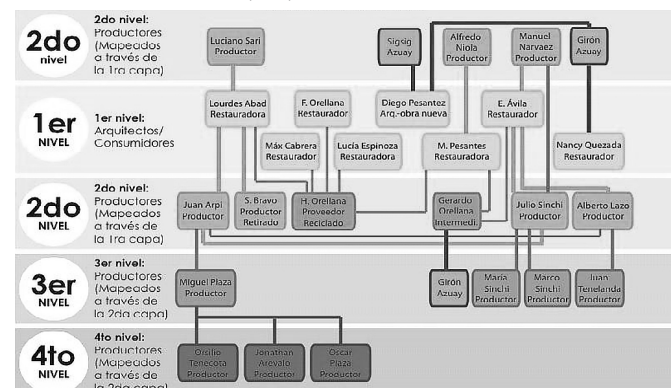


Imagen 37. Método de bola de nieve, para identificar los productores de adobe

vllr Ciudad Patrimonio Mundial. (2016).



La ciudad de Cuenca tiene una única investigación sobre la ubicación de productores de adobe, realizada por el proyecto vllr Ciudad Patrimonio Mundial (vllr-CPM) de la Facultad de Arquitectura - Universidad de Cuenca.

El proyecto vllrCPM empleó la técnica de muestreo de bola de nieve (Imagen 36), consistió en un primer nivel encuestar a arquitectos vinculados a la construcción con tierra para identificar productores y/o proveedores que les dotan de adobes, a quienes entrevistaron en un segundo nivel, y repitieron el proceso hasta llegar al cuarto nivel de profundidad (Imagen 37), encontrando 12 productores de adobe en Cuenca, principalmente en la parroquia de Sinincay.

3.1.1. Fábricas de adobes (adoberas)

El mapa muestral de fábricas de adobe o adoberas en Sinincay del proyecto vllrCPM, fue verificado en campo, logrando constatar ocho de las doce fábricas de adobes registradas, las demás no producían adobes, además de aportar en la investigación al encontrar una fábrica de adobes no registrada (Mapa 5) (Tabla 3).

Cuatro adoberas están en Sinincay, de las cuales se analizará la adobera 2 y 3 que tienen adobes en stock mientras las otras dos producen adobes por pedido de grandes cantidades. Además se estudia una de las fábricas de adobe más cercanas al área de influencia de Sinincay, con adobes en stock, ubicada en la ciudad de Cuenca, la adobera 1.



3.1.1.1. Fabricación de adobes en las adoberas seleccionadas

A través de una entrevista (Anexo 1) se obtuvo información sobre la producción de adobe en las 3 fábricas seleccionadas, con el objetivo de verificar si la producción de adobe se realiza conforme a las recomendaciones técnicas del capítulo 2 de esta investigación.

Los fabricantes de adobera 1 y adobera 2 producen adobes en base al conocimiento empírico que proviene de sus ancestros, a excepción de la adobera 3 que producían ladrillos y aprendieron hacer adobes de manera intuitiva, ante la falta de conocimiento técnico ninguna de las adoberas proporciona los materiales como arcilla, áridos, agua y fibras para la producción de adobes.

La tierra usada en las tres fábricas proviene de la misma fábrica y no es zarandeada, la fibra usada es la paja. Y el agua para formar el barro, contiene materia orgánica, contrario a las recomendaciones técnicas de que detallan en el capítulo 2, en la adobera 1 y 2 proviene del río o lluvia, además en la adobera 3 reciclan el agua provienen del uso doméstico o aguas grises.

En la fabricación de adobes, una vez hecho el barro en la adobera 1 y 3 dejan dormir el barro, mientras en la adobera 2 no se realiza esa práctica, afectando en la integración de todas las partículas de la tierra con el agua. Luego el barro se vuelve a batir y se coloca en los moldes donde es compactado como se lo realiza en las tres adoberas. En el proceso de secado, en las tres fábricas de adobe tan solo cubren del sol a los adobes y no del viento como también se recomienda para evitar el secado acelerado, en consecuencia, los adobes pueden presentar torsión y fisuras (Imagen 38). Luego para un secado uniforme, en la adobera 1, 2 y 3 se giran los adobes, una práctica correcta, por último, los fabricantes dejan secar los adobes mínimo un mes como lo precisa la norma peruana e incluso los dejan más tiempo.

En definitiva, la adobera 1 (Imagen 39) y 3 (Imagen 40) cumplen con el 56% y la adobera 2 (Imagen 41) con el 44% de buenas prácticas en la fabricación de adobes (Tabla 4).

Tabla 3. Características generales de los productores de adobe (adoberos) en Sinincay

Código	Propietario	Parroquia	Longitud	Latitud	Productividad
Adobera 1	Aida Sinchi	Cuenca	79° 2' 34.51" O	2° 51' 38.42" S	stock
Adobera 2	Hernán Zenteno	Sinincay	79° 1' 29.73" O	2° 50' 39.98" S	stock
Adobera 3	Manuel Narvaez	Sinincay	79° 1' 30.00" O	2° 50' 38.00" S	stock
Adobera 4	German Contreras	Cuenca	79° 2' 46.49" O	2° 51' 58.63" S	stock
Adobera 5	Zoila Montalvan	Cuenca	79° 2' 40.91" O	2° 51' 35.90" S	stock
Adobera 6	Antonio Poluche	Sinincay	79° 1' 41.00" O	2° 50' 52.00" S	bajo pedido
Adobera 7	Manuel San Martin	Cuenca	79° 2' 40.91" O	2° 51' 35.90" S	bajo pedido
Adobera 8	Geovani Contreras	Cuenca	79° 2' 46.49" O	2° 51' 58.63" S	bajo pedido
Adobera 9	Mario Patín	Sinincay	79° 1' 45.8112" O	2° 50' 50.661" S	bajo pedido

Propio

Tabla 4. Buenas practicas en la fabricación de adobes

Procedimiento	Adobera 1	Cumplimiento Adobera 2	Adobera 3
Zarandeo de la tierra.	NO	NO	NO
Agua sin materia orgánica.	NO	NO	NO
Proporción de los materiales.	NO	NO	NO
Dormido del barro.	SI	NO	SI
Mezcla compactada.	SI	SI	SI
Secado, cubierto del sol.	SI	SI	SI
Secado, cubierto del viento.	NO	NO	NO
Secado, homogéneo.	SI	SI	SI
Secado mínimo de 28 días.	SI	SI	SI
Cantidad	5/9	4/9	5/9
Porcentaje	56%	44%	56%

Propio

Imagen 38. Torsión y fisuras en el adobe
Propio

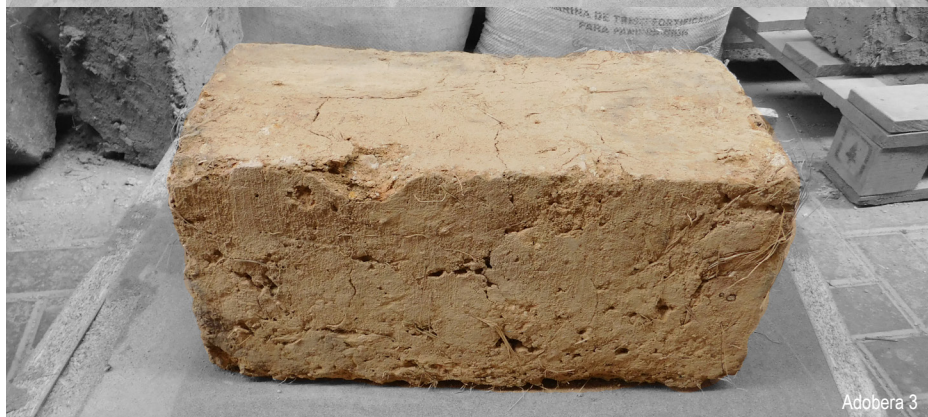


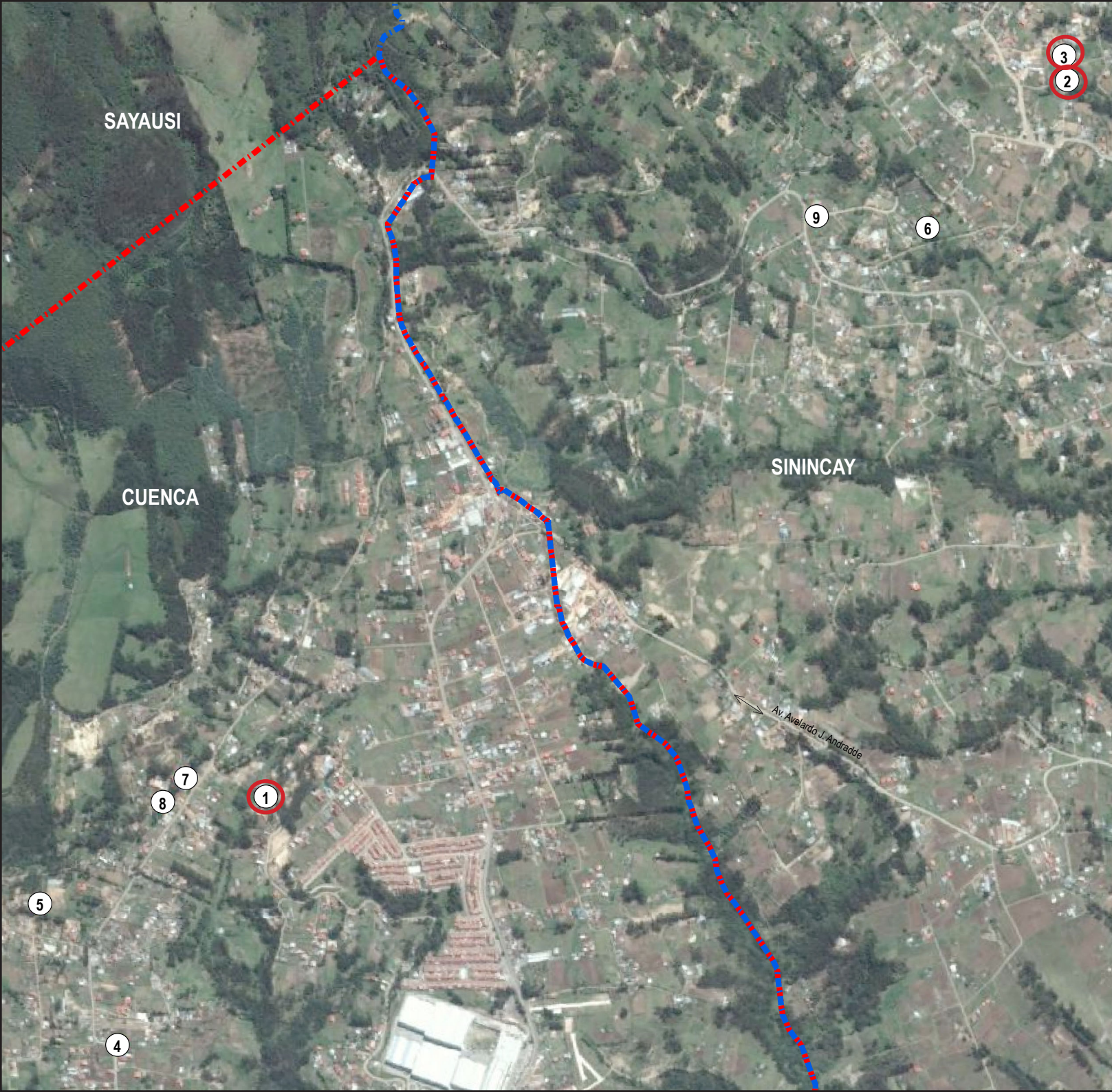
Imagen 39. Fábrica de adobe 1
Propio



Imagen 40. Fábrica de adobe 2
Propio



Imagen 41. Fábrica de adobe 3
Propio

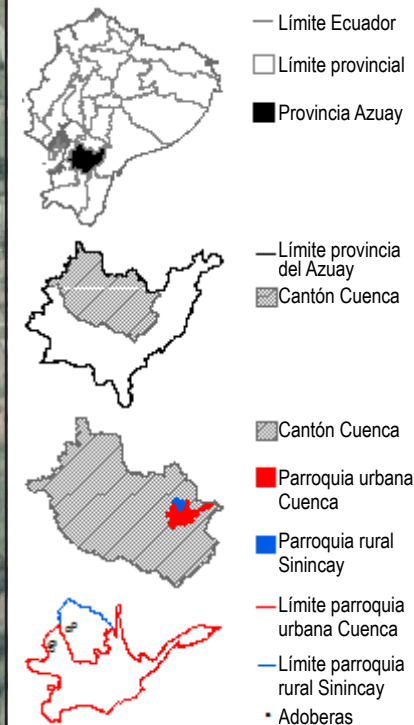


Mapa 5. Área de estudio

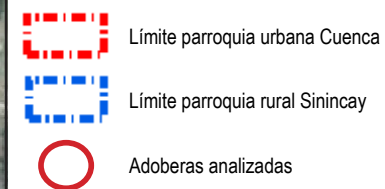
Fuente: SNI, s/f. Google Earth, 2017.
Elaboració: Propia

UBICACIÓN

División política de Ecuador



SIMBOLOGÍA



- | | |
|-------------|-------------|
| ① Adobera 1 | ⑥ Adobera 6 |
| ② Adobera 2 | ⑦ Adobera 7 |
| ③ Adobera 3 | ⑧ Adobera 8 |
| ④ Adobera 4 | ⑨ Adobera 9 |
| ⑤ Adobera 5 | |

ESC

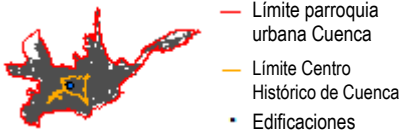
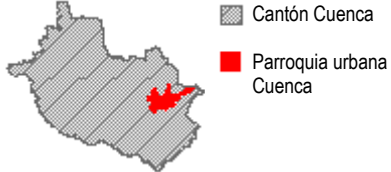
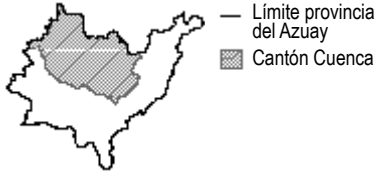
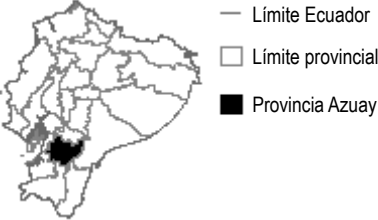
1:13000

Mapa 6. Edificaciones de estudio

Fuente: GAD Cuenca, s/f. Google Earth, 2017.
Elaboració: Propia

UBICACIÓN

División política de Ecuador



SIMBOLOGÍA

- (E1) Edificación patrimonial 1
(Casa Moreno)
- (E2) Edificación patrimonial 2
(Casa Palacios Abad)



3.1.2. Edificaciones patrimoniales

Se ha obtenido permiso para extraer adobes de dos edificaciones patrimoniales ubicadas en el centro histórico de Cuenca; la Casa Moreno (Imagen 42) perteneciente a la Universidad de Cuenca y la Casa Palacios Abad propiedad del municipio de Cuenca (Mapa 6).

La Casa Moreno, denominada por esta investigación como edificación 1, inmueble que pertenece a la Universidad de Cuenca, está ubicado en un barrio emblemático de la ciudad “El Vado”, en el margen del río Tomebamba, sector conocido también como “El Barranco”. Según las investigaciones realizadas por la Universidad de Cuenca, el sector era una zona de ingreso a la ciudad de personas que venían del sur de Ecuador se quedaban y atravesaban el río para ingresar a la Cuenca antigua. Actualmente el sector es un mirador de la ciudad, cerca del inmueble existen diversas edificaciones de carácter artesanal como talleres de sombreros de paja toquilla, etc.

Dentro de la edificación se reconoce 4 etapas de construcción todas construidas en el siglo XX. No existe un registro preciso de las fechas, pero se estipula su construcción inició en 1930. Se caracteriza por sus entresijos de gran altura, su fachada es netamente de ladrillo artesanal con arquerías y balcones de hierro forjado (Imagen 42) y muros de adobe, bahareque y mampostería de ladrillo. La Casa Moreno cuya restauración se encontraba en la etapa final, de la cual solo se obtuvieron adobes nuevos, fabricados con la tierra reciclada de antiguos adobes de la propia edificación (Imagen 45).

Con respecto a la Casa Palacios Abad, según la información proporcionada por el Departamento de Áreas Históricas del Municipio de Cuenca al cual pertenece el inmueble, denominada edificación 2, es el inmueble más antiguo en torno a la actual plaza de El Otorongo en la ciudad de Cuenca, que data de aproximadamente inicios del siglo XX (antes de 1920) y tiene un alto valor patrimonial por ser testimonio de la forma de vida de la clase trabajadora de aquel entonces.

La casa no tiene elementos ni espacios suntuosos o vistosos, sus cualidades

Imagen 42. Edificación 1 (Casa Moreno)
Propio



Imagen 43. Edificación 2 (Casa Palacios Abad)
Propio



Imagen 44. Extracción de adobes edificación 2
Propio



arquitectónicas radican en la sencillez de los elementos que lo componen, y por las técnicas constructivas tradicionales con raíces precolombinas y coloniales con las que fue construida.

3.1.2.1. Extracción de adobes de la edificación 2

Se accedió a adobes antiguos (Imagen 43) que formaban parte del cerramiento de la edificación 2 ya que iban a ser derrocados, no fue posible extraer adobes del interior de la vivienda porque su derrocamiento no coincidió con el cronograma de esta investigación. Para extraer los adobes primero se procedió a quitar el revoque, empañete y encalado con la ayuda de una espátula (Imagen 44), con mucho cuidado de no dañar el adobe, posterior a ello con la ayuda de un cincel se procedió a desprender adobe por adobe (Imagen 44).

Imagen 45.
Casos de estudio
Propio





3.2. Selección de normativas de construcción con adobe

Ecuador siendo uno de los 150 países con edificaciones construidas en tierra inscritas en la lista de patrimonio mundial (WHEAP, 2012) y registrando nuevas edificaciones construidas con tierra cruda año tras año según la encuesta anual de edificaciones del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), es indispensable que cuente con una normativa para el diseño y construcción con tierra.

Por ello en la última actualización de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC - 2015), en el apartado de viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros, incluye directrices generales para el diseño arquitectónico de edificaciones con muros portantes de adobe, no así para el diseño estructural que se rige al Código de Construcción con Adobe del Perú, Norma E.080 para construcción con adobe (NEC-SE-VIVIENDA parte 2, 2015, pg. 26).

Perú al igual que Ecuador se encuentran ubicados en el borde oriental del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico (Jiménez, Yépez, García, Peñafiel, Chérrez, Loaiza & Bermeo. 2002, pg.132), y la norma peruana referida, establece requisitos y criterios técnicos de diseño y construcción para edificaciones de tierra, mediante una filosofía de diseño que define un comportamiento estructural adecuado para conferir seguridad y durabilidad a las edificaciones de tierra ante fenómenos naturales y antrópicos (Norma E.080 Diseño y construcción con tierra reforzada, 2017, pg.4), por ser desarrollada en un contexto geográfico semejante al nuestro es una norma aplicable en Ecuador. Sin embargo, la norma peruana no considera algunos ensayos físico y mecánicos para los cuales se aplicó la norma estadounidense AASHTO y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) que hacen referencia a otros materiales las cuales fueron adaptadas al adobe (Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Formato de los adobes de los casos de estudio

Propia

Espécimen	Ancho (a) [mm]	Largo (b) [mm]	Alto (h) [mm]
Adobera 1	192,8	395,1	134,2
Adobera 2	202,5	402,5	183,8
Adobera 3	202,8	411,3	171,5
Edificación 1	192,8	395,1	134,2
Edificación 2	244,3	498,8	135,0

Tabla 6. Normas, procedencia y tamaño de muestra

Propia

	Nombre de ensayo	Norma/País	Tamaño de muestra	Cant. de muestra
Ensayos físicos	Preparación de la muestra	NTE INEN 688:1982 / Ecuador	variable	-
	Contenido de humedad	NTE INEN 862:2011 / Ecuador	300 gr	3
	Contenido de materia orgánica (ignición)	AASHTO T-267-86 / EEUU	100 gr	3
	Granulometría	NTE INEN 696:2011 / Ecuador	1000 gr (mortero)	3
		NTE INEN 0697:2010 / Ecuador	2000 gr (adobe)	
	Límite líquido	NTE INEN 0691:1982 / Ecuador	variable	3
Ensayos mecánicos	Límite plástico	NTE INEN 0692:1982 / Ecuador	variable	3
	Resistencia a la compresión adobe	E. 080 / Perú	10x10x10cm	6
	Resistencia a la compresión mortero	NTE INEN 0488: / Ecuador	5x5x5cm	6
	Resistencia a la flexión adobe	NTE INEN 2554: / Ecuador	Unidad de adobe	6
	Resistencia a la compresión murete	E. 080 / Perú	3a x b	4
	Resistencia a tracción indirecta murete	E. 080 / Perú	57 x 57 x e _m	4

a = ancho del adobe

b = lado mayor del adobe

e_m = espesor del muro

Eddy Aguilar Alberca - Rosa Quezada Zambrano

Imagen 46. Ensayo de granulometría de adoberas y edificaciones patrimoniales

Propia

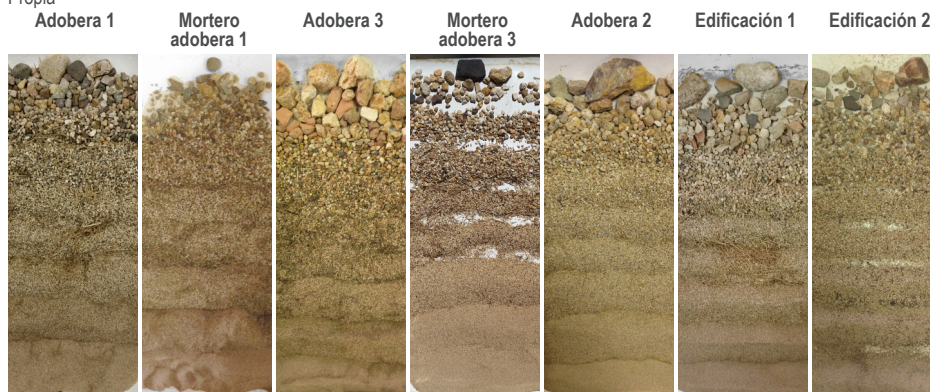


Imagen 47. Ensayo para determinar el límite líquido (casa grande) de adoberas y edificaciones patrimoniales

Propia

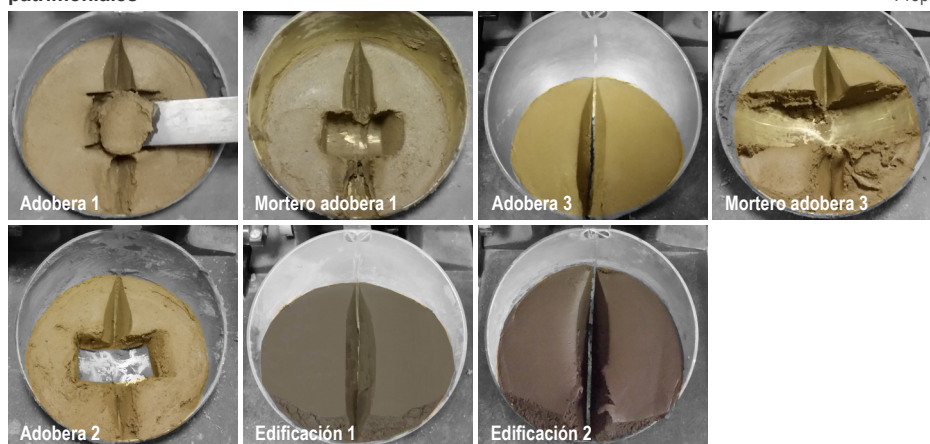
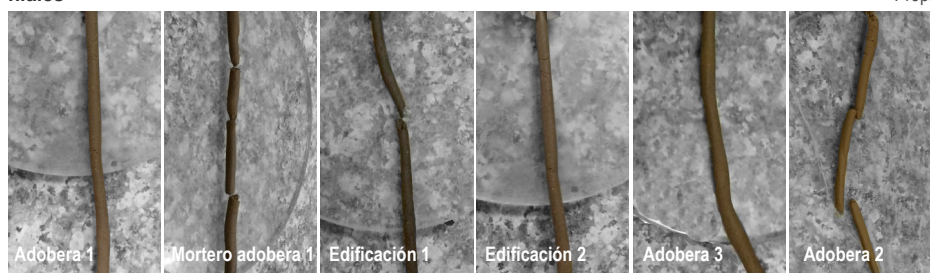


Imagen 48. Ensayo para determinar el límite de plasticidad de adoberas y edificaciones patrimoniales

Propia



3.3. Caracterización física del adobe

3.3.1. Clasificación del suelo

Actualmente, existen dos elaborados sistemas de clasificación de suelo, se trata del American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En Estados Unidos, el sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos de carreteras, mientras que los ingenieros geotécnicos prefieren utilizar el Sistema Unificado (Braja, 2015) el cual se aplica en esta investigación ya que da mayores detalles en cuanto a los áridos de grano fino que son predominantes en el adobe.

Según Braja (2013) para una clasificación apropiada con el sistema SUCS, se debe conocer algo o todo de la siguiente información:

1. Porcentaje de grava, es decir, la fracción que pasa la malla de 76,2 mm y es retenida en la malla No. 4.
2. Porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa la malla No. 4 y es retenida en la malla No. 200.
3. Porcentaje de limo y arcilla, es decir, la fracción de finos que pasan la malla No. 200.
4. Coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de curvatura (C_c).
5. Límite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla No. 40.

Para obtener dicha información se han realizado los ensayos de granulometría (Imagen 46), límite líquido (Imagen 47) y límite plástico (Imagen 48), obteniendo la información suficiente para clasificar el suelo usado en la fabricación de los



adobes estudiados. No se determinaron los coeficientes de uniformidad y coeficientes de curvatura ya que para suelos con alto porcentaje de áridos finos que pasa la malla No. 200 (mayor al 5%) (Tabla 7) esos coeficientes no son requeridos para clasificar este tipo de suelo.

Los ensayos de granulometría, límite líquido y límite plástico se realizaron según la Norma Técnica Ecuatoriana (Anexo 2), repitiendo cada ensayo 3 veces en diferentes muestras obtenidas mediante cuarteo de cada adobera y edificación patrimonial cuyos resultados se muestran a detalle en los anexos de la adobera 1 (Anexo 3), adobera 2 (Anexo 4), adobera 3 (Anexo 5), edificación 1 (Anexo 6) y edificación 2 (Anexo 7).

En resumen, la distribución de tamaños de partículas (Tabla 7) (Gráfica 6) de los adobes de todos los casos de estudio muestran alto contenido de finos, es decir el suelo que pasa la malla No. 200, estando en un rango entre 38% a 70% de limos y arcillas.

En cuanto al contenido de la sumatoria de arcillas y limos la adobera 1 y mortero de la adobera 3 cumple la norma HB 195 (Tabla 10), la adobera 2 cumple con los parámetros de las normativas HB 195, NBR 13553 y E.080 (Tabla 10), la adobera 3 y edificación 1 cumple con las normas HB 195 y NBR 13553, la edificación 2 y mortero de la adobera 1 no cumple con ningún parámetro porque supera el 70% de finos.

En cuando al contenido de arenas (suelo que pasa la malla No. 4 y es retenido en la malla No. 200) que oscila entre 27% a 47% en los casos estudiados, cumpliendo con la norma australiana HB 195. El tamaño mínimo de grava en la adobera 2 y 3 no cumplen con el parámetro la norma HB 195 como se detalla en la tabla 10.

En resumen la distribución granulométrica del adobe de los casos de estudio del cantón Cuenca tienen un promedio de 54,6% de arcillas, 37,6% de arena y 7,8% de grava; en los dos casos de estudio del mortero (Tabla 8) (Gráfica 6) contienen aproximadamente 69,3% de limos y arcilla, arena 30,3% y 0,4% de grava.

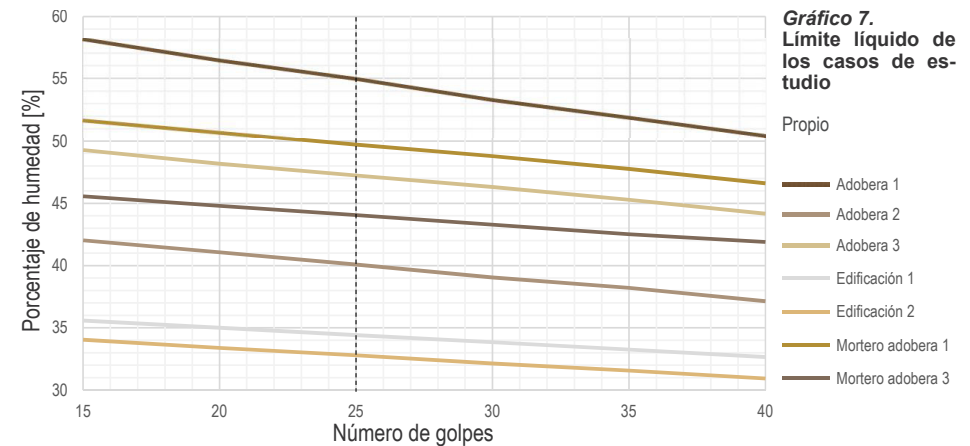
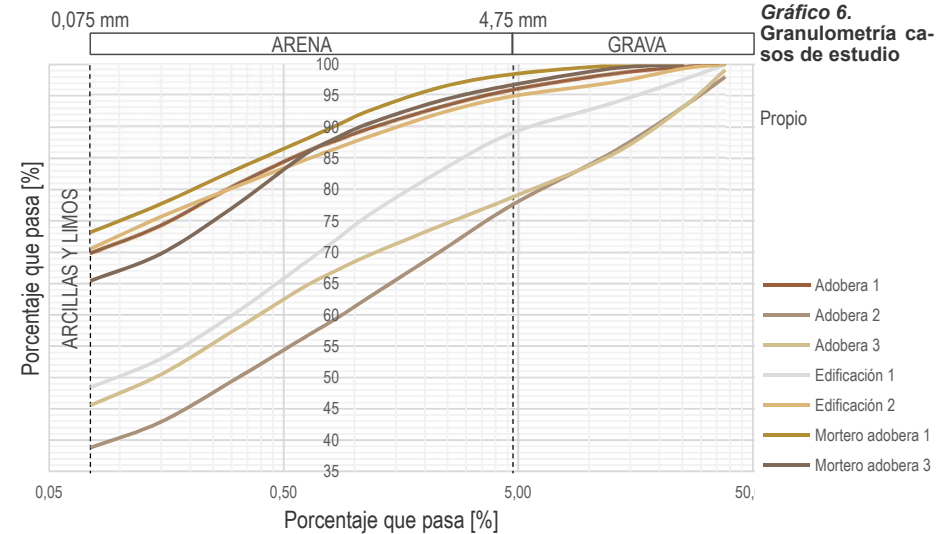


Gráfico 8. Límite plástico de los casos de estudio

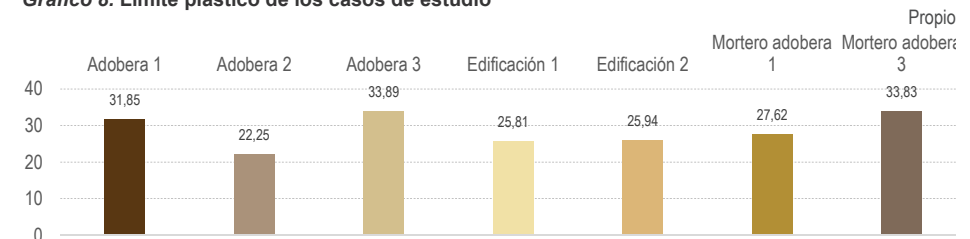




Tabla 7. Clasificación SUCS según el tamaño de las partículas del adobe

Propia

Tamiz [#]	Abertura tamiz [mm]	Adobera 1 (Anexo 3)			Adobera 2 (Anexo 4)			Adobera 3 (Anexo 5)			Edificación 1 (Anexo 6)			Edificación 2 (Anexo 7)			Promedio	
		Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]	Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]	Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]	Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]	Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]		
1 1/2"	38,100	0,00	100,00		2,0	98,0		0,9	99,1		0,0	100,0		0,0	100,0			
1"	25,400	0,60	99,40	1,68	4,7	93,3	13,94	5,8	93,3	14,32	2,4	97,6	6,1	0,6	99,4	2,86	7,78	grava
1/2"	12,700	1,09	98,32		7,3	86,1		7,6	85,7		3,7	93,9		2,2	97,1			
4	4,750	2,52	95,80		8,4	77,7		6,8	78,8		4,8	89,1		2,2	95,0			
8	2,360	2,68	93,12		7,4	70,3		4,5	74,3		6,0	83,1		2,7	92,3			
16	1,180	3,37	89,74		7,2	63,0		4,6	69,7		6,9	76,2		3,7	88,6			
20	0,850	1,93	87,82		3,5	59,6		2,5	67,2		4,0	72,2		1,9	86,7			
30	0,600	2,12	85,70	28,47	3,4	56,2	47,29	2,9	64,3	40,14	4,2	68,0	45,5	2,1	84,6	26,59	37,59	arena
50	0,300	5,34	80,36		6,8	49,4		7,0	57,3		8,1	59,9		4,4	80,2			
100	0,150	6,09	74,27		6,5	42,9		6,8	50,5		6,9	53,0		4,5	75,7			
200	0,075	4,42	69,85		4,1	38,8		4,9	45,5		4,6	48,4		5,1	70,6			
Fondo		69,85	0,00	69,85	38,8	0,0	38,77	45,5	0,0	45,55	48,4	0,0	48,4	70,6	0,0	70,55	54,63	finos

Tabla 8. Clasificación SUCS según el tamaño de las partículas del mortero de barro

Propia

Tamiz [#]	Abertura tamiz [mm]	Mortero adobera 1			Mortero adobera 3			Promedio	
		Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]	Porc. retenido [%]	Porc. que pasa [%]	Clasificación SUCS* [%]		
1 1/2"	38,100	0,0	100,0		0,0	100,0			
1"	25,400	0,0	100,0	0,17	0,0	100,0	0,62	0,40	grava
1/2"	12,700	0,2	99,8		0,6	99,4			
4	4,750	1,4	98,5		2,6	96,8			
8	2,360	2,0	96,4		2,5	94,3			
16	1,180	3,7	92,7		3,6	90,7			
20	0,850	2,4	90,4		2,3	88,4			
30	0,600	2,5	87,8	26,64	3,0	85,3	33,95	30,29	arena
50	0,300	4,9	82,9		8,3	77,0			
100	0,150	5,2	77,7		7,2	69,8			
200	0,075	4,6	73,2		4,4	65,4			
Fondo		73,2	0,0	73,19	65,4	0,0	65,44	69,31	finos

Gráfico 9. Índice de plasticidad de los casos de estudio

Propio

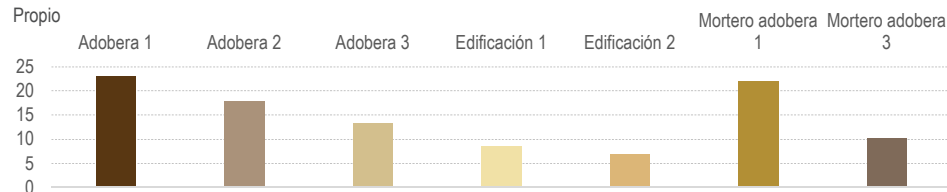


Tabla 9. Límites de Atterberg de los casos de estudio

Propia

	Límite Líquido [%]	Límite Plástico [%]	Índice de plasticidad [%]
Adobera 1	54,95	31,85	23,10
Adobera 2	40,08	22,25	17,83
Adobera 3	47,24	33,89	13,35
Edificación 1	34,42	25,81	8,61
Edificación 2	32,78	25,94	6,84
Mortero adobera 1	49,71	27,62	22,08
Mortero adobera 3	44,06	33,83	10,23
Promedio	43,32	28,74	14,58

Tabla 10. Parámetros indicados en documentos y normas

Propia

Documentos	Caracterización física					
	Granulometría				Tamaño máximo árido [mm]	Índice de plasticidad [%]
	Arcillas [%]	Limos [%]	Arena [%]	Grava [%]		
NTE E. 080	10 a 20	15 a 25	55 a 70		5	
HB 195	10 a 40	10 a 30	30 a 75		25	
			arena y grava fina			
Houben and Guillaud	5 a 29					31 a 50
NBR 13553	15 a 50					≤ 45
						≤ 18



A demás se determinó los límites de Atterberg: el límite líquido (Tabla 9) (Gráfico 7) que oscila entre 30% a 55% de humedad, 43% en promedio. El límite plástico (Tabla 9) (Gráfico 8) oscila entre 22% a 34% de humedad, 29% en promedio. Y el índice de plasticidad (Tabla 9) (Gráfico 9) oscila entre 6% a 23% de humedad, 15% en promedio.

Conforme a la tabla 9 y 10 a excepción de la adobera 1 todos cumplen con el límite líquido recomendado por Houben y Guillaud. Ninguno cumple el límite plástico recomendado por la norma brasileña NBR 13553. Y en cuanto al índice de plasticidad solo la Adobera 1, 2 y mortero de la adobera 1 cumplen con la recomendación de Houben y Guillaud.

Con los límites de Atterberg se procede a graficar la carta de plasticidad (Gráfico 10 al 11) que permite establecer el tipo de suelo al posicionar el punto (x,y), siendo x=Límite líquido y y=índice de plasticidad.

Todos los insumos necesarios para la clasificación de suelo según SUCS se han resumido en la tabla 11, determinando que:

- Los adobes de la **Adobera 1** han sido fabricados con un tipo de suelo **MH**, es decir un suelo de grano fino con limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas (Gráfico 11a).
- Los adobes de la **Adobera 2** han sido fabricados con un tipo de suelo **SC**, es decir un suelo de grano grueso con arcillas inorgánicas de plasticidad media (Gráfico 11e).
- Los adobes de la **Adobera 3** (Gráfico 11c) y **Edificación 1** (Gráfico 11f) han sido fabricados con un tipo de suelo **SM**, es decir un suelo de grano grueso con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánica.
- Los adobes de la **Edificación 2** han sido fabricados con un tipo de suelo **CH**, es decir un suelo de grano fino con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánica (Gráfico 11g).

Gráfico 10. Carta de plasticidad

Carta de plasticidad. 2015. Braja. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

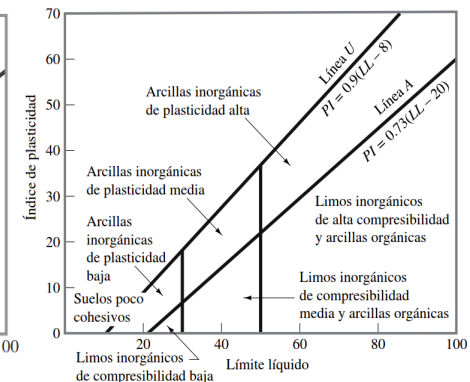
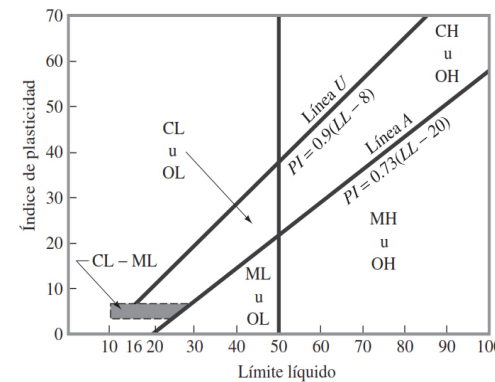


Gráfico 11. Carta de plasticidad de los casos de estudio

Propio

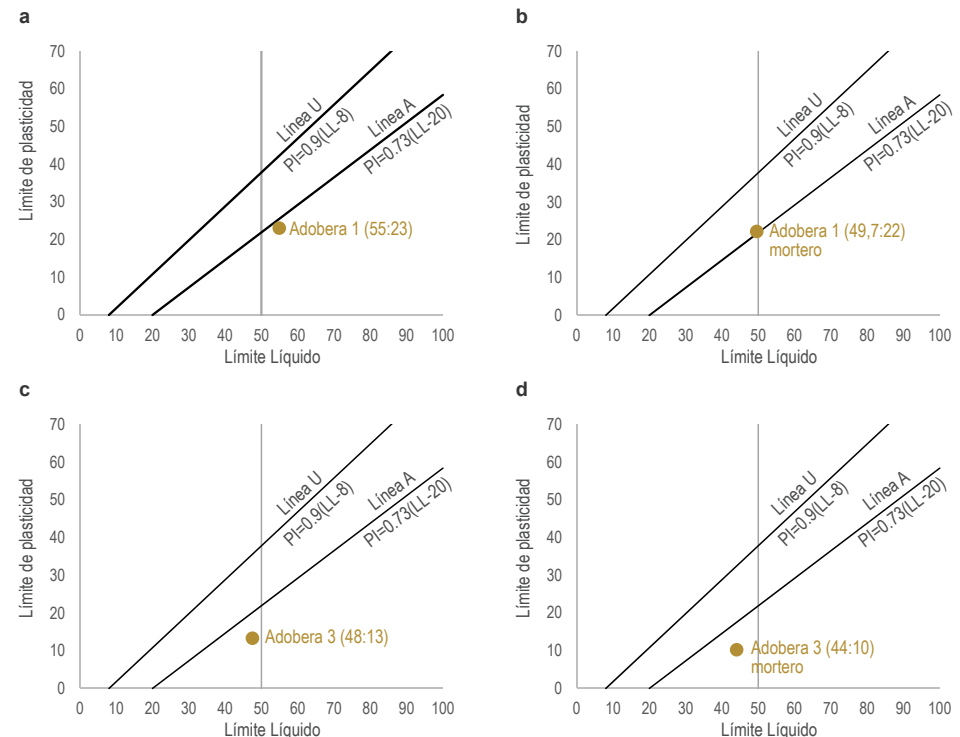




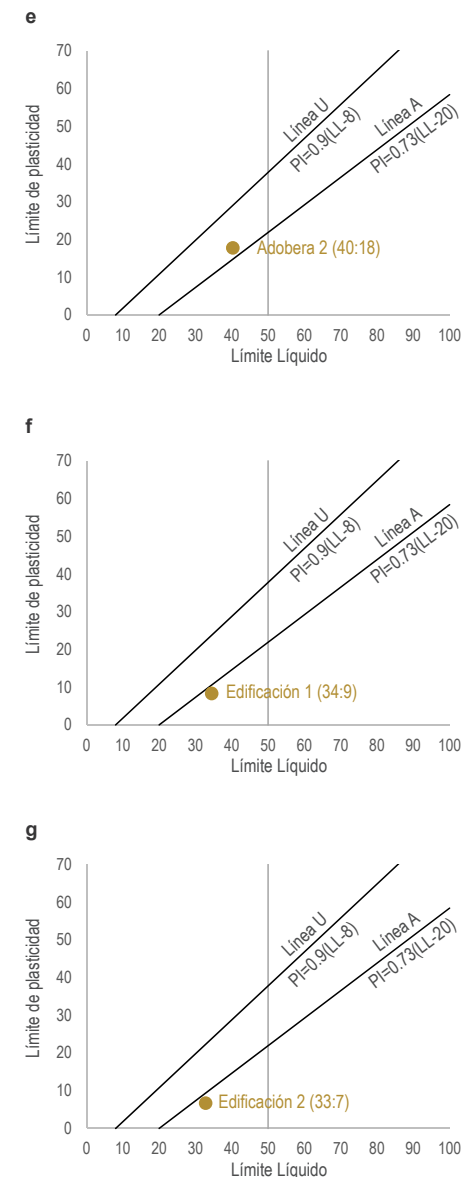
Tabla 11. Clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)

Propia

Adobera 1 (Anexo 3) [%]	Edificación 2 (Anexo 7) [%]	Mortero adobera 1 (Anexo 3) [%]	Mortero adobera 3 (Anexo 5) [%]	Edificación 1 (Anexo 6) [%]	Adobera 2 (Anexo 4) [%]	Adobera 3 (Anexo 5) [%]	
1,7	2,9	0,2	0,6	6,1	13,9	14,3	Suelo que pasa la malla de 76,2 mm y es retenido en la malla No. 4 Grava
28,5	26,6	26,6	33,9	45,5	47,3	40,1	Suelo que pasa la malla No. 4 y es retenido en la malla No. 200 Arena = F1
69,8	70,6	73,2	65,4	48,4	38,8	45,5	Porcentaje que pasan la malla No. 200 Limos y arcillas = F
55,0	32,8	49,7	44,1	34,4	40,1	47,5	LL Límite líquido
31,9	25,9	27,6	33,8	25,8	22,3	33,9	PL Límite plástico
23,1	6,8	22,1	10,2	8,6	17,8	13,6	PI Límite líquido - Límite plástico Índice de plasticidad
Suelo de grano fino 50% o más pasando la malla #200	Suelo de grano fino	Suelo de grano fino	Suelo de grano fino	Suelo de grano fino	Suelo de grano grueso	Suelo de grano grueso	Suelo de grano grueso mas del 50% pasando la malla No. 200
Suelo de grano fino L= baja plasticidad LL<50 H= alta plasticidad LL>50	H	L	L	L	Arenoso	Arenoso	Suelo de grano grueso Gravoso = F1 < (100-F)/2 Arenoso= F1 ≥ (100-F)/2
Sistema Unificado de Clasificación de Suelo - símbolo de grupo	MH LL ≥ 50; límites de de Atterberg bajo la línea A	CH LL ≥ 50; límites de de Atterberg sobre la línea A	CL LL < 50; límites de de Atterberg sobre la línea A	ML LL < 50; límites de de Atterberg bajo la línea A	SM Más del 12% pasa la malla No. 200; límites de Atterberg bajo la línea A	SC Más del 12% pasa la malla No. 200; límites de Atterberg sobre la línea A; PI> 7	SM Más del 12% pasa la malla No. 200; límites de Atterberg bajo la línea A

Gráfico 11. Carta de plasticidad de los casos de estudio

Propio





- El **Mortero de la adobera 1** está compuesto de un suelo tipo **CL**, es decir un suelo de grano fino con arcillas inorgánicas de plasticidad media (Gráfico 11b).

- El **Mortero de la adobera 3** está compuesto de un suelo tipo **ML**, es decir un suelo de grano fino con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánicas (Gráfico 11d).

La Adobera 1, Adobera 3, Edificación 1, Edificación 2 y Mortero de la adobera 3, poseen un suelo con pocas aptitudes para la fabricación de adobes por el contenido de materia orgánica que baja la resistencia y que provoca las fisuras ya que al estar en contacto con agua se expande pero al secarse se contrae.

La Adobera 2 y Mortero de la adobera 1, por el contrario, al tener un tipo de suelo inorgánico evita la aparición de fisuras en el proceso de secado, además de tener plasticidad media apropiada para la fabricación de adobes, sin embargo el contenido de brava puede ser perjudicial para la resistencia a la compresión ya que al no adherirse al barro provoca desprendimiento y debilitamiento del espécimen.

3.1.1.1. Contenido orgánico en suelos mediante perdida por ignición

El método de “pérdida por ignición” para la determinación el contenido orgánico se aplicó bajo la norma AASTHO T-267-86 que se detalla en el anexo 2 y cuyos resultados se muestran en el Anexo 3 (Adobera 1), Anexo 4 (Adobera 2), Anexo 5 (Adobera 3), Anexo 6 (Edificación 1) y Anexo 7 (Edificación 2).

La norma peruana E. 080 indica que en los suelos arcillosos se debe usar paja de aproximadamente 50 mm de largo en proporción de 1 volumen de paja por 5 de tierra lo que ayuda al control de fisuras y resistencia, es decir alrededor del 10% de fibra. Fuera de la materia orgánica propia del suelo también es parte el contenido de fibras naturales, en el caso de las fábricas de adobe y edificaciones patrimoniales estudiadas se ha usado paja y también raíces como es el caso de la adobera 2 y 3, además un caso especial de un tipo de paja de forma cilíndrica hueca que fue usada en la elaboración de los adobes de la edificación 1.

En la tabla 12 y gráfico 12 se presenta el contenido de materia orgánica de los casos de estudio que es menor al 10%, que no es precisamente por la presencia de paja ya que visualmente se verificó que es casi nula a excepción de la adobera 1, deduciendo así que el contenido de fibra es menor al especificado en la norma peruana E. 080 y que además predomina la materia orgánica propia de la tierra que se evidencia en el tipo de suelo descrito anteriormente donde uno de los componentes principales son limos o arcillas orgánicas.

Siendo muy bajo el contenido de fibra, un componente importante del adobe, cuya presencia tiene mucha influencia en la resistencia del material, sobre todo en la resistencia a flexión, desde ya se puede presumir que dicha resistencia tendrá bajos valores.

Tabla 12. Contenido de materia orgánica de los casos de estudio

Propia

	Contenido de materia orgánica [%]
Adobera 1	6,43
Adobera 2	4,30
Adobera 3	6,89
Edificación 1	8,14
Edificación 2	7,41
Mortero adobera 1	8,78
Mortero adobera 3	6,16
Promedio	6,87

Gráfico 12. Contenido de materia orgánica de los casos de estudio

Propio

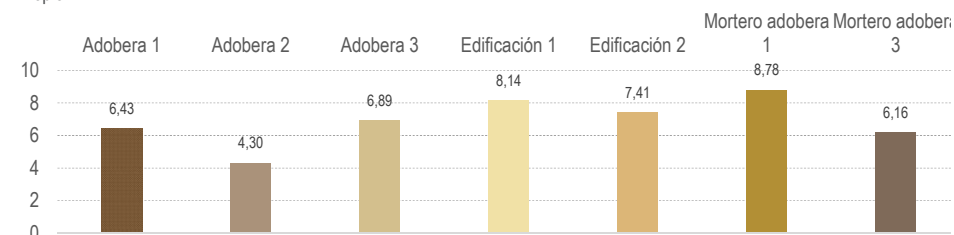


Imagen 49. Ensayos para determinar las características mecánicas

Propia



3.4. Caracterización mecánica del adobe

Las características mecánicas de un material definen sus capacidades para soportar cargas exteriores, por ello para determinar las características del adobe se lo sometió ante cargas de compresión y flexión a las unidad de adobe, cargas de compresión y tracción indirecta en el caso de los muretes (Imagen 49), además en todos los especímenes ellos se midió las deformaciones para así obtener el módulo de elasticidad.

Los ensayos de compresión del adobe como unidad y muretes, y la resistencia del murete a tracción indirecta o compresión diagonal siguieron los parámetros de la normativa peruana de Diseño y Construcción con Tierra Reforzada E.080. La resistencia a flexión del adobe y resistencia a compresión del mortero se las realizaron bajo los parámetros de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0488 y NTE INEN 2554 respectivamente, estas normativas hacen referencia al hormigón, sin embargo fueron adaptadas para su aplicación en el adobe y mortero de barro, puesto que la norma peruana E.080 no establece ensayos de este tipo, todos los procedimientos seguidos para la realización de los ensayos referidos están detallados en el Anexo 2.

Para los ensayos a compresión del adobe, flexión del adobe y compresión del mortero de barro se analizaron 6 especímenes de cada adobera (fábrica de adobe) y edificación patrimonial; y en los ensayos de resistencia a compresión y tracción indirecta en muretes se ensayaron 4 muestras, los resultados de estos ensayos se muestran detalladamente en los anexos de la adobera 1 (Anexo 3), adobera 2 (Anexo 4), adobera 3 (Anexo 5), edificación 1 (Anexo 6) y la edificación 2 (Anexo 7).



3.4.1. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad relaciona el esfuerzo con la deformación unitaria siendo un parámetro indispensable para el diseño estructural, en un material no lineal, ni isótropo como el adobe depende principalmente de las características de la tierra y también de factores como la fabricación, secado, etc., por ello no es una constante como lo es en otros materiales.

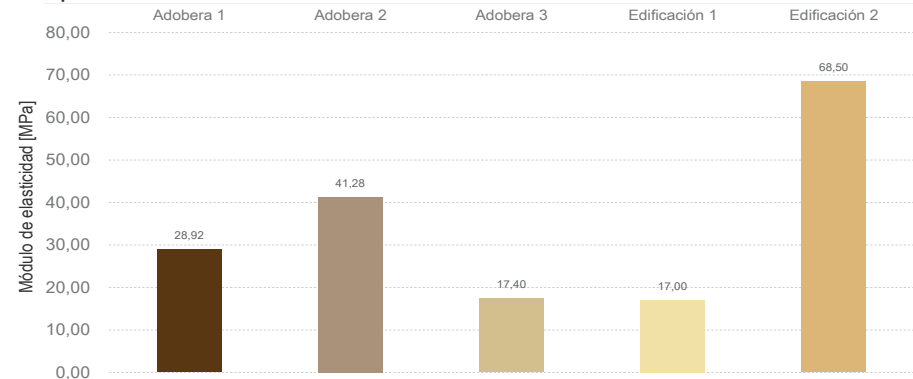
En materiales como el hormigón y el acero el módulo de elasticidad está claramente definido su parte elástica que tiene un comportamiento lineal, diferente a lo que ocurre en el adobe que tiene un comportamiento muy irregular y diferente en cada espécimen, su parte elástica no está claramente definida. Ante esta dificultad se obtuvo para cada incremento de esfuerzo su respectiva deformación, se calculó la pendiente entre punto y punto de la gráfica de esfuerzo vs deformación, con esas pendientes se determinó la variación entre cada una, considerando el módulo de elasticidad del adobe aquella que tenga un rango de pendientes que no presenten variación mayor al 15%, puesto que se presentó grandes variaciones siendo las más bajas alrededor del 10%, que a demás no estén en los datos iniciales del ensayo, cuando el material por su irregularidad se está acomodando y presenta incremento de esfuerzo casi horizontales y que no estén en los últimos incrementos de resistencia donde el material está fracasando.

En el ensayo a flexión del adobe y tracción indirecta del murete no se pudo determinar el módulo elástico por la imprecisión de los equipos disponibles para medir las deformaciones y cargas iniciales que experimentaban los especímenes, esto se comprobó al determinar el porcentaje que representaba la carga inicial con respecto a la carga máxima registrada en cada espécimen ensayado, los datos utilizados para determinar estos porcentajes se encuentran en el anexo de cada adobera y edificación patrimonial (Anexos del 3 al 7).

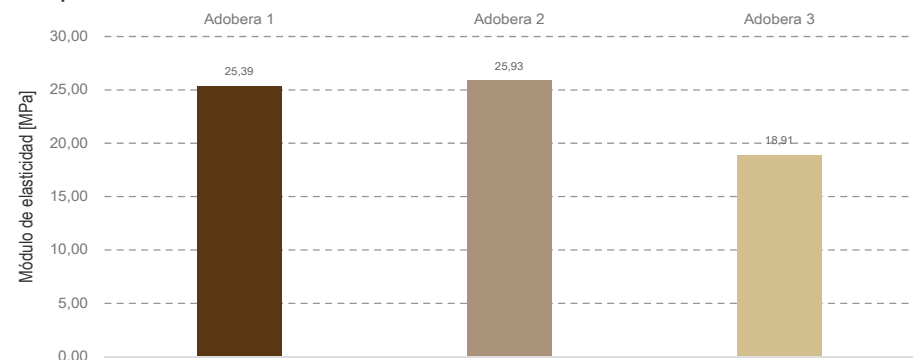
Concretamente en el ensayo a flexión en adobes las cargas iniciales no pudieron ser registradas porque el umbral mínimo admisible de la máquina era de 980 N (Anexo 2), valores menores a ese consideraba el peso del adobe como carga, producto de ello se registraron valores iniciales que representan del 25% al 95%

Gráfico 13. Módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos de compresión
Propio

Compresión de adobe



Compresión de murete



Compresión de mortero

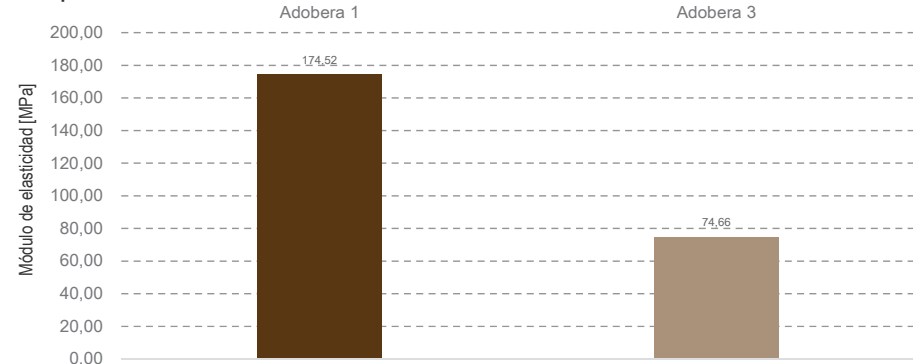


Imagen 50. Cubos de adobe ensayados a compresión

Propia



de la carga máxima; mientras que en el ensayo a tracción indirecta del murete la máquina no tenía la opción de ser calibrada, ante esto las cargas iniciales representaban del 25% hasta el 70%, evidenciando que en ambos ensayos las cargas iniciales registradas están fuera de la zona de comportamiento elástico, imposibilitando el calculo del módulo de elasticidad.

Donde si fue posible obtener el módulo elástico en los ensayos a compresión de las unidades de adobe, mortero y muretes de adobe, donde los especímenes, presenta mayor resistencia y mayor cantidad de registros de deformación (Gráfico 13).

3.4.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es el esfuerzo máximo que soporta un material antes que presente reblandecimiento.

Durante los ensayos la velocidad de carga fue de 98 N/s para los adobes y morteros de barro, mientras que los muretes fueron ensayados en una máquina universal la cual no contaba con el mecanismo para calibrar la velocidad de carga.

3.4.2.1. Resistencia a la compresión del adobe

Los especímenes de adobe ensayados a compresión no presentaron un comportamiento similar entre si, evidenciando la heterogeneidad de la tierra empleada para la fabricación de los adobes a pesar de que provenga de la misma fábrica, durante el ensayo los especímenes presentaron importantes deformaciones ante pequeños incrementos de carga, el fracaso de las muestras iniciaba con desprendimientos superficiales (Imagen 50a) y fisuras en los bordes verticales (Imagen 50c), seguida por fisuras provocadas por la presencia de grava (Imagen 50b, 50d y 50f), ramas o raíces (Imagen 50e), ladrillo (Imagen 50d y 50g) o teja de gran tamaño, que finalizaban desprendiéndose del espécimen ensayado (Imagen 50b,



50d, 50f y 50h), provocando gran debilitamiento.

Conforme a los resultados obtenidos en los ensayos, se puede deducir que los especímenes soportaron importantes incrementos de cargas desde el inicio del ensayo (Gráfico 14), a excepción de la muestra 5 de la adobera 1 (Gráfico 14, adobera 1) que inicialmente tiene una tendencia horizontal en la relación de esfuerzo-deformación, esto se debe a un acomodamiento de la muestra previo a iniciar a soportar mayores cargas.

En los gráficos obtenidos en cada uno de los casos de estudio podemos observar que los especímenes no muestra un comportamiento similar entre ellos, teniendo varios tipos de comportamientos y ademas se ratificó que no tienen una zona clara de comportamiento elástico, ni muestra con claridad una zona en la que deja el espécimen deja de ser elástico (Gráfico 14)

También se deduce que la tierra ante las cargas de compresión se acomoda para seguir soportando carga, como claramente se observa en el gráfico de la adobera 2, donde los especímenes 4 y 6 muestran un comportamiento escalonado, presentando cada cierto tramo grandes deformaciones para aumentos de cargas pequeñas para después registrar grandes incrementos de carga, repitiéndose esto a lo largo del ensayo, hasta su fracaso

La muestra 5 de la adobera 1 es otro tipo de comportamiento, donde inicialmente el espécimen muestra una tendencia horizontal, para ir tomando carga paulatinamente hasta su fracaso, presuntamente por el mismo hecho del acomodamiento de las partículas de tierra.

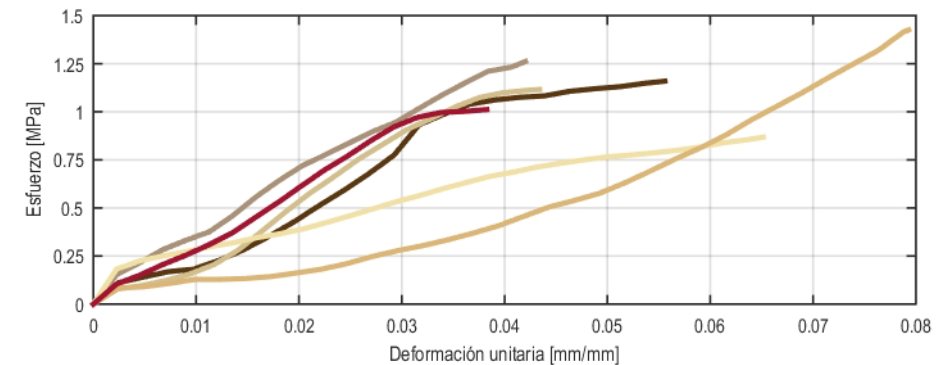
Otro comportamiento es el que tienen los especímenes de la adobera 3 y edificación 1 donde desde el inicio del ensayo mantienen una tendencia casi horizontal hasta el fracaso de las muestras.

Finalmente con los resultados obtenidos de los ensayos se calculo la resistencia ultima a compresión que según normativa peruana de Diseño y Construcción con

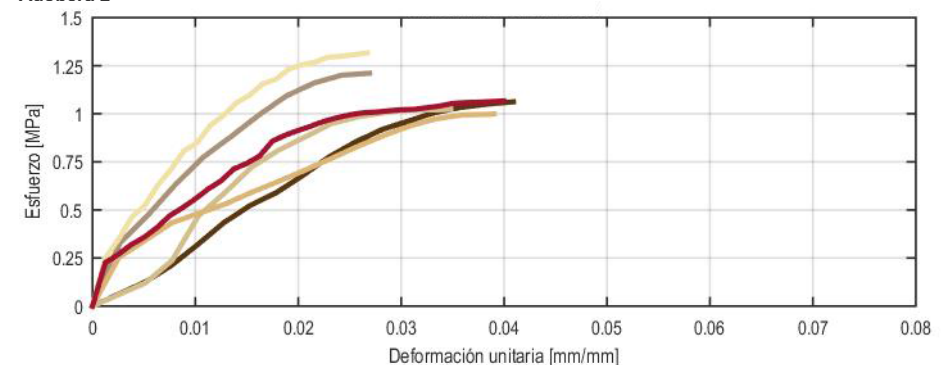
Gráfico 14. Esfuerzo vs deformación de la unidad de adobe a compresión

Propio

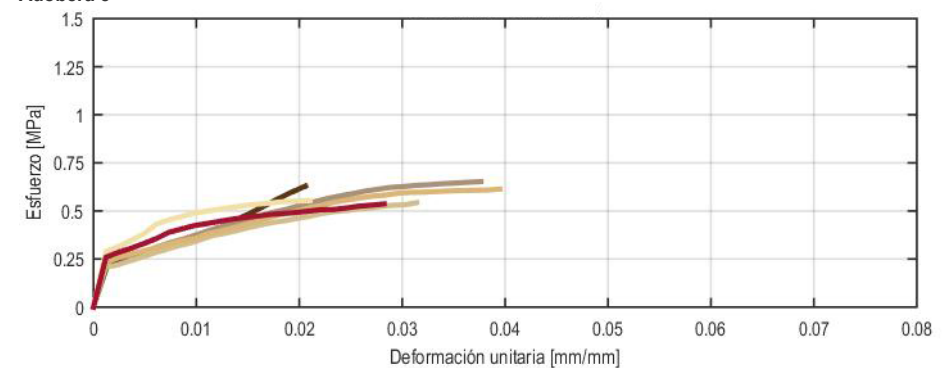
Adobera 1



Adobera 2



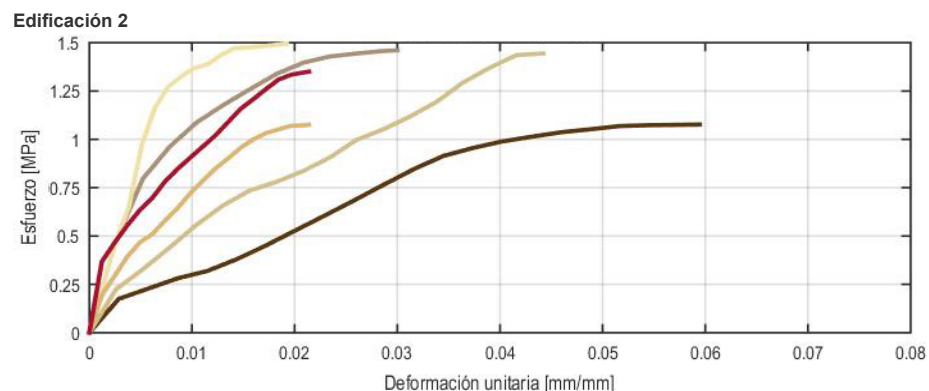
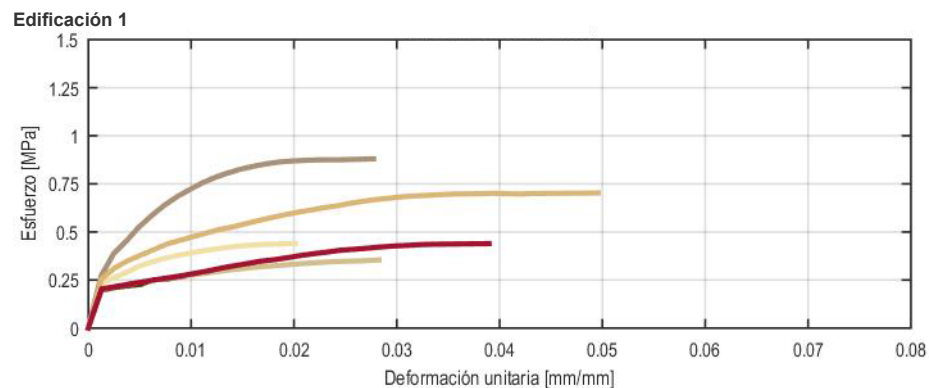
Adobera 3



— Muestra 1 — Muestra 2 — Muestra 3 — Muestra 4 — Muestra 5 — Muestra 6

Gráfico 14. Esfuerzo vs deformación de la unidad de adobe a compresión

Propio



— Muestra 1 — Muestra 2 — Muestra 3 — Muestra 4 — Muestra 5 — Muestra 6

Tabla 13. Resistencia a la compresión del adobe

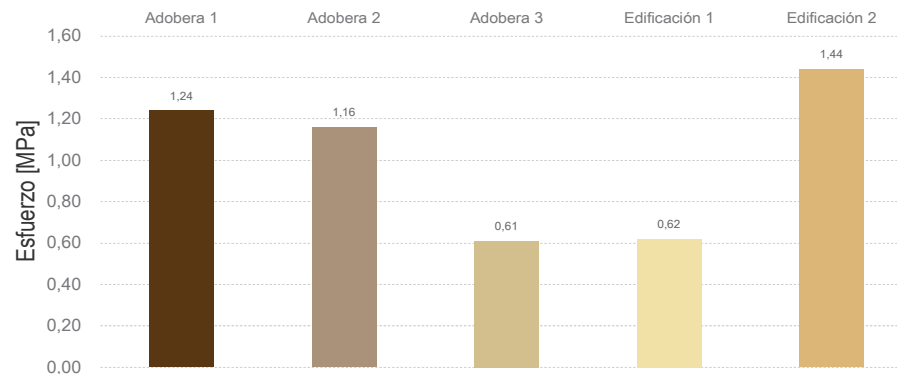
Propio

Espécimen	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Adobera 1	118,98	117,35	107,01	15864	1,24	28,92
Adobera 2	98,71	98,83	98,83	10487	1,16	41,28
Adobera 3	93,35	94,04	100,12	5281	0,61	17,40
Edificación 1	100,08	101,40	100,71	5232	0,62	17,00
Edificación 2	95,01	99,83	99,36	12446	1,44	68,50

Tierra Reforzada E.080 debe ser mínimo de 1 MPa, comparando los resultados obtenidos para cada caso de estudio (Tabla 13) se concluye que los especímenes de la adobera 1, adobera 2 y la edificación 2 cumplen con la resistencia mínima (Gráfico 15), donde la edificación 2 registra el valor mas alto con 1,44 MPa, donde los módulos elásticos de los oscilan entre 17 MPa hasta 68.5 MPa, siendo los mas bajos de la adobera 3 y edificación 1 que no cumplieron con la resistencia mínima.

Gráfico 15. Resistencias promedio del adobe a compresión

Propio



3.4.2.2. Resistencia a la compresión del mortero

El mortero fue suministrado por las mismas fábricas de donde se tomaron las muestras de adobe, de tal forma que los muretes⁵ fueran construidos con un mortero de similares características que el adobe, a demás de determinar las características del barro que los artesanos suministran, consiguiendo resultados reales de la calidad que tienen las construcciones de adobe.

Cabe señalar que solo se consiguió mortero de la adobera 1 y 3, debido que la adobera 2 no suministró el material, sin embargo por la cercanía entre la adobera 2 y 3 (50 metros aproximadamente) se decidió usar el barro de la adobera 3 para construir también los muretes de la adobera 2.

El mortero suministrado por las fábricas al secarse al secarse no presentaron fisuras visibles a simple vista, los dos tipos de mortero durante el ensayo fracasarían presentando fisuras verticales que provocarían leves desprendimientos superficiales (Imagen 51).

Si observamos la gráfica de esfuerzo vs deformación obtenida del mortero de la adobera 1 (Gráfica 16 mortero adobera 1) se puede observar que los especímenes no tiene un comportamiento similar entre ellos y que al iniciarse la carga presentan grandes deformaciones para pequeños aumentos de carga, el mortero de la adobera 3 empezó a soportar carga desde el inicio del ensayo, donde su gráfica tiene un comportamiento similar entre los especímenes (Gráfica 16 mortero adobera 3), comportamientos similares al adobe que no es de sorprender al estar compuestos principalmente de tierra.

Los dos tipos de mortero presentaron deformaciones unitarias similares a las que se obtuvo en el adobe obtenido de la misma fábrica, que fueron de 0.06 mm/mm en la adobera 1 y de 0.03 mm/mm en la adobera 3, pero la resistencia obtenida en

⁵ murete es un muro pequeño, de muy baja altura. www.glosario.net - © 2003 - 2017 HispaNetwork Publicidad y Servicios, S.L. Recuperado el 13 de mayo del 2017 de <http://arte-y-arquitectura.glosario.net/construccion-y-arquitectura/murete-7320.html>

Imagen 51. Cubos de mortero ensayados a compresión
Propia

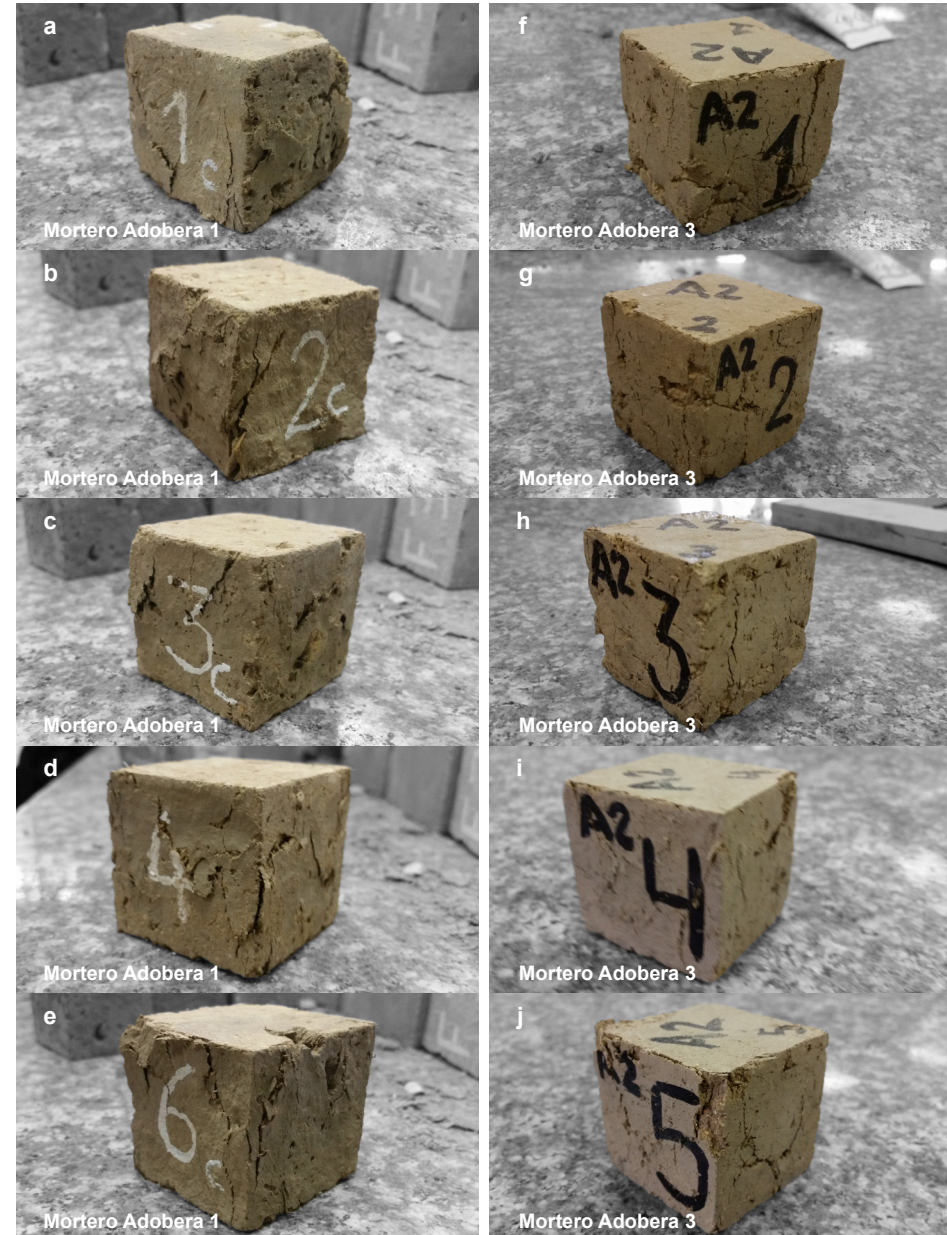
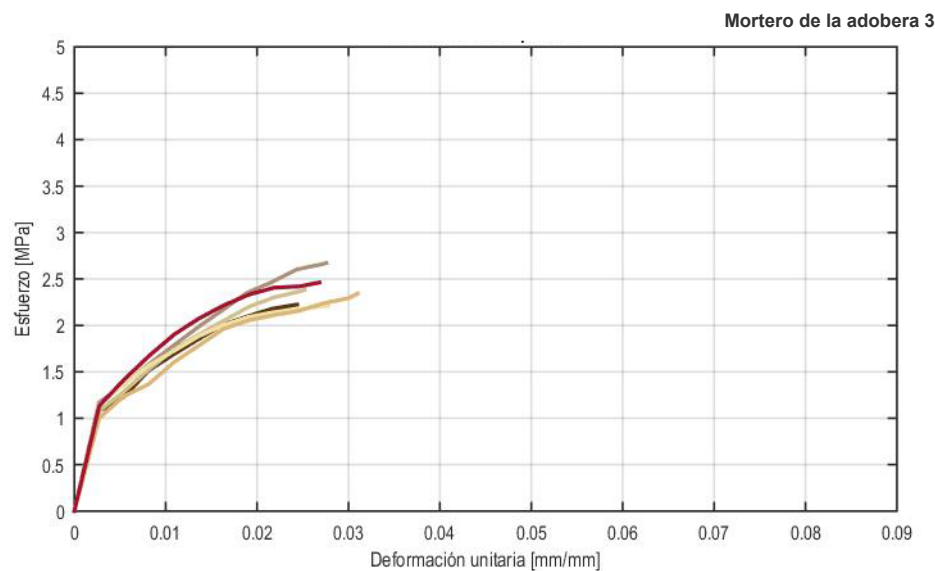
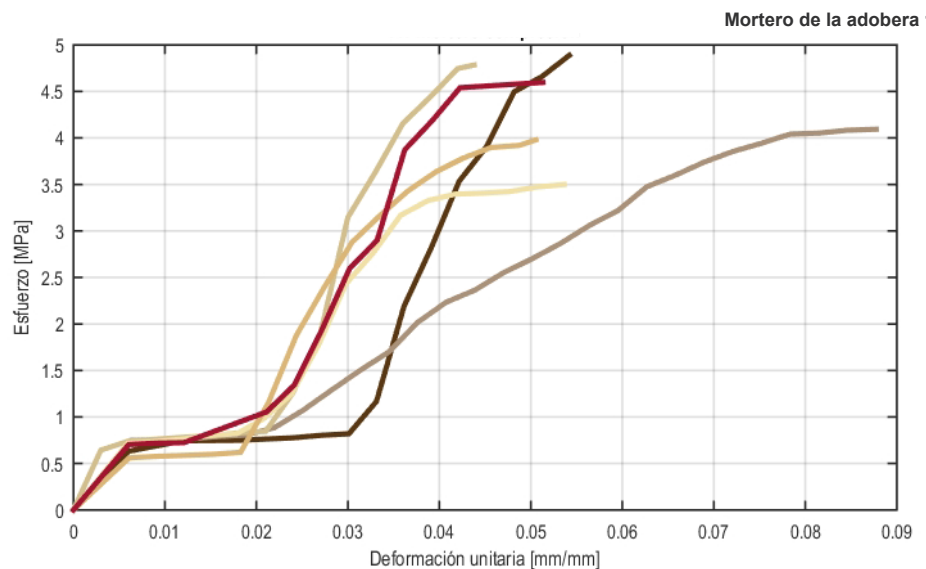


Gráfico 16. Esfuerzo vs deformación del mortero a compresión

Propia



Muestra 1 Muestra 2 Muestra 3 Muestra 4 Muestra 5 Muestra 6

el mortero fue significativamente superior al adobe, resultados que se resumen en la tabla 14, en el caso de la adobera 1 muestra un incremento en la resistencia a compresión del 270% y de 304% en la adobera 3 (Gráfico 17), actualmente no esta establecida la resistencia optima que debe tener un mortero de barro, por ello no se puede concluir si las resistencias obtenidas son las adecuadas para su utilización en el murete, pero cumple con que el elemento de unión debe ser de mejores características que los elementos que une.

Finalmente los módulos obtenidos (Tabla 14) para el mortero de la adobera 1 son de 174,52 MPa y de 78,58 MPa para el mortero de la adobera 3, correspondiendo el valor mas alto con el mortero que tuvo mayor resistencia a compresión.

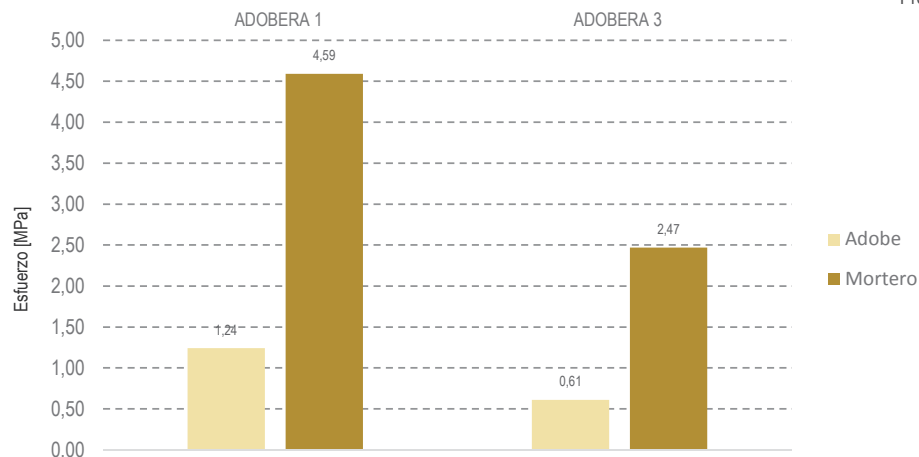
Tabla 14. Resistencia a la compresión del mortero

Propia

Espécimen	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. del mortero [MPa]	Esfuerzo máx. del adobe [MPa]	Módulo de elasticidad del mortero [MPa]
Adobera 1	43,45	43,00	41,78	7971,21	4,59	1,24	174,52
Adobera 3	46,41	46,43	46,61	5133,81	2,46	0,61	74,66

Gráfico 17. Resistencias promedio del mortero y adobe a compresión

Propia



3.4.2.3. Resistencia a la compresión de muretes de adobe

Los especímenes empleados para la obtención de la resistencia a compresión en muretes fueron construidos con adobes obtenidos de las 3 fábricas de adobes estudiadas (Imagen 52), no fue posible construir muretes de las edificaciones ya que no se pudo extraer la cantidad de adobes necesarios.

La normativa peruana E.080 establece que los muretes construidos para este ensayo debían cumplir con la condición que su altura debe ser aproximadamente tres veces el ancho, debido que las fábricas tenían formatos de adobe diferentes (Tabla 15) los muretes construidos de la adobera 1 constaban de cuatro hiladas (Imagen 52a) y de tres hiladas en los de la adobera 2 y 3 (Imagen 52b y 52c), cumpliéndose así la condición de la altura del murete.

Una vez construidos los muretes se los dejo secar durante 28 días para su ensayo, pero antes de realizar el ensayo los muretes presentaban fisuras propias del adobe que fueron pintadas de color azul para diferenciarlas de las provocadas en el ensayo (Imagen 52), de estas fisuras se eligieron 6 para ser medidas antes y después del ensayo para examinar su comportamiento en el fracaso del murete, cabe señalar que las muestras de la adobera 1 (Imagen 52a) y adobera 3 (Imagen 52c) presentaron una mayor cantidad de fisuras (Imagen 53) que los de la adobera 2 (Imagen 52b), esta presentaba fisuras superficiales algunas de ellas provocadas por las raíces empleadas en su elaboración, la cual según los fabricantes desempeña el papel de la paja.

Durante el ensayo algunos muretes presentaron fisuras verticales en los adobes de contacto inferior y superior con las placas de la maquina (Imagen 54 y 55a), las cuales se prolongarían a lo largo del murete, donde la mayoría de fisuras nuevas provocadas por el esfuerzo a compresión se conectaron con las fisuras presentes previas al ensayo (Imagen 55a), también ocurrió que las fisuras previas al ensayo se conectarían entre si provocando desprendimientos superficiales, en los muretes de la adobera 1 (Imagen 56) y de la adobera 3 (Imagen 58) las fisuras presentes antes del ensayo la mayoría interactuaron o generaron nuevas fisuras

Imagen 52. Muretes previos al ensayo a compresión
Propia



Imagen 53. Fisura previa al ensayo
Propia



Imagen 54. Fisuras en muretes a compresión
Propia



Tabla 15. Formatos de adobe para la conformación de muretes de adobe

Propia

Código	a [mm]	b [mm]	c ₁ [mm]	c ₂ [mm]
Adobera 1	225	460	130	675
Adobera 2	205	405	180	615
Adobera 3	205	410	175	615

a = ancho del adobe
b = largo del adobe
c₁ = altura del adobe
c₂ = a x 3 = altura del murete

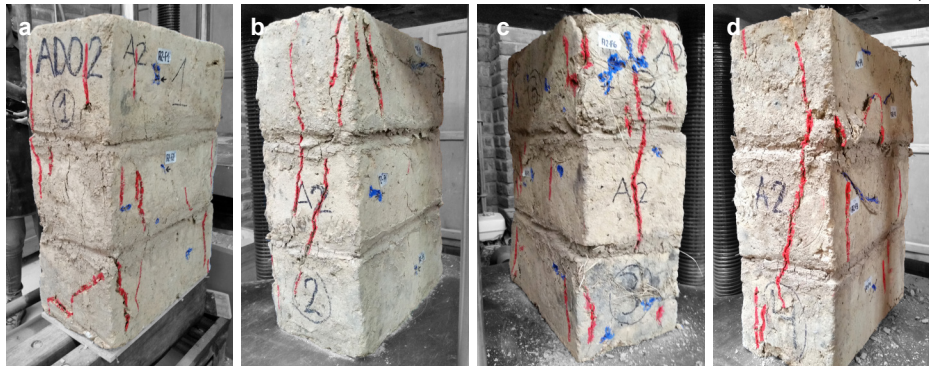
Imagen 55. Fisuras en muretes ensayados a compresión
Propia



Imagen 56. Muretes ensayados a compresión de la adobera 1
Propia



Imagen 57. Muretes ensayados a compresión de la adobera 2
Propia



durante el ensayo, esto no ocurrió en la adobera 2 (Imagen 57) donde las fisuras nuevas no estaban relacionadas con las ya presentes.

Después de haber fracasado los muretes, se examinaron las 6 fisuras anteriormente seleccionadas, en la mayoría su abertura había disminuido, ratificando que la construcción con adobe al someterse a cargas de compresión a la vez que trabaja a esfuerzos también se compacta suprimiendo los vacíos y el muro al comprimirse se expande.

También se examinaron el origen de las fisuras provocadas por las cargas de compresión y las anteriores al ensayo que resultaron ser ocasionadas por la presencia de árido grueso, pedazos de ladrillo o por terrones no disueltos en el bati-do del barro porque no se dejó dormir el barro como se recomienda en el capítulo 2, en la imagen 55b se puede observar como un pedazo de ladrillo el cual solo era visible parcialmente antes del ensayo y fue pintado de azul provocaría una fisura que se expandiría a través del murete, en la imagen 55c vemos como un árido grueso que se encontraba en el interior del adobe provocó fisuras durante el ensayo y en la imagen 55d es un ejemplo de como un pedazo de teja de gran tamaño que se encontraba en el interior del adobe provocó un desprendimiento debido a la falta de adherencia con la tierra, los pedazos de ladrillos y tejas encontrados en el interior de los adobes se deben a que todas las fábricas de adobes también elaboran ladrillos, utilizando los retazos de estos como agregado grueso del adobe.

Imagen 58. Muretes ensayados a compresión de la adobera 3
Propia





Con los resultados obtenidos de los ensayos se determina que los muretes presentaron un comportamiento como se puede observar en los gráficos de esfuerzo-deformación obtenidos (Gráfico 18), los muretes de la adobera 2 al estar compuestos con adobes mejor compactados se observa que al tener menos fisuras el murete empieza a registrar cargas a penas comienza el ensayo, a diferencia de la adobera 1 que tenía muchas fisuras primero el material se acomodó, por ello se ve en la curva un tramo inicial casi horizontal para luego comenzar a registrar incrementos fuertes de carga, la adobera 3 que también presentaba pocas fisuras tiene un comportamiento de incremento constante de carga.

Los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en la tabla 16, la norma peruana E.080 determina que la resistencia última del murete a compresión debe ser mínimo de 0,6 MPa, es decir que la adobera 1 cumple con la normativa, pero los especímenes de la adobera 2 y de la adobera 3 no cumplen con la resistencia mínima requerida (Gráfico 19), a pesar de que el mortero empleado en ambos tenía mejor resistencia ante cargas de compresión esto no fue suficiente para mejorar la resistencia a compresión del murete, el módulo elástico más alto obtenido corresponde a la adobera 2 siendo de 25,93 Mpa.

Tabla 16. Resistencia a la compresión del murete

Propia

Especimen	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Adobera 1	226,1	472,8	535,9	78645	0,74	25,39
Adobera 2	204,3	406,4	578,9	43296	0,52	25,93
Adobera 3	206,9	409,6	537,4	34108	0,40	18,91

Gráfico 19. Resistencias promedio del murete a compresión

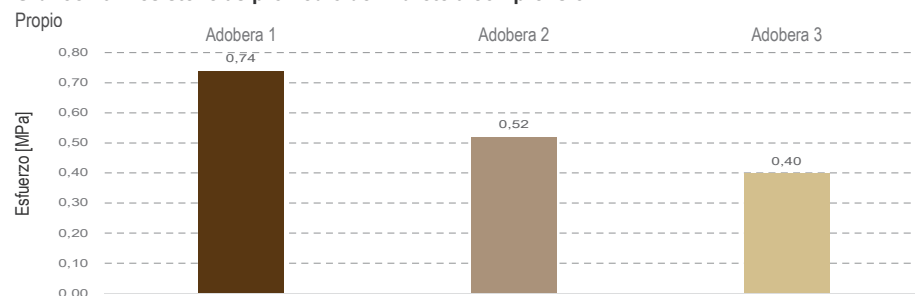
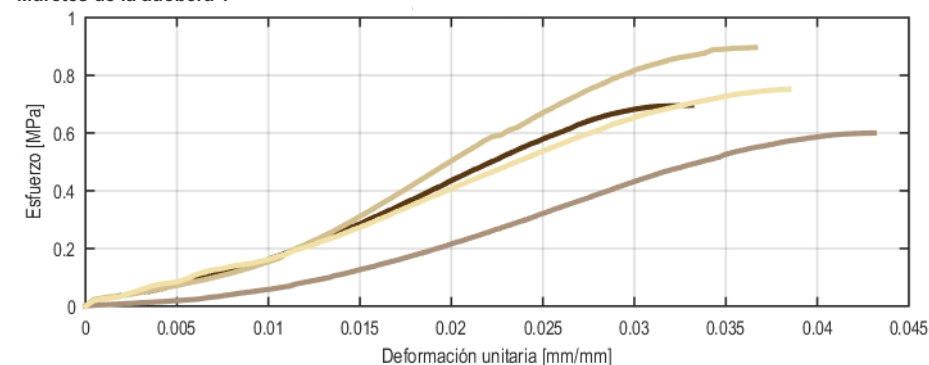


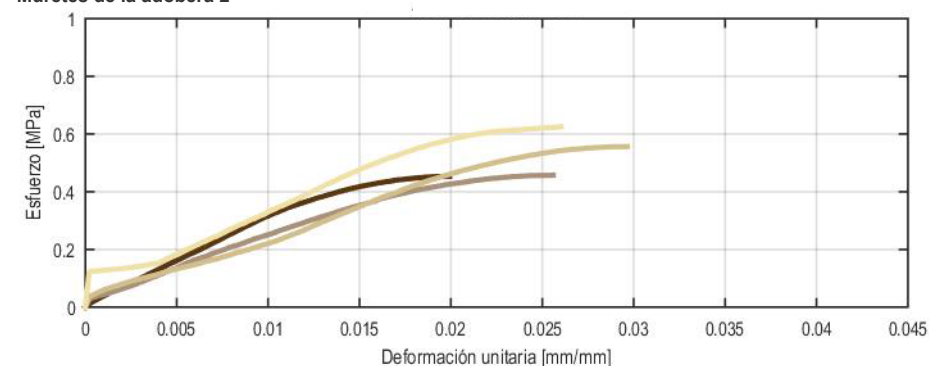
Gráfico 18. Esfuerzo vs deformación del murete a compresión

Propio

Muretes de la adobera 1



Muretes de la adobera 2



Muretes de la adobera 3

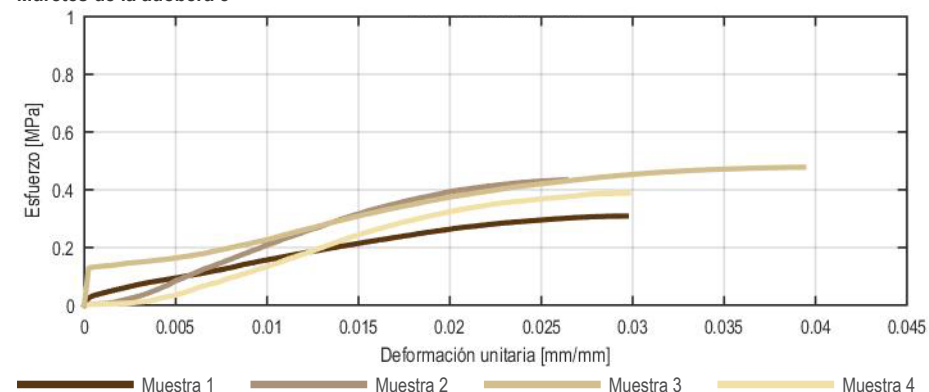
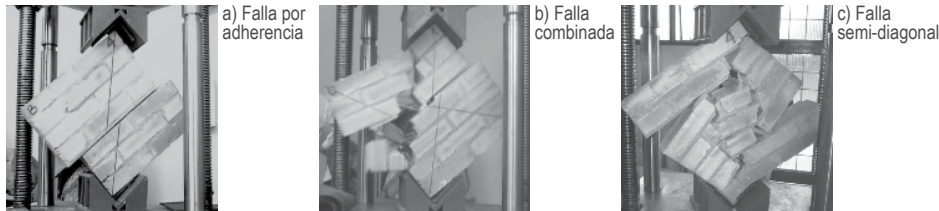


Imagen 59. Modos de falla en muretes ensayados a tracción indirecta

[Fotografía de Páez, D., Parra, S. & Montaña, C.]. (2009). Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería.



3.4.3. Resistencia a tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta o compresión diagonal consiste en someter al murete a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales, provocando que fracase a cortante, gracias a este ensayo se determinó el esfuerzo a cortante.

3.4.3.1. Tipología de fallas

Para Páez, D., Parra, S. & Montaña, C. (2009) los muretes sometidos ante esta carga tienen 3 tipos de fallas (Imagen 59).

1. Falla por adherencia: el agrietamiento inicia y se propaga por las juntas, esto es producto de que la resistencia de las piezas es mayor a la adherencia del mortero.
2. Falla combinada: la resistencia de las piezas es menor a la adherencia del mortero, presentando fisuras en el mortero y las piezas.
3. Falla semi-diagonal: cuando la tensión de las piezas es semejante a la adherencia del mortero, donde se presenta un agrietamiento diagonal que esta presente en las piezas y en las juntas.

Imagen 60. Muretes previos al ensayo de tracción indirecta

Imagen 61. Agregado grueso en fisura nueva

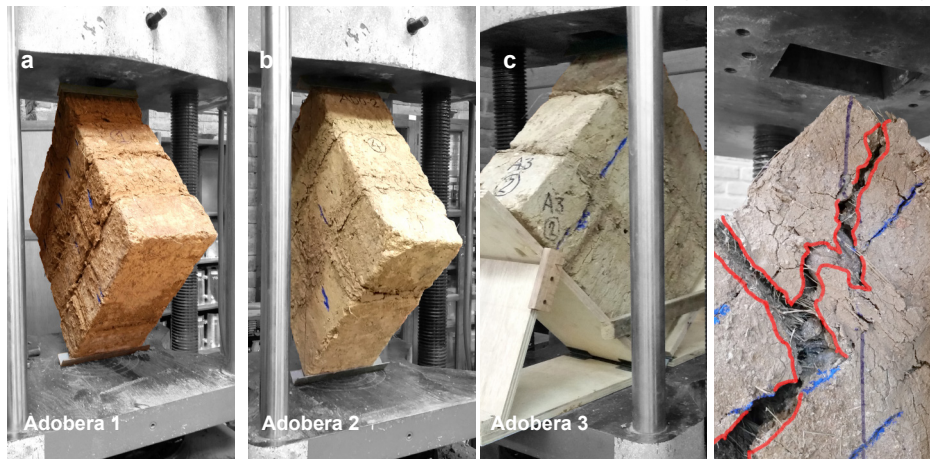
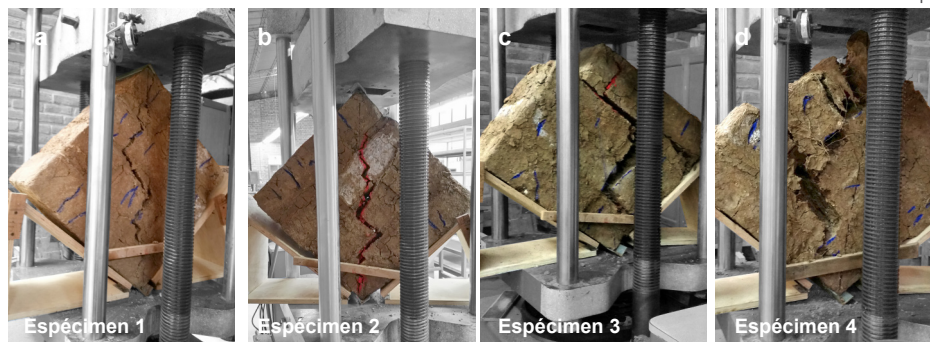


Imagen 62. Muretes ensayados a tracción indirecta de la adobera 1



3.4.3.2. Resistencia a tracción indirecta en muretes

El protocolo de la normativa peruana E.080 señala que los muretes deben cumplir con la condición que su altura debe ser aproximadamente igual a la longitud y que cada hilada debe estar compuesto de un adobe y medio, por ello los muretes contruidos de la adobera 1 constaban de cuatro hiladas y de tres hiladas en los de la adobera 2 y 3 (Imagen 60), esto en respuesta a que los adobes tenían diferentes formatos en cada fábrica, además de esto los adobes utilizados en los muretes tuvieron que ser recortados por condiciones del laboratorio, esto se detalla en el Anexo 2.

Luego de contruidos los muretes se los deajo secar 28 días. En la preparación para el ensayo se colocaron 2 bases triangulares debajo del murete, estos no tuvieron contacto con el muro durante el ensayo, su papel era el de sujetar el muro para poder analizar el modo de falla. Durante el ensayo los muretes tuvieron grandes deformaciones para pequeños aumentos de cargas, en uno de los casos la fisura causada por el ensayo paso por un agregado de gran tamaño que se encontraba en el interior de uno de los adobes (Imagen 61), los muretes de la adobera 1 presentaban importantes fisuras, es por ello que la fisura causada por la carga (fisura de color rojo) se prolongaba a través de alguna de las fisuras previas al ensayo (fisura color azul) (Imagen 62c), tres de los muretes de la adobera 1 tuvieron una falla combinada (Imagen 62a, 62b y 62d) y tan solo uno de ellos fracaso por adherencia (Imagen 62c), los muretes de la adobera 2 tuvieron una falla combinada en el espécimen 1 y 4, las cuales se originaron en la una de las juntas, prolongándose por el mortero hasta terminar en el apoyo inferior (Imagen 63a y 63.); los otros dos especímenes tuvieron una falla por adherencia (Imagen 63b y 63c); la adobera 3 también tuvo dos casos de falla, por adherencia en el espécimen 1 y 2 (Imagen 64a y 64b) y falla combinada en el espécimen 3 y 4, la fisura provocada unió los dos apoyos, pero en el espécimen 3 la fisura se prolongo a través de una fisura presente antes del ensayo (Imagen 64c y 64d).

Los resultados de los especímenes ensayados se resumen en la tabla 17, la norma Peruana E.080 determina que la resistencia ultima del murete a tracción indirecta debe ser mínimo de 0.025 MPa, por lo tanto se puede concluir que los especímenes de la adobera 2 y 3 no cumplen con la resistencia mínima, siendo los muretes de la adobera 1 los únicos en cumplir este requisito (Gráfico 20).

Tabla 17. Resistencia a tracción indirecta del murete

Propia

Especímen	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Diagonal [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. [MPa]
Adobera 1	228,1	567,2	570,9	804,8	3803	0,029
Adobera 2	204,9	568,5	562,5	799,9	4925	0,021
Adobera 3	204,9	561,2	540,2	779,0	4050	0,018

Imagen 63. Muretes ensayados a tracción indirecta de la adobera 2

Propia

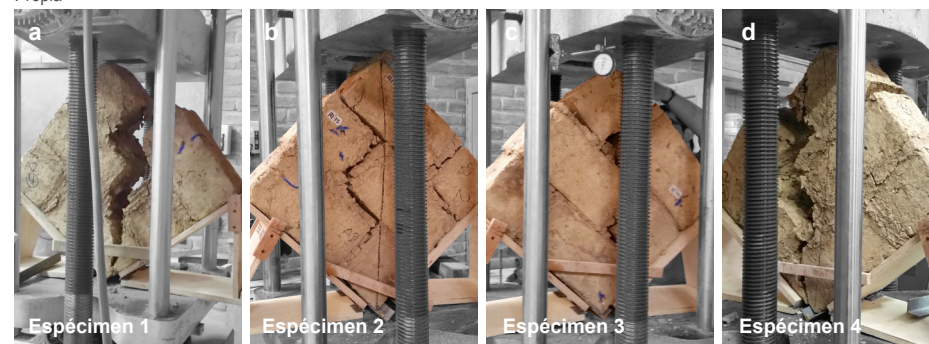


Imagen 64. Muretes ensayados a tracción indirecta de la adobera 3

Propia



Gráfico 20. Resistencias promedio del murete a tracción indirecta

Propia

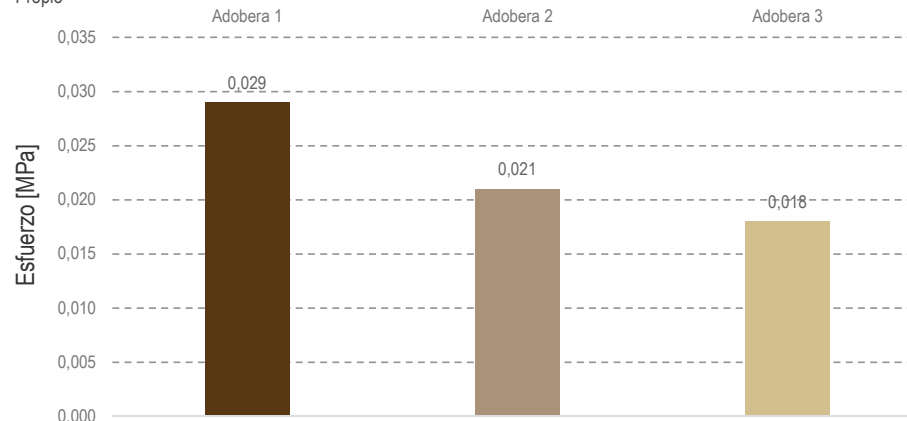
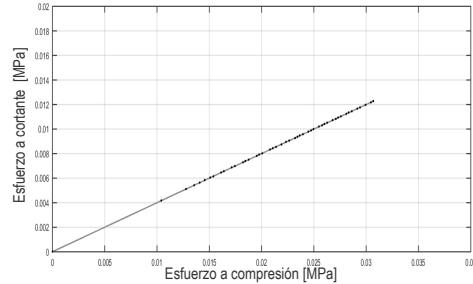
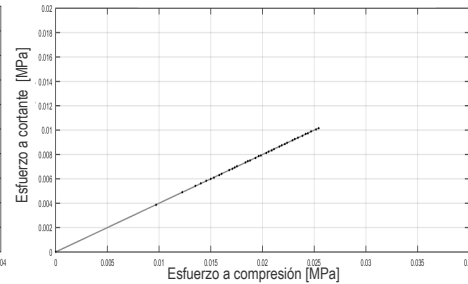


Gráfico 21. Esfuerzo a compresión vs esfuerzo a cortante del muretes a tracción indirecta
Propia

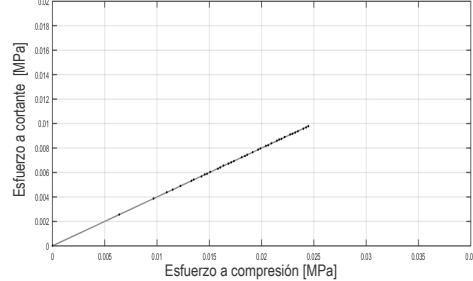
Adobera 1 murete 1



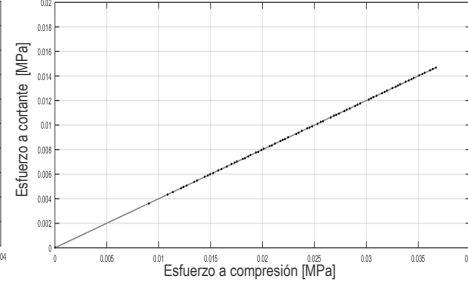
Adobera 1 murete 2



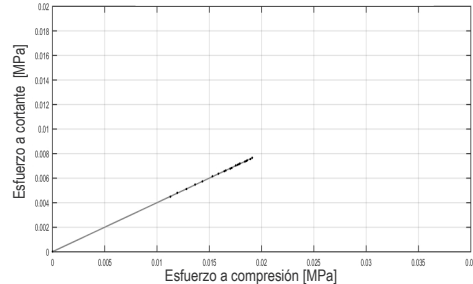
Adobera 1 murete 3



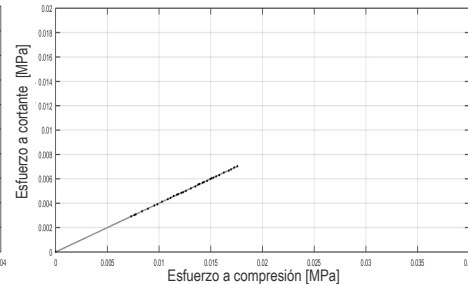
Adobera 1 murete 4



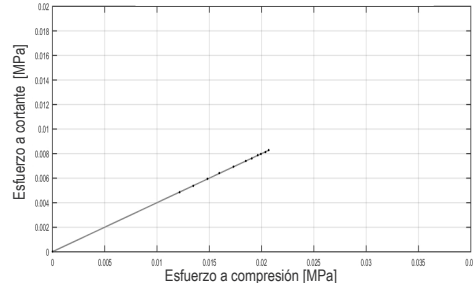
Adobera 2 murete 1



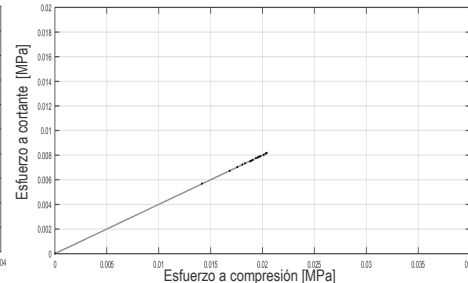
Adobera 2 murete 2



Adobera 2 murete 3



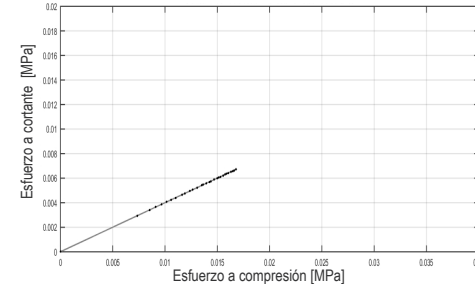
Adobera 2 murete 4



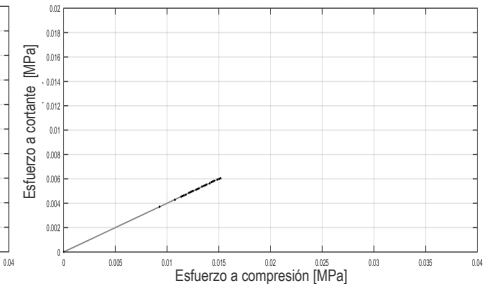
Estos resultados coinciden con que la adobera 1 era la que presentaba en sus adobes y en su mortero las mejores características mecánicas de los diferentes casos de estudio analizados. Los adobes de la adobera 2 cumplieron con la resistencia a compresión mínima establecida por la norma peruana, y el mortero empleado en la construcción de los muretes mostraba un mejor comportamiento compresión que el adobe, pero esto no fue suficiente para mejorar el comportamiento del murete, mientras que los muretes construidos en la adobera 3 sus adobes no cumplían con los requisitos mínimos de resistencia a compresión, y aunque el mortero tenía mejores características, no mejoró el comportamiento del murete, siendo el que menor resultado obtuvo y no cumplió la norma peruana.

Con los resultados obtenidos mediante los ensayos de tracción indirecta en muretes, se graficó el esfuerzo a compresión vs el esfuerzo a cortante al que están sometidos los especímenes (Gráfico 21), donde se puede deducir que a mayor esfuerzo a compresión, mayor es el esfuerzo a cortante al que está sometido el murete, siendo los especímenes de la adobera 1 los que registraron una mayor resistencia a cortante.

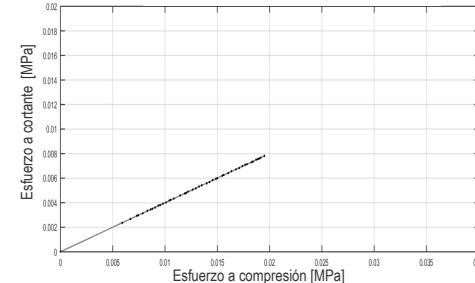
Adobera 3 murete 1



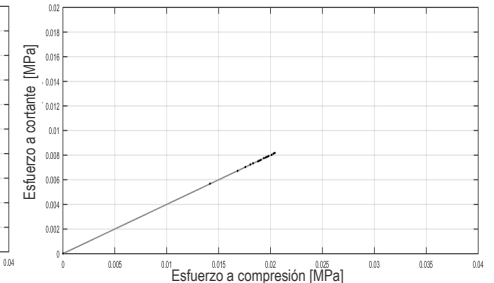
Adobera 3 murete 2



Adobera 3 murete 3



Adobera 3 murete 4



3.4.4. Resistencia a flexión del adobe

Esta resistencia se obtiene aplicando una carga perpendicular al lado longitudinal del adobe, el ensayo se lo realizó con dos puntos de carga, para asegurar que el adobe fracasase solamente a flexión, debido a que en el tercio medio del elemento la cortante es cero, evitando así que el adobe fracasare no solo por flexión sino también por cortante, el método de ensayo se lo detalla en el Anexo 2.

Se eligieron 6 adobes de cada caso de estudio seleccionando los adobes que presentaban menor cantidad de fisuras, las muestras ensayadas de la adobera 1, 3 y edificación 2 presentaban fisuras antes del ensayo, provocadas en algunos casos por la presencia de árido grueso (Imagen 65a).

Es por ello, que los adobes ensayados de la adobera 1, fracasaron principalmente por la fisura, estos adobes tenían una alta presencia de paja la cual se encontraba superficialmente (Imagen 66a), en el caso de la adobera 2 (Imagen 65b) y la adobera 3 (Imagen 65c) tenían una baja presencia de paja y se encontraba combinada con algunas raíces distribuidas en el adobe (imagen 66b y 66c), en la edificación 1 (Imagen 65d) tenían una alta presencia de paja similar al carrizo, pero esta tenía un diámetro aproximado de tres milímetros siendo hueca en su interior y no se presentaba adherida a la tierra (Imagen 66d), los especímenes de la edificación 2 (Imagen 65e) tenían una baja presencia de paja que se encontraba en algunos casos concentrada en un solo punto (Imagen 66e).

Cabe aclarar que, ante la falta de precisión en los equipos del Laboratorio de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad de Cuenca, tal y como se comentó anteriormente no se pudo obtener el módulo de elasticidad de los especímenes, sin embargo si se logró determinar el esfuerzo máximo a flexión.

Finalmente los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en la Tabla 18, donde se puede verificar que la resistencia a flexión del adobe es baja (Gráfico 22), la adobera 1 la resistencia obtenida representa el 24% de la resistencia a compresión; la edificación 2 su resistencia representa alrededor del 8%; la ado-

Imagen 65. Lugar de fisura de los adobes ensayados a flexión
Propia

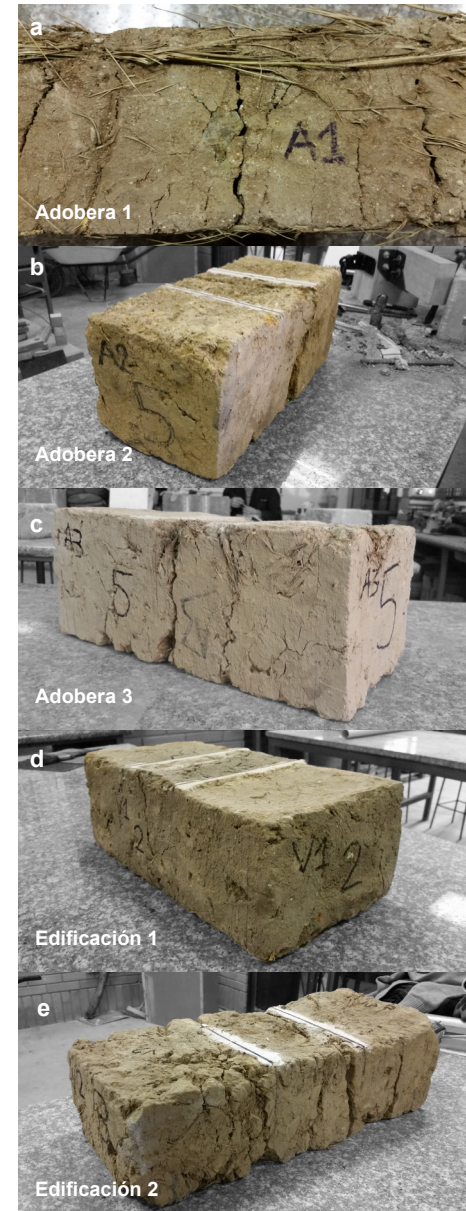


Imagen 66. Presencia de paja en los adobes ensayados a flexión
Propia

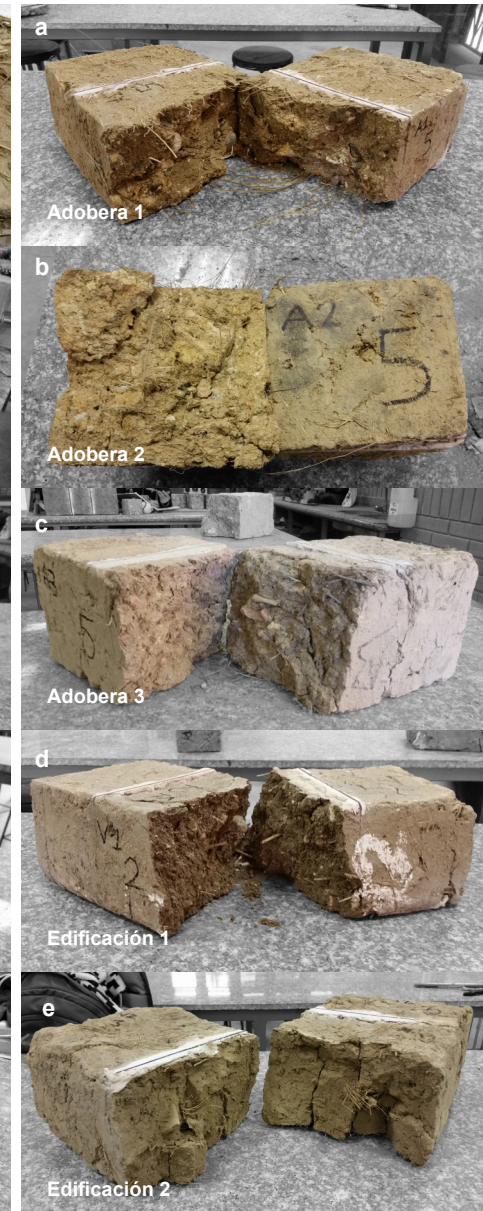


Tabla 18. Resistencia a flexión del adobe
Propia

Especimen	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. flexión [MPa]	Esfuerzo máx. compresión [MPa]	Porcentaje resistencia a flexión con respecto a compresión
Adobera 1	192,8	395,1	134,2	3098	3,00E-01	1,24	24,18%
Adobera 2	202,5	402,5	183,8	4249	2,03E-05	1,16	0,00%
Adobera 3	202,8	411,3	171,5	3622	3,38E-05	0,61	0,01%
Edificación 1	192,8	395,1	134,2	3098	5,34E-05	0,62	0,01%
Edificación 2	244,3	498,8	135,0	1311	1,18E-01	1,44	8,19%

Gráfico 22. Resistencias promedio del adobe a flexión
Propia



bera 2, la adobera 3 y la edificación 1 su resistencia representa menos del 0.01% de la resistencia obtenida a compresión, evidenciando que la baja cantidad de fibras o su sustitución por raíces en el caso de la adobera 2 y 3 no ayuda a su resistencia ante cargas a flexión.

3.4.5. Comparación de resistencias según distintas normativas

Las distintas normativas o documentos que abordan el tema del adobe, sugieren parámetros mecánicos mínimos que este debe soportar ante diferentes cargas, tal y como se puede observar en tabla 19, todos los documentos sugieren un valor para la resistencia a compresión, sin embargo tan solo la norma peruana y neozelandesa sugieren valores para otro tipo de cargas.

Si comparamos los resultados obtenidos en el laboratorio (Tabla 20) podemos observar que según el documento CYED que sugiere una resistencia a la compresión de 1.2 MPa tan solo los especímenes de la adobera 1 y adobera 2 cumplen, la norma española establece varios valores de resistencia a compresión: baja (0.75 MPa), media (1.5 MPa) y alta (2.25 MPa) donde solo los especímenes de la adobera 1, adobera 2 y edificación 2 entran en esta clasificación ubicándose entre los valores considerados como baja y media, la normativa neozelandesa establece una resistencia a la compresión de 1.3 MPa donde solo los adobes ensayados de la edificación 2 cumplen, además establece una resistencia a la flexión del adobe que debe estar entre el diez y veinte por ciento de la resistencia a la compresión donde solo la adobera 1 la cumple, para los valores establecidos en la norma peruana la adobera 1, adobera 2 y edificación 2 cumplen la resistencia a compresión del adobe y de estas solo la adobera 1 cumple el resto de resistencias establecidas por la normativa peruana.

Además para los parámetros establecidos en la IBC ninguno de los casos de estudio cumplieron la resistencia mínima para resistencia a compresión, lo mismo ocurre con los valores establecidos por NMAC 14.7.4 y la OIA.



Cabe señalar que la normativa neozelandesa, peruana y la IBC sugieren un módulo de elasticidad, para su empleo en el diseño estructural, los cuales son ampliamente superiores a los obtenidos en el laboratorio.

Finalmente se concluye que la adobera 1 cumple con 6 de los parámetros sugeridos en diferentes normativas, seguido de la edificación 2 con 5 normativas cumplidas, la adobera 2 cumple con 2 normativas, la adobera 3 y edificación 1 con los resultados mas bajos no son admitidos en ninguna normativa.

Tabla 19. Resistencia mínimas según normativas

Propia

Documento	Resistencia a la compresión - adobe [MPa]	Resistencia a la flexión - adobe [MPa]	Resistencia a la compresión - murete [MPa]	Resistencia a la tracción indirecta - murete [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
CYED (HABITERRA)	≥ 1,2	NS*	NS*	NS*	
Internacional Building Code (IBC)	≥ 2,1	NS*	NS*	NS*	413,7
NMAC 14.7.4.	≥ 2,1	NS*	NS*	NS*	
NTE E. 080 (Peru)	≥ 1,0	NS*	0,6	0,025	200,0
NZS 4298 (Nueva Zelanda)	≥ 1,3	10% a 20% resistencia compresión	NS*	NS*	300 * resistencia compresión
Office of International Affairs (OIA)	≥ 1,7	NS*	NS*	NS*	NS*
UNE-ENV (España)	baja = 0,75 media = 1,5 alta = 2,25	NS*	NS*	NS*	NS*

*NS = No sugiere

Tabla 20. Cumplimiento de normas según resultados obtenidos

Propia

Documento	Resistencia a la compresión - adobe [MPa]	Resistencia a la flexión - adobe [MPa]	Resistencia a la compresión - murete [MPa]	Resistencia a la tracción indirecta - murete [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
CYED (HABITERRA)	Adobera 1 Edificación 2				
Internacional Building Code (IBC)	ninguno				ninguno
NMAC 14.7.4.	ninguno				
NTE E. 080 (Peru)	Adobera 1 y 2 Edificación 2		Adobera 1	Adobera 1	ninguno
NZS 4298 (Nueva Zelanda)	Edificación 2	Adobera 1			ninguno
Office of International Affairs (OIA)	ninguno				
UNE-ENV (España)	Adobera 1 y 2 Edificación 2				



CAPÍTULO
04

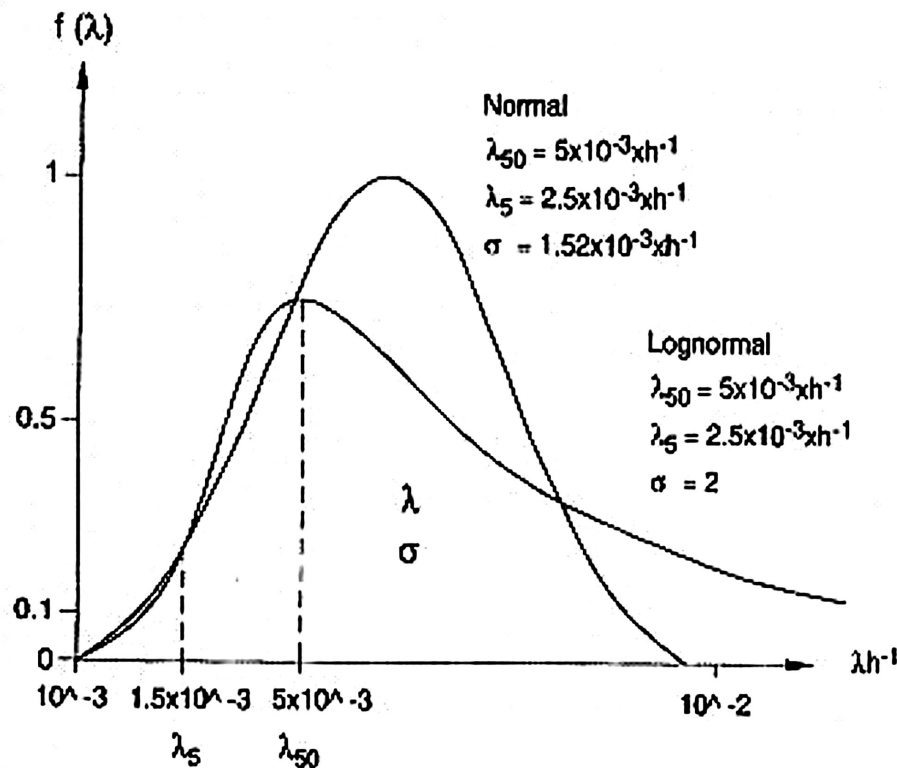
Aplicación de resultados

Introducción

El presente capítulo muestra la dispersión de datos mediante la curva de densidad de probabilidad (PDF) del módulo de elasticidad de cada adobera y edificación patrimonial, los cuales se ingresan en el modelo numérico para simular como trabaja el muro ante fuerzas provocadas por sismos, obteniendo la fuerza cortante y desplazamiento superior que soporta cada caso de estudio, imprescindible información para el diseño estructural de nuevas edificaciones, conservación de edificios existentes y para determinar la vulnerabilidad de este tipo de construcción ante fuerzas sísmicas.

4.1. Distribución de probabilidad aproximada

Gráfico 23. Distribución de probabilidad normal vs lognormal
Propio



En estadística se dice que una variable tiene una función de probabilidad, una función de distribución o simplemente una función de densidad de probabilidad (PDF) que caracteriza el comportamiento probable de una población. Es decir, la distribución de probabilidades describe la forma en que se espera que varíen los resultados, trata sobre expectativas de que algo suceda, resulta ser un modelo útil para hacer inferencias y tomar decisiones de incertidumbre (Badii, M. & Castillo J. 2009).

Existen diferentes tipos de distribuciones entre ellas la normal, log normal, etc. La distribución lognormal se caracteriza por las siguientes propiedades:

- Asigna a valores de la variable menores a cero 0 la probabilidad 0 y de este modo se ajusta a las tasas y probabilidades de fallo, de esta forma sólo pueden ser positivas.
- Como depende de dos parámetros, se ajusta bien a un gran número de distribuciones empíricas.
- Da más importancia a los valores grandes de las tasas de fallo que una distribución normal que tiende a ser pesimista (Gráfico 23) (Tamborero del Pino, J. & Cejalvo A. (s.f.))

Por ello se aplicará en esta investigación la distribución log normal en los módulos de elasticidad de las adoberas y edificaciones patrimoniales obtenidos en el capítulo 3, con el objetivo que la función de densidad de probabilidad obtenida permita determinar un rango de dispersión de datos de los cuales se obtienen valores aleatorios del módulo elástico para aplicar en el modelo numérico.



4.1.1. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del murete de adobe característico de Cuenca

Para generar los gráficos de distribución de probabilidad aproximada de los módulos de elasticidad de los muretes de adobe de Cuenca, se usaron los módulos de elasticidad de las cuatro muestras de cada fábrica de adobe, cuyos valores se detallan en los anexos, a partir de esos cuatro datos ingresados se generó la curva log normal generando la función de densidad de probabilidad (Gráfica 26), permitiendo deducir que:

La distribución de probabilidad aproximada del murete de adobe a compresión de la adobera 1 (Gráfica 26), tiene una alta probabilidad de datos entre 15 MPa a 35 MPa, incluso aunque poca, hay probabilidad de obtener un módulo de 50 MPa y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 10 MPa.

En los muretes de la adobera 2 (Gráfica 24) existe probabilidad de datos entre 15 MPa a 35 MPa, aunque en menor grado que la adobera 1 y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 10 MPa y mayores que 50 MPa. El módulo de elasticidad de los muretes de la adobera 3 (Gráfica 26) tienen probabilidad de datos entre 10 MPa a 30 MPa y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 5 MPa y mayores que 45 MPa.

En resumen las tres adoberas tienen en común la probabilidad de datos para el módulo de elasticidad entre 15 a 30 MPa (Tabla 21).

Tabla 21. Media y desviación estándar de los muretes de las fábricas de adobe estudiadas

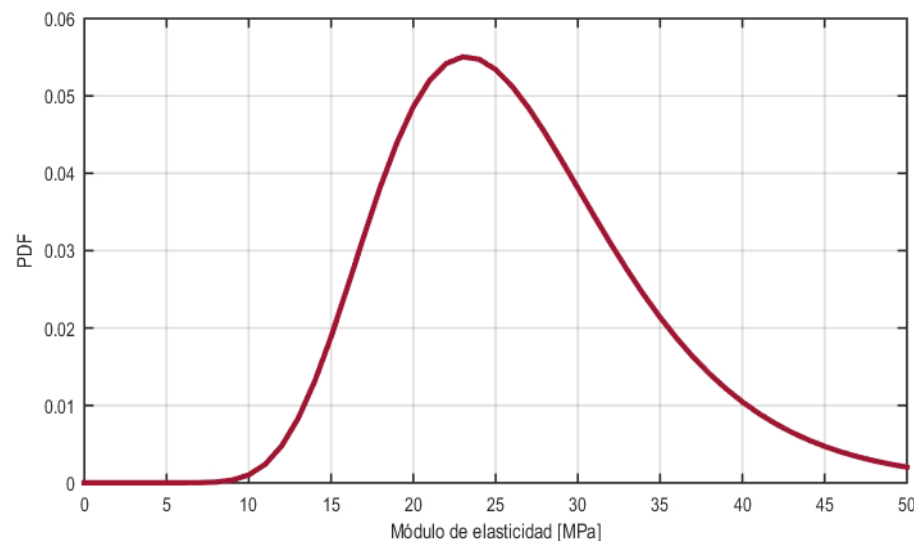
Propia

	Media del módulo de elasticidad a compresión [MPa]	Desviación estándar [MPa]
Adobera 1	25,39	1,34
Adobera 2	25,93	1,26
Adobera 3	18,91	1,36

Gráfico 24. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del murete de adobe a compresión

Propia

Adobera 1



Adobera 2

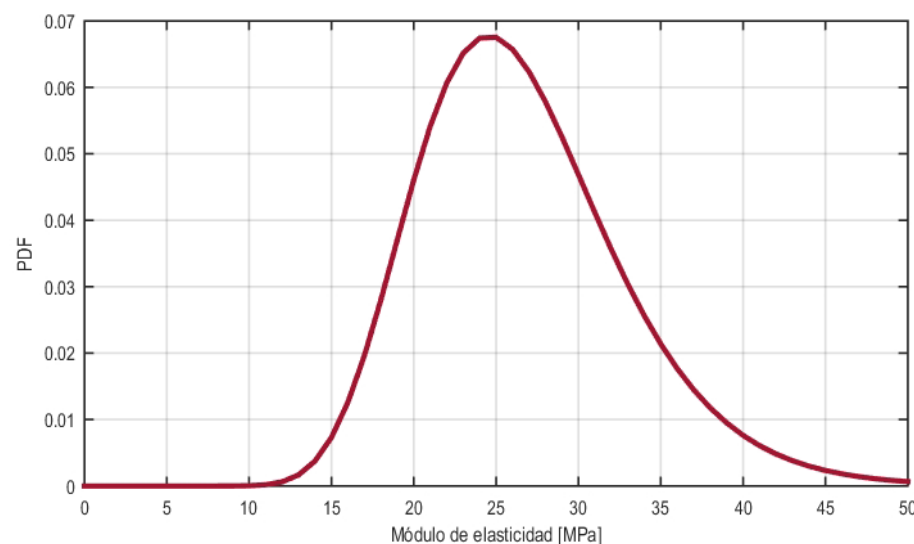


Gráfico 24. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del murete de adobe a compresión

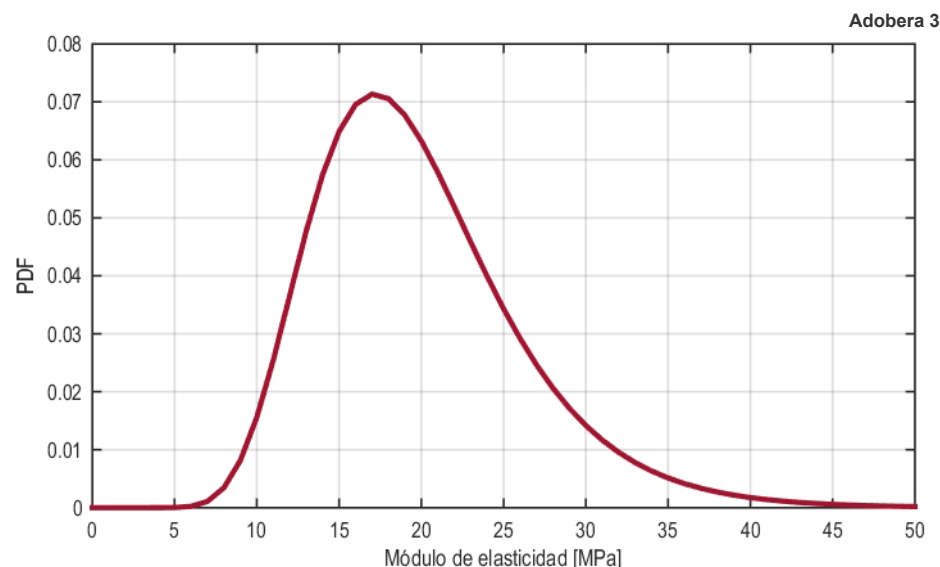
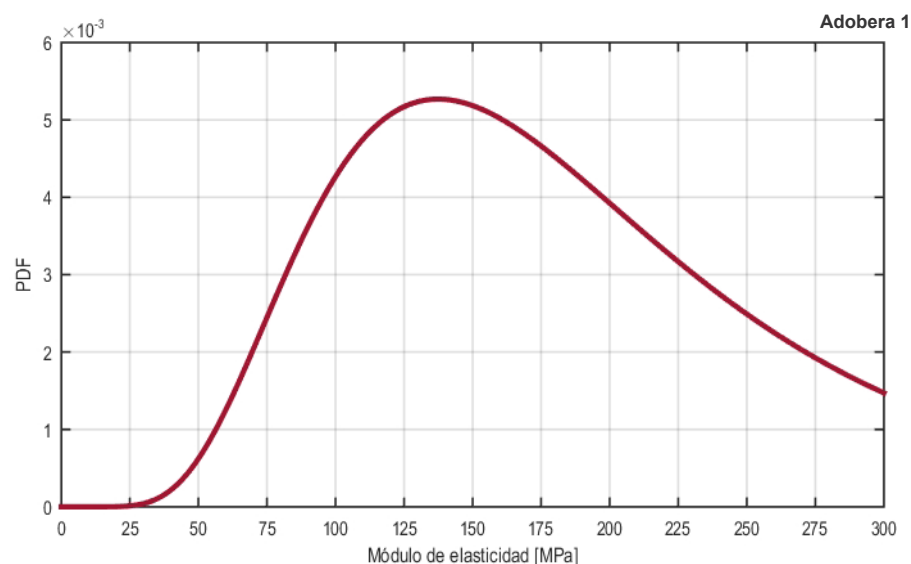


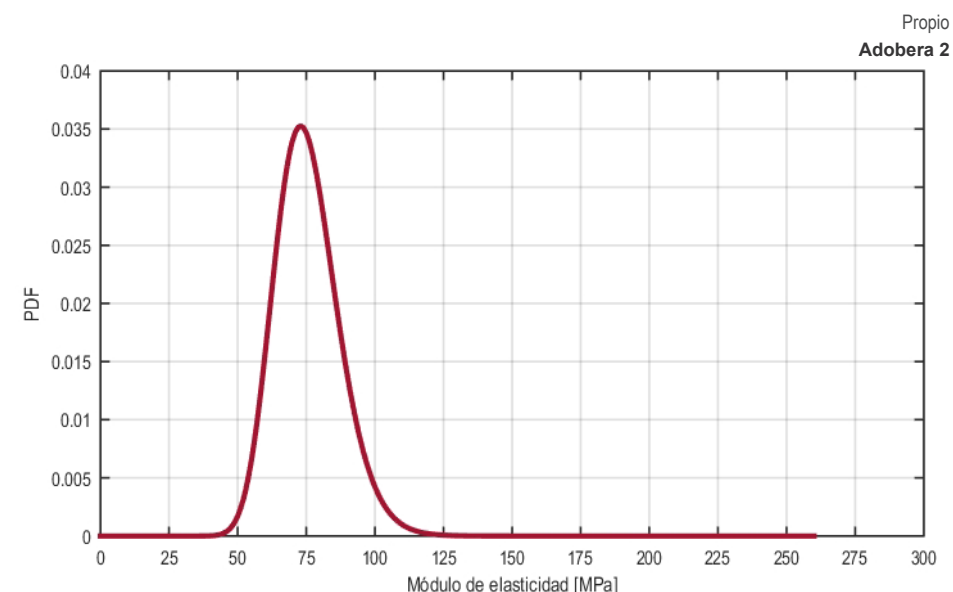
Gráfico 25. Distribución de probabilidad aproximada del mortero de barro a compresión



4.1.2. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del mortero de barro característico de Cuenca

La distribución de probabilidad aproximada se obtuvo usando los 6 valores del módulo de elasticidad de los 6 especímenes mortero de barro de Cuenca las seis muestras de fábricas de adobe, cuyos valores se detallan en los anexos, a partir de esos 6 datos ingresados se generó la curva log normal generando la función de densidad de probabilidad (Gráfica 25), permitiendo deducir que:

El mortero de barro de adobe a compresión de la adobera 1, muestra una alta probabilidad de datos del módulo de elasticidad entre 75 MPa a 300 MPa y nula probabilidad en menores a 25 MPa. El mortero de la adobera 2 tiene probabilidad de datos entre 50 MPa a 100 MPa, menor a la adobera 1, y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 10 MPa y mayores que 125 MPa. En resumen los dos morteros de barro tienen en común la probabilidad de datos para el módulo de elasticidad entre 75 a 100 MPa (Tabla 22).





4.1.3. Distribución de probabilidad aproximada del adobe característico de Cuenca

La distribución de probabilidad aproximada de adobe de Cuenca, se generó usando los valores de los módulos de elasticidad de seis especímenes de adobe de fábricas y edificaciones patrimoniales, que se detallan en los anexos, usando los 6 datos se generó la curva log normal generando la función de densidad de probabilidad (Gráfica 26), permitiendo deducir que:

El módulo de elasticidad de la adobera 1, tiene una alta probabilidad de datos entre 12.5 MPa a 50 MPa, incluso aunque poca, hay probabilidad de obtener un módulo de 60 MPa y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 10 MPa y mayores que 50 MPa.

Los adobes de la adobera 2 (Gráfica 26) tienen probabilidad de datos entre 20 MPa a 70 MPa, mayor que la adobera 1 y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 10 MPa y mayores que 120 MPa.

El módulo de elasticidad de los adobes de la adobera 3 (Gráfica 26) tienen probabilidad de datos entre 10 MPa a 30 MPa y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 10 MPa y mayores que 30 MPa.

La edificación 1 (Gráfica 26), tiene adobes con módulos de elasticidad con probabilidad de datos muy bajos cercanos a cero hasta 40 MPa, y nula probabilidad de módulos de elasticidad mayores que 120 MPa.

La edificación 2 (Gráfica 26), tiene adobes con módulos de elasticidad con probabilidad de datos muy bajos cercanos a cero hasta 40 MPa, y nula probabilidad de módulos de elasticidad mayores que 120 MPa.

En resumen, los cinco tipos de adobe tienen en común la probabilidad de datos para el módulo de elasticidad que puede variar entre 10 a 30 MPa (Tabla 23).

Tabla 22. Media y desviación estándar del mortero de barro de las fábricas de adobe estudiadas
Propia

	Media del módulo de elasticidad a compresión [MPa]	Desviación estándar [MPa]
Adobera 1	174,52	1,63
Adobera 3	74,66	1,17

Tabla 23. Media y desviación estándar de los adobes de los casos de estudio
Propia

	Media del módulo de elasticidad a compresión [MPa]	Desviación estándar [MPa]
Adobera 1	28,92	1,40
Adobera 2	41,28	1,51
Adobera 3	17,40	1,20
Edificación 1	17,00	2,13
Edificación 2	68,50	1,86

Gráfico 26. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del adobe a compresión
Propia

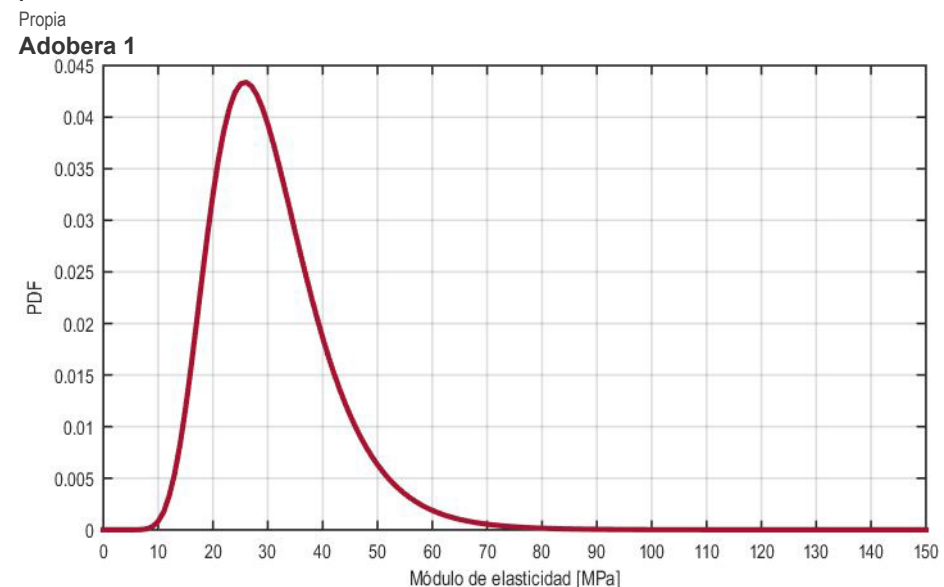
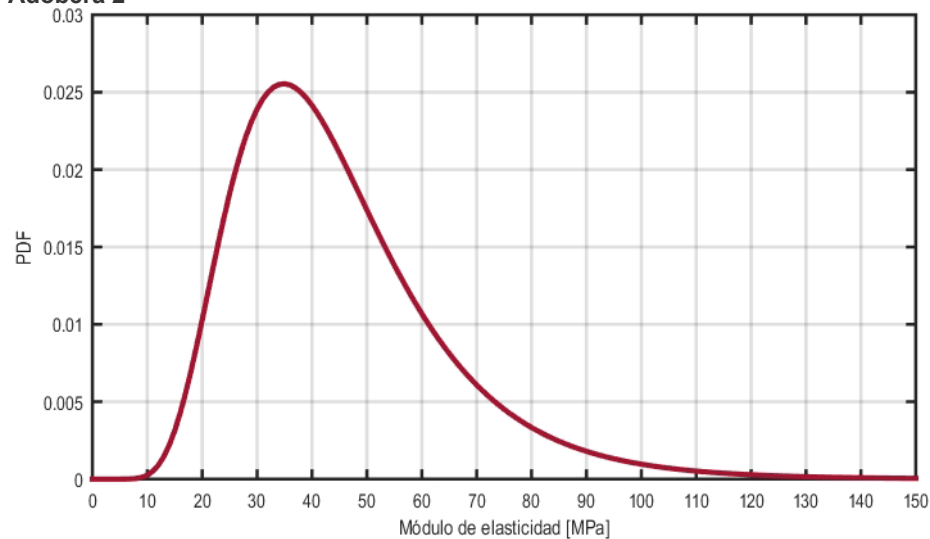




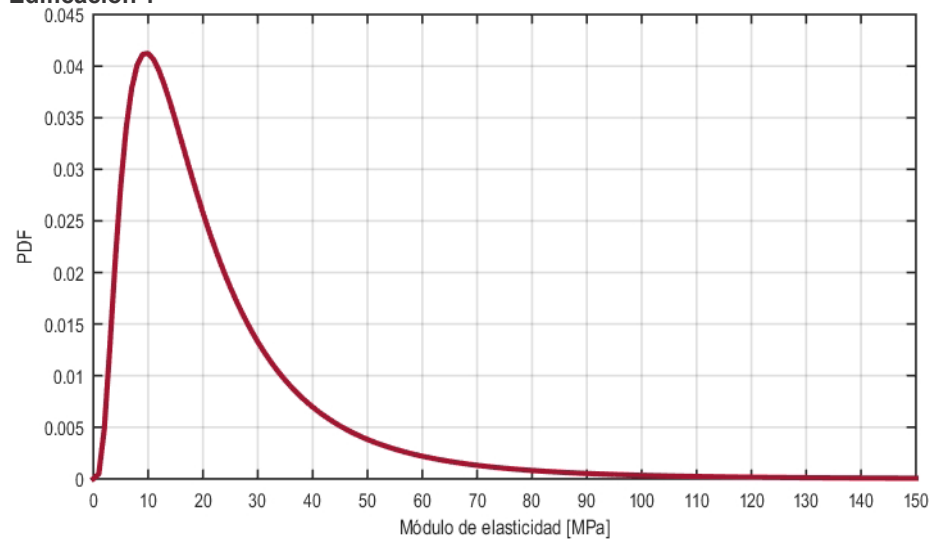
Gráfico 26. Distribución de probabilidad aproximada del módulo de elasticidad del adobe a compresión

Propio

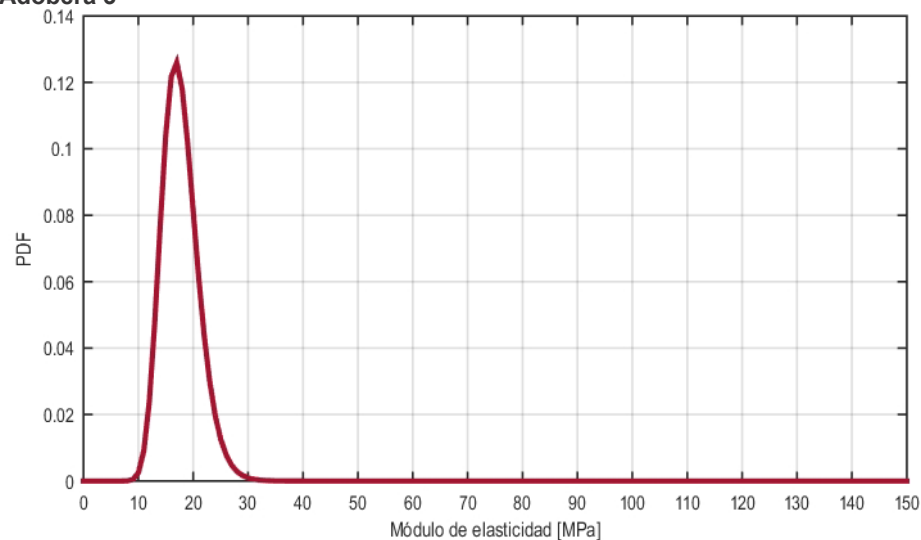
Adobera 2



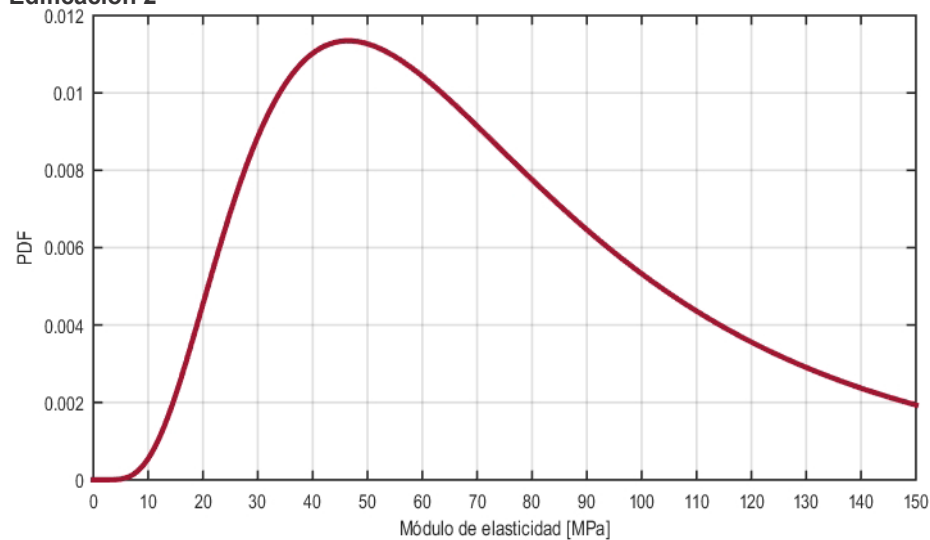
Edificación 1



Adobera 3



Edificación 2



4.2. Aplicación del modelo de análisis numérico

El modelo numérico se aplicó para las 3 fábricas de adobe y las 2 edificaciones patrimoniales estudiadas. Para la aplicación del modelo numérico, se ingresaron los siguientes datos obtenidos de los ensayos de caracterización mecánica:

- Modulo elástico del adobe.
- Resistencia a compresión del mortero de barro y adobe.
- Resistencia a tracción del adobe producto del ensayo a flexión.
- Resistencia a tracción del mortero de barro, considerado el 10% de su resistencia a compresión.
- Capacidad cortante del murete.

Gracias a los datos mencionados se modeló elementos sólidos que representan al adobe y al mortero de barro, en el programa ANSYS, como se muestra en el gráfico 27 en azul están dos vigas de acero rígidas que modelan las acciones del equipo sobre el murete de adobe, la una en la parte inferior que asegura las condiciones de contorno y que está sujeta a condiciones de borde de modo que evite el movimiento en el eje X, Y y Z, es decir esta fija, para que no se transmita las condiciones de borde directamente sobre el muro de adobe, de lo contrario se produciría un esfuerzo concentrado en el adobe que en la realidad no existe, la viga superior transmite las fuerzas de compresión y fuerza horizontal de forma equitativa al muro de adobe, en celeste está el mortero de adobe y en fucsia los adobes.

Y en el gráfico 28 se muestran los esfuerzos principales σ_3 producidos por el último incremento de carga a cortante y fuerza horizontal.

Gráfico 27. Elemento del muro de adobe representado en el modelo numérico
García Hernán, 2017.

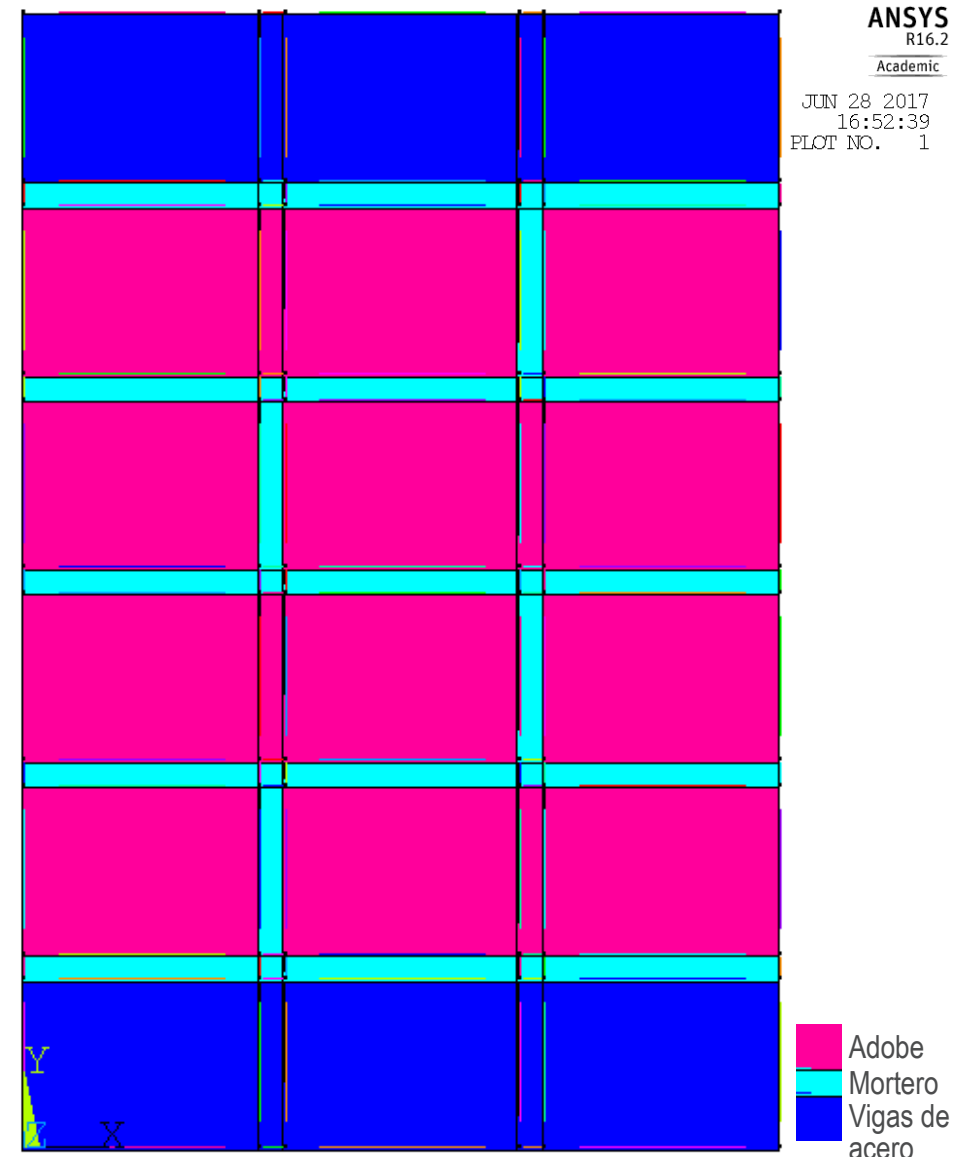




Gráfico 28. Muro de adobe representado en el modelo numérico
García Hernán, 2017.

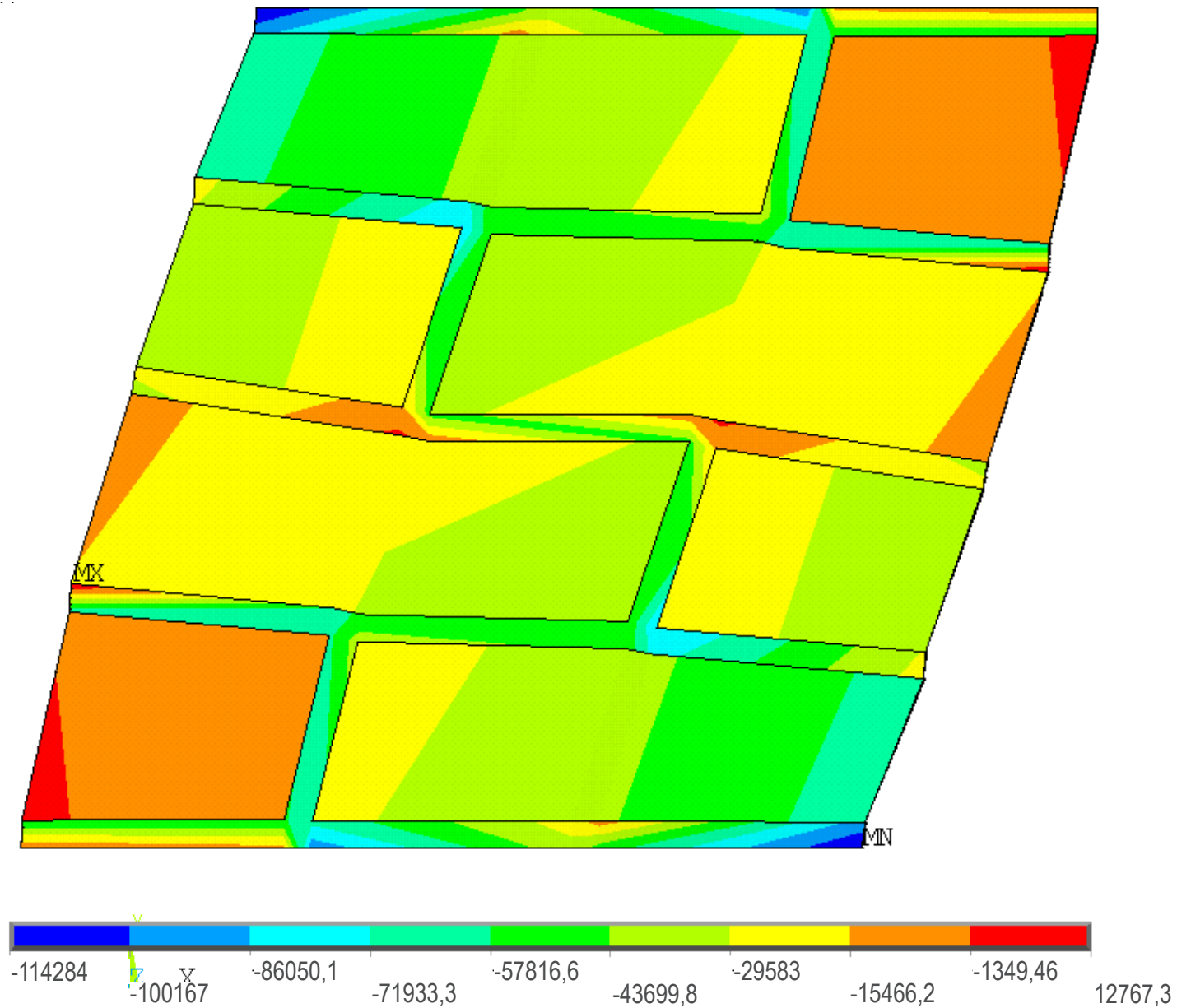
NODAL SOLUTION

STEP=2
SUB =52
TIME=2
S3 (AVG)
DMX =.001732
SMN =-114284
SMX =12767.3

ANSYS
R16.2

Academic

JUN 28 2017
16:57:32
PLOT NO. 1





Mediante el modelo numérico se analizaron la adobera 1, adobera 2, adobera 3, edificación 1 y edificación 2. A pesar que no se tienen resultados de las características mecánicas del mortero y murete de las edificaciones patrimoniales, por la falta de equipos para extraer muestras de muros, se modelaron los elementos del muro de dichas edificaciones en el modelo numérico ingresando valores proveniente de las curvas de probabilidad obtenida con la base de datos de las adoberas.

Luego de realizada la simulación del comportamiento del muro de adobe ante fuerzas a compresión que simula la carga muerta y carga viva que soporta el muro de adobe y una fuerza horizontal similar a una fuerza sísmica, se obtiene la resistencia de los muros a fuerza cortante.

En el gráfico 29, se observa la curva que se obtiene de la fuerza cortante versus el desplazamiento vertical de cada adobera y edificación patrimonial. Se puede ver que al llegar a cierto valor la gráfica deja de ser lineal y tiene un comportamiento inelástico.

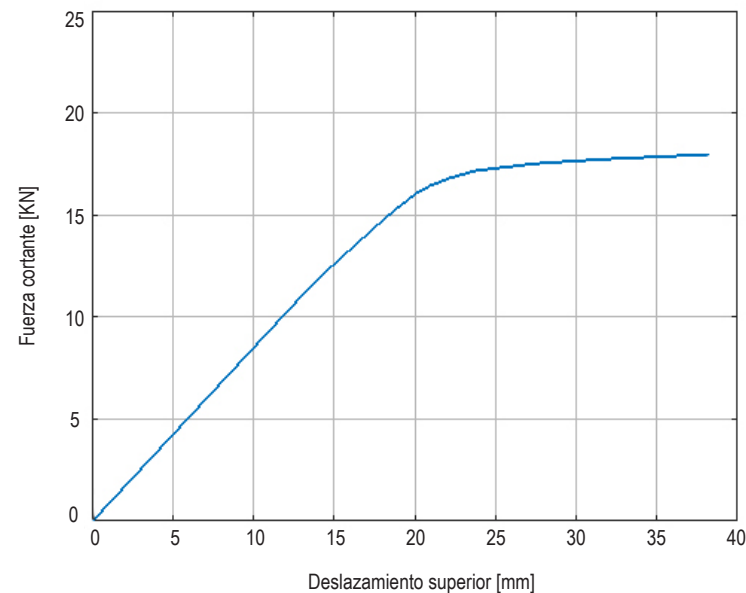
Estas gráficas demuestran cuanto puede resistir el muro de adobe a fuerzas horizontales provocadas por sismos, las gráficas pierden curvatura en la parte superior (es casi una recta horizontal) se debe a que el adobe es un material rígido y la curva se pierde al pasar al estado inelástico de la gráfica. Los muros de adobe de la adobera 1 y edificación 2 son los que registran mayor capacidad a fuerzas cortantes, pero este factor no es el principal, aún más importante es que tenga menor desplazamiento superior cuando de sismos se trata, pues si algo se puede deformar más a pesar que resista menos tiene más probabilidad de resistir un sismo sin fracasar.

Los sismos y las fuerzas que ejercen a cortante, cuya magnitud además está en función de factores como la carga muerta y carga viva, y el desplazamiento no debería ser mayor a los especificados en la gráfica 29 para cada caso de estudio porque entonces la edificación presentaría fallas como las detalladas en el capítulo 2 donde se describe la vulnerabilidad del adobe ante sismos.

Es así que, con los resultados de la caracterización mecánica de los adobe se puede diseñar cualquier estructura de mampostería de adobe en Cuenca, aproximándose a la realidad.

Gráfico 29. Curva de capacidad de los muros de adobe

Propia

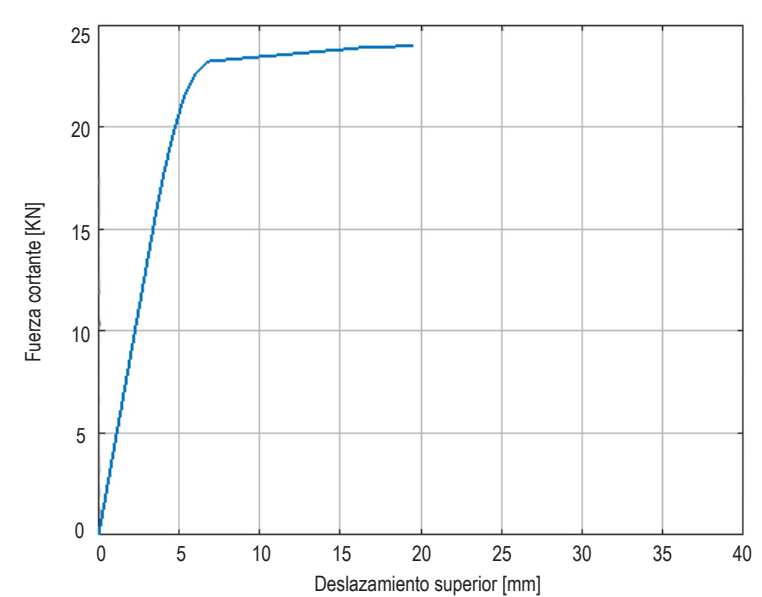
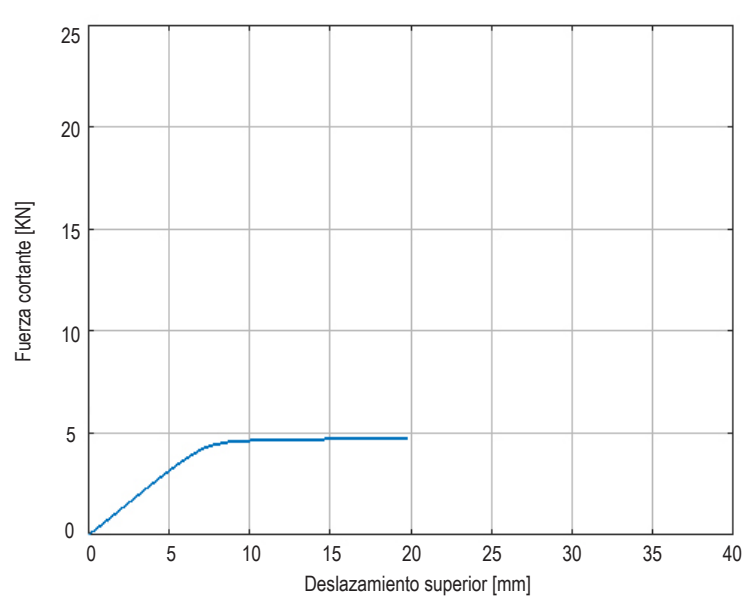
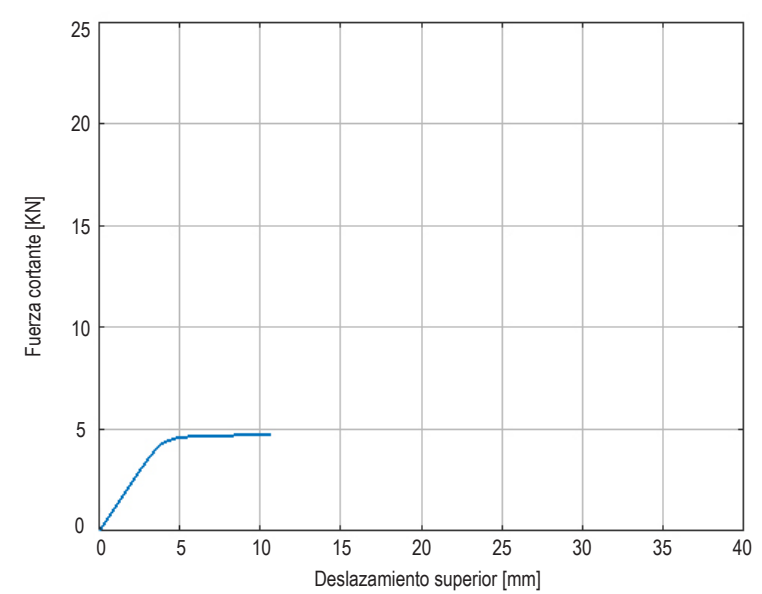
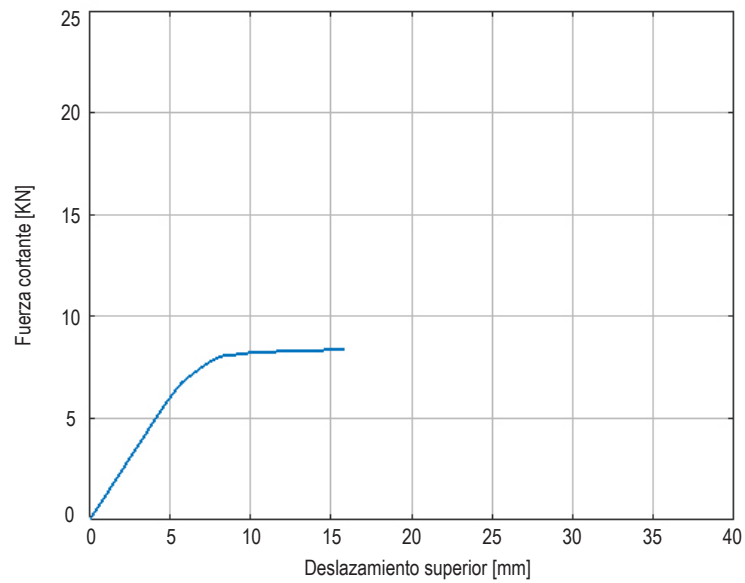


Adobera 1



Gráfico 29. Curva de capacidad de los muros de adobe

Propia

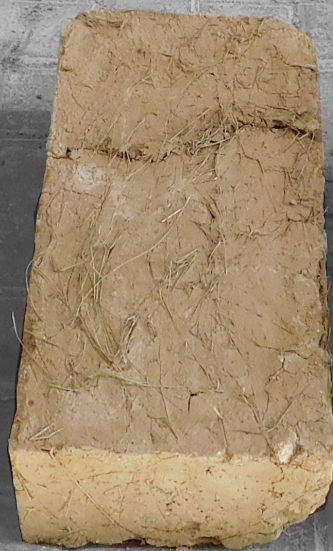




Edificación 1



Edificación 2



Adobera 1



Adobera 2



Adobera 3

Conclusiones y recomendaciones

Tabla 24.
Clasificación
SUCS según el
tamaño de árido
Propia

Unidad de adobe				
Caracterización física		Caracterización mecánica		
Tipo de suelo según SUCS	Contenido de materia orgánica [%]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	
Edificación 1 SM (suelo de grano grueso con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánica)	8,14	0,62	0,00005	
Edificación 2 CH (suelo de grano fino con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánica)	7,41	1,44	0,12	

Gráfico 30.
Características
mecánicas y fí-
sicas del adobe
de edificaciones
patrimoniales
Propia

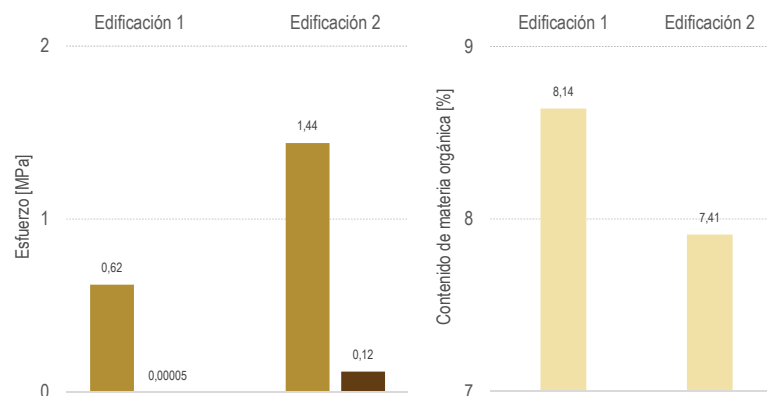


Imagen 67. Fibras naturales presentes en la edificación 1 y 2
Propia



¿Qué relación existe entre las propiedades físicas y mecánicas de la unidad de adobe y las propiedades mecánicas del murete de adobe?

Hay una relación directa entre la calidad de los componentes del adobe obtenidos en los ensayos de carácter físico con el comportamiento mecánico del adobe como unidad y como muro, que se evidencia en las edificaciones patrimoniales y fábricas de adobe o adoberas, descritas a continuación:

- Los adobes de la edificación 1, (Tabla 24 y Gráfico 30), tiene una composición desfavorable, por ser un suelo de grano grueso con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánica, con presencia alta de contenido orgánico 8% que muy poco corresponde a fibras naturales importantes estabilizantes y rigidizadores. La mala calidad de los componentes del adobe de esta edificación se reflejan en el comportamiento mecánico, el árido grueso afecta en la resistencia a compresión del adobe provocando que se acelere su fracaso, en la tabla 24 se observa la resistencia inferior a la mínima permitida para la construcción según la norma peruana E. 080, y la resistencia a flexión con valores sumamente bajos en comparación de la adobera 1 y edificación 2 por la falta de fibras naturales apropiadas, ya que se usó un tipo de paja cilíndrica hueca que no tuvo adherencia con el adobe (Imagen 67) y por ende no trabajaron en conjunto.

- La edificación 2, (Tabla 24 y Gráfico 30), con adobes de composición granular fina y limos inorgánicos de compresibilidad media tiene buenas características además de tener alrededor del 7% de contenido orgánico del que parte corresponde a fibras naturales, por ello la resistencia a compresión supera 1 MPa el esfuerzo mínimo establecido en la norma peruana E. 080, asimismo sobrepasa la resistencia a flexión de la edificación 1 por la presencia de fibras que funcionan como rigidizadores en el adobe (Imagen 67).



Tabla 25. Clasificación SUCS según el tamaño de árido

Propia

Unidad de adobe				Mortero de barro			Murete	
Caracterización física		Caracterización mecánica		Caracterización física		Caracterización mecánica		Caracterización mecánica
Tipo de suelo según SUCS	Contenido de materia orgánica [%]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Tipo de suelo según SUCS	Contenido de materia orgánica [%]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a tracción indirecta [MPa]
Adobera 1 MH (suelo de grano fino con limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas)	6,43	1,24	0,30	CL (suelo de grano fino con arcillas inorgánicas de plasticidad media)	8,78	4,59	0,74	0,029
Adobera 2 SC (suelo de grano grueso con arcillas inorgánicas de plasticidad media)	4,30	1,16	0,00002	ML (suelo de grano fino con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánicas)	6,16	2,47	0,52	0,021
Adobera 3 SM (suelo de grano grueso con limos inorgánicos de compresibilidad media y arcillas orgánicas)	6,89	0,61	0,00003				0,40	0,018

Gráfico 31. Características mecánicas y físicas del adobe, mortero de barro y muretes de adoberas

Propio

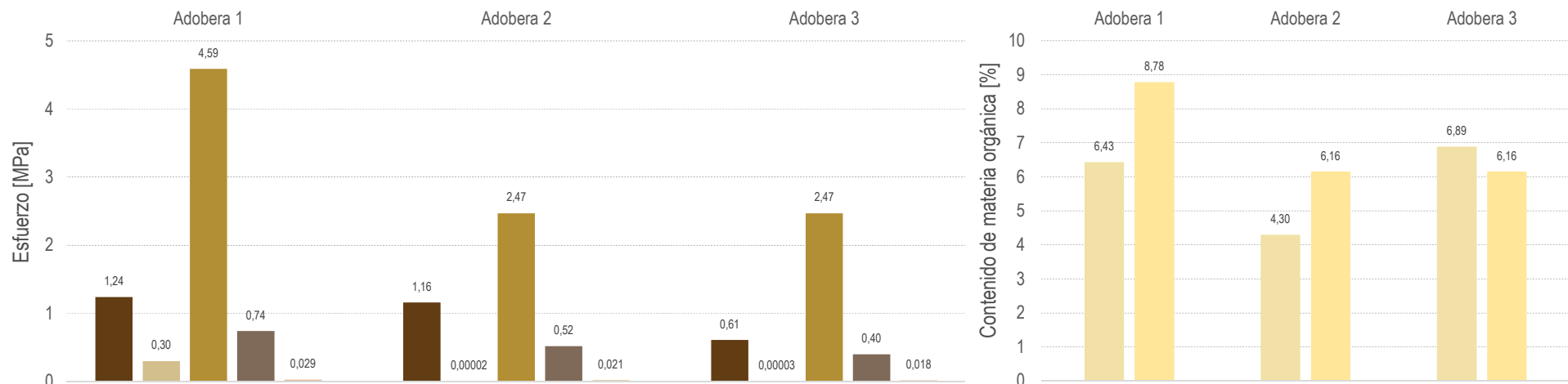
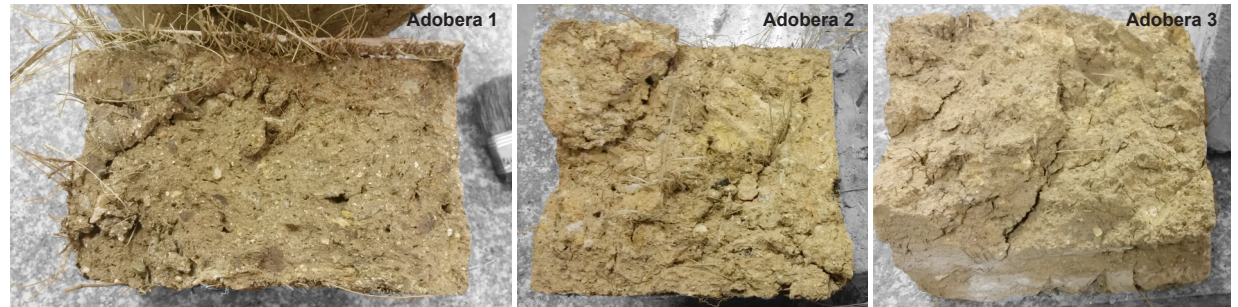


Imagen 68. Fibras naturales presentes en la adobera 1, 2 y 3
Propia



- Los adobes de la adobera 1, (Tabla 25, Gráfico 31), posee una composición granular fina y limos inorgánicos de alta compresibilidad que le otorgan un buen comportamiento mecánico y 6% de contenido orgánico que corresponde en su mayoría por la alta presencia de fibra natural como se observa en la imagen 68, la resistencia a compresión supera el esfuerzo mínimo establecido por la norma peruana y sobrepasa la resistencia a flexión de la Edificación 1, Adobera 2 y 3 por la presencia de fibras que funcionan como rigidizadores en el adobe (Imagen 68). Por las excelentes características físicas del mortero, suelo de grano fino, plasticidad media y arcillas inorgánicas dio como resultado la resistencia a compresión más alta registrada en esta investigación (Tabla 25). Como producto de un adobe y mortero de buena calidad, los muretes de esta adobera rebasan la resistencia a compresión y tracción indirecta mínima que indica la norma peruana E. 080, además de registrar los valores más altos de las tres fábricas de adobe.

- La adobera 2, (Tabla 25, Gráfico 31), tiene adobes compuesto de suelo de grano grueso, plasticidad media, arcillas inorgánicas y poco contenido de materia orgánica que poco tiene que ver con la paja que es casi nula como se observa en la imagen 68, propician condiciones óptimas para un buen comportamiento mecánico del adobe. La buena calidad de la composición del adobe de esta adobera se refleja en el comportamiento a compresión con resultados superiores a los mínimos establecidos por la norma peruana E 080; sin embargo a flexión, la baja presencia de fibras naturales (Imagen 68) importantes estabilizantes y rigidizadores influyeron en la baja resistencia del adobe a flexión.

- La adobera 3, (Tabla 25, Gráfico 31), con adobes de composición granular gruesa

sa y limos inorgánicos de compresibilidad con alrededor del 7% de contenido orgánico que poco corresponde a las fibras naturales, como se observa en la imagen 68 la presencia de paja en estos adobes es casi nula, debido a la alta presencia de árido grueso la resistencia a compresión no supera 1 MPa, el esfuerzo mínimo requerido en la norma peruana E. 080, además de muy baja resistencia a flexión provocada por casi nula presencia de fibras.

La adobera 2 y 3 usan el mismo mortero (Tabla 25, Gráfico 31), que tiene poco contenido de fibras, composición granular fina y limos inorgánicos de compresibilidad media obteniendo alta resistencia a compresión, pero no al nivel del mortero de la adobera 1 que logro casi el doble de resistencia (Gráfico 31). Por los resultados obtenidos la resistencia a compresión lograda por el mortero de barro no fue suficiente para compensar la mala calidad del adobe de la adobera 3 ni para cumplir con la calidad necesaria del murete de la adobera 2 que si cumplió con la resistencia mínima a compresión de sus adobes, debido que los muretes soportaron resistencias a compresión y tracción indirecta por debajo de las resistencias admisibles que indica la norma peruana E. 080.

Como recomendación final gracias a la experimentación, es importante que los adobes en su composición no tengan grava, ladrillo, teja o madera como duelas de gran tamaño como se encontró en algunos adobes ya que perjudican la resistencia del material, así como es imprescindible el uso de paja dentro del adobe y no solo en la superficie como ocurrió en todos los adobes. Para el mortero es importante que la composición sea de granos finos, arenas y paja para lograr mayor adherencia con el adobe y así los muros consigan mayor resistencia.



¿Qué relación existe entre el módulo elástico del adobe y su capacidad a compresión?

Los casos de estudio con las resistencias mayores (Edificación 2, Adobera 1 y Adobera 2) tienen también los módulos de elasticidad más altos. Sin embargo, el módulo elástico también es proporcional a la deformación, por ello algunos casos de estudio, a pesar de tener mayor resistencia, tienen menor módulo de elasticidad que otras adoberas o edificaciones patrimoniales (Tabla 26 y Gráfico 33). He ahí la importancia que el material no experimente mucha deformación, por ello es importante compactar el adobe en su fabricación, de lo contrario al secarse quedará poroso y al aplicar la carga a compresión la deformación será mayor e incluso la resistencia menor.

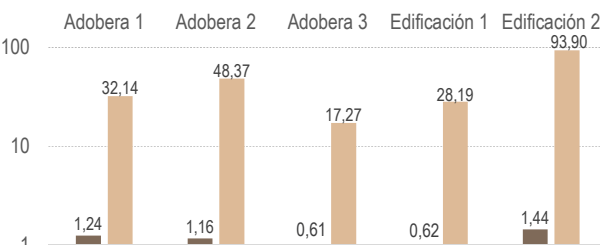
Tabla 26. Relación entre el módulo elástico del adobe y su capacidad a compresión

Propia

	Resistencia a la compresión adobe [MPa]	Módulo de elasticidad adobe [MPa]
Adobera 1	1,24	32,14
Adobera 2	1,16	48,37
Adobera 3	0,61	17,27
Edificación 1	0,62	28,19
Edificación 2	1,44	93,90

Gráfico 32. Relación entre el módulo elástico del adobe y su capacidad a compresión

Propio



¿Qué relación existe entre el módulo elástico del adobe y el módulo elástico del murete de adobe?

Los módulos elásticos del adobe y muretes tienen relación directa en los tres casos de estudio, puesto que conforme mayor es el módulo del adobe mayor es su módulo elástico en los muretes como se demuestra en la tabla 27 y gráfico 34.

Tabla 27. Relación entre el módulo elástico del adobe y del murete de adobe

Propia

	Módulo de elasticidad adobe [MPa]	Módulo de elasticidad murete a compresión [MPa]
Adobera 1	32,14	26,22
Adobera 2	50,63	26,43
Adobera 3	17,27	13,05

Gráfico 33. Relación entre el módulo elástico del adobe y del murete de adobe

Propio

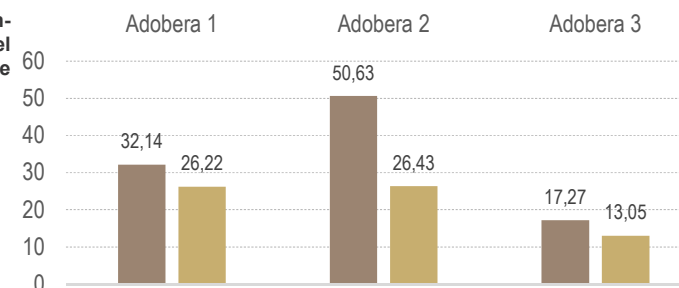


Tabla 28. Módulo elástico de los especímenes de muretes de adobe ensayados

Propia

		Módulo de elasticidad [MPa]
Adobera 1	Muestra 1	17,43
	Muestra 2	25,65
	Muestra 3	36,18
	Muestra 4	25,65
Adobera 2	Muestra 1	31,07
	Muestra 2	26,53
	Muestra 3	18,53
	Muestra 4	29,58
Adobera 3	Muestra 1	15,36
	Muestra 2	26,48
	Muestra 3	22,66
	Muestra 4	13,79
Media		23,16
Desviación estandar		1,35

Tabla 29. Valores aleatorios del módulo elástico representativo del muro de adobe en Cuenca

Propia

Módulo de elasticidad [MPa]
27.17
39.94
11.84
29.92
25.46
15.70
20.36
25.64
67.06
52.73

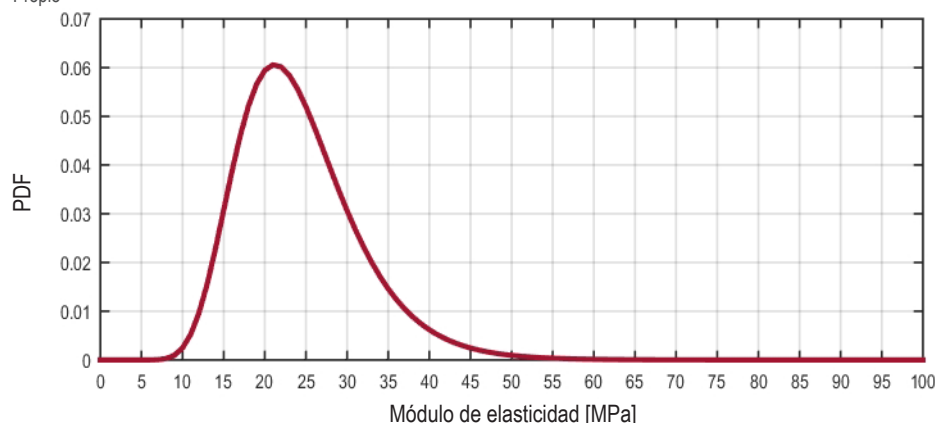
¿Entre que valores se encuentra el módulo elástico del murete característico de Cuenca y que dispersión de resultados podemos esperar?

El módulo elástico del murete de adobe característico de Cuenca tiene una media de 23,16 MPa como se observa en la tabla 28 con una desviación de $\pm 1,35$ MPa, dando el rango de mayor probabilidad del módulo elástico de adobe. Además como se observa en el gráfico 35 la curva de posibilidad del módulo de elasticidad indica la dispersión de datos que se puede tener con probabilidad de datos entre 15 MPa a 30 MPa, incluso aunque poca, hay probabilidad de obtener un módulo de 50 MPa y nula probabilidad de módulos de elasticidad menores a 5 MPa.

Gracias a la función de densidad de probabilidad (PDF) (Gráfico 35) de la cual se observa la dispersión de datos, se pueden obtener valores aleatorios con probabilidades dentro del rango debajo de la curva PDF que muestra una característica general de los módulos de elasticidad de todos los casos de estudio (Tabla 29). Algunos de los valores aleatorios que se puede obtener se muestran en la tabla 29, estos datos son útiles en la caracterización del muro de adobe a usarse en el modelo numérico.

Gráfico 34. Función de densidad de probabilidad del módulo elástico del muro de adobe característico de Cuenca

Propia





¿Qué relación existe entre los valores obtenidos del módulo elástico en las pruebas de laboratorio sobre muretes y el propuesto en normativas?

Los valores del módulo elástico en muretes de adobe del cantón Cuenca (Tabla 30), son muy inferiores a los recomendados en normas (Tabla 31), sugiriendo que los adobes fabricados en la zona de estudio de esta investigación no son aptos para la construcción. Sin embargo, con un estudio más profundo como la aplicación del modelo numérico se obtendrá en función del módulo y otros factores cuanto puede resistir los muros de adobes a fuerzas provocadas por sismos. Se recomienda en posteriores investigaciones aplicar técnicas para reforzar el adobe existente en Cuenca, permitiendo que resista más y con menores deformaciones dando como resultado mayor módulo elástico.

Tabla 30. Módulo elástico del murete de adobe

Propia

	Módulo de elasticidad murete compresión [MPa]
Adobera 1	26,22
Adobera 2	26,43
Adobera 3	13,05

Tabla 31. Módulo elástico sugerido en normativas

Propia

Documento	Módulo de elasticidad [MPa]
Internacional Building Code (IBC)	413,7
NTE E. 080 (Peru)	200,0
NZS 4298 (Nueva Zelanda)	300 * resistencia compresión

¿Cuales son las principales formas de falla determinadas a partir de los ensayos de muretes de adobe?

Los muretes de la adobera 1 presentaron principalmente una falla combinada (Tabla 32), mientras que los especímenes de la adobera 2 y 3 fallaron por adherencia y por falla combinada (Tabla 32).

Predominando la falla combinada poniendo en evidencia que tanto el adobe como el mortero están trabajando en conjunto sobre todo en la adobera 1, donde la presencia de fibra en las caras exteriores del adobe era evidente.

Aquellas fallas por adherencia se presumen por lo observado principalmente se debieron a la falta de fibra en las caras del adobe que mantenía contacto con el mortero de barro, puesto que la fibra además de ser un rigidizador potencia la adherencia entre las partículas de tierra, reafirmando la importancia del uso de fibras en la fabricación del adobe y mortero.

Además, se recomienda evitar el uso de grava, ladrillos, teja o cualquier otro elemento de gran tamaño que perjudica al adobe en su resistencia mecánica, ya que en todas las fallas se observó que fueron provocadas por áridos gruesos o por terrones de gran tamaño no disueltos que funcionaban como áridos.

Tabla 32. Muretes y tipos de falla

Propia

	Falla por adherencia	Falla combinada	Falla semi-diagonal
Adobera 1	1	3	-
Adobera 2	2	2	-
Adobera 3	2	2	-

¿En qué grado el modelo numérico se aproxima al modelo ensayado?

Existe bastante aproximación entre los resultados obtenidos de los ensayos a compresión del adobe en el laboratorio y los resultados del modelo numérico unos ejemplos se muestran en las gráficas 35 a 37 donde se analizó la adobera 2, espécimen a compresión 2, 4 y 5.

Los puntos en azul muestran los resultados del análisis obtenido en laboratorio, la línea naranja muestra la aproximación del modelo numérico. En las gráficas del espécimen 2 (Gráfica 35) y 4 (Gráfica 36) tienen un comportamiento similar las curvas producto del modelo numérico son más pesimistas en los primeros registros de esfuerzo vs deformación sin embargo a medida que se incrementa la carga se aproxima casi totalmente a la gráfica obtenida con los ensayos de laboratorio.

La gráfica 37 muestra un comportamiento irregular obtenido del ensayo de laboratorio y la curva del modelo numérico resulta ser una especie de media de la gráfica del modelo ensayado.

En definitiva se puede notar, en los tres ensayos, que la aproximación es relativamente buena y puede predecir el esfuerzo máximo a deformaciones congruentes con los resultados del experimento.

Gráfico 35. Modelo numérico vs modelo ensayado adobera 2, espécimen 2
García Hernán, 2017.

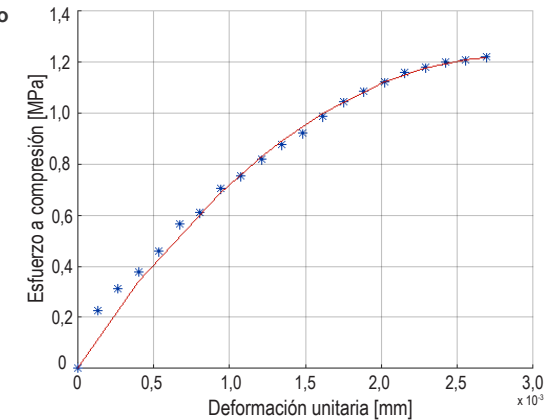


Gráfico 36. Modelo numérico vs modelo ensayado adobera 2, espécimen 4
García Hernán, 2017.

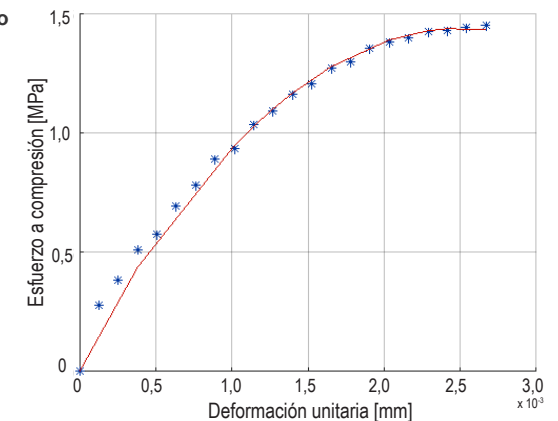
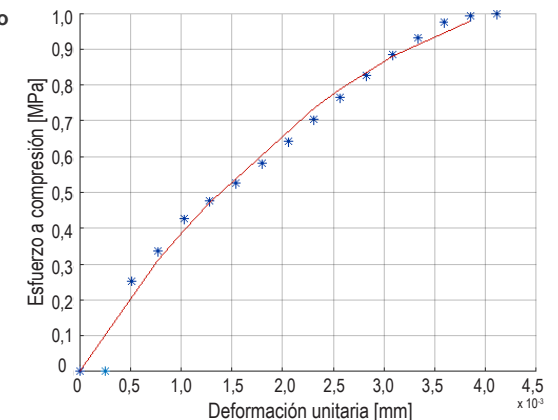


Gráfico 37. Modelo numérico vs modelo ensayado adobera 2, espécimen 5
García Hernán, 2017.





¿Cómo se puede utilizar los resultados obtenidos de los ensayos para modelar edificaciones existentes?

Gracias a los datos de los ensayos y las curvas de probabilidad se modelan los elementos sólidos como el adobe y mortero de barro que conforman el muro de adobe.

Así con la base de datos producto de ensayos de caracterización mecánica y conociendo la carga muerta que está actuando en la edificación, es posible modelar en un modelo numérico cualquier edificación de adobe existente que permitirá diseñar o aproximar la resistencia de los muros.

Un ejemplo claro son las dos edificaciones estudiadas en esta tesis, de las que se conocía tan solo la resistencia a compresión y flexión del adobe, y los datos faltantes necesarios de ingresar en el modelo numérico se obtuvo de las curvas de probabilidad del mortero de barro y murete de las fábricas de adobe.

Se recomienda que futuras investigaciones continúen con el análisis del comportamiento sísmico de las edificaciones de adobe de Cuenca a partir de los datos obtenidos en esta tesis, y así prepararse con antelación ante eventos impredecibles de la naturaleza como los sismos que pueden destruir las edificaciones patrimoniales en adobe.

Futuras líneas de investigación

- Analizar los adobes que producen las fábricas de adobe que no pudieron ser estudiadas en esta investigación.
- Analizar químicamente la arcilla más apropiada para la fabricación de adobes.
- Influencia del tiempo y condiciones de secado en la resistencia a compresión del adobe.
- Estudio de metodologías para determinar el módulo de elasticidad del adobe.
- Estudio del comportamiento de adherencia entre el mortero y los adobes.
- Desarrollar mayor adherencia entre los adobes y el mortero de barro que constituyen el murete, mejorando así su comportamiento ante una carga de compresión diagonal.
- Desarrollo de reforzamiento del adobe que mejore su desplazamiento horizontal.
- Aplicación de los datos obtenidos en esta tesis para determinar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de adobe del cantón Cuenca.



Recomendaciones

Para incursionar en líneas de investigación a fines al presente proyecto de titulación se recomienda a los investigadores:

- En el diseño de adobes, retirar: el árido grueso, fibras naturales que no estén secas, raíces, trozos de ladrillo o teja de gran tamaño
- Considerar en la planificación del proyecto, el tiempo que requiere preparar cada muestra y el ensayo, en el caso de esta tesis preparar la muestra para realizar el ensayo a flexión tomo más tiempo de lo esperado.

Para incursionar en líneas de investigación a fines al presente proyecto de titulación se recomienda a la universidad adquirir en los laboratorios:

- Equipos para la extracción de muretes y así obtener datos más certeros del comportamiento mecánico de los muros de adobe de las edificaciones patrimoniales.
- Equipos que permitan ensayar muretes a compresión diagonal con las dimensiones que indican las normas internacionales de adobe.
- Equipos para la movilización de mamposterías como el adobe desde el lugar de secado hasta las máquinas para ensayar, además del traslado desde la edificación hasta el laboratorio.
- Máquina para corte de adobes

- Deformímetro digital.
- Balanza digital, que permita pesar muretes.
- Horno que pueda alcanzar una temperatura igual o mayor a 300 °C, para ensayos de ignición y así determinar el contenido orgánico del barro.

Bibliografía



- AASHTO T 267-86. Standard method of test for determination of organic content in soils by loss of ignition. American Association of State Highway and Transportation Officials, United State, 2003. Recuperado el 15 de agosto del 2016 de https://bookstore.transportation.org/item_details.aspx?ID=755
- Amaya, J., Garcia, G., Ordoñez, S. (2016). Relevancia del estudio del adobe: Patrimonio como Recurso para el Desarrollo. Proyecto Vliir CPM.
- Asinari, M., Prato, C., PENNA, A., & Magenes, G. (2014). Modelación numérica de paneles de mampostería encadenada a través de macro-elementos. *ResearchGate*. Recuperado el 20 de junio del 2017 de https://www.researchgate.net/profile/Guido_Magenes/publication/266503301_MODELACION_NUMERICA_DE_PANELES_DE_MAMPOSTERIA_ENCADENADA_ATRAVES_DE_MACRO-ELEMENTOS/links/54394f930cf2d6698be16246.pdf
- ASTM D 4318-05. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. American Society for Testing and Materials, 2008. Recuperado el 15 de agosto del 2016 de <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm>
- ASTM D 2487-06. Standar Test Methods for classification of soils for engineering porposes (Unified soil classification system). American Society for Testing and Materials, 2008. Recuperado el 15 de agosto del 2016 de <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- Astorga, S. (2011). Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales (Tesis de pregrado). Universidad de Sevilla, Sevilla. Recuperado el 15 de junio del 2015 de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5023/fichero/3.-Documentos%252FMemoria.pdf>
- Badii, M. & Castillo J. 2009. Distribuciones probabilísticas de uso común. *Daena: International Journal of Good Conscience*. 4(1): 149-178. Marzo 2009. ISSN 1870-557X. Recuperado el 21 junio del 2017 de [http://www.spentamexico.org/v4-n1/4\(1\)%20149-178.pdf](http://www.spentamexico.org/v4-n1/4(1)%20149-178.pdf)
- Barreto, L. (2014). Estudio sobre la fabricación y propiedades mecánicas del adobe utilizado como material de construcción en la parroquia Paletillas, cantón Zapotillo (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Recuperado el 07 de enero del 2017 de <https://dspace.unl.edu.ec/bitstream/123456789/10603/1/TESIS.pdf>
- Barzallo, G. & Rodas, P. (2015). Transformación de las edificaciones patrimoniales en las áreas rurales del cantón Cuenca a partir de un análisis de la actualización de los inventarios de 1988. *Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT)*, XV, 411-421. Vliir Ciudad Patrimonio Mundial, Ecuador.
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J. & Quintero J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, vol. 27, número 105, pg. 569-578, diciembre de 2003. Recuperado el 02 de enero del 2017 de http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_27/105/7-ANALISIS.pdf
- Besoain, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos. Recuperado el 02 de enero del 2017 de https://books.google.com.ec/books/about/Mineralog%C3%ADa_de_arcillas_de_suelos.html?id=pfL7oUpz1QC&redir_esc=y
- Blondet, M., Villa, G., Brzev, S. (2003). Construcciones de adobe resistentes a los terremotos. *World-Housing, 2003 Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California 94612-1934*. Recuperado el 20 de diciembre del 2016 de http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe_Tutorial_Spanish_Blondet.pdf
- Braja, M. (2013). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cuarta edición. Recuperado el 20 de febrero del 2017 de <https://civilwor.files.wordpress.com/2016/09/fundamentos-de-ingenier-c3ada-geotc3a9cnica-braja-m-das-4ta-edicic3b3n.pdf>
- Caballero, M., Silva, L., & Montes, J. (2010). Resistencia mecánica del adobe compactado incrementada por bagazo de agave. *XVI Congreso Internacional anual de la SOMIM 22 al 24 de septiembre, 2010, Monterrey, Nuevo León, México*. Recuperado el 07 de enero del 2017 de http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2010/A3/A3_221.pdf
- Carazas, W. (s.f.). ADOBE: Anti-seismic construction handbook. *CRATerre-Misereor*. Recuperado el 10 de noviembre del 2016 de http://www.unevoc.unesco.org/e-forum/E_antiseismic-construction-Adobe.pdf
- Carranza, M. (2010). ¿Existen técnicas adecuadas de construcción con tierra para países sísmicos? (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, España. Recuperado el 19 de diciembre del 2016 de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13543/Carranza_Marcela_Tesina.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Çatalhöyük Research Project. (2014). Catalhoyuk Side Guidebook. *UNESCO World Heritage Center*. Recuperado el 06 de noviembre del 2016 de <http://www.catalhoyuk.com/sites/default/files/Catalhoyuk-Guidebook-ENGLISH.pdf>
- Carnevale, E., Rakotomamonjy, B., Sevillano, E., Abad, M. (2015). Orientaciones para la conservación de inmuebles patrimoniales material pedagógico de tierra en Cuenca. *Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC)*. Recuperado el 15 de octubre del 2016 de <http://whc.unesco.org/document/142073>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres del Perú - CENEPRED. 2013. Manual para la evaluación de riesgos originados por Fenómenos Naturales.



- Recuperado el 04 de diciembre del 2016 <http://bvpad.indec.gov.pe/doc/pdf/esp/doc2460/doc2460-contenido.pdf>
- Cevallos, P. (2009). Las construcciones en tierra en Ecuador: Innovaciones tecnológicas. *Revista INVI*, 7(16). Recuperado el 30 de diciembre del 2016 de <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/156/135>
- Cevallos, P. (2006). La construcción con tierra en el Ecuador. Recuperado el 20 de noviembre del 2016 de <http://www.cricyt.edu.ar/secprensa/siacot/cdenlinea/conferencias/Cevallos,%20Patricio/PO-%20Patricio%20Cevallos.pdf>
- Cid, J., Mazarrón, F. & Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo (Universidad Politécnica de Madrid). *Informes de la Construcción*, Vol. 63, 523, 159-169, julio-septiembre 2011, ISSN: 0020-0883, eISSN: 1988-3234, doi: 10.3989/ic.10.011. Recuperado el 1 de agosto del 2016 de http://oa.upm.es/10611/2/INVE_MEM_2011_95320.pdf
- Cirvini, S. & Gómez, J. (2014). Ensayo y dispositivo para evaluar la absorción capilar en probetas de adobe y tapia. *Rev. Téc. Ing. Universidad del Zulia*. Vol. 37, N° 1, 3 - 10. Recuperado el 11 de diciembre del 2016 de <http://200.74.222.178/index.php/tecnica/article/view/6939/6928>
- Cortés, M. & Sakakibara, M. (2015). Ruta sísmica ancestral: Un viaje por las culturas Constructivas en adobe en los lugares más sísmicos del mundo. *Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT)*, XV, 469-476. Vllir Ciudad Patrimonio Mundial, Ecuador.
- Cuáles fueron los siete terremotos más poderosos de la historia, (04 de diciembre de 2016), n/a. Recuperado el 04 de diciembre del 2016 de <http://www.infobae.com/tendencias/2016/11/22/cuales-fueron-los-siete-terremotos-mas-poderosos-de-la-historia/>
- Earthen Internacional Building Code (IBC). (s.f.). n/a. Recuperado el 14 de junio del 2017 de <http://www.dcat.net/resources/Pima%20County%20Approved%20Standard%20for%20Earthen%20IBC%20Structures.pdf>
- ICC IBC. (2009). n/a. Internacional Building Code (IBC). Recuperado el 14 de junio del 2017 de http://www.co.washington.ne.us/media/ICC-International_Building_Code_2009.pdf
- Gatti, F. (2012). Arquitectura y construcción en tierra: estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña. Recuperado el 15 marzo del 2017 de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/16141>
- Handbook For Building Earth Homes. (s.f.). n/a. *Peace Corps*. Recuperado el 15 junio del 2017 de <http://www.pdhone.com/courses/c777/PeaceCorpsHandbookForBuildingEarthHomes.pdf>
- Hernandez, A. (2014). Simulación del comportamiento de paredes de obra de fabrica de ladrillo bajo estados de carga biaxial mediante micromodelación (Tesis de maestría). Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals y Ports. Barcelona.
- Houben, H & Guillard, H. (2005). *Earth Construction: A comprehensive guide*. Recuperado de <http://www.developmentbookshelf.com/doi/book/10.3362/9781780444826>
- Irala, C., Morales, R., Rengifo, L & Torres, R. 1993. Manual para la construcción de viviendas de adobe. Recuperado de <http://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/Manual%20para%20la%20Construccion%20de%20Viviendas%20Adobe.pdf>
- Jiménez, C. (2010). *Arquitectura de tierra*, New Gourn, Hassan Fathry. *Construcción con tierra: Tecnología y Arquitectura*. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos, Valladolid. Recuperado de https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2011/2011_9788469481073_p165-168_jimenez.pdf
- Jiménez, J., Yépez, F., García, E., Peñafiel, C., Chérrez, M., Loaiza, V. & Bermeo H. (2002). Estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de Cuenca mediante técnicas de simulación. *XV Jornadas nacionales y primeras binacionales de ingeniería estructural, Loja - Ecuador*. Pg, 131 - 155.
- Jiménez, M. & Cañas, I. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, vol. 21, Issue 2, February 2007. Pg 237-251. Recuperado el 14 de junio del 2017 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061805002497>
- Jenkins, A., Rteil, A. & Lovegrove, G. (s.f.). Sustainable Earthen and Straw Bale Construction in North American Buildings: Codes and Practice. Recuperado el 14 de junio del 2017 de http://engineering.ok.ubc.ca/_shared/assets/Sustainable_Earthen_and_Straw_Bale_Construction_in_North_American_Buildings_Codes_and_Practice39213.pdf
- Lourenco, P. (1996). Computational strategies for masonry structures (Tesis doctoral). Universidade do Porto, Portugal. Recuperado el 10 de junio del 2017 de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:4f5a2c6c-d5b7-4043-9d06-8c0b7b9f1f6f?collection=research>
- Maldonado, L. & Vela-Cossío, F. (2011). El patrimonio construido con tierra: Las aportaciones historiográficas y el reconocimiento de sus valores en el contexto de la arquitectura popular española. *Universidad Politécnica de Madrid. Informes de la Construcción* Vol. 63, 523, 71-80, julio-septiembre 2011, ISSN: 0020-0883, eISSN: 1988-3234, doi: 10.3989/ic.10.062. Recuperado de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/1254/1339>



- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. (2010). Manual de construcciones/ Edificaciones antisísmicas de adobe. Recuperado el 04 de junio del 2017 de http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Manuales_guias/MANUAL%20ADOBE.pdf.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Perú). (2017). Adobe: reglamento nacional de construcciones: norma técnica de edificación NTE E. 080. Recuperado el 10 de mayo del 2017 de http://procurement-notice.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376
- Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Recuperado el 01 de diciembre del 2016 de <https://casae-co.files.wordpress.com/2011/09/manual-de-construccion-en-tierra-gernot-minke.pdf>
- Minke, G. (2001). Manual de construcción para viviendas anti-sísmicas de tierra. Universidad de Kassel, Alemania. Recuperado el 01 de diciembre del 2016 de http://www.itacanet.org/esp/construccion/Construccion_tierra.pdf
- Meli, R. (1994). Mampostería estructural: la práctica, la investigación y el comportamiento sísmico observado en México. Cuaderno de investigación Centro nacional de prevención de desastres México, N° 17, Julio 1994. Recuperado el 04 de diciembre del 2016 de http://proteccion-civil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/374/1/images/ci_17.pdf#page=7
- Narváez, J. & Siavichay, D. (2010). Adobe en la construcción: Propuesta de mejoramiento de las características técnicas del Adobe para la aplicación en viviendas unifamiliares emplazadas en el área periurbana de la ciudad de Cuenca (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/558>
- Navarro, G. (2003). Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida. 2da Edición. Recuperado el 04 de enero del 2017 de <https://books.google.es/books?id=HufLWjgJrtwC&pg=PA34&dq=qu%C3%ADmica+limos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwix7O-7h6rRAhVDQiYKHecOCJMQ6AEIKzAA#v=onepage&q&f=false>
- NEC. (2014). Viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5m. Recuperado el 5 de mayo del 2017 de <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoria-na-de-la-construccion/>
- NMAC 14.7.4. (2003). New Mexico Earthen Building Materials Code. Santa Fé, NM: Construction Industries Division (CID) of the Regulation and Licensing Department, 2004. Recuperado el 01 de Octubre del 2016 de <http://164.64.110.239/nmac/parts/title14/14.007.0004.htm>
- Norma Técnica de Edificación NTE E.080. Diseño y construcción con tierra reforzada. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, Perú, 2017. Recuperado el 8 de abril del 2017 de <https://www.udocz.com/read/norma-e-080-diseno-y-construccion-con-tierra-reforzada-actualizada-pdf>
- Norma Técnica de Edificación NTE E.080. Adobe: Reglamento nacional de construcciones, Perú, 2000. Recuperado el 20 de septiembre del 2016 de <https://centrocidart.files.wordpress.com/2013/10/norma-peruana-de-adobe.pdf>
- NTE INEN 688. Mecánica de suelos. Preparación de muestras alteradas para ensayos. Instituto ecuatoriano de normalización, Ecuador, 1982. Recuperado el 20 de septiembre del 2016 de <https://archive.org/stream/ec.nte.0688.1982#page/n0/mode/1up>
- NTE INEN 2554. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una vida simple con carga en los tercios). Instituto ecuatoriano de normalización, Quito, Ecuador, 2011. Recuperado el 20 de septiembre del 2016 de http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/NORMAS_2014/ACO/17122014/nte-inen-2554.pdf
- NTE INEN 862. Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad. Instituto ecuatoriano de normalización, Quito, Ecuador, 2011. Recuperado el 20 de septiembre del 2016 de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/862.pdf>
- NTE INEN 696. Áridos: Análisis granulométrico en los áridos, finos y gruesos. Instituto ecuatoriano de normalización, Quito, Ecuador, 2011. Recuperado el 20 de septiembre del 2016 de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/696-1.pdf>
- NZS 4297. Engineering Design of Earth Buildings. Nueva Zelanda, 1998. Recuperado el 10 de diciembre del 2016 de http://www.eastue.org/project/linea-adobe/norme/NZD4297-1998-Engineering_Design_of_Earth_Buildings.pdf
- NZS 4298. (1998). Materials and workmanship for earth buildings. Engineering Design of Earth Buildings. Nueva Zelanda, 1998. Recuperado el 10 de diciembre del 2016 de
- NZS 4299. (1998). Earth buildings not requiring specific design. Engineering Design of Earth Buildings. Nueva Zelanda, 1998. Recuperado el 10 de diciembre del 2016 de <https://es.scribd.com/document/261131530/nzs-4299-1998-pdf>
- Office of International Affairs (Wolfskill LS, Dunlop WA, Callaway BM). (1970). Handbook for building homes of earth. Department of housing and urban development, Office of International Affairs (OIA), Washington, DC 20410. Recuperado el 15 de junio del 2017 de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAE689.pdf
- Oliver-Smith, A. 1994. Perú, 31 de mayo, 1970: Quinientos años de desastre. Revista de Desas-



- tres y Sociedad, N° 2, 4-18. Recuperado el 04 de diciembre del 2016 de <http://desenredando.org/public/revistas/dys/rdys02/dys2-1.0-nov-19-2001-TODO.pdf#page=7>
- Pesántez, M. & González, I. (2011). Arquitectura tradicional en Azuay y Cañar: Técnicas, creencias, prácticas y saberes. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC). Recuperado el 15 de octubre del 2016 de <http://www.inpc.gob.ec/component/content/article/493>
- Programa Regional de Meteorología / IANIGLA - CONICET. (s.f.). Fenómenos Meteorológicos. Recuperado el 04 de diciembre del 2016 de <http://www.prmarg.org/fenomenos-meteorologicos>
- Pumpelly, R. (1908). Explorations in Turkestan - Prehistoric Civilizations of Anau. Recuperado el 05 de octubre del 2016 de <http://www.etana.org/sites/default/files/coretexts/20372.pdf>
- Quinteros, D. (2014). Modelización del comportamiento de estructuras de mampostería mediante la teoría de homogenización (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Salta, Argentina. Recuperado el 20 de noviembre del 2016 de: <http://www.cimne.com/PLCd/cvdata/cntr1/dtos/img/mdia/Files-for-download/1-Thesis/2014---R-Quinteros.pdf>
- Rakotomamonjy, B., Carnevale, E., Sevillano, E. & Abad, M. (2015). Orientaciones para la conservación de inmuebles patrimoniales de tierra en Cuenca. Recuperado el 10 de noviembre del 2016 de <http://craterre.org/diffusion:ouvrages-telechargeables/view/id/7176dde3e64aac-5b7f89f98786f82fb8>
- Rodriguez, M., Montenegro, I., Saroza, B., Nolasco, P., & Castro, Y. (2011). Aproximación a la patología presentada en las construcciones de tierra: algunas recomendaciones de intervención. Recuperado el 19 de diciembre del 2016 de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1256/1341>
- Sismos más potentes que han afectado Ecuador. (17 de abril del 2016). n/a. *El Universo*. Recuperado el 04 de diciembre del 2016 de <http://www.eluniverso.com/noticias/2016/04/17/nota/5531580/sismos-mas-potentes-que-han-afectado-ecuador>
- Spotorno, R., Pochettino, J., Figueredo, G. & García, F. (2016). Ensayos experimentales del proceso de secado de adobe de arcilla de la zona de Makalle (Chaco). III Congreso Argentino de Ingeniería— IX Congreso de Enseñanza de la Ingeniería - Resistencia 2016. Recuperado el 11 de diciembre del 2016 de <http://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/123456789/1019/CADI-ADO-BE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tambaco, D. (2012). Análisis de la arquitectura vernácula del Ecuador: Propuestas de una arquitectura contemporánea sustentable. Recuperado el 10 de octubre del 2016 de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/829/1/T-SENESCYT-0372.pdf>
- Tamborero del Pino, J. & Cejalvo A. (s.f.). NTP 418: Fiabilidad: la distribución lognormal. Ministerio de trabajo y asuntos sociales España, España. Recuperado el 21 junio del 2017 de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_418.pdf
- Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., & Bermúdez, J. (2006). Aplicación de las fibras naturales en el desarrollo de materiales compuestos y como biomasa. Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 19, N. 1, 113-120, (Octubre, 2006), ISSN : 0257-1749. Recuperado el 08 de enero del 2017 de <http://learningobjects2006.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/viewFile/210/153>
- UNESCO World Heritage Convention (WHC). United Nations. Recuperado 15 de noviembre del 2016 de <http://whc.unesco.org/en/list/886>
- Vargas, J., Blondet, M., & Tarque, N. (2005). The Peruvian Building Code for Earthen Buildings. Recuperado el 31 de diciembre del 2016 https://www.researchgate.net/publication/238727832_The_Peruvian_Building_Code_for_Earthen_Buildings
- Vargas, L. (2016). Determinación de propiedades mecánicas de la mampostería del adobe, ladrillo y piedra en edificaciones históricas peruanas (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Recuperado el 05 noviembre del 2016 de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/7472>
- World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP). (2012). World Heritage: Inventory of earthen architecture. Recuperado el 15 de septiembre del 2016 de <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002170/217020e.pdf>
- Yamin, L., Rodríguez, A., Fonseca, L., Reyes, J & Phillips, C. s/f. Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria. Universidad de Bogotá, Colombia. Recuperado el 04 de diciembre del 2016 de <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/492/673>