

**REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON MUROS ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS DE GRUPO DE USO
II, III Y IV CONSTRUIDOS EN TAPIA PISADA**



RAFAEL CRISTOBAL ARISMENDI WEBER



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
BUCARAMANGA**

2018

**REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON MUROS ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS DE GRUPO DE USO
II, III Y IV CONSTRUIDOS EN TAPIA PISADA**

RAFAEL CRISTOBAL ARISMENDI WEBER

**Trabajo de Investigación para optar al título de
Magister en Ingeniería Estructural**

Director

ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES

Ing. Civil – Ph.D. Estructuras

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A Dios por bendecirme con tantas gracias inmerecidas.

A mi esposa Amparo por su constante paciencia, compañía y expresiones de amor.

A mis hijos Olga Lucía, Sandra Milena, Rafael Augusto y Samuel Andrés por constituir un fundamento importante de mi vida y de la misión que vine a cumplir.

A mis hermanas Hirma y Alba por la participación tan fundamental como desinteresada que han tenido en mi vida.

A mis difuntos familiares, Madre, Padre y Hermanos Samuel, Olga y Elmis. Todos ellos, muertos y vivos, ejercieron gran influencia en vida y su recuerdo me motiva y enorgullece.

A mis alumnos por enseñarme tanto.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Álvaro Viviescas, director de este proyecto por su constante apoyo, consejos, indicaciones y ayuda.

A la Escuela de Ingeniería Civil por permitirme continuar con mi afición de ser un constante alumno.

A la Universidad Industrial de Santander por facilitarme los medios para llevar a cabo este proyecto y permitirme integrarla como espacio esencial en mi diario quehacer.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVO E HIPÓTESIS.....	20
1.1. OBJETIVO GENERAL	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3. HIPÓTESIS	20
1.4. ALCANCE. SESGAMIENTO DE ESTE TRABAJO EN CUANTO AL TIPO DE EDIFICIOS INCLUIDOS 20	
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. GLOSARIO	23
4. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	24
4.1. BREVE HISTORIA SOBRE LA CONSTRUCCIÓN EN ADOBE Y TAPIA PISADA.....	24
4.2. DESARROLLO CONTEMPORÁNEO DE LA TAPIA	25
4.3. ESTUDIO SOBRE CONSTRUCCIONES EN ADOBE O TAPIA PISADA EN COLOMBIA	30
4.4. LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA EN EL MUNDO.....	32
4.4.1. Generalidades.....	32
4.4.2. Construcciones en tapia pisada o en adobe en américa	33
4.4.3. Construcciones en tapia pisada en europa.....	41
4.4.4. Construcciones en tapia pisada o en adobe en otros países.....	47
4.5. CONDICIONES MÍNIMAS A TENER EN CUENTA EN LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA O EN ADOBE	51
4.6. FORTALEZAS DE LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA O EN ADOBE.....	54
4.7. DEFICIENCIAS ESTRUCTURALES DE LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA O EN ADOBE 55	
4.8. REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS CONSTRUIDOS EN TAPIA PISADA O EN ADOBE 55	
4.8.1. Generalidades.....	55
4.8.2. Mejoramiento de entrepiso y de su acción de diafragma. Plaqueta de concreto.....	56
4.8.3. Mejoramiento de muros con malla metálica tipo vena anclada con elementos metálicos integrados al muro con mortero y cubierta con el mismo mortero 57	
4.8.5. Mejoramiento de muros con elementos incrustados	59
4.8.6. La NSR 10 y el reforzamiento estructural de edificios existentes	60

5.	CASO DE ESTUDIO. MUROS EN TAPIA PISADA SIN Y CON REFUERZO CON PANTALLA DE CONCRETO REFORZADO.....	61
5.1.	ORGANIZACIÓN DEL PROCESO	61
5.2.	CÁLCULOS PRELIMINARES	62
5.2.1.	Número de muros a probar	62
5.2.2.	Dimensionamiento de los muros de prueba	62
5.2.3.	Cálculo de Carga Vertical	64
5.2.4.	Cálculo de Carga Horizontal	68
5.2.4.1.	Bases del Cálculo	68
5.2.4.2.	Cálculo de la Carga Horizontal Suponiendo Comportamiento Elástico 68	
5.2.4.2.1.	Cálculo para el muro en Tapia Pisada	70
5.2.4.2.2.	Cálculo para muros en Tapia Pisada+Refuerzo en concreto armado 70	
5.2.4.3.	Cálculo para el muro en Tapia Pisada usando la expresión de la NTCM 2004	71
5.2.4.4.	Expectativa de las deflexiones durante el ensayo	72
5.2.5.	Chequeo del muro de Tapia Pisada con SAP	72
5.2.5.1.	Bases del cálculo.....	72
5.2.5.2.	Cálculo numérico para el muro en Tapia Pisada	73
5.3.	DISEÑO DE LOS ENSAYOS	78
5.3.1.	Generalidades.....	78
5.3.2.	Dimensionamiento de las vigas de concreto.....	80
5.3.3.	Cálculo de la estabilidad de los muros durante la prueba	82
5.3.3.1.	Muro en tapia	82
5.3.3.2.	Muro en Tapia + Concreto	84
5.3.3.3.	Estabilidad de todo el conjunto	85
5.3.4.	Cálculo del refuerzo de la viga base y la viga corona	85
5.3.5.	Cálculo del refuerzo del muro de concreto	86
5.3.6.	Cálculo de los conectores.....	92
5.3.7.	Diseño del mecanismo de sujeción del muro al actuador.....	94
5.4.	ESTADO DE ESFUERZOS INICIALES DEL MURO.....	100
5.5.	MATERIAL DE TIERRA UTILIZADO	100

5.6.	CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS	103
5.7.	ENSAYOS EFECTUADOS	113
5.8.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	113
5.9.	INFRAESTRUCTURA DEL LABORATORIO, PREPARACIÓN Y EQUIPO DE TRABAJO DURANTE LOS ENSAYOS	116
5.10.	DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE CARGA EN LOS MUROS	119
5.10.1.	Muro en tapia pisada.....	119
5.10.1.1.	Dinámica del muro en Tapia Pisada.....	119
5.10.1.2.	Comportamiento del muro en Tapia Pisada	120
5.10.1.3.	Comportamiento del muro en Tapia Pisada reforzado.....	130
5.11.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	136
5.11.1.	Muro de Tapia Pisada	136
5.11.2.	Muro de Tapia Pisada reforzado.....	139
5.11.3.	Análisis comparativo de los muros	141
5.11.4.	Sobre los esfuerzos y las deformaciones	142
5.11.4.1.	Muro de tierra	142
5.11.4.2.	Muro de Tierra-Concreto.....	143
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	144
6.1.	CONCLUSIONES	144
▪	Sobre los conectores	144
6.2.	RECOMENDACIONES	145
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	147
	ANEXOS.....	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Iglesia San Laureano. Bucaramanga.....	25
Figura 2. Catedral de Santa Marta.....	25
Figura 3 La Casa de la Aduana. Santa Marta	25
Figura 4 Edificio Albornoz Rueda. Sede Universidad Libre. Socorro.....	25
Figura 5 Interior de la Escuela de Artes Plásticas, Oaxaca. Fotografía: Luis F. Guerrero..	28
Figura 6 Residencia en La Paz, Bolivia. Arq. Raúl Sandoval.....	28
Figura 7. Cultural, Educational and Sacral Buildings. Nueva Delhi. India	29
Figura 8. Academic accommodation building, Charles Sturt University at Thurgoona. New South Wales. Australia.	29
Figura 9 Casa de Tierra armada, Meldorf, Alemania	45
Figura 10. Edificio de tierra armada. Weilburg, Alemania.....	45
Figura 11. Edificio de 5 pisos con tiza en Winchester, Hampshire.....	46
Figura 12. Centro de Visitantes, Proyecto Eden, Cornwall.....	47
Figura 13. Recomendaciones según documento “Construcciones de adobe resistentes a los terremotos”	52
Figura 14. Errores estructurales que provocan riesgos de derrumbe durante un sismo.....	53
Figura 15. Construcción con muros de tapia pisada en el proyecto Eden, Cornwsall.....	54
Figura 16. Implementación de mejoramiento en el diafragma.	56
Figura 17. Pasadores de anclaje de las mallas.....	57
Figura 18. Mallas en ambos lados de los muros.....	57
Figura 19. Aplicación del mortero de cubrimiento de las mallas.....	57
Figura 20. Reforzamiento de los muros con listones de madera.....	58
Figura 21. Pasadores de anclaje de los listones de madera.....	58
Figura 22. Distancias recomendadas entre listones.....	58
Figura 23. Reforzamiento de los muros con caña.	59
Figura 24. Corte vertical de los muros a probar	64
Figura 25. Entrepiso.....	66
Figura 26. Cubierta.	67
Figura 27. Esquema de montaje del muro para el ensayo	69
Figura 28. Definición del material del muro	73
Figura 29. Definición de las cargas.....	74
Figura 30. Dimensionamiento del muro y división en elementos finitos	75
Figura 31. Carga vertical asignada	76
Figura 32. Carga horizontal asignada.....	76
Figura 33. Muro deformado para una carga horizontal de 90 000 N.	77
Figura 34. Esfuerzos en el muro para la carga horizontal máxima.	79

Figura 35. Esfuerzos en el muro para la carga horizontal al 60% de la máxima.	80
Figura 36. Esquema de Vigas de Cimiento y de Corona.....	81
Figura 37. Esquema de probeta de ensayo.....	81
Figura 38. Cargas Máximas en Muro de Tapia Durante el Ensayo.....	82
Figura 39. Esquema para cálculo del anclaje de estabilización.....	84
Figura 40. Refuerzo de las vigas Cimiento y Corona.....	86
Figura 41. Modificación de la masa de la Viga Corona.....	87
Figura 42. Modificación de la masa del muro de concreto.....	88
Figura 43. Elevación del muro. Carga horizontal aplicada.....	89
Figura 44. Vista Axonométrica Extruida del Muro.....	89
Figura 45. Deformada del muro por Cargas Horizontal y Vertical.....	90
Figura 46. Refuerzo vertical requerido.....	91
Figura 47. Refuerzo vertical y horizontal requerido.....	92
Figura 48. Esquema para cálculo de conector.....	94
Figura 49. Esquema del mecanismo de acople de muro con el actuador horizontal.....	95
Figura 50. Ensayos de muros que muestran el mecanismo de acople con el actuador horizontal.....	97
Figura 51. Placas de Transferencia. Parámetros para su diseño.....	99
Figura 52. Proceso de fundida de viga de base.....	106
Figura 53. Viga de base fundida.....	106
Figura 54. Formaleteada de los muros.....	107
Figura 55. Regla para controlar el espesor de las capas de tierra.....	107
Figura 56. Apisonado de la tierra.....	108
Figura 57. Pisones utilizados.....	108
Figura 58. Primer juego de muros.....	109
Figura 59. Demolición de los muros.....	109
Figura 60. Hechura de nuevos muros.....	110
Figura 61. Fundida de la pantalla en concreto armado.....	110
Figura 62. Apuntalamiento de la viga corona para no cargar el muro.....	111
Figura 63. Aparición de grieta nuevamente, a una altura de unos 50 cm de la corona.....	111
Figura 64. Muro solo en tapia recortado para eliminar la zona desprendida por la grieta.....	112
Figura 65. Muro en tapia reforzado recortado para eliminar la zona desprendida por la grieta.....	112
Figura 66. Gráfica que muestra la señal de carga horizontal aplicada en un ensayo en la Universidad de Los Andes.....	114
Figura 67. Modulación de la carga para ensayo efectuado en la Universidad Industrial de Santander.....	114
Figura 68. Gráfico de carga diseñado para la prueba.....	116
Figura 69. Vista del Laboratorio. Personal preparando la prueba.....	117
Figura 70. Montaje de sensores.....	118
Figura 71. Equipo responsable de los ensayos.....	119
Figura 72. Referencia de Tiempos y ciclos tomados para los estados mostrados en las fotos 73 a 87.....	121

Figura 73. Estado del muro a aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo. 6 s.....	122
Figura 74. Estado del muro a $\frac{3}{4}$ de ciclo. 18 s.....	122
Figura 75. Estado del muro a $1\frac{1}{4}$ de ciclo. 33 s.....	123
Figura 76. Estado del muro a $1\frac{3}{4}$ de ciclo. 48 s.....	123
Figura 77. Estado del muro a $2\frac{1}{4}$ de ciclo. 63 s.....	124
Figura 78. Estado del muro a $2\frac{3}{4}$ de ciclo. 78 s.....	124
Figura 79. Estado del muro a $3\frac{1}{4}$ de ciclo. 93 s.....	125
Figura 80. Estado del muro a $3\frac{3}{4}$ de ciclo. 108 s.....	125
Figura 81. Estado del muro a $4\frac{1}{4}$ de ciclo. 123 s.....	126
Figura 82. Estado del muro a $4\frac{3}{4}$ de ciclo. 138 s.....	126
Figura 83. Estado del muro a $5\frac{1}{4}$ de ciclo. 153 s.....	127
Figura 84. Estado del muro a $5\frac{3}{4}$ de ciclo. 168 s.....	127
Figura 85. Estado del muro a $6\frac{1}{4}$ de ciclo. 183 s.....	128
Figura 86. Estado del muro a $6\frac{3}{4}$ de ciclo. 198 s.....	128
Figura 87. Ciclos de histéresis para el muro de tapia	129
Figura 88. Desplazamientos a nivel de la viga corona.....	129
Figura 89. Estado del muro a los 195 s.....	130
Figura 90. Estado del muro a 225 s.....	130
Figura 91. Estado del muro a 255 s.....	131
Figura 92. Estado del muro a 285 s.....	131
Figura 93. Estado del muro a 315 s.....	132
Figura 94. Estado del muro a 345 s.....	132
Figura 95. Estado del muro a 375 s.....	133
Figura 96. Estado del muro a 405 s.....	133
Figura 97. Estado del muro a 435 s.....	133
Figura 98. Estado del muro a 465 s.....	134
Figura 99. Ciclos de histéresis para el muro de tapia reforzado.....	135
Figura 100. Desplazamientos a nivel de la viga corona en el muro de tapia reforzado	135
Figura 101. Esquema de mecanismo de falla presentado en el muro de tapia pisada	136
Figura 102. Curvas Cortante-Compresión contra desplazamiento de muro de tapia pisada	137
Figura 103. Curvas Cortante-Compresión contra desplazamiento de muro de tapia pisada reforzado.....	140
Figura 104. Curvas Cortante-Compresión contra desplazamiento de los muros de tapia pisada y tapia pisada reforzado.....	141
Figura 105. Detalle de los conectores y su instalación	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de autores y libros o documentos importantes sobre la construcción en tierra en Méjico	40
Tabla 2. Refuerzo vertical y horizontal requerido en el muro de concreto	91
Tabla 3. <i>Resumen de los resultados obtenidos del ensayo de granulometría para suelos procedentes de Barichara, San Gil y Piedecuesta.</i>	102
Tabla 4. Propiedades granulométricas de los materiales utilizados en construcciones en tierra,	102
Tabla 5. Propiedades granulométricas del material utilizado en el ensayo.....	103
Tabla 6. Tiempos de máxima elongación del movimiento del muro	120
Tabla 7. Resultados de las pruebas en diferentes estados límites para el muro de tapia	138
Tabla 8. Resultados de las pruebas en diferentes estados límites del Muro de Tapia Reforzado	140
Tabla 9. Tabla comparativa de resultados de las pruebas en diferentes estados límites de cada muro.....	141
Tabla 10. Comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos para el muro de tierra.....	142
Tabla 11. Comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos para el muro de Tierra.Concreto	143

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. GRANULOMETRÍA DE LA TIERRA UTILIZADA	156
Anexo B. ENSAYOS DE HUMEDAD	159
Anexo C. ENSAYOS DE COMPRESIÓN DEL MATERIAL TIERRA EN DISTINTAS FECHAS	162
Anexo D. ANÁLISIS DE LOS PASADORES QUE CONECTAN LOS MUROS DE CONCRETO Y TAPIA PISADA. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS MUROS ...	167
Anexo E. DOCUMENTOS Y VIDEOS RESULTANTES DE LAS PRUEBAS	180

RESÚMEN

TÍTULO: REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON MUROS ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS DE GRUPO DE USO II, III Y IV CONSTRUIDOS EN TAPIA PISADA *

AUTOR: RAFAEL CRISTÓBAL ARISMENDI WEBER **

PALABRAS CLAVES: Tapia pisada, Adobe, Tierra armada, Reforzamiento estructural, BTC,

Los edificios construidos en mampostería en adobe o en tapia pisada (tierra apisonada) forman parte de nuestra tradición constructiva, razón por la cual tienen una connotación cultural de gran relevancia en nuestra sociedad. Es el caso no solo de Colombia sino de todos aquellos países que tuvieron la influencia europea, la que a su vez ya había sufrido la influencia del medio oriente, cultura en la cual este tipo de construcción fue utilizado desde épocas inmemoriales. Aún más, en América, incluyendo lo que hoy es gran parte de los Estados Unidos, los pueblos indígenas ya utilizaban la tierra para la construcción de sus viviendas. ([1], pag. 49)

Hoy en día estos países están sumidos en una disyuntiva. Por un lado deben preservar su legado histórico, pero por otro, están obligados a garantizar la seguridad de la vida humana dotando a los edificios de un adecuado tratamiento estructural. Se hace necesario encontrar una solución ecléctica que contemple ambas necesidades.

El objetivo del presente trabajo es proponer una alternativa para contribuir al problema del reforzamiento estructural de los edificios construidos en tapia pisada, usualmente destinados a actividades de los grupos de uso II, III y IV, utilizando una modalidad de reforzamiento extraído del capítulo C de la norma NSR 10 pero que no ha sido tomada en cuenta para la solución del mismo. Se trata de la pantalla de concreto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Ingeniería Estructural. Director de Proyecto PhD. Álvaro Viviescas Jaimes.

ABSTRACT

TÍTULO: STRUCTURAL REINFORCEMENT WITH STRUCTURAL WALLS OF BUILDINGS OF USE GROUP II, III AND IV BUILT IN RAMMED EARTH *

AUTOR: RAFAEL CRISTÓBAL ARISMENDI WEBER **

PALABRAS CLAVES: Rammed earth, Adobe, Armed earth, Structural reinforcement, Compressed soil block.

Buildings built in masonry in adobe or tapia (ground rammed) are part of our historical constructive process, reason why they have a cultural connotation of great relevance in our society. It is the case not only of Colombia but of all those countries that had the European influence, which in turn had already suffered the influence of the Middle East, culture in which this type of construction was used from immemorial time. Moreover, in America, including what is now the United States, indigenous peoples already used earth for the construction of their homes [1].

On the one hand they must preserve their historical legacy, but on the other hand, they are obliged to guarantee the safety of human life by providing buildings with an adequate structure. It is necessary to find an eclectic solution that contemplates both needs.

The strategic objective of the present work is to propose a new alternative to solve the problem of structural reinforcement of the rammed earth buildings, usually used in tasks belonging to groups of use II, III and IV, using a modality of reinforcement extracted from the chapter C of the standard NSR 10 but that had not been taken into account for the solution of the same. This is the concrete screen.

* Master Degree Thesis

** Physical and Mechanic Engineering School. Civil Engineering School. Structural Engineering Master. Project Director PhD. Álvaro Viviescas Jaimes.

INTRODUCCIÓN

La historia de la construcción no indispensable en Colombia nació con las construcciones en adobe o en tapia pisada. Este hecho, producto de la conquista, en el caso de Colombia hace que estas construcciones formen una parte muy importante de su cultura “Las construcciones en tierra constituyen una parte fundamental del patrimonio construido de nuestro país. De la mano del adobe y de la tapia pisada se desarrolló la arquitectura urbana y residencial en Colombia durante cuatro siglos. De acuerdo con el listado de la Dirección de Patrimonio del Ministerio de Cultura, se han declarado 1.133 Monumentos Nacionales y 47 Centros Históricos, de los cuales el 80% se encuentra construido en tierra. Dentro de estos Centros Históricos se encuentra La Candelaria en Bogotá, Zipaquirá, Villa de Leyva, Popayán, Barichara, Salento, etc. Dentro de los Monumentos Históricos representativos se puede mencionar la Casa de la Moneda, el Colegio Mayor del Rosario, el Colegio Helvetia, Hacienda Montes (Museo Antonio Nariño), el Convento del Santo Ecce Homo (Boyacá), entre otros.” ([1], pág. 1)

La construcción en tierra ha sido realidad en todo el mundo, “Un elemento que resulta muy interesante acerca de la arquitectura de tierra es el desarrollo inconexo de sistemas constructivos muy similares en distintas regiones culturales. La construcción térrea tuvo una evolución independiente en sitios tan distantes como el norte de África, Mesopotamia, India, China, la región andina o Mesoamérica, desde antes de la era cristiana....” “En nuestro continente hay datos del uso de tapias muy anteriores a la conquista europea. Un ejemplo relevante es Perú, en donde existen sofisticadas estructuras de tiempos preincaicos en las que se crearon tapias tanto de manera aislada como en combinación con técnicas, como la *quincha* y el adobe. Los palacios que conforman la ciudad de Chan Chan son mudos testigos del avance tecnológico que alcanzaron las culturas mochica y chimú para la edificación de imponentes murallas.” ([15], pág. 8)

Sin embargo, estas estructuras han estado abandonadas y eso las ha hecho vulnerables a otras exigencias por las que posiblemente ya habían pasado en otras épocas su vida, cuando estaban en mejores condiciones de mantenimiento y solo hasta épocas recientes, en las que se han creado instituciones en cada uno de los países, que tienen entre sus funciones preservar sus bienes culturales, en el caso de Colombia el Ministerio de Cultura, se ha establecido reglamentación sobre las intervenciones que se pretenda hacer en ellas, desde demoliciones hasta simples reformas o refacciones. “En la actualidad este patrimonio se ve amenazado y deteriorado por diversos factores medio ambientales, destacándose entre ellos los procesos de deterioro por humedad y los eventos sísmicos.” ([1], pág. 1). “Con respecto a este último es importante mencionar que terremotos dentro del ámbito colombiano, el sismo del eje cafetero del 25 de enero de 1999, el sismo de Popayán de 1983, o el sismo de

Cúcuta de 1875 han evidenciado la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en tierra.” ([1], pág. 1).

Esto ha atentado no solo contra la necesidad moral de preservar nuestra herencia cultural, sino contra nuestra propia economía “La tutela de los centros menores de tierra cruda y el conocimiento profundo de estas tecnologías pueden ser útiles para la valorización de estos sistemas, con el fin de que puedan convertirse ellos mismos en fuentes e instrumento generador de riqueza económica y cultural en contextos desventajados (sic) a través de una economía sostenible” ([13], pág. 7).

Pero además hay que tener en cuenta la seguridad de los usuarios de tales edificaciones “Existe entonces una doble responsabilidad frente a la salvaguarda de los monumentos, ambas de primer orden: una la de preservar la materialidad de la estructura edilicia (sic) por contener los valores arquitectónicos e históricos que estas conllevan, y otra igualmente importante la de salvaguardar la vida de los ciudadanos que las utilizan.” ([16], pág. 147)

Por eso, en Colombia y en otros países como es el caso de Perú, Chile, Méjico, se ha dedicado esfuerzos a estudiar el caso, llegando a conclusiones importantes no solo para la rehabilitación de las estructuras sino para su adecuación o reforzamiento para situaciones de sismo. Las propuestas de reforzamiento se refieren a estructuras para viviendas y se pueden sintetizar así:

La primera es mediante mallas de vena instaladas a cada lado de los muros, en las zonas críticas, tratando de formar vigas y columnas, interconectadas entre sí mediante pasadores en alambro de 8 mm que forman una cuadrícula de 20 cm x 20 cm. ([3], pág. 286). Estas mallas se cubren con una capa de mortero de cal y arena. Los pasadores se adhieren al muro existente con una pasta de calicanto. ([3], pág. 290). (Ver figura 17).

La segunda es mediante listones de madera externos colocados en las direcciones horizontal y vertical, en toda el área de los muros a distancias recomendadas, en ambas caras de cada muro, e interconectadas mediante pasadores ubicados cada 50 cm. En las uniones de los muros se garantiza la conexión de este entramado mediante herrajes de acero. ([3], pág. 290). (Ver figura 19).

Las dos soluciones anteriores se complementan con la dotación de diafragmas en el entrepiso y en la cubierta.

Las técnicas anteriores están limitadas a edificios hasta de dos pisos y utilizadas para viviendas, dejando por fuera una cantidad significativa de edificios de dos y tres pisos y a las iglesias que tienen una configuración única y alturas superiores a los dos pisos. Estas últimas construcciones están generalmente dedicadas a usos catalogados por la norma NSR 10 como del tipo II, III y IV.

Actualmente se encuentra además de las anteriores, para edificios en otros tipos de uso, unas prácticas ejecutadas por ingenieros dedicados a la patología de estructuras, consistentes en incrustar refuerzos con cierto grado de tensionamiento, sin llegar a los niveles de tensión correspondientes a las estructuras pretensadas. Estos elementos de refuerzo se colocan estratégicamente en sentido vertical y horizontal y su objetivo es absorber los esfuerzos de tracción que puedan presentarse en los muros en un evento de sismo. Se adhieren al muro llenando el inter-espacio con un mortero de arena con cal. Esta práctica no se encuentra amparada por ninguna norma nacional.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar otra forma de reforzamiento aplicable a edificios con mampostería en adobe o tapia pisada con cualquier configuración y altura. Se trata de reemplazar parte del espesor de los muros por muro estructural en concreto. Este muro se construiría en uno de los lados, para el caso de los muros de fachada sería el lado interno y en el de los muros internos sería en el lado que menos impacto signifique desde el punto de vista arquitectónico. De todas maneras el muro construido se recubrirá con un acabado que simule el acabado de la parte removida del muro. Desde el punto de vista estructural, se debe garantizar que la parte del muro existente que se ha dejado esté adecuadamente anclado al muro nuevo con el fin de asegurar su comportamiento ante las componentes de los sismos tanto en el sentido de su plano como perpendiculares a él. Prácticamente, este último compromiso es el objetivo del presente trabajo.

Sin embargo, no hay que olvidar la posibilidad que esta forma de reforzamiento permitiría para su aplicación en construcciones nuevas. En este momento histórico se aprecia un real interés de la arquitectura contemporánea de utilizar los muros de tierra en construcciones modernas, sobretodo de aquellas ubicadas en pueblos con mucha presencia del paisaje natural. De hecho la construcción en tierra aún es una realidad en dichas poblaciones, como por ejemplo en el caso de Barichara “A pesar de que la ley colombiana no permite el uso de la tierra como material exclusivo de construcción, sobretodo en las zonas de riesgo sísmico, y de la falta de recursos públicos tanto para la construcción de nuevas viviendas populares en tierra como para la restauración del patrimonio no monumental, estas técnicas de edificación están todavía vigentes en el área de Barichara, más que en otras partes del país” ([17], pág. 117)

Es de aclarar que este trabajo de investigación solo abarcará la aplicación de esta técnica de reforzamiento a muros en tapia pisada, quedando pendiente por evaluar su comportamiento con muros en adobe.

1. OBJETIVO E HIPÓTESIS

1.1. |OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad de utilizar los muros estructurales para el reforzamiento estructural de los edificios construidos en mampostería en tapia pisada, sin limitar su uso al tipo I, de acuerdo con A.2.5.1.4 de la NSR 10. ([26], pág. A-26).

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.2.1. Determinar el comportamiento de la curva “Carga – Deformación” de un muro en tapia pisada y de un sistema combinado “Muro en Tapia – Muro Estructural” y elaborar una gráfica comparativa.
- 1.2.2. Proponer y evaluar experimentalmente un sistema de conexión del muro en concreto con el muro existente para que el primero pueda considerarse soporte estructural del segundo.

1.3. HIPÓTESIS

Los muros estructurales, tratados en la norma NSR 10 en su capítulo C pueden ser utilizados para solucionar el reforzamiento estructural de los edificios construidos en tapia pisada.

1.4. ALCANCE. SESGAMIENTO DE ESTE TRABAJO EN CUANTO AL TIPO DE EDIFICIOS INCLUIDOS

Se puede apreciar que el presente trabajo de grado está dedicado expresamente al reforzamiento estructural de los edificios construidos en tapia pisada. Esto excluye a los edificios construidos en adobe, que ocupan un volumen importante de los mismos. Esta distinción se ha considerado pertinente, teniendo en cuenta que a pesar de que el material básico del que están conformadas ambas técnicas es la misma, la tierra, es posible que el comportamiento sea distinto, en virtud de que en los muros en adobe aparece un componente nuevo, que es la pega. Además, de investigaciones anteriores se ha encontrado que la resistencia de los muros en tapia es mayor que la de los muros en adobe. Aproximadamente en un 40%. ([74], pág. 330).

Se hace necesario, dedicar otros espacios de investigación a la aplicación de esta nueva técnica propuesta al reforzamiento estructural de los edificios construidos en tierra.

2. JUSTIFICACIÓN

La protección de los bienes culturales es un tema que ha preocupado a la humanidad desde antes de 1899 cuando, buscando la minimización de los daños producidos por las guerras en los bienes considerados patrimonio cultural, un grupo de países importantes, sobretodo de Europa, a los cuales se sumó Estados Unidos, organizaron la primera Convención de la Haya dedicada a este tema. Posteriormente, en 1907 volvió a celebrarse una nueva convención en La Haya y el 15 de abril de 1935 se llevó a cabo el llamado Pacto de Washington. ([30], pág. 1).

A través de estas convenciones los países han establecido el convencimiento de que los daños ocasionados a los bienes culturales pertenecientes a cualquier pueblo constituyen un menoscabo al patrimonio cultural de toda la humanidad, puesto que cada pueblo aporta su contribución a la cultura mundial. Por lo tanto, han considerado que la conservación del patrimonio cultural es de gran importancia para todos los pueblos del mundo y que conviene que ese patrimonio tenga una protección internacional. ([30], pág. 1).

Este hecho ha significado el compromiso de todos los pueblos alrededor del tema de la protección a los bienes de interés patrimonial, para el caso que nos interesa, y en general de los bienes de interés cultural, en el cual están incluidos los bienes inmuebles, los bienes muebles y los bienes inmateriales.

En América del Sur desde hace ya varias décadas, los gobiernos han adquirido este compromiso en relación con la preservación de los edificios y construcciones en general que constituyan patrimonio histórico. Este compromiso quedó claramente redactado en el “Informe Final de la Reunión sobre Conservación y Utilización de Monumentos y Lugares de Interés Histórico y Artístico” en 1967, de acuerdo con el cual “La inclusión del problema que representa la necesaria conservación y utilización del patrimonio monumental en la relación de esfuerzos multinacionales que se comprometen a realizar los Gobiernos de América, resulta alentadora en un doble sentido. En primer término, porque con ello los Jefes de Estado dejan reconocida, de manera expresa, la existencia de una situación de urgencia que reclama la cooperación interamericana, y en segundo lugar, porque siendo la razón fundamental de la reunión de Punta del Este el común propósito de dar un nuevo impulso al desarrollo del continente, se está aceptando implícitamente que esos bienes del patrimonio cultural representan un valor económico y son susceptibles de erigirse en instrumentos del progreso.” ([19], pág. 1).

En el caso de Colombia los principios contenidos en las declaraciones de estas convenciones, en lo que tiene que ver con los bienes patrimoniales, están plasmados en la Ley 1185 de 2008 [31], modificatoria de la Ley 397 de 1997 [30]. En este país, al igual que en muchos países de América y del mundo, hay una gran cantidad de edificios considerados Bienes de Interés Cultural, BIC, por su envergadura histórica. “Muchas de las edificaciones del período colonial

español, fueron construidas en mampostería de adobe y/o tapia pisada. Los materiales para la construcción de las iglesias y de las casas de la época se limitaron generalmente a los que estaban disponibles en la región y trabajados comúnmente por artesanos locales. Como consecuencia de su edad, diseño y funciones, los edificios de adobe y tapia son estructuras de tipo histórico y de legado cultural significativo dentro de las comunidades.” ([9], pág. 176).

Gran parte de estas edificaciones están catalogadas actualmente como “edificaciones indispensables, pertenecientes al grupo de uso IV, tal como las define A.2.5.1.1 NSR-10, y las incluidas en los literales (a), (b), (c) y (d) del grupo de uso III, tal como las define A.2.5.1.2 NSR-10” y “deben diseñarse y construirse cumpliendo los requisitos presentados en el procedimiento de diseño definido en A.1.3.2 a A.1.3.8 NSR-10, y además los requisitos adicionales dados en el Capítulo A.12 NSR-10, dentro de los cuales se amplía el Paso 10 de A.1.3.4 NSR-10, exigiendo una verificación de la edificación para los movimientos sísmicos correspondientes al umbral de daño de la edificación.” ([26], pág. A-8).

Las soluciones planteadas hasta la fecha para los edificios contruidos en tierra son limitadas en cuanto al grado de protección que ofrecen en un evento de sismo, ya que solo garantizan que el edificio no se desplomará súbitamente en tal caso. “Se pretende en lo posible evitar la ocurrencia del colapso de la edificación durante el evento sísmico o en lo posible retardar dicho colapso para permitir la salida de los ocupantes. El objetivo de estas medidas de rehabilitación no está centrado en la protección de la propiedad ni en la minimización de los daños, ya que debido a las características mismas de estos materiales y técnicas constructivas, esto requeriría mayores niveles de intervención que los propuestos.” ([3], pág. 288). Este es un concepto muy limitante cuando se trata de edificios catalogados en los grupos de uso II, III y IV. Se requiere por lo tanto encontrar una solución para el reforzamiento estructural de estos edificios que esté más cercano a la norma NSR 10. Este proyecto pretende presentar una alternativa para la solución de esta necesidad.

3. GLOSARIO

MURO EN TAPIA PISADA:	Técnica de construcción de muros de tierra, consistente en el apisonamiento de la misma dentro de un encerramiento en madera o metálico, llamado tapiales.
MUROS EN ADOBE:	Técnica de hechura de muros de tierra, con adobe.
ADOBE:	Bloque macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad frente a agentes externos (Tomado de la Norma Peruana E080).
COB:	Técnica de construcción de muros de tierra, consistente en el apisonamiento de la misma, mezclada con fibras vegetales, que pueden ser fique o cualquier otra planta rica en fibras. Es un mejoramiento del muro en tapia pisada.
BTC:	Técnica de hechura de muros de tierra, consistente en el armado del mismo con bloques macizos prefabricados de tierra compactada y secados mediante máquinas que aplican vibración y compactación. Corrientemente la tierra es mezclada con materiales cementantes como cemento o cal.
REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL:	Técnica de mejoramiento de la resistencia de los muros, usualmente de tierra, para actualizar su capacidad a resistir cargas horizontales, corrientemente tipo sismo.
TIERRA ARMADA:	En el contexto de los muros de tierra se entiende como material compuesto por suelo natural mezclado con cementantes, como cemento o cal, que se utiliza para construir directamente el muro mediante la modalidad de tapial o en la fabricación de los adobes que se usarán en el muro.

4. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

4.1. BREVE HISTORIA SOBRE LA CONSTRUCCIÓN EN ADOBE Y TAPIA PISADA

La técnica de la construcción en tierra es milenaria. “La tierra es uno de los materiales más antiguos usados en la construcción de edificaciones. La construcción con tierra tiene miles de años de historia y existe evidencia arqueológica que sugiere la existencia de ciudades construidas enteramente en tierra: Jericó, Çatal Huyuk en Turquía, Harappa en Pakistán, Akhlet-Aton en Egipto, Chan-Chan en Perú, Babilonia en Iraq, Duheros en España, entre otras. Todas las grandes civilizaciones del Medio Este –los asirios, los babilonios, los persas y los sumerios– construyeron con tierra apisonada y con bloques de barro. Por otro lado, cuando los españoles empezaron su conquista del Nuevo Mundo, trajeron consigo el conocimiento de la construcción con adobe y tapia pisada. Fue así como se inició la construcción de las principales ciudades capitales del reino de la Nueva Granada. Las casas urbanas del común de la gente eran edificadas en uno o dos pisos en adobe o tapia pisada. Así mismo, en las ciudades se edificaron las construcciones religiosas levantadas en piedra, en tapia pisada o en ladrillo cocido sentado en argamasa.” ([3], pág. 286).

Sin embargo, otras referencias bibliográficas señalan que “A la llegada de los españoles a América, hallaron en diferentes regiones construcciones elaboradas en tierra y bahareque” [76]. De tal manera, que para el caso de Colombia, gran cantidad de construcciones que heredamos de nuestros antepasados en las ciudades con tradición colonial tienen como material básico el adobe o la tapia pisada. Siguiendo la ruta de la conquista, sin pretender ser rigurosos, es el caso de Santa Marta, Cartagena, Mompo, Girón, Bucaramanga, Barichara, Socorro, Bogotá, Popayán, etc. Es de entender que la tierra era, tal como lo es ahora, el material disponible más abundante en cualquier parte continental y la mano de obra solo requería de una capacitación muy sencilla que transformara a los aprendices en artesanos de este tipo de construcción. En este momento, en virtud de su antigüedad, esas construcciones han adquirido una connotación histórica que brilla por el papel que estos edificios cumplieron en sus respectivas épocas.

Estas construcciones importantes son el resultado de la transferencia de conocimiento que se difundió mediante el mecanismo de enseñanza a través de la construcción, de los maestros a los aprendices que con el tiempo adquirirían la categoría de maestros. Técnicas que posteriormente, en el siglo XVIII, tuvieron sus primeras expresiones escritas, “gracias a varios escritores como Juan de Villanueva en España, Goiffon, M. Fontenay, y el arquitecto François Cointereaux (Lyon 1740 – Paris 1830). En 1786, Cointereaux construye su primera casita (sic) en tapia y así que desarrolla y amplía la técnica de la tapia por medio de 35 artículos que son difundidos en toda la Europa, Alemania (región Weilburg), Dinamarca, Australia, E.U. Por eso, permitiría la construcción de 2000 granjas en el Norte. En Francia, la tapia es utilizada para las construcciones domésticas; horno, pozo, para la

arquitectura agrícola; granjas... la técnica de tapia es localizada principalmente en Dauphiné, Lyon, Auvergne, Bretagne y Dombes.” [77]

En las figuras 1 a 4 se muestran algunos ejemplos de monumentos nacionales.

*Figura 1. Iglesia San Laureano.
Bucaramanga.*

[\(http://lengerkemetripchild.webnode.es/products/visita-a-las-iglesias-de-bucaramanga/\)](http://lengerkemetripchild.webnode.es/products/visita-a-las-iglesias-de-bucaramanga/)



Figura 2. Catedral de Santa Marta

<https://www.google.com.co/search?q=fotos+edificios+historicas+colombia&biw>



Figura 3 La Casa de la Aduana. Santa Marta

<https://www.google.com.co/search?q=fotos+edificios+historicas+colombia&biw>



Figura 4 Edificio Albornoz Rueda. Sede Universidad Libre. Socorro

(Archivo de fotos del autor).



4.2. DESARROLLO CONTEMPORÁNEO DE LA TAPIA

Actualmente las construcciones en Tapia pisada están adquiriendo un nuevo impulso, gracias a la conciencia que se está adquiriendo a nivel mundial alrededor del tema de la ecología y el uso racional de la energía.

“Por fortuna no todo está perdido para la tapia. En casi todo el mundo jóvenes arquitectos, ONGs y entidades académicas motivadas por el empuje que en las últimas dos décadas ha recibido la llamada arquitectura ecológica y sustentable, se han dado a la tarea de recuperar esta técnica milenaria con el fin de emplearla en estructuras modernas, con un lenguaje acorde con las necesidades actuales.”

“En Alemania, Australia, Brasil, Canadá, Colombia, España, Estados Unidos, Francia y Portugal, por sólo nombrar algunos países, la construcción con tapia ha tomado un vertiginoso impulso. Para constatarlo basta con ver la importante serie de libros y artículos publicados en los últimos diez años.” ([15], pág. 10).

En las últimas dos décadas este tema ha despertado el interés de científicos de todo el mundo, especialmente de Europa. En este proceso, como es usual, las universidades han jugado un papel muy importante. En una investigación efectuada en Francia recientemente, 2010, con el fin de determinar las características dinámicas de edificios viejos construidos con tierra, llamada “First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings” y publicada en la revista *Engineering Structures*. No. 33 (2011), se puede apreciar el concepto que en este momento el mundo científico que trabaja en temas de la construcción tiene al respecto. De acuerdo con él, el resurgimiento moderno de la tierra apisonada se concentra en determinadas partes del mundo, como California, el Reino Unido y Australia occidental, pero hay interés en Francia, como lo demuestra la reciente producción de una guía de diseño. Opinan los autores que hasta la fecha no había mucha investigación al rededor de la tapia pisada, a través de pruebas de laboratorio, a pesar de que se requiere un mayor conocimiento al respecto tanto para conservar los edificios monumentales, como para promover la extensión de este tipo de tecnología en la construcción de nuevos edificios. ([74], pág. 2112).

Como es obvio, la atención ha estado centrada en el comportamiento a cortante de los muros, dado que es este tipo de comportamiento el que brinda mayor posibilidad de aporte a la capacidad estructural de los edificios. En el artículo “Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob”, publicado en la revista “*Construction and Building Materials* 61 (2013)” alrededor de un trabajo investigativo desarrollado en los laboratorios BAM del Federal Institute for Materials Research and Testing, en Berlín, los autores se refieren al manejo equivocado tanto en la construcción como en la reparación de muchos inmuebles construidos en tierra, ya sea en tapia pisada como en adobe. En ellos se han cometido fallas tales como la falta de continuidad en las esquinas y en las uniones de las paredes, la presencia de techos pesados que no están soportados por vigas en forma de anillo, y también techos a menudo no conectados a las paredes. Esto ha conducido a que en algunos países, donde gran parte de la población, urbana y rural, viven en casas construidas con tierra, ella ha sido afectada por terremotos altamente destructivos, por ejemplo, Turquía (Erzinkan 1992), Irán (Bam 2003), Perú (Pisco 2007) y Chile (Concepción 2010). Es decir, que estos eventos no solo han causado la pérdida de muchas vidas, sino que también ha destruido buena parte del patrimonio cultural mundial. ([51], pág. 327).

Otro punto de atención es el material y la técnica de construcción utilizada. En el transcurso del milenario proceso de vida de las construcciones en tierra se han utilizado muchas técnicas de construcción, cuyo objetivo es mejorar el comportamiento del material, sobre todo ante fuerzas a cortante, pero también facilitar el proceso. En esta variada lista de técnicas se destacan:

Construcciones en tapia pisada:

- a. Tierra apisonada del sitio sola.
- b. Tierra apisonada del sitio con limos traídos de lugares vecinos.
- c. Tierra apisonada en sitio con fibras vegetales de productos agrícolas vecinos mezclados con la tierra o intercalados durante el proceso de apisonamiento, por capas.
- d. Tierra apisonada del sitio mezclada con cemento o con cal.

Construcciones en adobe:

- a. Con adobes fabricados en tierra sola, secados al aire y sin compresión.
- b. Con adobes fabricados en tierra sola, secados al aire y sometidos a compresión.
- c. Con adobes fabricados en tierra mezclada con fibras vegetales.
- d. Todas las anteriores con capas intercaladas de ladrillo cocido.

En las figuras 5 a 8 se muestran algunas expresiones de esta arquitectura reciente.

Figura 5 Interior de la Escuela de Artes Plásticas, Oaxaca. Fotografía: Luis F. Guerrero.

([15], pág. 6)



Figura 6 Residencia en La Paz, Bolivia. Arq. Raúl Sandoval

([20], pág. 160)

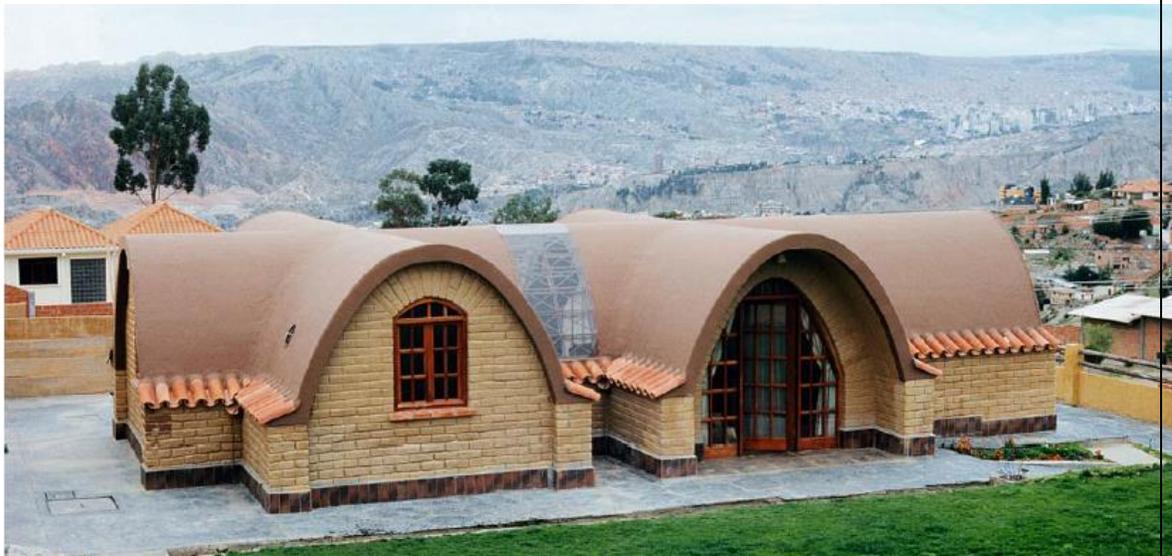


Figura 7. Cultural, Educational and Sacral Buildings. Nueva Delhi. India

([20], pág. 175)

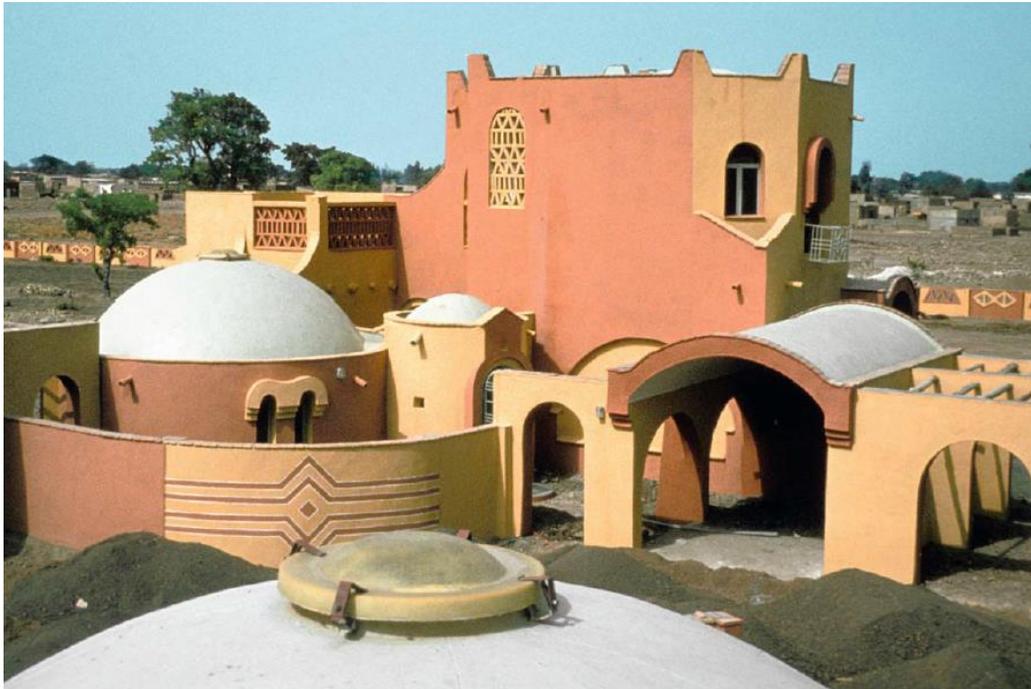


Figura 8. Academic accommodation building, Charles Sturt University at Thurgoona. New South Wales. Australia.

([20], pág. 187)



Estas muestras de construcciones recientes expresan la tendencia moderna en algunos países tanto de América, como de Europa, Asia y Australia, de utilizar la tierra en forma de tapia pisada o de adobe como parte importante de la estructura de las construcciones. Obviamente, que las estructuras involucradas son corrientemente de Uso Tipo I, o de Tipos II y III, pero de un nivel o máximo dos. Ya no se trata de las estructuras de dos y tres niveles para todo tipo de uso, como se hacía hace 500 años, porque en este momento histórico donde se requieren estos edificios, en los centros urbanos, hay alternativas más económicas, visto esto a corto plazo, y, talvez con mayor flexibilidad para resolver las pretensiones arquitectónicas. Sin embargo, en estos tiempos, en los cuales ha cobrado una especial importancia el comportamiento ecológico del ser humano, lo cual entraña la minimización del consumo de energía, la construcción en tierra cobra actualidad. La posibilidad de uso de la tierra del mismo sitio de construcción, el buen comportamiento térmico del material y la no utilización de cemento en grandes cantidades, igualmente que la disminución en el uso de maquinarias pesadas para el proceso, hacen de la construcción en tierra una alternativa válida para el desarrollo de la industria de la construcción.

4.3. ESTUDIO SOBRE CONSTRUCCIONES EN ADOBE O TAPIA PISADA EN COLOMBIA

Tal como se afirma en la Sección 4.1, en nuestro país hay una alta presencia de este sistema de construcción, no solo a nivel de vivienda y de construcciones con tipos de uso I y II, sino que hay una gran cantidad de edificios catalogados como patrimonio histórico, muchos de los cuales corresponden a tipos de uso superiores ([9], pág. 176), ([11], pág. 227). Esto ha desembocado en la necesidad de abordar el tema a través de investigaciones tecno-científicas en las que las Universidades han constituido un aporte importante.

En la Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, se han desarrollado varios trabajos alrededor del tema. Entre ellos se destacan:

- “Comportamiento estructural de muros en tierra apisonada, reforzados verticalmente con caña, sometidos a cargas horizontales”. Tesis de grado ejecutada por William Amaury Prada Díaz, Santiago Rivero Bolaños; 1999. Dirigida por el Profesor Dalton Moreno Girardot.
- “Determinación de los módulos elástico, plástico y de rotura en material para tapia pisada”. Ejecutada por Pablo Geovanny Pérez Jarro y César Augusto Pachón Olarte; año 2003. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Dirigida por los profesores Ricardo Cruz Hernández y Dalton Moreno Girardot.

- Aspectos a tener en cuenta en la vulnerabilidad sísmica para edificaciones en tapia pisada en la ciudad de Bucaramanga. Ejecutado por Javier Caballero Esteban y Delcy Mayerlyng Solar Santos, año 2007. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Dirigida por profesora Esperanza Maldonado Rondón.
- Influencia de las propiedades físico – mecánicas en el material tierra para construcción con tapia pisada. Ejecutada por Lina María Benítez Rodríguez y Camilo José Navas Corena, año 2009. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Dirigida por el profesor Wilfredo Del Toro Rodriguez.

En otras universidades se han constituido centros de investigación alrededor de este tema, es el caso de la Universidad de los Andes a través de su Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, cimoc, y financiado por la Corporación Barrio La Candelaria acomete el “Estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en técnicas tradicionales de adobe y tapia pisada”. Esa misma Universidad mediante su Centro de Estudios de Desastres y Riesgos, CEDERI, de la Universidad de los Andes y financiado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y el Fondo para la Reconstrucción Social del Eje Cafetero, forec, lleva a cabo el “Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas de adobe y tapia pisada a nivel nacional”. Los resultados de estos trabajos son resumidos en un artículo elaborado por los investigadores Luis Eduardo Yamín Lacouture, Camilo Phillips Bernal, Juan Carlos Reyes Ortiz y Daniel Ruiz Valencia. ([3], pág. 1)

Por otro lado, la Pontificia Universidad Javeriana facilita la investigación en este campo mediante el trabajo de un cuerpo de investigadores que elabora el documento “Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales en tierra”. Los ejecutores son Daniel Ruiz Valencia, Cecilia López Pérez y Juan Carlos Rivera, profesores de dicha institución. ([11], pág. 228).

Hay que resaltar también el trabajo de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, que ha elaborado varios trabajos al respecto entre los cuales se destaca el “Manual para la Rehabilitación de Viviendas Construidas en Adobe y Tapia Pisada”. Trabajo financiado por La Red de Solidaridad de la Presidencia de la República. ([4], pág. 1).

Ha habido otras expresiones de investigación en otros centros universitarios pero talvez los relacionados representan holgadamente el esfuerzo que se ha hecho en este sentido. Sin embargo, este esfuerzo no ha sido suficiente para lograr la institucionalización de unas prácticas a nivel de la normatividad colombiana sobre la construcción, más exactamente la NSR 10, para este sistema de construcción, que establezca tanto unas prácticas de rehabilitación o reforzamiento estructural, como de construcción, como sí ha sido el caso de Perú y Chile y otros países, pocos en realidad. ([45], [7], [26])

4.4. LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA EN EL MUNDO

4.4.1. Generalidades

El tratamiento que se le ha dado a las construcciones en tapia pisada en Colombia, se ha basado principalmente en el temor a su capacidad estructural para resistir sismos. Contrasta este con el que se le ha dado en otros países “A pesar de que en Colombia la construcción en tapia pisada no es permitida, en otros sitios como el occidente de Australia, Canadá, Nueva Zelanda, España, Zimbabwe, Francia, Estados Unidos (California) y otros tantos países, es permitida y además ha sido evidente el interés del Reino Unido en este tipo de construcciones, pues allí han publicado recientemente una guía de construcción, acompañada de diseños arquitectónicos interesantes.” ([1], pág. 49).

En esta sección se trata de mostrar el estado actual de aceptabilidad que las construcciones en tapia pisada o adobe tienen en algunos países de cada continente. En cada caso hay que precisar hasta donde llega dicha aceptabilidad. Es decir, si se limita al reforzamiento estructural de las construcciones existentes o si se extiende hasta la normalización de construcciones nuevas y su tipo de uso. Pero, además, se encuentra un tratamiento diferencial con respecto al tipo de material y su configuración: En algunos países se incluye en la aceptabilidad la tierra pura, bajo ciertas condiciones de gradación o granulometría y compactación; en otros, la tierra debe ser mezclada con algún material cementante, corrientemente cal o cemento. En cuanto a la configuración, hay varias formas. Las tradicionales, encontradas en los edificios monumentales, que son el principal objeto de este trabajo, son:

- a. La llamada Tapia pisada o tapial que consiste en un muro construido mediante bloques de dimensión aproximada 2.0 m de ancho por 1.0 m de alto y del espesor del muro, que se construye en el sitio mediante capas de tierra que se van apisonando en la medida en que se va vertiendo la tierra en capas de aproximadamente 15 cm, hasta llegar a 10 cm, y que adquieren las dos caras paralelas gracias a dos formaletas llamadas tapias. Este apisonamiento puede ser manual o mediante apisonador neumático.
- b. La llamada construcción de adobe, consistente en muros que se arman con piezas fabricadas independientemente con tierra apisonada y cruda a la cual se le agregan otros materiales para darle mayor cohesión y resistencia al cortante “Frecuentemente, para mejorar las condiciones del suelo se adicionan otros materiales como fibras naturales (paja y estiércol de caballo) cal e incluso sangre de toro” ([4], pág. 18). Esto último también aplica para el caso anterior.

Ver figuras 9a y 9b

Figura 9a. Ilustración sobre técnica de muros en tapia pisada

([4], pág. 2.4)

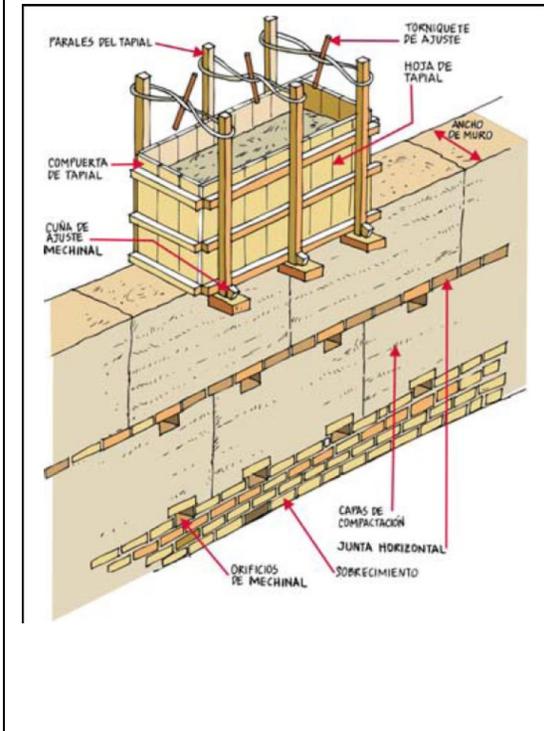
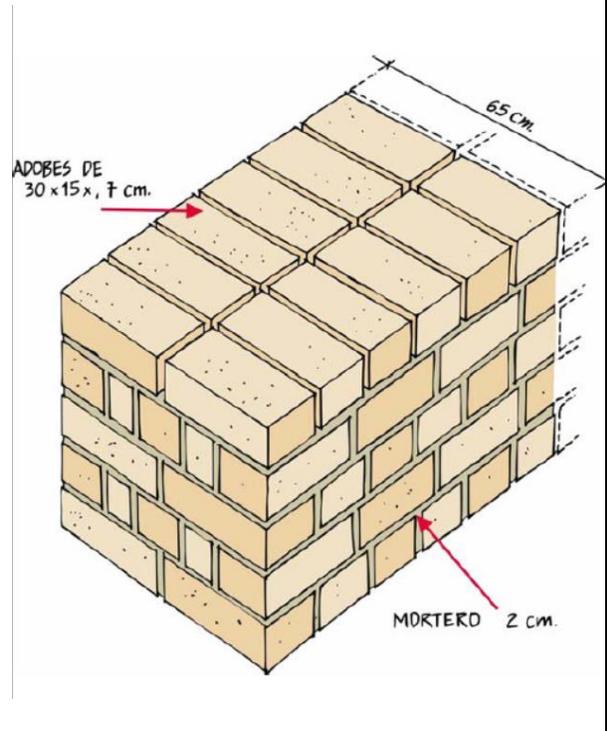


Figura 9b. Ilustración sobre técnica de muro en adobe

([4], pág. 2.9)



No es el objetivo de esta sección profundizar en el tema propuesto, teniendo en cuenta que es muy extenso y justifica la dedicación exclusiva para una tesis de investigación de maestría, sino tratar someramente el estado en que se encuentra en los países relacionados el tratamiento del reforzamiento estructural de edificios construidos en tapia pisada, para actualizarlos a las exigencias que la época impone a todos los edificios, en la búsqueda de la seguridad para los seres vivos.

4.4.2. Construcciones en tapia pisada o en adobe en américa

4.4.2.1 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Brasil

“Brasil ha emitido trece normas, desarrolladas por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) desde 1986 hasta 1996, sobre el suelo cemento y sus aplicaciones constructivas en forma de bloque suelo cemento y pared monolítica.” ([21], pág. 160)

“La Associação Brasileira dos Construtores com Terra, abcterra, con sede en la ciudad de São Paulo, la Associação Brasileira de Ciências em Materiais e Tecnologias Não Convencionais, abmtenc, con sede en la ciudad de Río de Janeiro,

y principalmente el Proyecto de Investigación proterra, ahora Red Iberoamericana proterra, han debatido sobre las consecuencias de los impactos y el agotamiento de determinadas materias primas utilizadas en la construcción civil, y las alternativas posibles, teniendo en cuenta la importancia de la sostenibilidad y buscando contribuir con la definición de políticas públicas para la vivienda sostenible y de interés social, y la preservación del inmenso patrimonio arquitectónico existente en nuestro país.” ([44], pág. 238)

“La producción y el uso de la arquitectura y construcción con tierra en Brasil se han concentrado en tres aspectos: el patrimonio cultural edificado, la arquitectura de la necesidad y la bioarquitectura.” ([44], pág. 238)

“A pesar de los esfuerzos, todavía no hay en Brasil normas técnicas para el uso del adobe y las demás técnicas, mientras que desde el año 1989 está en vigor en Brasil la norma para ladrillo de suelo cemento. Esto es un ejemplo de que las líneas de investigación, en su mayoría, todavía benefician temas que privilegian intereses de apenas algunos sectores de la construcción civil, dificultando la implantación de una política integral que incentive la producción de viviendas sociales y sostenibles.” ([44], pág. 240).

“El Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED), Camari, Brasil, desarrolló un sistema para una vivienda de bahareque con elementos prefabricados que después del ensamblaje fueron rellenados con bolas de barro.” ([46], pág. 37).

4.4.2.2 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Chile

Chile es de los países que viven en permanentemente estado de alerta por concepto del sismo. Por esto llama la atención la actitud proactiva que han asumido en relación con el tema de la preservación de los edificios monumentales, consecuencia de la conquista española. De acuerdo con el documento “Vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile: Aplicación a los torreones españoles de Valdivia”, tesis escrita en la Universidad Austral de Chile en el año 2013, Chile cuenta con un comportamiento muy particular y diverso puesto que posee construcciones de diversos tipos este tipo desde el siglo XVI, cuando sucedió la conquista de Chile. Así, en el Sur fuertes y torreones, que fueron construidos como defensa de las ciudades recién fundadas por el Reino de España de esa época. En el centro y norte se tienen las iglesias de adobe, en tanto que en el sur, las mismas son de madera, como es el caso de las iglesias de Chiloé. En la zona central se tienen también las casonas en adobe y mampostería de la época. Se tiene también obras viales como puentes y viaductos construidos completamente en mampostería como el de Malleco y el puente de Cochi, ambos en acero, que fueron fundamentales para el crecimiento y desarrollo de la sociedad chilena del siglo XIX.” ([14], pág. viii).

En el documento “¿Existen técnicas adecuadas de construcción con tierra para países sísmicos?”, tesis presentada a la Universidad Politécnica de Cataluña, en 2010, después del terremoto del mismo año, se encuentran reflexiones por parte del arquitecto Alejandro Aravena, de acuerdo con las cuales, es un error tratar de insistir, apoyándose en criterios que llaman pseudo-históricos, en estilos antiguos, tal como ocurrió en La Serena y otras ciudades. ([46], pág. 37).

Para la misma época se encuentra la opinión de que no se debe sepultar al adobe como material de construcción, menos aún en esta época en la que la tierra comienza a ser revalorizada por su validez en el campo de la ecología, en la que utilizada con sistemas estructurales sismo-resistentes, como es el caso de la madera, campo en el cual Chile es una autoridad técnica, puede demostrar su validez. De acuerdo con esta reflexión, Chile puede también alcanzar un liderazgo importante en el diseño y construcción sismoresistente de tierra. ([46], pág. 37).

El constructor de obras civiles Francisco Prado García, académico de la Escuela de Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile afirma que en Chile hay una cantidad importante de edificios cuya estructura está construida en este material y el hecho de que aún estén prestando servicio, si se tienen en cuenta sus características favorables y desfavorables, quiere decir que es un material válido para ser tenido en cuenta. ([46], pág. 37)

Chile se ha visto obligada, como consecuencia de su realidad tectónica, por su ubicación geográfica en la falla de subducción de la placa de Nazca en la placa sudamericana, lo cual ha significado un largo historial de sismos con intensidades superiores a 7.0 en la Escala Richter, a atender en forma muy dinámica la normalización de sus construcciones, capitalizando dicha experiencia sísmica como una oportunidad para introducir una nueva norma para el diseño sísmico de edificios y otra de diseño de edificios de hormigón armado.” ([66], pág. 32).

En cuanto a la alteración, restauración, rehabilitación, remodelación, reparación o consolidación estructural de las construcciones de tierra, Chile es el primer país suramericano en establecer una norma para el reforzamiento estructural de las viejas construcciones de tierra. Esto sucedió en febrero de 2010, después del terremoto cuando se creó la norma técnica NTM 002 2010 “Proyecto de intervención estructural de construcciones patrimoniales de tierra, para reparar o reforzar edificaciones de adobe existentes, aunque no para edificios nuevos.” ([66], pág. 99).

En este momento en Chile existen dos Normas, la NTM 002, “Proyecto de intervención estructural de construcciones de tierra”, elaborada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y la NCh03332 “Estructuras - Intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda - Requisitos del proyecto estructural”, elaborada por el Instituto Nacional de Normalización (INN). La primera cubre toda construcción en tierra, en tanto que la segunda está orientada específicamente a los edificios monumentales. [5] y [67].

4.4.2.3 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Perú

Es un caso similar a Chile, lo que no es de extrañar por cuanto comparten la misma falla geológica. Sin embargo, se atrevió a asentar en normas las directrices para desarrollar nuevas construcciones en adobe simple o estabilizado.

El empeño de las universidades, lideradas por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), en investigar sobre las construcciones en adobe, material a través del cual se ha canalizado la construcción en tierra, comenzó después del terremoto de Huaraz, Perú, en 1970. Este proceso ha desembocado en la norma denominada Adobe y que está incorporada al Reglamento Nacional de Edificaciones como el capítulo E.080, llamado Adobe, que ya ha sido revisado y mejorado dos veces. ([46], pág. 36).

Posteriormente, el 15 de agosto de 2007, sucedió otro terremoto, con una magnitud de 7.9 en la escala de Richter, que afectó principalmente a la región del sur de Lima y que permitió determinar la eficacia de la norma. Se encontró que 76.000 viviendas fueron destruidas o dañadas gravemente, pero que las viviendas en adobe que habían sido construidas respetando las nuevas normas pudieron mantenerse sin o con daños menores. ([46], pág. 36).

La Pontificia Universidad Católica del Perú se ha constituido en líder indiscutible del proceso de investigación sobre las construcciones que utilizan la tierra, específicamente en forma de adobe, con destino específico hacia la vivienda. Este centro educativo organizó el Seminario Sismo Adobe 2005, de alcance internacional y que trató temas relacionados no solo con la ingeniería sino con la arquitectura y la conservación de este tipo de edificaciones. ([46], pág. 36).

4.4.2.4 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Argentina

En Argentina está prohibida la construcción en tierra, sin embargo hay zonas en las que prolifera dicho tipo de construcción, como es el caso de Mendoza en la que más del 80% de su población rural ha construido sus viviendas con adobe no obstante esta prohibición, atendiendo a los altos costos de los materiales amparados por la legislación nacional como son el ladrillo, la arena, el cemento, el triturado o casajo y el acero. ([24], pág. 5).

No hay normas en Argentina para este tipo de construcciones, a pesar del esfuerzo hecho por entidades prestigiosas de Argentina como es la Universidad de Tucumán, que ha liderado reiterados encuentros internacionales alrededor del tema de las construcciones en tierra.

En Argentina, el reglamento que rige la construcción es el INPRES-CIRSOC, Instituto Nacional de Previsión Sísmica – Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. En él no se considera la tierra como material válido para la construcción, lo cual ha generado, como es usual en estos tiempos, en los que la tierra ha ganado adeptos a nivel mundial para

ser considerada como alternativa de construcción, afirmaciones como la que se encuentra en la publicación Construcción con Tierra-2, del Centro de Investigación Habitat y Energía, CIHE, la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, FADU, la Universidad de Buenos Aires, UBA, y el Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas, en las que se sostiene que esta conclusión de las normas no tiene fundamento técnico. Esto indica el estado en que se encuentra el manejo de este tema.

El problema es que esta actitud de las normas, además de desconocer la capacidad que las construcciones en tierra manejadas técnicamente, lo cual permite no solo aprovechar sus ventajas sino regular su uso de acuerdo con sus deficiencias, produce un fenómeno con consecuencias peores a nivel social y es que, obedeciendo a las limitaciones económicas de la población, un alto porcentaje de la misma termina construyendo sus necesidades habitacionales en tierra cruda, a espaldas de la reglamentación nacional y sin asistencia técnica ni apoyo económico, empeorando su situación social y agregando a su vulnerabilidad social, la física. ([54], pág. 29), Se encuentran también afirmaciones de investigadores autorizados que dan a los muros en tierra, contruidos con bloques mejorados con cemento y con la acción mecánica de la compresión durante su fabricación una credibilidad equiparable a los fabricados convencionalmente, los cuales sí están avalados en las normas, en el caso de Argentina, la CIRSOC 103 Tomo I y III y, el nuevo Reglamento CIRSO 501 Y 501-E.

Hay en Argentina un centro de investigación alrededor de las construcciones con tierra, el Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATIC), que ha sido construido con muros en tierra en sus distintas formas de presentación, o sea, sistema monolítico (tapial); sistema de mampostería (BTC, Bloque de Tierra Comprimido y BaTc, Bloque Articulado de Tierra Comprimido, y sistema mixto, quincha y entortado) [70] y que tiene entre sus objetivos investigar y promulgar los resultados de sus investigaciones sobre este tema y en cuanto al desconocimiento que las normas hacen de las construcciones con tierra como tecnología aceptada para resistir las solicitudes estructurales que deben considerarse en una construcción para que pueda ser aceptada como sismo-resistente, afirma que ello es el resultado de la falta de difusión de los resultados que las investigaciones han logrado sobre las reales posibilidades de la tierra y de las distintas formas de estabilización y cubrimiento en sus deficiencias. ([69], pág. 2).

4.4.2.5 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Uruguay

En Uruguay se ha hecho un esfuerzo importante por fomentar la construcción en tierra, para el efecto con una frecuencia anual y en convenio firmado con la Unesco a través de la cátedra "Arquitecturas de Tierra, culturas constructivas, desarrollo sostenible", realizan encuentros internacionales alrededor de este tema. En este

sentido la academia ha contribuido en forma importante, a través de La Universidad de la República de Uruguay.

La práctica de la construcción con tierra en Uruguay, como en todos los países de América, proviene desde antes de la conquista española, solo que después de este evento se tecnificó con base en la experiencia española derivada de la invasión de los moros en su territorio y se utilizó en edificios de mayor envergadura, como eran las grandes mansiones señoriales. En el siglo XXI, atendiendo a las dificultades económicas que sufrió el país en la década del 90, la construcción en tierra ha resurgido y en este momento hay varios grupos de arquitectos que han asumido este tipo de construcción como una alternativa válida, considerando también las ventajas que presenta desde el punto de vista ecológico.

Se ha evidenciado el incremento en la construcción con tierra en la década del 2000 al 2010. ([49], pág. 66). En este último año se llevó a cabo actividades importantes de formación en la arquitectura, en investigación y en capacitación sobre la construcción en tierra por parte de distintas agrupaciones nacionales como las universidades y distintas agremiaciones profesionales, pero en forma descoordinada, lo que les hace sentir que hace falta programas de educación y entrenamiento sobre este tipo de arquitectura y sobre la conservación y mantenimiento del patrimonio monumental o el de las simples viviendas y sobre la búsqueda de nuevos materiales. ([49], pág. 5)

Sin embargo, a pesar de este fenómeno de estimulación del profesional para adoptar esta solución dentro de su panorama de alternativas, la construcción en tierra no está normalizada en Uruguay.

4.4.2.6 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Venezuela

Las normas venezolanas, SENCAMER, Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos, que en el año de 2004, reemplazó a COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales, en lo referente a las normas de construcción, no incluye las edificaciones en tierra. Sin embargo, la Universidad de los Andes Mérida en Venezuela, ha venido liderando un proceso de investigación alrededor del tema de tecnologías de construcción con tierra para la vivienda rural en Venezuela, que se apoya en las investigaciones celebradas en otros países como Alemania, Estados Unidos y Perú, con el fin de proponer un diseño de vivienda de desarrollo progresivo, de un piso, con mampostería reforzada, con base en bloques de tierra-cemento de 20 cm de ancho y contrafuertes cada 3.5 m aproximadamente. [54]

4.4.2.7 Construcciones en tapia pisada o en adobe en México

Méjico también tiene una tradición en la construcción en tierra, sobretodo en forma de adobe, entre los estados de Puebla, Tlaxcala y Vera-cruz. Sin embargo, no se cuenta con investigaciones que permitan precisar la procedencia de dicha cultura. En esa zona hay una gran cantidad de desarrollos prehispánicos que utilizaron la técnica del adobe, mas no de la tapia. Al parecer, esta técnica fue traída por los españoles, provenientes de regiones en las que esta técnica constructiva era usada y, por lo tanto, fueron los españoles los que la difundieron en Méjico. Sin embargo, otra hipótesis es que la técnica del tapial haya llegado después de la época virreinal, a finales del siglo XIX, cuando hubo facilidad para traer de Francia cierta influencia arquitectónica originada en la escuela de Cointeroux. En esta época hubo un gran desarrollo de las haciendas agrícolas y ganaderas en Méjico, que permitió la aplicación y difusión de esta técnica de construcción hasta mediados del siglo XX. ([15], pág. 9)

Méjico ha sufrido múltiples sismos, muchos con magnitudes que oscilan entre 6.5 y 8.5 en la escala Richter, rango en los que corrientemente se han producido gran cantidad de pérdidas tanto de vidas humanas como en bienes económicos, como el reciente sucedido el 19 de septiembre de 2017, en el que han sido reportados 366 muertos en diferentes entidades del país y más de 44 edificios dañados en la Ciudad de México. Estos sismos tienen su origen principalmente por la subducción de las placas tectónicas de Cocos y de Rivera bajo la placa de Norteamérica. Por lo tanto, la comunidad científica mejicana se ha visto obligada a profundizar en este tema, con vistas a desarrollar normativas que permitan mejorar el comportamiento de sus estructuras ante estos eventos.

Es importante tener en cuenta que Méjico es un estado federal y que cada estado cuenta con su propio reglamento de construcción. Esto complica la intención de abordar en forma somera el tema, como es la de esta sección; sin embargo, de la información encontrada al respecto se puede concluir que los entes gubernamentales y académicos tienen, a la vez que claridad sobre la importancia de actualización de sus estructuras viejas, plena conciencia de la necesidad de preservación de sus monumentos históricos. En una reflexión encontrada en un documento de CENAPRED, El Sismo de Tehuacan el 15 de junio de 1999, se hace notar que mientras que en la reparación y reconstrucción de las escuelas y viviendas afectadas se están aplicando normas muy estrictas, resultado del endurecimiento de las mismas como resultado del sismo de 1985 en ciudad de Méjico, el criterio imperante en la restauración de los edificios monumentales es el de dotarlos de sus características arquitectónicas originales. ([63], pág. 164)

Como puede apreciarse, ha habido mucha inquietud sobre el tema del comportamiento estructural de los edificios en momentos de sismo, inquietud que, como suele suceder, tiene su cuna y lugar de desarrollo en el aula universitaria. Sin embargo, los entes gubernamentales han sido diligentes en la capitalización de este conocimiento generado en la academia, lo cual puede ser verificado en el documento normativo "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y

Construcción de Estructuras de Mampostería”, que dedica su capítulo 11 a la rehabilitación de los edificios construidos, en cuya redacción se aprecia su aplicabilidad a los edificios considerados monumentos históricos, construidos en su mayor frecuencia en adobe o en bloques de piedra, que era la mampostería de la época. En esta afirmación se aprecia la aceptación por parte de CENAPRED. ([64], pág. 44)

Por otro lado, Méjico es un país con mucha construcción catalogada como monumentos históricos y, por lo tanto, hay mucha actividad económica en el campo del turismo, que justifica la preocupación por la estabilidad estructural de la misma. Actualmente, tras el sismo del 19 de septiembre de 1985 que sorprendió a la [Ciudad de México](#) a las 7:19 con una magnitud de 8,1 en escala Richter, se creó el CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, a través del cual se manejan normas e investigaciones relativas a todo lo que signifique peligro para la seguridad tanto de las personas como para los monumentos y entre ellos se encuentra la rehabilitación de los monumentos nacionales. Esta política nacional se ve reflejada en recientes decisiones de entes como el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y algunos gobiernos estatales y municipales, que han contratado con distintos grupos de ingenieros estructuralistas la rehabilitación estructural de edificios coloniales considerados como patrimonio histórico.” ([56], pág. 1)

Se muestran a continuación algunos autores de libros y documentos importantes:

Tabla 1. Lista de autores y libros o documentos importantes sobre la construcción en tierra en Méjico

Autores	Libro o Documento
Fernando Peña Mondragón (UNAM) y Paulo B. Lourenço (Universidad de Minho).	Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas. [57]
Joaquín Lozano Mercado de la (Universidad Autónoma de Puebla), Horacio Ramírez de Alba (UAEM) y Oscar Flores Macías (Instituto Mejicano del Petróleo).	Estado del Arte del Análisis de Mamposterías sin Refuerzo en Construcciones Antiguas. [58]
Natalia García Gómez (UAEM)	Edificios Históricos de Mampostería y Herramientas para su Estudio Estructural. [59]
Alberto Cedeño (UAM)	Valoración de las Condiciones de la Estructura Antigua. [60].
Carlos A. Gutiérrez Martínez, Leonardo Flores Corona, César López Martínez (CENAPRED)	Sismo de Coyuca de Benítez del 7 de octubre de 2001. [61]

4.4.3. Construcciones en tapia pisada en europa

4.4.3.1 Generalidades

Europa es un continente rico en monumentos históricos construidos en tapia pisada y en adobe. Los países que más destacan son, en su orden: Italia, Francia, España. ([48], pág. 14) y Alemania, que se enriqueció mucho de Francia en este proceso. Por esta razón se ha escogido a estos países para describir someramente el tratamiento que actualmente se le da a estos edificios.

4.4.3.2 Construcciones en tapia pisada o en adobe en España:

En el proceso histórico que ha vivido España, se destacan dos episodios: Primero, la invasión sufrida en el siglo IIX por los moros, sociedad musulmana, que duró más de siete siglos y, por otro lado, la conquista que hicieron, una vez recuperaron la península, de lo que ellos creían era La India, en el siglo XV. Estos dos procesos han significado actualmente para España una gran connotación a nivel cultural. El primero la dotó de un gran patrimonio histórico constituido por bienes físicos, tales como monumentos, archivos, bibliotecas, muebles, desarrollos urbanos con gran historia, parajes arqueológicos o paisajísticos, y también por bienes inmateriales, tales como manifestaciones del folclore, la gastronomía o la tradición. Es paradójico, pero toda esta riqueza no se habría dado si España no hubiera sufrido ese centenario período de invasión. Todo esto le ha dado a la España actual un acervo inmenso de riqueza cultural representada en bienes económicos y productivos de naturaleza sui géneris y de una gran heterogeneidad y que tienen gran implicación a nivel de la economía, que la hace comparable solo a Italia o a Francia. Estos bienes, son no renovables, pero en cambio, son de muy larga vida, pero que requieren la aplicación de unos costos de mantenimiento y conservación, y que tiene la particularidad de que, al igual que nadie puede ejercer sobre ellos una propiedad particular, todos pueden gozarlos como una propiedad social. ([48], pág. 14)

Es importante también decir que sabemos por los textos antiguos de Plinio, que ya había fuertes de tierra apisonada en España a finales del año 100 AC. ([20], pág. 12), es decir antes de la invasión de los moros, que se ha establecido sucedió desde el año 726 d.C.

Resultado de esta riqueza patrimonial es la existencia en España de muchas empresas que se dedican a la rehabilitación arquitectónica y estructural de las mismas. El Programa de Conservación del Patrimonio Histórico Español de la Fundación Caja Madrid en su Base de datos muestra un listado de 94 empresas, categorizándolas de acuerdo con su tamaño, las hay desde empresas con más de mil (1000) empleados, hasta pequeñas, de origen familiar, con cinco (5) empleados. Ver ([48], pág. 50)

Pero, estas empresas corrientemente no hacen investigación como actividad primaria, ella solo actúa con base en los objetivos concretos de un compromiso

contractual orientado a obtener unos resultados arquitectónicos y estructurales en el marco de la conservación y el mantenimiento, plenamente tasables en el corto plazo y, como producto derivado van adquiriendo una experiencia que en un gran porcentaje no se difunde sino que queda como el llamado “know how” de la empresa familiar para su aplicación en un nuevo contrato” ([48], pág. 68). Sin embargo, otra parte puede acumularse y difundirse en forma sistemática. Se categoriza a estas empresas de acuerdo con el campo que cubren, en su misión, en:

- Centros formativos, entre los que están incluidas las universidades.
- Centros de restauración de las administraciones nacionales, regionales o locales.
- Centros de investigación e innovación con carácter genérico.
- Museos.
- Fundaciones especializadas en distintos sectores del ámbito del patrimonio histórico.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas de España elaboró un documento guía para la planeación, diseño y construcción de edificios de tierra, en 1992. El enfoque principal está sobre tapia pisada, aunque también se dan referencias comparativas con el adobe. ([49], pág. 4).

La sección uno del documento está dedicado a la historia de la tapia pisada, que allá la llaman tierra pisada, y del adobe. La segunda trata de los fundamentos de diseño de los muros, teniendo en cuenta su necesidad de resistir acciones de compresión, tensión y pandeo. La sección tres se refiere a los métodos de construcción en tierra apisonada. En este capítulo se detallan los componentes del encofrado, los distintos métodos de apisonado y la secuencia de construcción. A continuación se detallan los cimientos y el tratamiento que se debe aplicar en las esquinas con el fin de dar amarre a los muros entre sí. Finalmente, se dan directrices sobre el control de calidad que se debe seguir para lograr una obra durable y segura. ([49], pág. 4). En la guía se encuentra también información sobre las pruebas a que se deben someter los materiales y sobre las tolerancias admisibles durante la construcción. ([49], pág. 5).

En cuanto al estado de la normatividad, España solo tiene aprobado en este momento una norma referente a edificios en tierra, la UNE 41410 2008 Bloques de Tierra Comprimida, BTC ([55]). De esta forma, por lo menos hay un acercamiento a esta vieja tecnología. Sin embargo, no hay norma referente al reforzamiento estructural de edificios construidos en adobe o en tapia pisada, a pesar de que, como se ha expresado ampliamente en los párrafos anteriores, hay claridad en relación con la importancia que tienen estas construcciones, sobre todo si están incluidas en el inventario de patrimonios culturales de la región y del mundo. Los trabajos de reforzamiento estructural que se hacen se apoyan en las investigaciones efectuadas en los centros relacionados anteriormente.

4.4.3.3 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Italia:

Italia es un país con mucha herencia dejada por los procesos históricos que sus antepasados vivieron; la herencia dejada en forma de edificios fue construida tanto en tapia pisada como en adobe, también la hay en piedra unida con argamasa que era el concreto de la época. Todo esto como resultado de la época gloriosa del imperio romano durante los siglos I A.C. a V D.C.

Las áreas donde más abundan las construcciones en tierra son la parte baja de la provincia de Alejandría que es una región de Piedmont y el llamado territorio de Monserrate; en esta zona existen tanto viejas casas de campo, como edificios privados y públicos que fueron construidos para escuelas, mansiones palaciales, iglesias, etc. ([80], pág. 65).

Se distinguen tres áreas diferentes, la primera en la que el adobe, o sea ladrillos hechos a mano y no recocidos, es la técnica utilizada y es la parte sur de la provincia de Alessandria situada entre la pequeña población de Casalcermelli, Castel Spina, Sezzadio, Predosa y Castelnuovo Bertrando, la segunda en la que abunda la utilización de la tierra apisonada, tapia pisada, se desarrolla principalmente en el llamado Valle de Frascetta, ubicada entre las poblaciones de Tortona, Alessandria y Novi Ligure, en el sur, aquí las construcciones en tierra apisonada constituyen más del 50% de los edificios, algunas veces ellas muestran esquinas reforzadas con ladrillo recocido, o estructuras de carga de ladrillo recocido (como pilastras) y la tercera en la que se usa una tecnología combinada, adobe y tierra pisada está localizada entre Castelferro, Basluzo y Novi Ligure. ([80], pág. 66).

Lo anterior significa un reto para los arquitectos e ingenieros que, con el respaldo de las universidades, se han constituido en una organización llamada Terre di Terra cuyo objetivo es explotar la herencia material e inmaterial. En términos resumidos:

- a. La propuesta de un interesante ecomuseo temático tanto del territorio de Novi Ligure como en el área de Frascetta.
- b. Un plan de entrenamiento sistemático, información y concientización.
- c. Un conocimiento más profundo de la herencia arquitectónica en tierra.
- d. Un plan de comunicación sistemática

Sin embargo, hasta la fecha no existe en Italia normas al respecto de este tipo de construcción. Existen unas leyes, que han demostrado no tener mayor aplicabilidad práctica con carácter técnico-constructivo.” ([21], pág. 160).

4.4.3.4 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Francia:

Francia es de los países pioneros en la divulgación escrita de la técnica de construcción de los muros en tierra en la Europa posterior al medioevo, correspondiendo al desarrollo de la misma entre los siglos XV y XVI y por tal razón

su influencia traspasó las fronteras de dicho continente, llegando hasta América. La tierra apisonada, llamada terre pisé, se extendió entre los citados siglos. Cerca de Lyon hay actualmente edificios que tienen más de 300 años de vida y aún están habitados. En la época de la revolución industrial, entre 1790 y 1791, hubo un arquitecto llamado Francois cointeraux, quien publicó cuatro folletos sobre esta técnica, que, posteriormente fueron traducidos al alemán y divulgados a otros países vecinos gracias a Cointeraux, y a David Gilly, que escribió el famoso Handbuch der Lehmbackkunst (Gilly, 1787), obra en la que se califica esta técnica como el mejor método de construcción. ([20], pág. 13).

François Cointeraux fue un personaje importante para el desarrollo de la construcción en tierra en Francia, Alemania, Inglaterra y Rusia. Él (1740 -1830) dedicó su vida profesional al desarrollo de la tierra apisonada como material válido para la construcción, no solo en Francia sino en los países vecinos. Esta técnica ya era existente y se practicaba mucho en Lyon, su ciudad natal, rica en los cultivos de la uva que en conjunto con la elaboración del vino, eran las actividades básicas de la región y el pisé era la técnica común de construcción. Este tema del campo lo apasionó mucho una vez se hizo arquitecto y se dedicó a mejorar sus condiciones de vida. Dio inicio a una escuela de arquitectura para el campo, con base en la construcción con tierra pisada, para lo cual organizó unos folletos de estudio y ensayo sobre este tipo de construcción. Estos documentos de trabajo fueron organizados en una colección que se tituló École d'Architecture Rurale y que fue publicada en París entre 1790 y 1791, fueron traducidas a los idiomas alemán, danés, finlandés, ruso, italiano e inglés durante los próximos veinte años, lo que le generó la admiración y difusión por parte de importantes arquitectos de la época como Henry Holland en Inglaterra, David Gilly en Alemania, y Nicolai L'vov en Rusia ([79], pág. 73).

Sin embargo, a la fecha, a pesar de todo este historial, Francia no tiene norma para diseño y construcción, solo una que es experimental y se refiere al bloque de tierra comprimido. Esta es la norma experimental XP P13-901:2001(24), que es un documento provisional al cual puede acceder el público y que ha sido desarrollado por el organismo nacional AFNOR con el fin de obtener la necesaria experiencia en su aplicación y sobre ella basar una norma que se aspira a tener en el futuro. ([21], pág. 161).

4.4.3.5 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Alemania:

Alemania también ha tenido un desarrollo interesante en esta tecnología de construcción, a partir del siglo XVIII, época en que se alimentó de la literatura al respecto originada en Francia. “En Alemania, la casa más antigua habitada con paredes de tierra apisonada data de 1795. Su propietario, el director del cuerpo de bomberos, afirmó que las casas resistentes al fuego podrían ser construidas de

manera más económica utilizando esta técnica, en contraposición a las casas de marco de madera habituales con relleno de tierra.” ([20], pág. 13).

En Weilburg se encuentra el edificio más alto construido con muros de tierra. Data desde 1828 y aún se mantiene en pie. La técnica utilizada fué la tierra apisonada y los muros tienen un espesor en el piso bajo de 75 cm, en tanto que en el superior, 40 cm. Se estima que como consecuencia de su peso y la carga viva, la carga de compresión en los muros del primer piso es del orden de los 7.5 kg/cm². En la Figura 10 se puede apreciar la fachada del edificio ([20], pág. 13). En la Figura 9, se observa otra construcción famosa por su antigüedad.

Pero la utilización de la tierra en Alemania como material de construcción para sus construcciones comenzó mucho antes. De investigaciones arqueológicas que se han hecho de la Edad de Bronce se ha precisado que en Alemania ya se usaba la tierra como material de relleno de las casas construidas con madera, o para sellar los claros que quedaban en las casas hechas con troncos de madera, así como también se utilizaban las pieles de animales. Un ejemplo viviente de construcciones con muros de bloques de barro de esa época es el fuerte de Heuneburg, en el norte de Europa, cerca del lago de Constanza, Alemania, que fué construido en el siglo VI a.C. Imágenes de él se pueden observar fácilmente por internet. ([20], pág. 12)

Sin embargo, en Alemania actualmente no existe norma, pero sí un documento normativo que en ese país tiene un peso importante para poder diseñar y construir.

<p><i>Figura 9 Casa de Tierra armada, Meldorf, Alemania</i></p> <p>([20], pág. 15)</p>	<p><i>Figura 10. Edificio de tierra armada. Weilburg, Alemania</i></p> <p>[20], pág. 15)</p>
	

4.4.3.6 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Reino Unido

De acuerdo con una investigación efectuada en la Universidad de Bath, Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil, Grupo de Tecnología de Construcción Natural, liderada por Vasilios Maniatidis y Peter Walker, se puede apreciar la historia de las construcciones en tapia pisada y el estado en que se encuentra actualmente. De acuerdo con ella, en el Reino Unido se ha practicado este tipo de construcción durante más de dos siglos; durante el siglo XIX se construyeron muchos edificios con este material y la técnica de la tapia pisada, en Wessex. Posteriormente, después de la primera guerra mundial fueron construidas, en Amesbury, Wiltshire, varias casas; en los últimos 10 años ha habido un renacimiento de esta técnica que ha conducido a la revisión de esta tecnología de construcción. Llama la atención como dos épocas completamente diferentes en el contexto de la economía local, la inmediatamente posterior a la primera guerra mundial, en la que hubo la depresión económica que sigue a toda guerra, y la actual, absolutamente libre de dicho condicionamiento, se da este renacimiento de la construcción en tierra pisada. La explicación podría ser que en el primer caso el agente motivante era la búsqueda de optimización de los recursos financieros, en tanto que en el segundo, la razón es la optimización de un recurso mucho más estratégico, como es la ecología y la preservación del medio ambiente. Esta investigación ha sido, emprendida como parte del proyecto DTi Amigos para la innovación "Desarrollando la construcción en tierra apisonada para la vivienda del Reino Unido". ([49], pág. 1). A continuación se muestran dos ejemplos de construcciones en tapia pisada, una de la etapa primigenia y la otra, moderna.

Figura 11. Edificio de 5 pisos con tiza en Winchester, Hampshire.

Construida en Siglo IX. ([49], pág. 74)



Figura 12. Centro de Visitantes, Proyecto Eden, Cornwall.

Construida en 1999. ([49], pág. 77)



Sin embargo, el Reino Unido aún no cuenta con Normas para este tipo de construcciones.

4.4.4. Construcciones en tapia pisada o en adobe en otros países

4.4.4.1 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Nueva Zelanda:

Nueva Zelanda es un caso interesante por ser uno de los pocos países en el mundo en el que la construcción en tierra está respaldada por una normatización completa, desde los materiales hasta la mano de obra, el diseño y la construcción. Hay que tener en cuenta que Nueva Zelanda está ubicada en un sitio con múltiples fallas geológicas que inclusive están en proceso de cambio, tal como se evidenció mediante investigaciones efectuadas después del sismo del 14 de noviembre de

2016 con escala 7.8. Aún así, la construcción en tierra se ha constituido en una opción con gran aceptación de parte de la administración gubernamental, los técnicos y científicos y la sociedad. Esto podría ser la consecuencia de un contexto de disponibilidad limitada de materiales, lo cual habría que investigar más acuciosamente, pero también podría ser el resultado del proceso histórico que se ha dado, tal como se evidencia en una investigación efectuada para la Universidad de Óregon, EE UU, en 2013, con motivo de una tesis de maestría en arquitectura.

De acuerdo con ella, en el siglo XIX, durante la colonización europea, los colonos que siempre van acompañados por los misioneros en la generalidad de estos procesos, trajeron sus técnicas de construcción tradicional, entre ellas la construcción con tierra. Por ejemplo, la casa Pompallier de Russel, que es uno de los edificios de tierra más antiguos de Nueva Zelanda, fué construido en 1842 por misioneros de Lyon, Francia, que era la tierra del arquitecto Cointeroux, razón por la cual tenía la tradición del Pisé de terre, o sea construcción de tierra apisonada. Por otro lado, los colonos de El Reino Unido trajeron las técnicas de albañilería y adobe, adobe-ladrillo y cob y adaptaron los suelos locales y el material vegetal a su nueva situación. Hay una construcción emblemática de esta época, la casa hacienda en la estación principal de Esk en Canterbury del norte, construida en 1863, para la cual usaron la tierra y la yerba roja del sitio en reemplazo del cob para las paredes y la cubierta con la misma yerba. Este es un ejemplo típico de como se adoptan técnicas foraneas adaptándolas a los recursos de la región. ([28], pág. 16)

Similarmente a lo que sucedió en el Reino Unido con la primera guerra mundial, inmediatamente después de la segunda guerra mundial, en 1945, en algunas zonas al rededor de Nueva Zelanda, resurge el interés por la construcción en tierra, en contraposición a la construcción con estructuras de madera, dominante en dicha época. De acuerdo con los investigadores, este fenómeno no fue el resultado de un impulso de nostalgia por las tradiciones de construcción pioneras, sino una mezcla de factores, como son el hecho de la gran difusión que estaban teniendo las construcciones de tierra en Europa, las mismas restricciones económicas resultado de la guerra, pero también la profundización que para la época se dió a nivel de la geotecnia. Un constructor de renombre de la época, David Jones construyó varios edificios de tierra pisada en las vecindades de Whanganui, entre 1948 y 1992. ([28], pág. 18)

Actualmente hay un nuevo renacimiento de la construcción con tierra en Nueva Zelanda, pero con un ímpetu que supera tanto el sucedido en 1945, como los que están sucediendo en otras partes de mundo. Comenzó en 1971 con una casa de tierra pisada cerca de Whangarei, diseñada po el arquitecto Graeme North, quien es una autoridad lider en este tipo de construcción, reforzada con paja de Nueva Zelanda. Otras casas fueron construidas hasta 1975, además de otras casas con bloques de tierra prensada, entre 1970 y 1980 en Northland, Canterbury y

Marlborough. Curiosamente, los bloques prensados se fabricaron con una prensa Cinva Ram, inventada en 1952 en Colombia, para construcciones de viviendas de bajo costo en Sudamérica. Una empresa de Christchurch, Fraser Engineering, estaba comerciando estas máquinas para el mercado australiano y vendió algunas para Nueva Zelanda. En la actualidad este mercado de las construcciones en tierra ha avanzado en Australia y esto ha influido en Nueva Zelanda. ([28], pág. 20)

Todo esto ha significado una reactivación del interés en la construcción con muros de tierra en los últimos veinte años del siglo XX. En 1988, se creó la Asociación de Construcción de Tierra de Nueva Zelanda (EBANZ), cuyo objetivo es propender por el fomento de este tipo de construcción y administrar adecuadamente la investigación, la información, la educación y los recursos para lograrlo. La Universidad de Auckland organizó la conferencia, Earth Building para los años 90 (Universidad de Auckland, 1990), donde fueron invitados conferencistas nacionales e internacionales para que presentaran ponencias. Todo esto ha generado un efecto de bola de nieve que se ha visto reflejado en la construcción de más casas, creciendo también la oferta industrializada de bloques de tierra armada, lo que desembocó en los años 90 en la redacción por parte de un grupo de expertos en un documento que se convertiría en los Estándares de Construcción de Tierra, publicados en 1998. Estas normas están repartidas en tres documentos: NZS 4297 Diseño de Ingeniería de Edificios de Tierra, NZS 4298 Materiales y Obra para Edificios de Tierra, Y NZS 4299 Edificios de tierra que no requieren diseño específico (SNZ, 1998a, SNZ, 1998b, SNZ, 1998c)". ([28], pág. 20)

4.4.4.2 Construcciones en tapia pisada o en adobe en Estados Unidos

Estados Unidos muestra una historia interesante en cuanto al desarrollo de las construcciones en tierra. Sus momentos importantes están ubicados en tres épocas. La era Jeffersoniana, la gran depresión y la era del movimiento de retorno a la naturaleza de los años setenta a principio de los ochenta, en el cual se creó un movimiento cívico llamado el "Back-to-Nature Movement". ([28], pág. iv)

A lo largo de su historia, este ha sido un tema por el que se han preocupado personalidades importantes de la política de dicho país. Tomas Jefferson, arquitecto autodidacta, autopromulgado hombre de campo y receloso de la ciudad, pero sobretodo de los financistas, llegó a ser, presidente de los Estados Unidos (1801-1809) y es catalogado aún como uno de los más grandes como tal. En su juventud, tuvo la oportunidad de vivir en Europa y estuvo en contacto con Cointeraux, a través de cartas recibidas de este en su condición de diplomático de Estados Unidos, a través de las cuales se familiarizó con el tema del pisé. Sin embargo, cuando fue presidente, lo desechó como solución de posible para las necesidades de viviendas y edificios en EE. UU., con el argumento de que las condiciones meteorológicas de este país no eran compatibles con lo que él pensaba debía ser el comportamiento

de los muros en tierra. De acuerdo con él Estados Unidos era un país donde las grandes precipitaciones pluviales eran frecuentes en el Nordeste, lo mismo que las nevadas. El tiempo se ha encargado de desmentir esta suposición. Sin embargo, parece que si influyó en otro personaje, el general John Hartwell Cocke (1780-1866), quien construyó una escuela, una capilla y muchos albergues para sus esclavos entre 1815 y 1821. Su conocimiento lo logra acudiendo al libro de S. W. Johnson, "Economía Rural", que era prácticamente una transcripción del libro de Henry Holland, que a su vez fue una traducción del libro de "La Escuela Rural de Arquitectura" de Cointeraux. [79]

George Washington también construyó estructuras en tapia pisada. Su cercanía al tema se dió gracias a que formaba parte de un grupo de activistas para la libertad de los esclavos y que propendía por el mejoramiento de sus condiciones de vida. Este grupo, llamado "Sociedad para la Colonización Americana", lo conformó con Cooke y St. George Tucker, abogado y profesor universitario y líder social. [79]

En la era de la depresión la construcción en tapia pisada fue un recurso para resolver la necesidad de la vivienda rural sin mucha inversión. [79]

Sin embargo, la construcción en tapia pisada no ha podido lograr en Estados Unidos la difusión que se merece. Esto se ha dado por una estigmatización que pesa sobre este tipo de construcción en la cultura occidental, pero mucho más en la de ese país: El hecho de que fue muy utilizada para resolver la construcción de las viviendas de los esclavos, pero también porque la construcción en tapia pisada es asociada con lo viejo, valor que es contrario a la modernidad perseguida por esta cultura. Es decir, que "El hormigón, la construcción de armazón de acero y el vidrio plano han adquirido prestigio, incluso si son caros, innecesariamente usados y climáticamente inapropiados" ([28], pag. 143).

Pero hubo otro aspecto que le costó a las construcciones en tierra pisada la estigmatización que ha sufrido en los EE UU, es el hecho de que fue utilizada para construir las barracas de los esclavos y como solución para las viviendas de los pobres, así como en las construcciones agrícolas. Esto explica porqué esta alternativa brilla por su ausencia en los textos que describen la arquitectura americana. No hay que dejar de lado los componentes políticos y económicos que corresponden a los intereses de las industrias que están asentadas en el mercado de los materiales entendidos como convencionales y que gozan actualmente del beneficio que significa estar aprobados por las normas. Pero hay otro factor y es el hecho de que en ese país la cultura de la construcción en madera ha generado el establecimiento de un renglón de la economía que comienza desde la siembra, pasando por la restitución de los especímenes que se requiere talar para ese fin y todo esto ha generado un sistema que abastece con suficiencia la industria de la construcción en madera. Igualmente, cuenta EE UU con una red vial que permite el transporte rápido de elementos prefabricados, lo cual unido con el bajo peso específico de la madera, la favorece. Finalmente, el uso de la tierra como método de construcción se considera que obedece a una forma antigua de resolver la

misma, en estos tiempos en que se supone los países deben avanzar hacia la industrialización y por lo tanto el acero y el concreto son la medida del éxito. ([28], pag. 3)

Finalmente, hay que decir que la normatización de la construcción en tierra en los Estados Unidos solo ha sido dada en el estado de Nuevo México en el año 2004, pero actualmente está derogada. Ella incluía adobe, BTC y Tapia pisada. También existe la norma ASTM E-2392 M-10, que se refiere a adobe y tapia pisada y fue emitida en el año 2010.

4.5. CONDICIONES MÍNIMAS A TENER EN CUENTA EN LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA O EN ADOBE

La construcción en tapia pisada es una técnica milenaria, como ya se ha dicho, y a la fecha hay en todo el mundo expresiones de ella con muchos años, más exactamente siglos, de vida y en excelentes condiciones para prestar la función para la cual fueron construidas u otras funciones que la sociedad actual requiera de ellas, como es el caso de las muchas construcciones que se han mencionado en el transcurso de esta breve historia sobre las construcciones en tierra en cada uno de los países. Estos edificios fueron diseñados siguiendo unos parámetros que en su momento fueron determinados en forma empírica, con base en la metodología a la mano del hombre como ser inteligente, que la vida, en su dinámica de acumulación de conocimientos, le ha permitido, mediante el proceso, inclusive aceptado por la ciencia, de prueba y error. Esto es la mejor demostración de que la construcción en tierra es una técnica válida desde el punto de vista estructural.

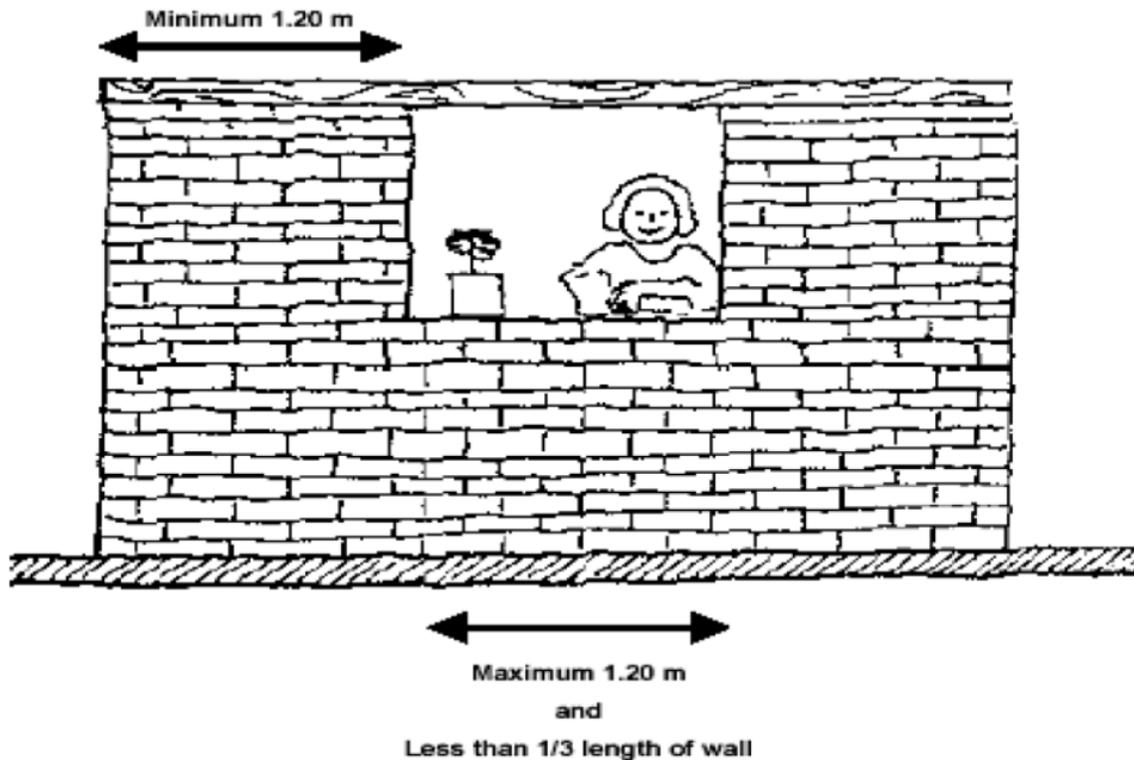
A continuación se hace una relación de los parámetros que recomienda un estudio efectuado por la Universidad Católica del Perú y que corresponde a las directrices geométricas que se deben tener en cuenta para construir viviendas en tierra resistentes a terremotos. Estas corresponden a las que se respetaban al construir estos edificios. Uno de los ejecutores de este documento es el profesor Marcial Blondet, famoso investigador en dicho país, que como ya se ha dicho ha debido padecer las consecuencias catastróficas de sismos de gran magnitud.

- a. La altura del muro no debería exceder ocho veces el espesor del muro en su base y en ningún caso debería ser mayor que 3.5 m
- b. La longitud sin arriostres de un muro entre muros transversales no debería exceder de 10 veces el espesor del muro, con un máximo de 7 m.
- c. Los vanos no deberían exceder de un tercio de la longitud total del muro.
- d. Ningún vano debería tener un ancho superior a 1.2 m.
- e. Proveer muros de 1.2 m de longitud mínima entre vanos.

Ver una representación gráfica de estas condiciones en la Figura 13.

Figura 13. Recomendaciones según documento “Construcciones de adobe resistentes a los terremotos”

Tomada de ([22], pág. 13)



En el libro “Manual de Construcción de Viviendas Antisísmicas en Tierra” de Yernot Minke, arquitecto y catedrático de la Universidad de Kassel, Alemania, en ese entonces, año 2005, director del Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales y conferencista sobre este tema a nivel mundial, se encuentra la siguiente relación de causas de falla de estas estructuras:

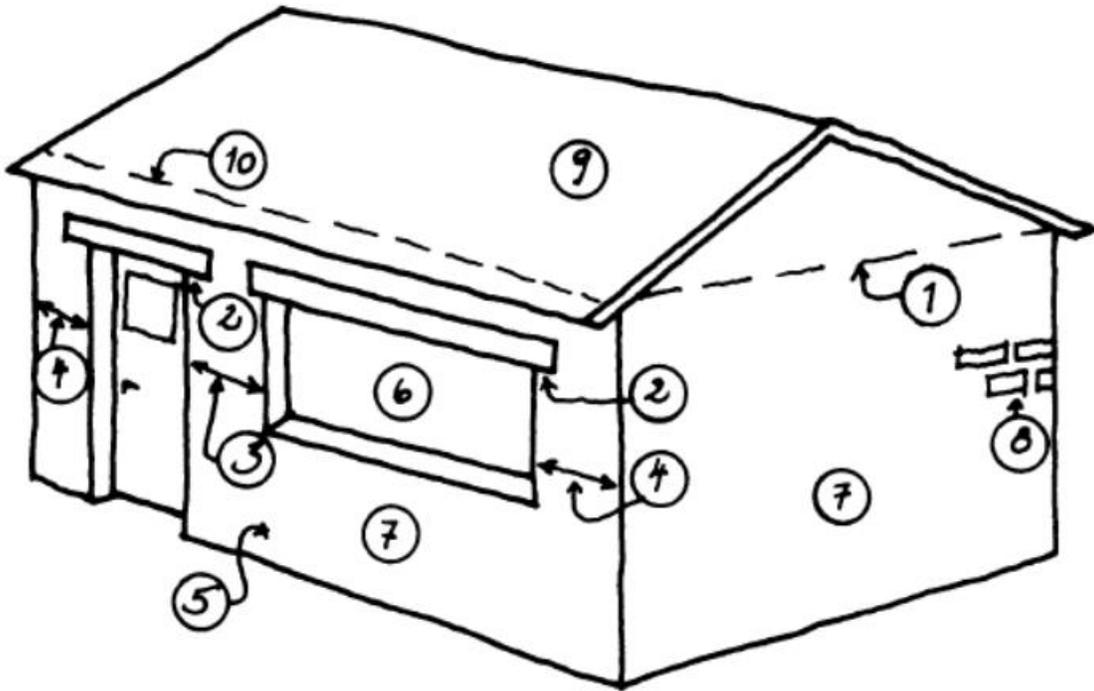
1. Ausencia de un refuerzo horizontal (encadenado, collarín o viga cadena).
2. Los dinteles no penetran suficientemente en la mampostería.
3. El ancho de muro entre los vanos de la ventana y la puerta es demasiado angosto.
4. El ancho entre los vanos de la ventana y la puerta en relación a las esquinas es demasiado angosto.
5. Ausencia de un sobrecimiento (zócalo).
6. El vano de la ventana es demasiado ancho.
7. El muro es muy largo y delgado sin tener elementos de estabilización.
8. La calidad de la mezcla del mortero es pobre (con una baja capacidad aglutinante), las uniones verticales no están completamente rellenas, las uniones horizontales son demasiado gruesas (más de 1,5 cm).

9. La cubierta es demasiado pesada.
10. La cubierta tiene un arriostramiento débil con el muro.

La numeración está relacionada con la Figura 14.

Figura 14. Errores estructurales que provocan riesgos de derrumbe durante un sismo.

Tomada de ([24], pág. 12)



Sin embargo, este es un tema que no está cerrado. El desarrollo reciente de este tipo de construcciones ha excedido estos toques, lo cual es posible mediante el uso de mejoradores de la resistencia de la tierra, como el cemento, la cal y otros aglutinantes. Esto se aprecia en la Figura 15. Sin embargo, estos recursos deben ser utilizados consistentemente con el espíritu filosófico que anime al diseñador y/o constructor: Se trata de un proyecto respetuoso del uso mínimo o moderado del carbono (baja huella de carbono)? O no.

Figura 15. Construcción con muros de tapia pisada en el proyecto Eden, Cornwsall.

Tomada de ([20], pág. 2)



4.6. FORTALEZAS DE LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA O EN ADOBE

Son muchas las fortalezas de las construcciones en tapia pisada, y en general en tierra, que se pueden resumir en el siguiente listado:

1. Rapidez en la construcción
2. Una huella de carbono muy corta
3. Costo mínimo de inversión
4. Aislamiento térmico
5. Posibilidad de reutilización del material de la demolición
6. Resistencia al fuego
7. Solidez y durabilidad

4.7. DEFICIENCIAS ESTRUCTURALES DE LAS CONSTRUCCIONES EN TAPIA PISADA O EN ADOBE

Como se ha dicho reiteradamente, las construcciones en tapia pisada tienen una historia de vieja data, siendo las que se construyeron a partir del siglo XVIII, de acuerdo con el desarrollo que las mismas tuvieron en Francia siguiendo las directrices escritas por Cointeraux en sus cuatro folletos de La Escuela de Arquitectura Rural (información técnica que se dispersó hacía Alemania, Inglaterra y Rusia) las que podemos observar más profusamente hoy. Sin embargo, aún existen muchas de mayor edad, como es el caso de la Casa de la Aduana en Santa Marta, primer edificio que se construyó en el continente americano y que data desde 1531 (ver Figura 3).

Dado este laboratorio que la vida de estas estructuras ha hecho disponible, vale la pena preguntarse si es cierto que es la naturaleza del material la que hace vulnerables a estos edificios ante sismos o es la falta de un adecuado seguimiento a dicha estructura, lo cual es parte del proceso de mantenimiento que debe tener todo edificio, sin importar qué materiales se usaron para su diseño y construcción.

Este tema, en conjunto con la preocupación por la sostenibilidad del planeta, es la principal inquietud que en las últimas décadas ha motivado múltiples investigaciones de parte de muchas universidades del mundo. ([11], pág. 226)

A la fecha se podría decir que la desventaja estructural de las construcciones en tapia surge cuando no se respetan los parámetros geométricos mínimos que permiten este tipo de construcciones, lo cual traslada las limitaciones al campo de la arquitectura.

4.8. REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS CONSTRUIDOS EN TAPIA PISADA O EN ADOBE

4.8.1. Generalidades

Las soluciones propuestas en Colombia están dirigidas a edificios hasta de dos pisos y para uso como viviendas. No corresponden a cálculos específicos sino que se aplican genéricamente, atendiendo a pruebas que se han hecho en laboratorios o, inclusive, a cálculos mediante modelamiento numérico, aprovechando las facilidades de cómputo que en este momento se tiene con los computadores y el desarrollo de softwares apropiados elaborados con base en elementos finitos. Estas soluciones se han alimentado en forma sustancial de las investigaciones efectuadas en otros países, tanto latinoamericanos, como es el caso de Perú y Méjico, como europeos, como es el caso de Alemania.

Como se puede colegir de las Secciones 4.5 y 4.7, son variadas las razones que hacen vulnerables a estos edificios, unas son de tipo constructivo o que surgen durante la vida del edificio, como son las irregularidades en planta y en altura, distribución inadecuada de los muros en planta, pérdida de la verticalidad

–o plomo– de los muros, problemas de humedad, filtraciones, conexión inadecuada entre muros, pérdida de recubrimiento de muros, uso de materiales no compatibles, etc.; otras son inconsistencias ante las exigencias de tipo sísmico, como son entrepisos pesados y ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuado de elementos de entrepiso y cubiertas sobre muros, entrepisos muy flexibles, luces muy largas y estructuración de cubierta deficiente. Las primeras corresponden o a deficiencias en diseño que requieren de soluciones específicas a cada caso o a fallas localivas que pueden ser reparadas sin problema. Las segundas están relacionadas con las cargas por sismos y requieren de la dotación a los muros de una resistencia a corte para las exigencias que sucedan en el sentido de sus planos y a flexión para las que sucedan en sentido transversal a los mismos.

A continuación se muestran las soluciones recomendadas en el “Manual para la Rehabilitación de Viviendas Construidas en Adobe y Tapia Pisada” de la AIS para atender las fallas correspondientes a las causales provenientes de sismos. [4]

4.8.2. Mejoramiento de entrepiso y de su acción de diafragma.

Plaqueta de concreto

- **MEJORAMIENTO DE ENTREPISO Y DE SU ACCIÓN DE DIAFRAGMA**

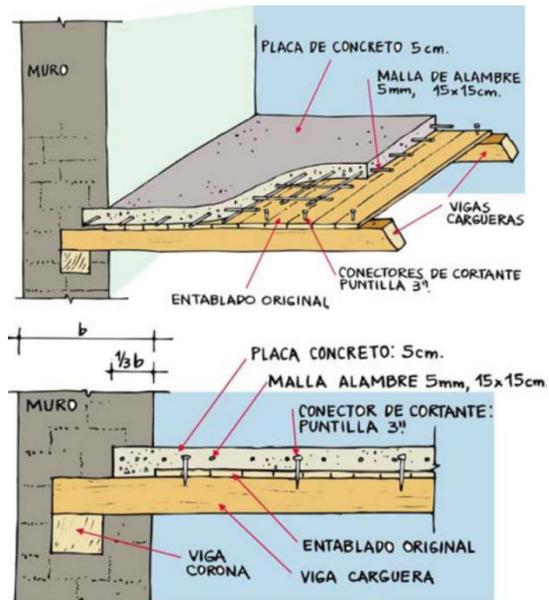
Un diafragma efectivo permite distribuir las fuerzas de manera adecuada a los elementos verticales más resistentes y permite absorber los efectos de torsión debido a las irregularidades de la construcción. Se plantean varias alternativas para lograr una mejor acción de diafragma de los entrepisos o de la cubierta cuando se presenta un sismo.

- **PLAQUETA DE CONCRETO**

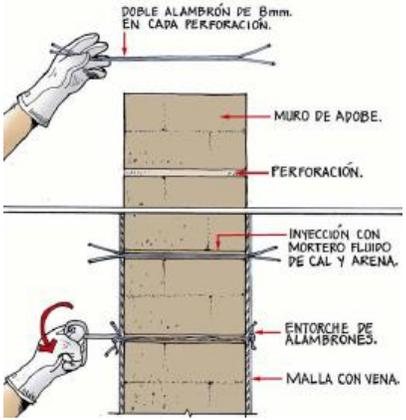
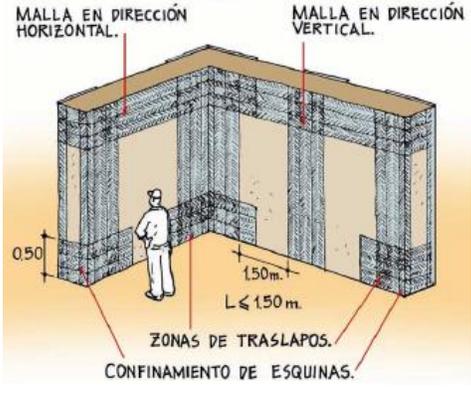
Consiste en fundir una plaqueta de concreto sobre el muro de madera existente. Se debe generar una conexión efectiva entre la plaqueta y las vihas cargueras principales y también a losm muros perimtrales. Se debe verificar la resistencia de la madera o colocar apuntalamientos temporales mientras fragua la mezcla de concreto.

Figura 16. Implementación de mejoramiento en el diafragma.

([4], pág. 64)



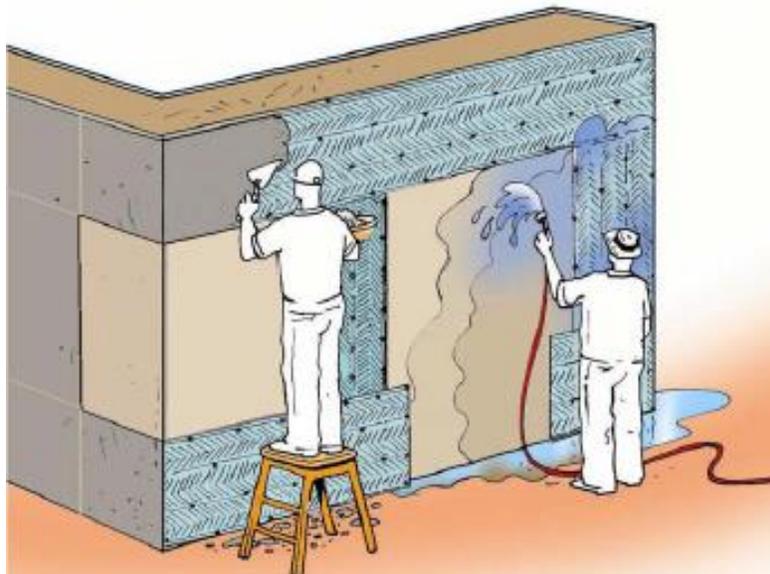
4.8.3. Mejoramiento de muros con malla metálica tipo vena anclada con elementos metálicos integrados al muro con mortero y cubierta con el mismo mortero

<p><i>Figura 17. Pasadores de anclaje de las mallas.</i> ([4], pág. 67)</p>	<p><i>Figura 18. Mallas en ambos lados de los muros.</i> ([4], pág. 67)</p>
 <p>DOBLE ALAMBROÓN DE 8mm. EN CADA PERFORACIÓN.</p> <p>MURO DE ADOBE.</p> <p>PERFORACIÓN.</p> <p>INYECCIÓN CON MORTERO FLUIDO DE CAL Y ARENA.</p> <p>ENTORCHE DE ALAMBROONES.</p> <p>MALLA CON VENA.</p>	 <p>MALLA EN DIRECCIÓN HORIZONTAL.</p> <p>MALLA EN DIRECCIÓN VERTICAL.</p> <p>0.50</p> <p>1.50m.</p> <p>$L \leq 1.50m.$</p> <p>ZONAS DE TRASLAPOS.</p> <p>CONFINAMIENTO DE ESQUINAS.</p>

Esta propuesta también está con mallas en geotextil y mallas de PVC.

Figura 19. Aplicación del mortero de cubrimiento de las mallas.

([4], pág. 71)



4.8.4. Mejoramiento de muros con elementos de madera confinante

Figura 20. Reforzamiento de los muros con listones de madera.

([4], pág. 75)



Figura 21. Pasadores de anclaje de los listones de madera.

([4], pág. 73)

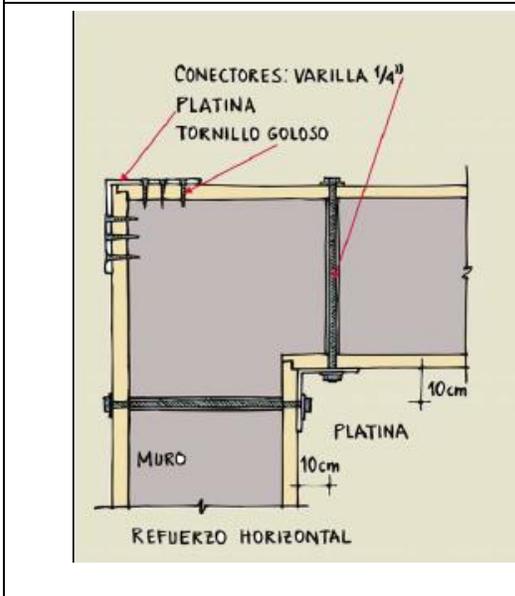
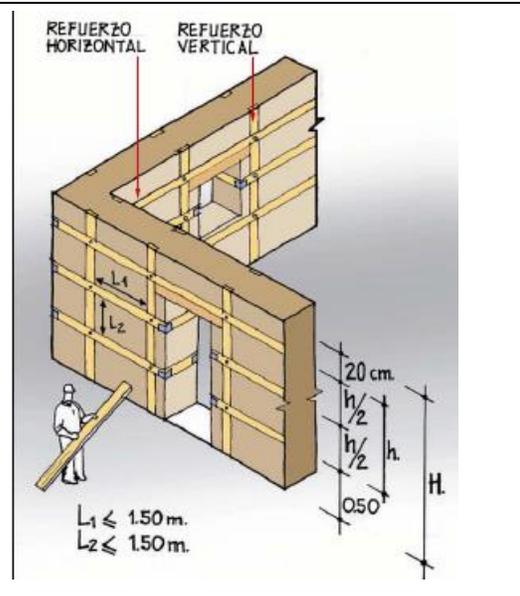


Figura 22. Distancias recomendadas entre listones.

([4], pág. 74)



4.8.5. Mejoramiento de muros con elementos incrustados

Podría considerarse como un complemento de los refuerzos plateados en las secciones 5.5.2, 5.5.3 y 5.5.4 y está contenida en la norma peruana, Adobe, después de haber sido ensayada por investigadores locales, entre ellos, Marcial Blondet.

Figura 23. Reforzamiento de los muros con caña.

([6], pág. 6), ([7], pág. 316)



A raíz del terremoto de Huaraz en 1970, que se estima causó la muerte del orden de 70.000 personas, en un gran porcentaje, 50%, dentro de sus casas construidas con adobe, la comunidad peruana reflexionó sobre la necesidad de hacer mucha investigación alrededor del tema. Inicialmente, esta se enfocó en la búsqueda de como reforzar los muros con materiales vegetales, talvés haciendo asociación con la experiencia europea de los muros en tapia pisada con cob. Después de hacer pruebas con distintos tipos de materiales, decidieron utilizar el reforzamiento con caña, con lo cual se aumentó en forma importante la resistencia a cortante y a tracción de los muros. El refuerzo consistió en un conjunto de cañas dispuestas en sentido vertical y ancladas al cimiento, conectadas entre sí mediante otro sistema de cañas dispuestas horizontalmente cada 4 hiladas de adobe. ([6], pág. 6).

Este refuerzo no solamente permitió aumentar la resistencia de los muros sino que también mantuvo unidos las partes fisuradas de los mismos. Se encontró que la caña y el adobe eran materiales bastante compatibles. También significó una buena conexión entre los muros, en las esquinas. De esa forma la estructura se mantuvo en pie, significando una solución acertada para evitar el desplome de la estructura en los momentos de sismo. ([6], pág. 6).

A nivel nacional se ha efectuado el reforzamiento de edificios anclando tanto vertical, como horizontalmente, tensores en varilla de acero y adhiriéndola al muro con mortero de arena con cal. El autor no ha encontrado soporte documental a nivel de pruebas de laboratorio o modelos numéricos que muestre la eficacia de dicha

práctica. Sería importante porque no deja de preocupar la gran diferencia estructural que hay entre estos dos materiales, el acero y la tierra, vista a través de sus módulos de elasticidad.

Para concluir esta sección se puede decir que en el país ya hay un recorrido importante en este tema del reforzamiento estructural de edificios, hasta de dos pisos. Sin embargo, falta reglamentarlo mediante su inclusión en la NSR 10. Además, es necesario dedicar esfuerzos a la investigación del reforzamiento estructural de edificios de más de dos pisos y para tipos de uso II, III y IV de dicha norma.

4.8.6. La NSR 10 y el reforzamiento estructural de edificios existentes

Al respecto solo puede decirse que la NSR 10 trata el tema del reforzamiento estructural de edificios construidos con anterioridad a la expedición de la norma, en su sección A.10, pero no se refiere a los construidos en adobe y tapia pisada, sino que está redactado para los edificios con sistemas estructurales tipo pórtico o muros estructurales, ya sean de concreto o de acero.

No obstante, la especificación de que “Una edificación que se intervenga siguiendo los requisitos aquí presentados debe ser capaz de resistir temblores pequeños sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero con algún daño en elementos no estructurales, y temblores fuertes sin colapso.” ([26], pág. A-97), deberá ser tenida en cuenta para el reforzamiento de los edificios construidos en adobe o tapia pisada, si se pretende actuar en consonancia con esta norma.

5. CASO DE ESTUDIO. MUROS EN TAPIA PISADA SIN Y CON REFUERZO CON PANTALLA DE CONCRETO REFORZADO.

5.1. ORGANIZACIÓN DEL PROCESO

Las pruebas de laboratorio requeridas para el presente proyecto fueron elaboradas conjuntamente con dos estudiantes candidatos al título de Ingeniero Civil, German Arvey Pico Fonseca y John Taylor Herrera Rodríguez, cumpliendo así con uno de los objetivos de las carreras de Maestría, generar temas de investigación para los niveles de pregrado.

Con ellos se diseñó el plan de trabajo para dichos ensayos con el fin de cumplir con lo establecido en el Plan de Proyecto que se tramitó, o sea:

- a. Consecución de los materiales, mano de obra y equipos para la prueba. Esta mano de obra era importante porque, si bien los estudiantes de pregrado tenían dentro de sus obligaciones aportar trabajo en este sentido, se requería experiencia en el proceso de la construcción.
- b. La construcción de dos muros, uno de tapia pisada y otro de tapia pisada con una pantalla de concreto reforzado conectada a él mediante pasadores. El espesor del muro de tapia pisada es de 50 cm y el de tapia pisada con la pantalla es también de 50 cm, del cual 45 cm corresponde a la tapia y 5 cm al concreto.
- c. Extracción de muestras para hacer ensayos de granulometría, compresión y humedad. Hechura de estos ensayos.
- d. Secado de los muros, en forma completamente natural.
- e. Sometimiento de los muros a pruebas de cargas simultaneas de compresión (vertical) y de cortante cíclica (horizontal). Toma de resultados.
- f. Interpretación de resultados

Es importante aclarar que en general la organización del texto del proyecto por parte de los estudiantes de pregrado como el del autor del presente documento, a nivel de post-grado, se elaboró en forma completamente independiente por parte de los ejecutores y, con mucha más razón, la fase de interpretación. Esto con el fin de no interferir la capacidad de aporte de cada uno.

5.2. CÁLCULOS PRELIMINARES

5.2.1. Número de muros a probar

La presente investigación es la primera que se hace en Colombia y, por lo que se ha podido encontrar en la documentación consultada, sobre el comportamiento combinado de un muro de tierra y uno de concreto acoplados mediante conectores, en el mundo. Por lo tanto la presente es una especie de sondeo en el tan complicado como extenso mundo de la investigación sobre esta ocurrencia que tiene de entrada un aspecto en contra, que es el celo con que las entidades gubernamentales de cada país administran estos edificios catalogados como patrimonio cultural mundial. Esto dificultaría la puesta en práctica de esta tecnología de reparación, puesto que o requeriría la demolición de una capa del muro, o la alteración, así sea mínima, de las dimensiones arquitectónicas, seguramente internas, del edificio, para el reforzamiento estructural. Al respecto hay que tener en cuenta que todas las propuestas conocidas para hacer reforzamiento estructural son invasivas. De todas maneras, la pretensión de esta investigación es mostrar la factibilidad técnica de esta alternativa de reforzamiento.

En este estado de cosas, se ha decidido hacer este sondeo probando solo dos muros, uno sin refuerzo y el otro reforzado, conscientes de que no es una cantidad que permita el reconocimiento científico de esta modalidad de reforzamiento, puesto que seguramente no cumpliría con los parámetros estadísticos que se requieren para darle validez en este sentido.

5.2.2. Dimensionamiento de los muros de prueba

Teniendo en cuenta la literatura consultada al respecto sobre los ensayos efectuados en investigaciones similares en Colombia y otros países [3, 73], las dimensiones de los muros de las construcciones en cuestión, pero también, en términos muy importantes, la deflexión que se espera obtener en el muro reforzado, el cual debe ser de las mismas dimensiones externas del muro de tapia pisada sin reforzar, se había escogido como dimensiones de los muros de prueba:

Muro de Tapia:

Altura: 2.00 m.
Largo: 1.60 m.
Espesor: 0,50 m.

Muro de Tapia reforzado:

Altura: 2.00 m.
Largo: 1.60 m.
Espesor Tapia: 0,45 m.
Espesor Concreto: 0,05 m.

Sin embargo, en el transcurso del secado de los muros se presentó un fenómeno de agrietamiento horizontal a la misma altura en ambos muros, el muro solo en

tapia y el combinado, aproximadamente a los 60 cm de la corona. Esto exigió que se recortaran los muros, quedando ambos con una altura de 1,20 m. Finalmente, las dimensiones de los muros son:

Muro de Tapia:		Muro de Tapia reforzado:	
Altura:	1.20 m.	Altura:	1.20 m.
Largo:	1.60 m.	Largo:	1.60 m.
Espesor:	0,50 m.	Espesor Tapia:	0,45 m.
		Espesor Concreto:	0,05 m.

Esta variación en las dimensiones con seguridad va a variar el comportamiento de los muros en el ensayo. Con las dimensiones iniciales la intención era crear unas condiciones en que el muro trabajara con bastante presencia de flexión, situación desfavorable para el muro de tierra, de esa forma al comparar dicho comportamiento con el del muro reforzado, posiblemente se apreciaría con más facilidad la mejora en dicho comportamiento. Con la variación, este régimen supuesto cambiaría puesto que el componente de cortante sería más evidente, lo cual no se aprecia como un problema porque corresponde a la realidad de la mayoría de los muros de tierra de las construcciones hacia las cuales está orientada esta investigación.

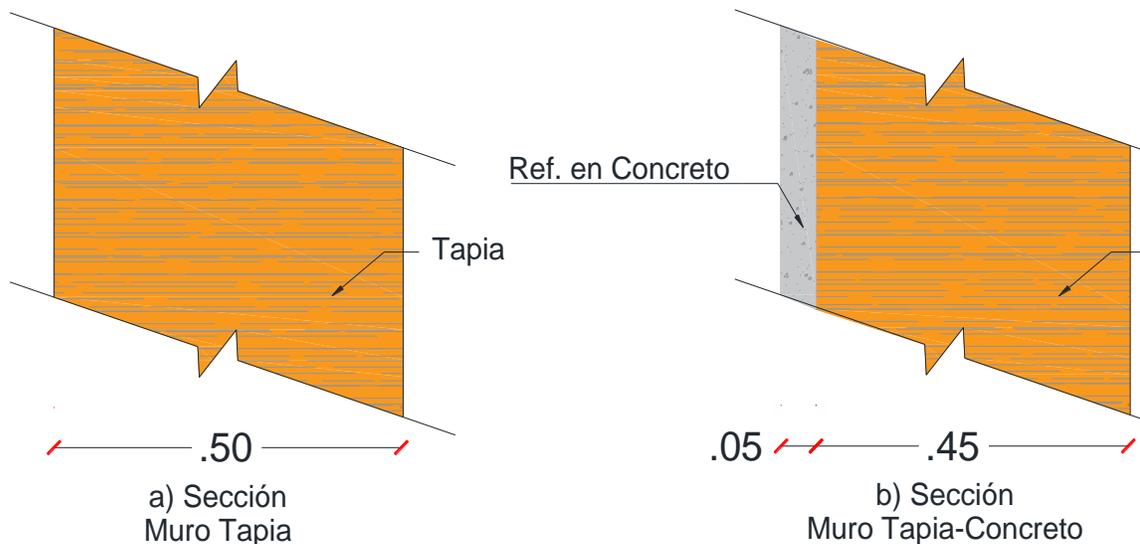
En el mismo sentido, es importante tener en cuenta que el objetivo de la presente investigación no es determinar el tipo de falla de los muros, sino determinar la eficacia del tipo de refuerzo propuesto, o sea, mediante el acompañamiento del muro existente en tapia de un muro de concreto armado de espesor adecuado y debidamente anclado con el primero. Dicho en otras palabras, no es importante si el muro falla a flexión o a cortante, sino que haya una mejoría sustancial en su resistencia a cargas horizontales, que es la componente ante la cual se pretende dar a los muros mayor resistencia.

El espesor de 50 cm es el típico encontrado tanto en literatura como en observaciones de edificios de dos (2) pisos. Efectivamente, los criterios para construir edificaciones de tierra en forma adecuada no limitan el espesor de los muros, lo que limitan son las distancias entre apoyos laterales y la altura de los muros, en función del espesor del mismo.

En cuanto al espesor de la capa de concreto se decide que sea de 5 cm, teniendo en cuenta los criterios de recubrimiento mínimo que la NSR 10 establece para interiores, sin embargo, en este sentido, la discusión no está cerrada puesto que hay técnicas de aplicación del concreto (por ejemplo concreto lanzado) y mejoramiento del mismo que permite disminuir este espesor.

En la figura 24 se muestra un corte vertical de los muros.

Figura 24. Corte vertical de los muros a probar



5.2.3. Cálculo de Carga Vertical

Cada muro se coronará con una viga de concreto con el fin de contar con una zona de aplicación de la carga cíclica, sin dañar el muro de tapia. A pesar de que la condición real de un muro en el evento de sismo es una carga cíclica horizontal, que puede tener componentes en el sentido de su plano o en el sentido transversal al mismo (también puede tener una componente vertical causada por el sismo), la condición bajo la cual se someterá el muro en esta investigación es la primera, o sea, carga en el plano del muro y horizontal. La razón principal es que el aporte estructural que se espera de estos muros es mediante su actuación en su plano. Sin embargo, en caso de que en algún momento interese su comportamiento ante cargas en sentido transversal al muro, esto podría ser motivo de otra investigación. En cuanto a la componente vertical, nunca ha sido motivo de preocupación de parte de los investigadores, por la resistencia natural que el muro presenta ante esta situación, siempre y cuando no haya problemas de construcción, como es el caso de un desplome pronunciado.

La capacidad de soporte del muro cuando está soportando una carga horizontal depende de si soporta simultáneamente una carga vertical y la magnitud de la misma. Para el presente caso, la carga vertical es la de la viga de concreto cuyo peso no alcanza una magnitud del orden de la que corrientemente se encuentra en los edificios para los muros del primer piso, cuando ellos son de dos o tres

pisos. Esto significa que hay necesidad de complementar esta carga vertical. Para tal efecto se usará un actuador vertical que aporte la carga restante.

A continuación, se hace un cálculo aproximado de la carga vertical a que se someterá cada muro, con base en las características descritas en la Sección 5.2.1.

Parámetros generales:

Largo del muro:	1,60 m
Ancho aferente:	2,00 m
Peso específico tierra:	18 000 N/m ³
Espesor muro primer piso:	0.50 m
Espesor muro segundo piso:	0.40 m
Altura de muros:	1.20 m

Peso Entrepiso por metro de longitud de muro:

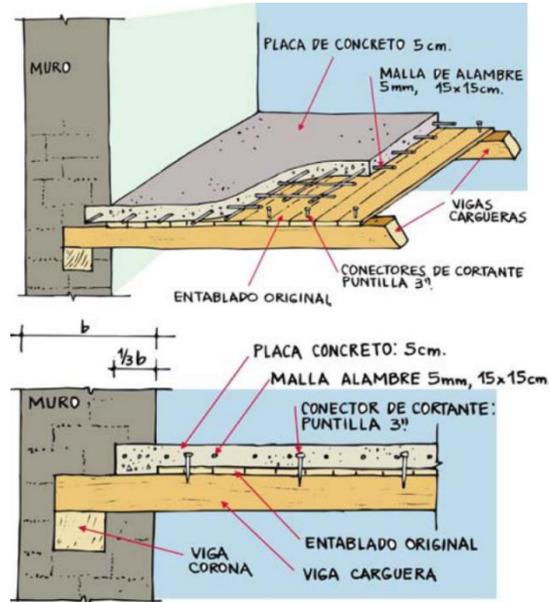
Ver figura 25.

Se considera el siguiente diseño de entrepiso:

Peso listones 4cmx18cm@50 cm: $0,04*0,08*900*2,00/0,5 =$	11,52 kg
Peso machimbre e:1cm: $0,01*2,00*900 =$	18,00 kg
Peso concreto e:5 cm: $0,05*2,00*2400 =$	240,00 kg
Peso Baldosín: $0,005*2,00*1800$	18,00 kg
Peso Viga entrepiso 10cmx20cm: $0,1*0,2*900 =$	<u>18,00 kg</u>
Peso Piso aferente al muro /m	306,00 kg

Figura 25. Entrepiso.

Tomado de ([4], pag 5-5)



Peso muro segundo piso por metro de longitud de muro:

Teniendo en cuenta las dimensiones que corrientemente se encuentran en este tipo de edificaciones, se considera para el segundo piso un espesor de muro de 40 cm.

Peso muro segundo piso / m:

$$1\ 800\ \text{kg/m}^3 \times 0,4\ \text{m} \times 2,5\ \text{m} \times 1,0\ \text{m} \times 10\ \text{m/s}^2 = 18\ 000,00\ \text{N} / \text{m}$$

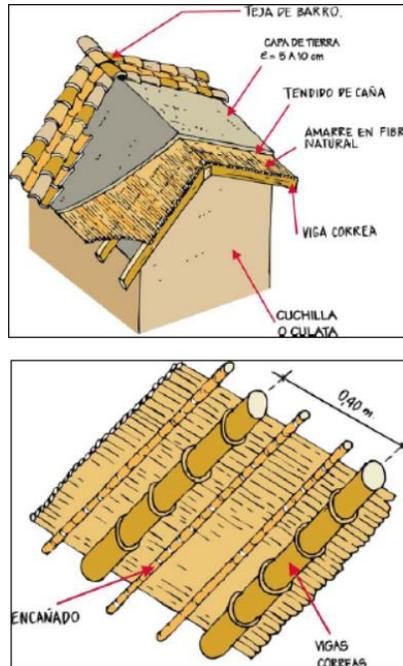
Peso Cubierta por metro de longitud de muro:

Se considera la cubierta que se muestra en la figura 26.

Peso Madera Rolliza $\phi\ 4''@50\ \text{cm}$: $(\text{PI})/4 \times 0,1^2 \times 900 \times 2,00 / 0,5 =$	28,27 kg
Peso Tendido de Caña: $0,01 \times 2,00 \times 800 =$	16,00 kg
Peso Capa de Tierra e:6 cm: $0,06 \times 2,00 \times 1800 =$	216,00 kg
Peso Teja de Barro: $0,02 \times 2,00 \times 1800$	72,00 kg
Peso Viga cinta 10cmx10cm: $0,1 \times 0,1 \times 900 =$	<u>9,00 kg</u>
Peso Cubierta aferente al muro /m	341,00 kg
Carga Muerta Total soportada por el muro / m:	24 470,00 N /m

Figura 26. Cubierta.

Tomado de ([4], pag 2-23)



Carga Muerta Total soportada por el muro: 1,60 m x 24 470,00 N /m:	39 152 N
Carga Muerta Viga Corona (Ver Sección 5.3.3.1):	5 232 N

Peso Herrajes:

Estos herrajes consisten en unas platinas que se colocarán en cada extremo, unas barras y la tornillería necesaria, para transmitir al muro la carga cíclica del actuador horizontal (esta carga en sus ciclos negativos halará al muro). Estos herrajes han sido calculadas no solo por resistencia, sino también por deformación, de tal manera que esta sea mínima, para alterar mínimamente la lectura que el equipo de sensores hará de la deformación del muro. También se incluirán como carga vertical los herrajes y tensión vertical necesaria para mantener la estabilidad por volcamiento del muro. En la figura 27 se muestra este montaje. A continuación se calcula esta carga:

Cálculos de pesos Herrajes

Barras de 1 ½" x 2m:	729,7 N
Platinas (una de ¾" y otra de 1 ½" x 90 cm x 35 cm):	1645,6 N
Cable 3/8 x 5m:	28,6 N

Tensión cables	<u>1000,0 N</u>
Carga total por concepto de herrajes y tensión cables estabilizadores:	<u>3404,1 N</u>
 Carga Necesaria a Aplicar con el Actuador Vertical:	 30 516 N

5.2.4. Cálculo de Carga Horizontal

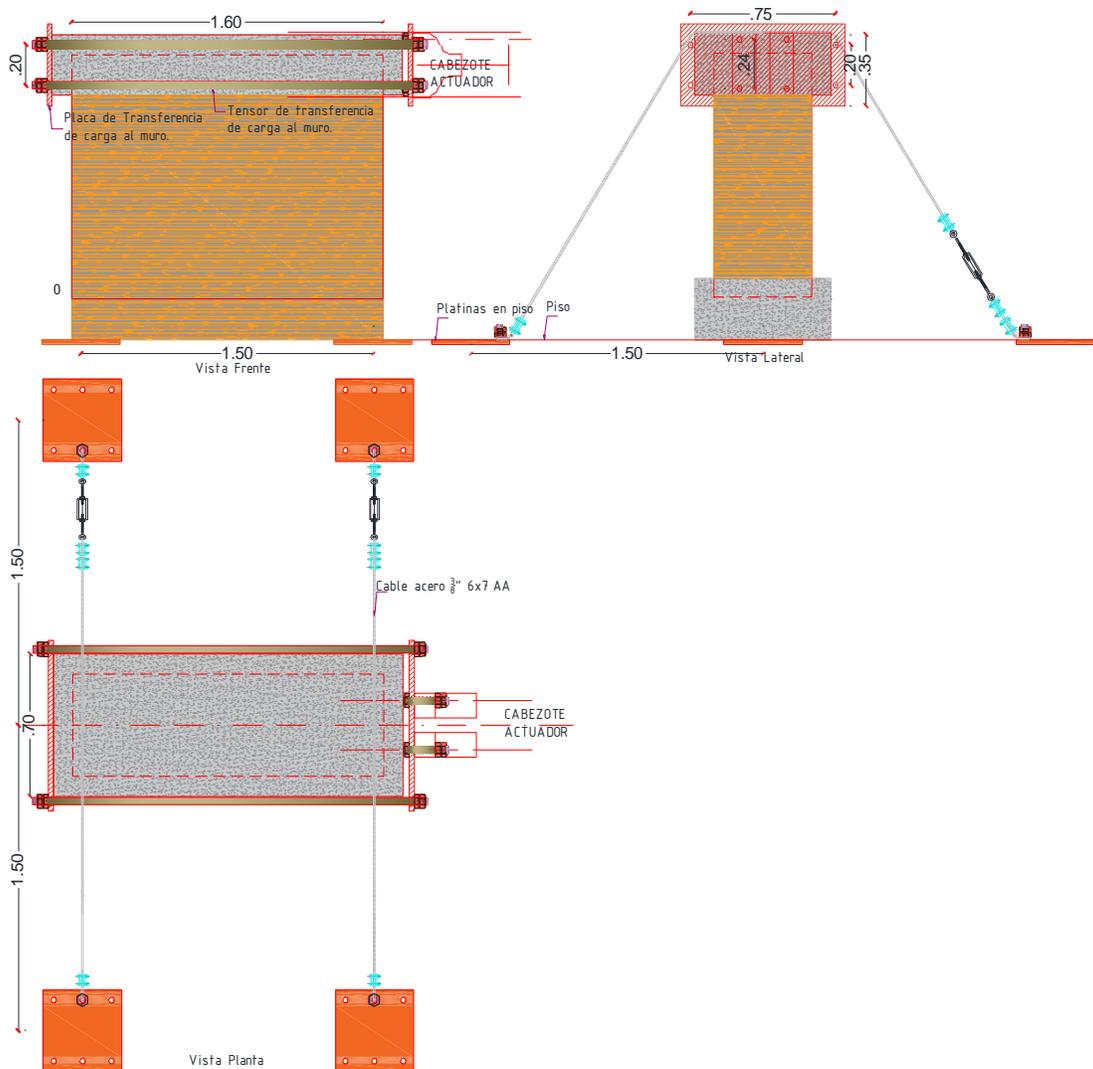
5.2.4.1. Bases del Cálculo

Este cálculo se ha efectuado mediante dos métodos. El primero, suponiendo un comportamiento elástico del muro. El segundo, utilizando una expresión contenida en la norma NTCM 2004, que si bien está calibrada para mampostería confinada, puede dar una idea de la carga máxima que puede sopórtar el muro de tapia. Esto, ante la imposibilidad de localizar otra herramienta matemática, seguramente empírica, para hacer esta estimación. El ensayo, médula de la presente investigación, permitirá verificar la fidelidad del resultado obtenido mediante esta estimación.

5.2.4.2. Cálculo de la Carga Horizontal Suponiendo Comportamiento Elástico

En esta sección se trata de estimar el orden de magnitud de la carga horizontal que se requerirá durante el ensayo, para cada muro. Para el efecto se ha supuesto un comportamiento elástico de los mismos sometidos a una carga monotónica, teniendo en cuenta que se trata de un cálculo estimativo.

Figura 27. Esquema de montaje del muro para el ensayo



Con el objetivo planteado, se consultó información sobre parámetros de tierra pisada de ensayos anteriores hechos en otros centros de investigación, para el caso del módulo de elasticidad, no medido en la presente investigación, de los cuales se describen los siguientes:

De ([1], pág. 52):

$E_{\text{Máx}}$ Tapia pisada: 74,00 MPa

$E_{\text{mín}}$ Tapia pisada: 42,12 MPa

E_{prom} Tapia pisada: 54,78 MPa

De ([29], pag 90):

Eprom Tapia pisada: 55,9 MPa

De ensayos efectuados en laboratorio, se toma:

F_p Tapia pisada: 1,56 MPa (Ver Anexo C, Sección C.4.)

5.2.4.2.1. Cálculo para el muro en Tapia Pisada

Dimensiones:

Ancho, B: 500 mm

Largo, H: 1 600 mm

Alto, L: 1 200 mm

I = 1,71E+11 mm⁴

Eprom Tapia pisada: 54,78 MPa

Δ supuesto = 5 mm

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

$$P = \frac{3EI}{L^3} \Delta = 81155,56 \text{ N}$$

Para el caso se ha supuesto que solo actúa la carga horizontal, puesto que el efecto de la vertical es insignificante para la deformación en el sentido horizontal.

Es decir, si se aspira a que el desplazamiento elástico sea de aproximadamente 5 mm, la carga horizontal debe ser del orden de 81 156 N. Se asumirá en el modelo numérico una carga horizontal de 90 000 N

5.2.4.2.2. Cálculo para muros en Tapia Pisada+Refuerzo en concreto armado

Para este caso es importante hacer la siguiente reflexión:

El interés de la propuesta es que este muro combinado trabaje como una unidad monolítica, lo cual se logrará mientras la conexión entre los muros de concreto y de tierra pisada se mantenga eficaz. Para el efecto del cálculo de la carga horizontal a aplicar a este conjunto, una buena aproximación podría ser utilizar el mismo artificio usado en diseño por la teoría clásica del concreto reforzado, o sea transformar la sección de concreto en un volumen de tierra equivalente, mediante un factor igual

a la relación de los módulos de elasticidad. Sin embargo, teniendo en cuenta la gran diferencia entre estos dos módulos de elasticidad ($E_{CONC} \cong 400 E_{TAPIA}$), esto significaría un muro de tierra equivalente de un espesor exagerado. Bajo la misma lógica, el muro de tierra podría convertirse en un muro de concreto equivalente, lo cual resultaría en un muro de concreto de espesor muy pequeño, despreciable. Con base en ese raciocinio, se concluye que el muro combinado tendrá un comportamiento dinámico muy aproximado al de un muro de concreto con el espesor original, pero con una masa igual a la suma de las masas de sus componentes. Esta suposición se utilizará en el cálculo de la rigidez. Realmente, es una aproximación, que se espera muy cercana a la realidad.

Otra justificación para utilizar en la simulación solo el espesor del muro de concreto con una masa igual a la suma de las de cada una de las capas es que el muro de concreto es la capa que funjirá como elemento estructural y, por lo tanto, va a soportar el cortante y la flexión. El muro de tapia quedará como un elemento no estructural.

Dimensiones:

Ancho, B: 50 mm
 Largo, H: 1 600 mm
 Alto, L: 1 200 mm
 $I = 1,71E+10 \text{ mm}^4$
 $E \text{ concreto: } 21\,538 \text{ MPa}$
 $\Delta \text{ supuesto} = 0,3 \text{ mm}$

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

$$P = \frac{3EI}{L^3} \Delta = 191\,449,83 \text{ N}$$

Es decir, si se supone que el comportamiento es elástico y se aspira que en esta condición el desplazamiento máximo sea de aproximadamente 0,3 mm, la carga horizontal debe ser del orden de 191 450 N.

5.2.4.3. Cálculo para el muro en Tapia Pisada usando la expresión de la NTCM 2004

Según este método tomado de ([36], pag 40), la capacidad del muro viene dada por la expresión:

$$V_{mR} = F_R(0,5v_m A_T + 0,3P) \leq 1,5F_R v_m A_T$$

Donde: V_{mR} = Cortante resistido por el muro, hasta sufrir grietas
 F_R = Factor de reducción de resistencia, para
 v_m = Resistencia a la compresión diagonal del material.
 A_T = Área en planta.
 P = Carga vertical soportada por el muro.

Para el efecto se han asumido los siguientes valores paramétricos:

$F_R = 0,4$, Muros no confinados ni reforzados interiormente
 $v_m = 0,03$ ([11], pag 232, Tabla 1).
 $A_T = 0,50 \text{ m} \times 1,60 \text{ m} = 0,80 \text{ m}^2$.
 $P = 24\,470 \text{ N/m} \times 1,60 \text{ m} = 39\,152 \text{ N}$

Esto arroja un valor de capacidad ante carga horizontal, antes de agrietarse, de:

$$V_{mR} = 9498 \text{ N}$$

Como puede apreciarse, este valor es muy inferior al calculado en la sección 5.2.3.2.1, pero es muy importante tener presente que esta última expresión, que es empírica, corresponde al estado máximo de aparición de las grietas, en tanto que la teoría elástica supone un comportamiento indefinidamente lineal.

Para el ensayo se tomará la previsión de que el actuador horizontal pueda llegar a una carga cercana a las calculadas en la sección 5.2.3.2.1 para cada caso.

5.2.4.4. Expectativa de las deflexiones durante el ensayo

Las deflexiones que se esperan obtener durante los ensayos serán mayores que las calculadas, puesto que en tal evento el muro de tapia llegará a la falla y, por lo tanto al estado plástico, en tanto que el de concreto, si no llega a la falla por limitaciones del equipo actuador, es muy probable que llegue al estado plástico.

5.2.5. Chequeo del muro de Tapia Pisada con SAP

5.2.5.1. Bases del cálculo

El objetivo de esta sección es evaluar mediante esta herramienta numérica, qué pasará dentro de la masa del muro de tapia pisada cuando se le aplique las cargas respectivas calculadas en la sección anterior. El software utilizado cuenta con su licencia de uso y es de propiedad de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

El modelo de análisis aplicado es elástico, la carga horizontal es no lineal y se aplica por pasos, tal como se describe en la sección 5.2.5.2. En esa sección también se

describen las condiciones usadas, tales como la definición de los materiales y las cargas. El muro se supone empotrado en el piso y libre para trasladarse y rotar en la corona. El muro se arma mediante elementos finitos de dimensiones tales que se formen tres (3) en el sentido del eje u , diez (10) en el sentido v y diez (10) en el sentido z . Las cargas tanto horizontal como vertical se distribuyen entre los nodos para disminuir el efecto de la concentración.

Los parámetros del material son los mismos utilizados en la sección 5.2.3.

5.2.5.2. Cálculo numérico para el muro en Tapia Pisada

Para el efecto se han definido las características del material mediante la carpeta mostrada en la Figura 28.

Figura 28. Definición del material del muro

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data". It is organized into several sections:

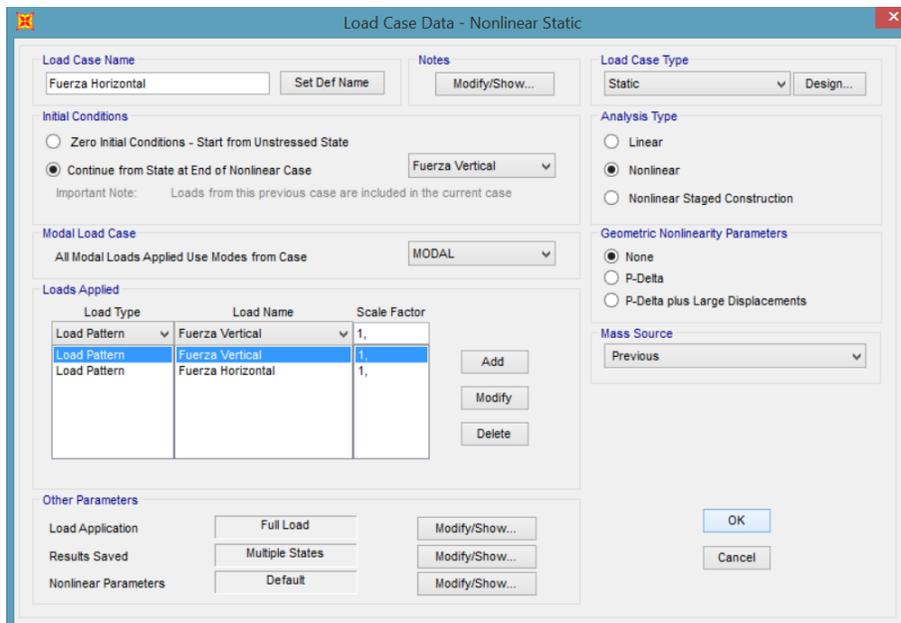
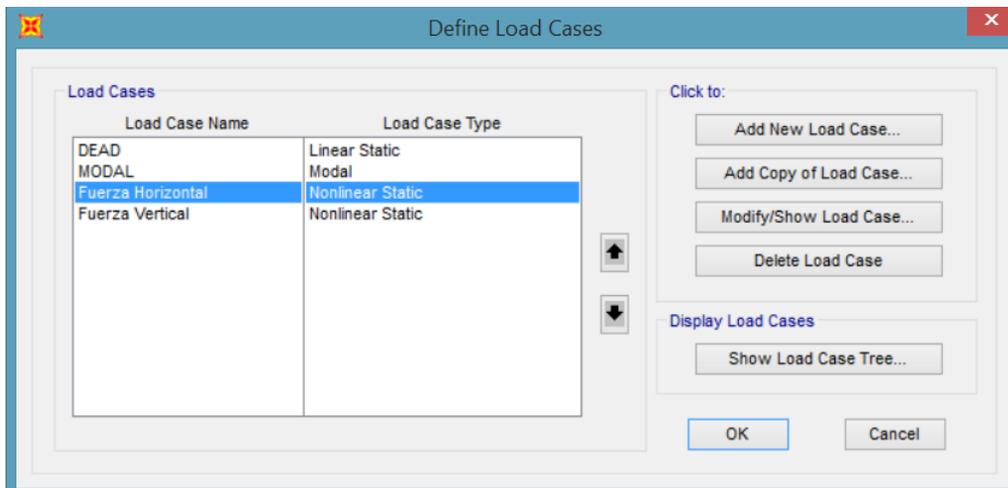
- General Data:**
 - Material Name and Display Color: Tierra (with an orange color swatch)
 - Material Type: Concrete (dropdown menu)
 - Material Notes: Modify/Show Notes... (button)
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 18000, (input field)
 - Mass per Unit Volume: 1834,8624 (input field)
 - Units: N, m, C (dropdown menu)
- Isotropic Property Data:**
 - Modulus of Elasticity, E: 54780000, (input field)
 - Poisson, U: 0,2 (input field)
 - Coefficient of Thermal Expansion, A: 9,900E-06 (input field)
 - Shear Modulus, G: 22825000, (input field)
- Other Properties for Concrete Materials:**
 - Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 170000, (input field)
 - Expected Concrete Compressive Strength: 170000, (input field)
 - Lightweight Concrete (checkbox)
 - Shear Strength Reduction Factor: (input field)
- Switch To Advanced Property Display:** (checkbox)
- Buttons:** OK and Cancel (buttons)

En la figura 29 se muestra la definición de las cargas. Para el caso se ha establecido que la carga horizontal se aplica añadida a la carga del actuador vertical, la cual se suma a la del peso muerto de la viga corona, cuyo ancho se ha considerado es igual al real de la viga y el espesor se ha calculado para que su peso sea el mismo de la construida. La carga horizontal se aplicará por pasos de 1 hasta 10, con el fin de determinar el nivel de la misma que produce unos esfuerzos a compresión que excedan la capacidad del material.

La carga del actuador vertical es de: 33 920 N (ver Sección 5.2.2)

La carga del actuador horizontal es de: 90 000 N (ver Sección 5.2.3.2.1)

Figura 29. Definición de las cargas



Adicionalmente, se ha definido una carga combinada que corresponde a la suma de la carga horizontal y el peso propio (carga muerta), puesto que la carga horizontal que se puede variar por pasos ya contiene la carga vertical permanente. En la figura 30 se observa el muro con las dimensiones asignadas en el SAP. En la figura 31 se aprecia el valor de las cargas verticales asignadas, que son equivalentes a una resultante de 33 920 N. En la figura 32, se observa la carga horizontal asignada, cuya sumatoria corresponde a 90 000 N, que es la máxima a la que se supone se someterá al muro, en pasos de 9 000 N. Esta carga se ha asignado en cuatro (4) puntos de la viga corona, con el fin de lograr mayor similitud con la situación real. Las cargas verticales corresponden aproximadamente a la del actuador vertical, 33920 N. Esta, se ha supuesto uniformemente distribuida en la corona del muro. Estos niveles de cargas vertical y horizontal están justificadas en las secciones 5.2.2 y 5.2.3.

Figura 30. Dimensionamiento del muro y división en elementos finitos

(Dimensiones en metros)

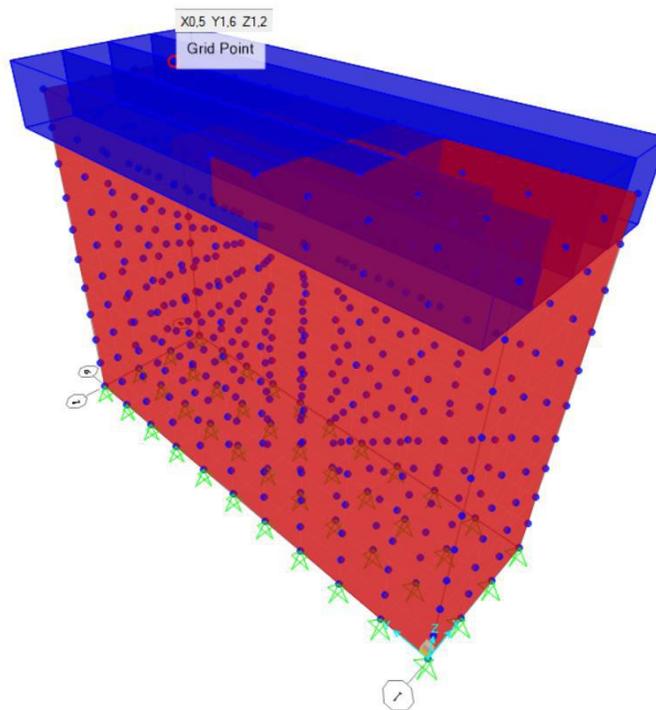


Figura 31. Carga vertical asignada

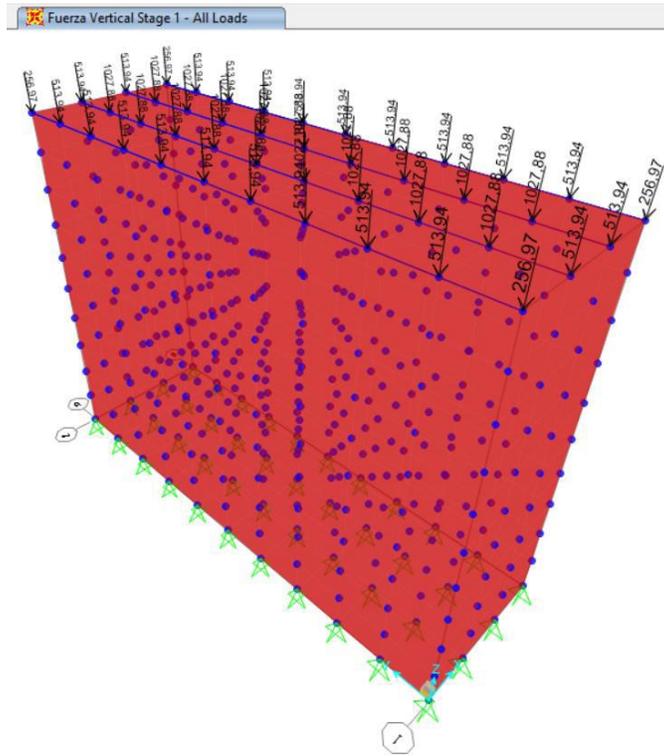
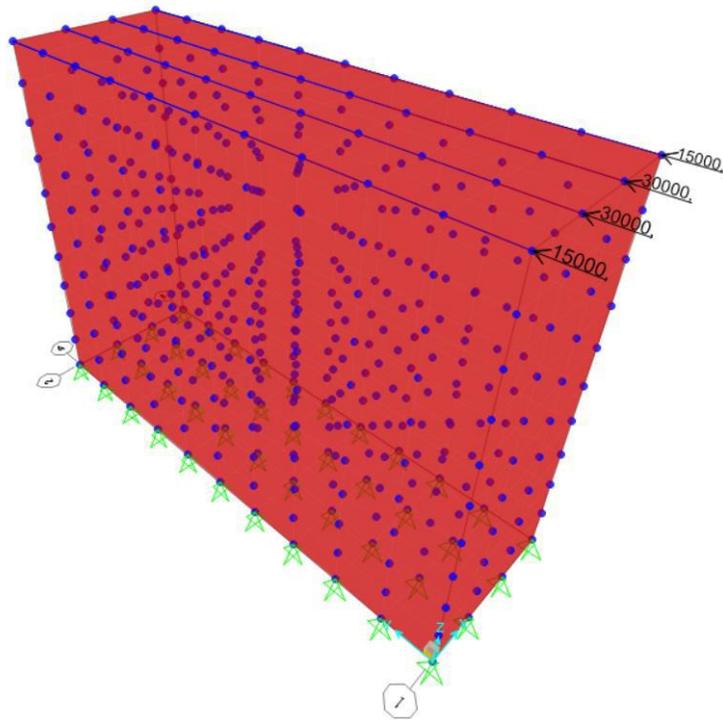


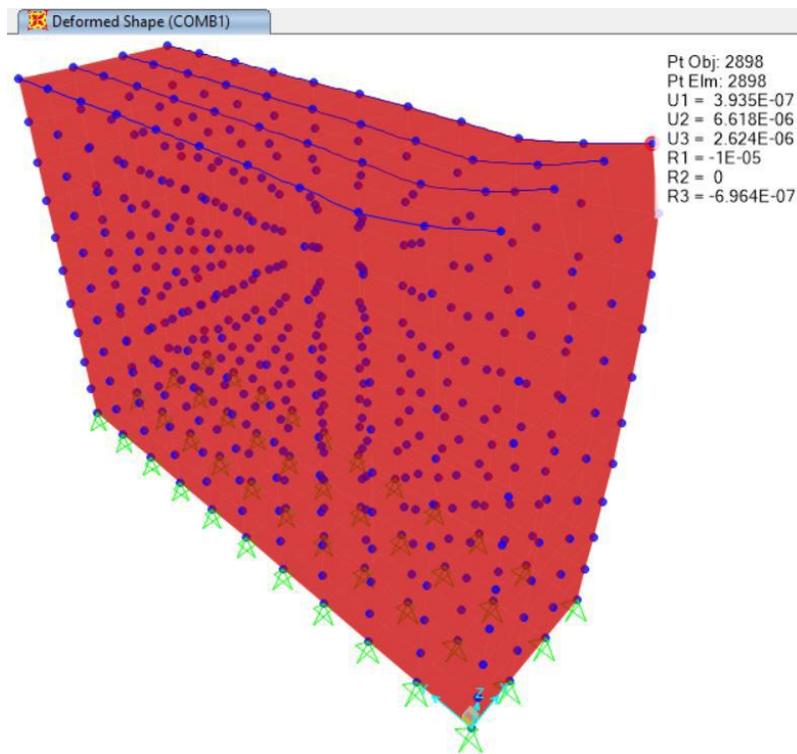
Figura 32. Carga horizontal asignada



En la Figura 33 se muestran los resultados obtenidos, en cuanto a deformaciones. Esta impresión corresponde a la carga combinada en la que la horizontal aplicada está en el paso 10, o sea 90 000 N. Se observa que la deformación horizontal en el sentido del muro, de acuerdo con el programa, sería del orden de 0,007 mm. Se observa también que la deformación vertical es uniforme en la mayor parte de la longitud del muro, pero indica un levantamiento del muro en su extremo derecho superior. De todas maneras, esta vista esquemática del muro da una idea de la forma en que el muro se deformará en el laboratorio.

Figura 33. Muro deformado para una carga horizontal de 90 000 N.

(Unidad: m)



En la Figura 34 se muestran los esfuerzos para la carga horizontal (combinada con la vertical), de 90 000 N, correspondiente al paso 10, que es la máxima carga a que se sometió el modelo numérico. En la Figura 35 se muestran los esfuerzos con la carga horizontal en el paso 6, o sea a un 60% de la máxima, 54 000 N. Se observan los siguientes valores de esfuerzo (tener en cuenta que la carga horizontal se aplica en la esquina superior derecha).

Ubicación-Carga →	H al 100%	H al 60%	Sentido
Derecha Superior	2,17 MPa	1,38 MPa	Compresión
Izquierda Inferior	0,23 MPa	0,14 MPa	Compresión
Izquierda Superior	0,03 MPa	0,03 MPa	Compresión
Derecha Inferior	0,21 MPa	0,12 MPa	Tensión

Es decir, que en el punto de aplicación de la carga horizontal, al 60% de la carga máxima supuesta, los esfuerzos de compresión no excederían la capacidad del material a compresión (1,56 MPa, según sección 5.2.3.2). Esta carga, en el ciclo positivo, creará unos esfuerzos de compresión cuyos valores máximos se desarrollan a lo largo de la diagonal que parte desde el punto de aplicación de la carga (esquina superior derecha) hasta la esquina diagonalmente opuesta. En estos puntos se muestran los valores de dichos esfuerzos. Igualmente, en las otras dos esquinas del plano del muro, se observa que los esfuerzos que acusa el modelo son de tracción en la esquina inferior derecha, pero de compresión, con un valor pequeño, en la esquina superior izquierda. Esto se debe a la presencia de la carga a compresión transmitida por la viga corona y por la carga vertical distribuida en la cara superior del modelo. Esta es la razón por la cual estos muros se comportan mejor con carga vertical aplicada a compresión que sin ella, puesto que disminuyen los esfuerzos a tracción que aparecerían en su masa, si dicha carga no existiera. Los esfuerzos a tracción que se acusan en la esquina inferior derecha indican que hace rato, en ese proceso de aumento de la carga horizontal, se excedió la capacidad que el material puede tener en este sentido. Teniendo en cuenta que la tierra es un material que presenta poca resistencia a la tracción, se infiere que muy posiblemente a estos niveles de esfuerzos de tracción ya se estén presentando grietas en dichas zonas, lo que indicaría que el elemento estructural, a este nivel de carga, ya se encuentra en la zona plástica del comportamiento. En cuanto a los esfuerzos generados por la carga horizontal al 100%, el de la esquina superior derecha excedió la capacidad a compresión del material y, como se esperaba, los otros esfuerzos son mayores, conservando su sentido,

5.3. DISEÑO DE LOS ENSAYOS

5.3.1. Generalidades

Las pruebas consistieron, en términos principales, en el ensayo de dos muros, sometidos a cargas simultáneas de cortante cíclico y compresión. La carga de compresión tiene como objetivo simular la que soportan corrientemente los muros de primer piso en las construcciones de este tipo, como consecuencia de su función de muro portante. En nuestro país, estos edificios corrientemente no exceden los dos pisos, aunque se encuentran en forma no muy frecuente edificios de tres pisos

(ver Sección 4.1), también se tiene referencia de edificios de seis pisos de tierra armada en Alemania ([20], pag. 15). Atendiendo nuestra realidad nacional, se ha intentado recrear dichas condiciones aplicando a los muros sendas cargas verticales de magnitud igual a la sumatoria de las aferentes que corresponden a la cubierta, al muro del segundo piso y al entrepiso, tal como se desarrolla a continuación. Sin embargo, es importante anotar que en caso de que la construcción sea de mayor número de pisos, la situación es menos desfavorable (siempre que la exigencia a compresión, combinada con la carga lateral, no ponga en peligro la capacidad a compresión del muro), teniendo en cuenta, tal como se podrá observar de los resultados de los ensayos, que los esfuerzos críticos para estos muros son los de tracción.

Figura 34. Esfuerzos en el muro para la carga horizontal máxima.

(Unidad: Pa)

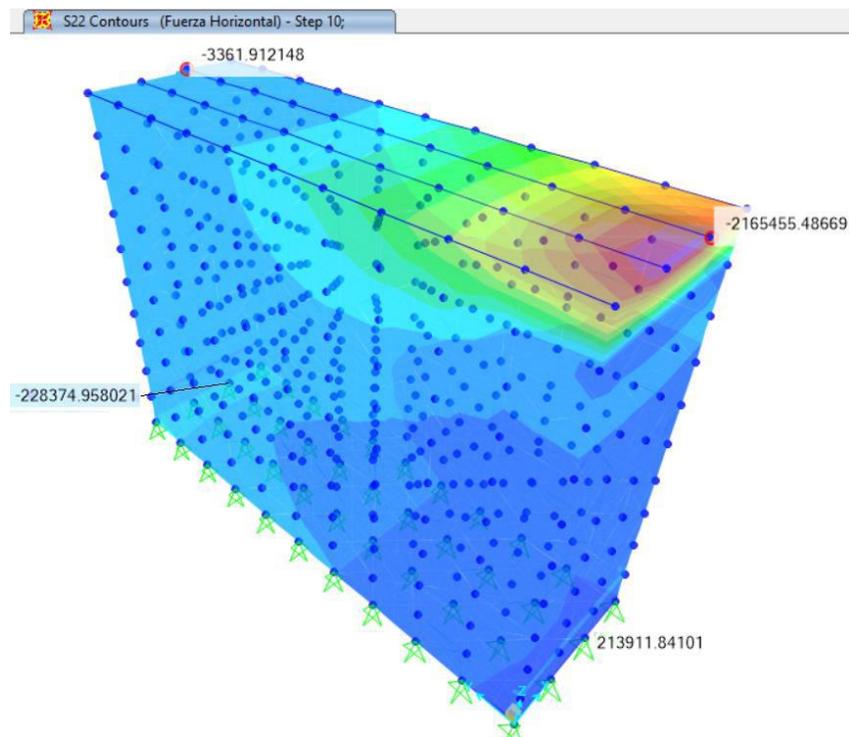
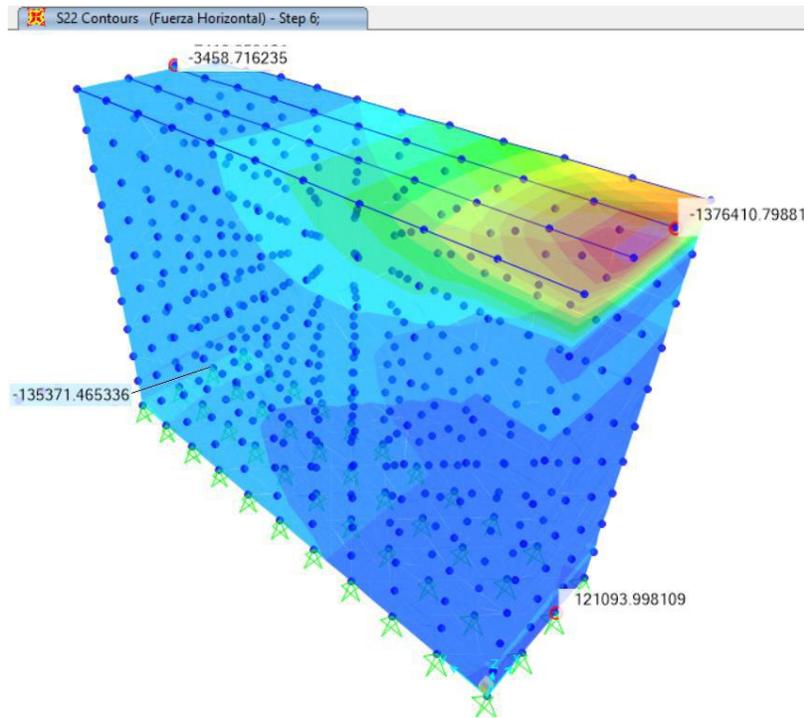


Figura 35. Esfuerzos en el muro para la carga horizontal al 60% de la máxima.

(Unidad: Pa)



5.3.2. Dimensionamiento de las vigas de concreto

Cada muro requiere de dos vigas, una de cimentación y otra de corona. La viga de cimentación tiene como objetivo anclar el muro al piso de tal manera que no se deslice ni se vuelque durante la prueba. La de corona cumple la función de interface entre las cargas, tanto vertical como horizontal, con el muro, con el fin de distribuir dichas cargas en la zona de aplicación, eliminando así efectos locales que excedan la capacidad del material antes de que sucedan los efectos generales que realmente interesan.

Se utilizará el mismo diseño de viga para ambas necesidades y para los dos muros. En la figura 36 se muestra el detalle de esta viga y en la figura 37, la probeta de prueba acoplada con sus vigas.

Figura 36. Esquema de Vigas de Cimiento y de Corona

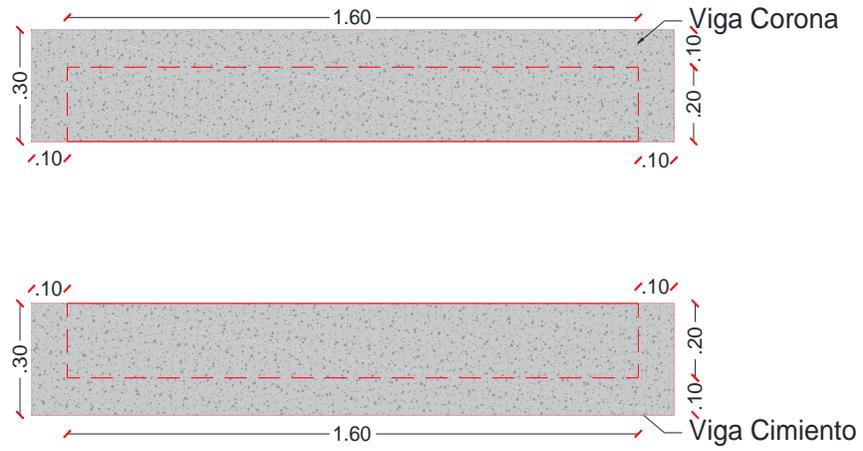
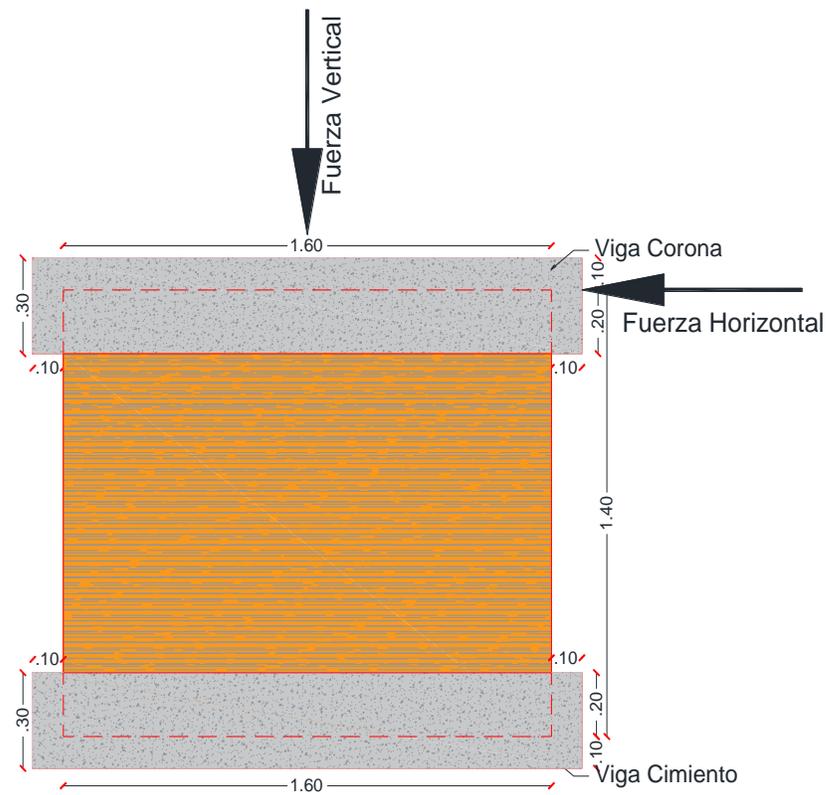


Figura 37. Esquema de probeta de ensayo



5.3.3. Cálculo de la estabilidad de los muros durante la prueba

5.3.3.1. Muro en tapia

Cargas estabilizantes, propias solo del conjunto:

Peso Viga Corona: $(0,3 \times 0,7 \times 1,8 - 0,2 \times 0,5 \times 1,6) \times 24\,000 = 5\,232\text{ N}$

Peso Muro: $0,5 \times 1,6 \times 1,4 \times 18\,000 = 20\,160\text{ N}$

Peso Herrajes: $3\,404\text{ N}$

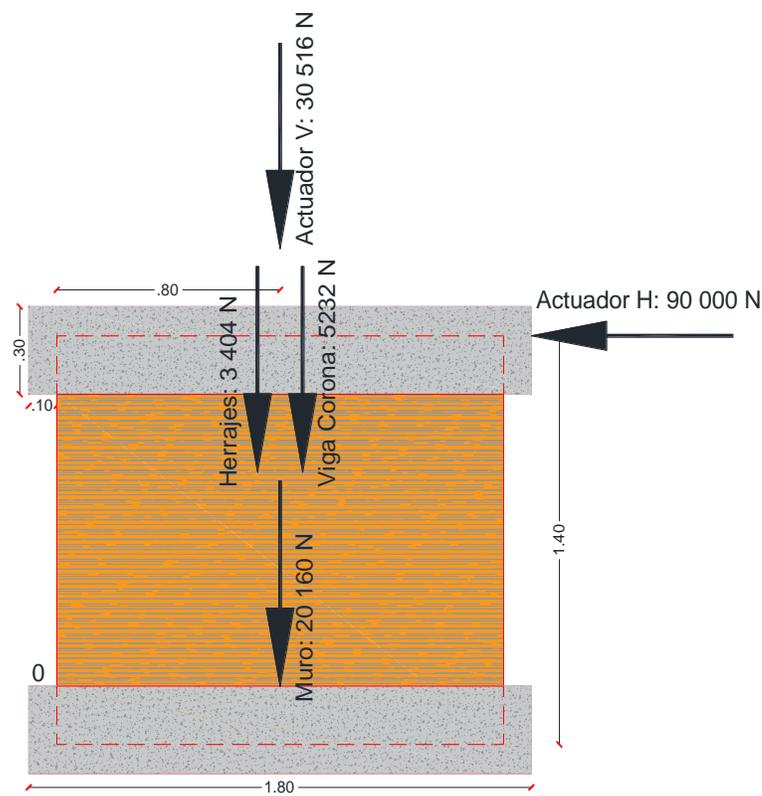
Según cálculos efectuados en la sección 5.2.2. Carga Vertical, la carga vertical total que soporta corrientemente un muro de primer piso en un edificio de dos pisos, es de $24\,470\text{ N/m}$. Por tal razón, lo que haría falta para completar la carga vertical sería:

Carga Actuador Vertical: $24\,470\text{ N/m} \times 1,60\text{ m} - 5\,232\text{ N} - 3\,404\text{ N} = 30\,516\text{ N}$

Σ Cargas Verticales = $30\,516 + 5\,232 + 20\,160 + 3\,404 = 59\,312\text{ N}$

Del esquema que se muestra en la figura 38, y de los cálculos de los momentos desarrollados a continuación, se puede observar que el muro en tapia tratará de volcarse en relación con el punto "0".

Figura 38. Cargas Máximas en Muro de Tapia Durante el Ensayo



Por otro lado, la carga horizontal producirá un momento de volcamiento, que, dimensionado con la carga elástica calculada, 90 000 N, sería:

$$\text{Momento de Volcamiento: } MV = 90\,000 \times (1,4 - 0,2) = 108\,000 \text{ N.m}$$

$$\text{Momento Resistente: } MR = 59\,312 \times 1,6 / 2 = 47\,450 \text{ N.m}$$

Lo que quiere decir que el muro tendería a volcarse.

Ante esta realidad, se analizan varias opciones:

1. Aumentar la dimensión horizontal del muro. Esto significaría mucha mayor fuerza del actuador horizontal para lograr niveles similares de deformación horizontal. Hay que tener en cuenta que la deformación horizontal es inversamente proporcional a la inercia de la sección transversal y esta es proporcional a la potencia cuarta de la altura de la sección transversal, la longitud del muro. Dicho en otras palabras, la carga horizontal que se requiere para lograr un mismo nivel de deformación varía con la potencia 4ª de la longitud del muro, pudiendo crear problemas con la capacidad del actuador con que se cuenta. Por esta razón, se desecha esta alternativa.
2. Crear algún anclaje con la base del muro, en ambos extremos de la misma, teniendo en cuenta el movimiento en ambos sentidos del actuador, con el fin de aportar una fuerza estabilizadora. Este anclaje alteraría en algo el comportamiento del muro en cuanto al régimen de tracciones que sufrirá en la zona en la cual se ubique. Sin embargo, como el objetivo de la investigación es determinar el comportamiento relativo entre los dos muros, uno sin reforzar y otro reforzado con un muro de cortante, unidos mediante anclajes, en este caso, de acero, si en ambos casos se coloca el mismo refuerzo vertical, se estaría causando la misma afectación, en caso de que ella fuera significativa. El refuerzo se colocará externamente.

Se escoge esta última alternativa y se procede a calcular la sección de dicho refuerzo:

Ecuación de equilibrio de fuerzas (ver figura 39):

$$90\,000 \times 1,20 = 0,8 \times 59\,312 + 1,6 \times F_{\text{Anclaje}}$$

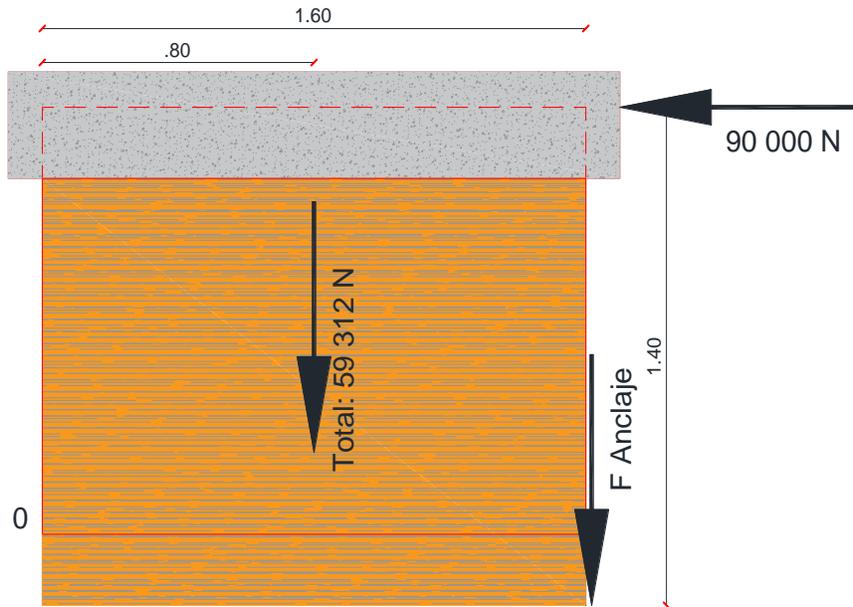
1,20 es el brazo con respecto al punto "0".

$$F_{\text{Anclaje}} = 37\,844 \text{ N}$$

Se usará 2 Φ 3/8" y será un cable tensado que se colocará externamente con el fin de solucionar de una vez la estabilidad al volcamiento de todo el conjunto.

A continuación se analiza la tendencia al volcamiento del conjunto, incluyendo la viga base. Para este caso, la ecuación de equilibrio sería:

Figura 39. Esquema para cálculo del anclaje de estabilización



$$90\,000 \times 1,50 = 0,9 \times (59\,312 + 5\,232) + 1,7 \times F_{\text{Anclaje}}$$

1,50 es el brazo con respecto al piso.

$$F_{\text{Anclaje}} = 45\,241 \text{ N}$$

El mecanismo de anclaje que se utilizará será mediante dos cables, uno a cada lado, fijados a las platinas laterales (ver figura 24):

Inclinación Cables, en relación con la vertical: 32°

$$F_{\text{Anclaje Ang. } 32^\circ} = 53\,348 \text{ N}$$

Puesto que son dos, cada uno aporta: 26 674 N.

La capacidad a rotura de este cable, según catálogo Emcocables, es de 71 100 N.

O sea, que está bien la escogencia.

5.3.3.2. Muro en Tapia + Concreto

Para el caso del muro reforzado no se requiere del reforzamiento del muro contra acción de volcamiento, puesto que el refuerzo vertical del muro de concreto estará anclado a la viga de cimiento, pero si se requiere para lograr la estabilidad del conjunto. Se usará el mismo.

5.3.3.3. Estabilidad de todo el conjunto

Todo el conjunto se anclará al piso del laboratorio mediante unos cables fijados a pernos de diámetro 1", utilizando una facilidad que brinda las instalaciones del laboratorio. Esto garantiza la estabilidad del conjunto. Igualmente, se tomarán las precauciones necesarias para que el conjunto no se deslice.

5.3.4. Cálculo del refuerzo de la viga base y la viga corona

La exigencia estructural de estos componentes es a cortante en el plano horizontal, siendo la zona crítica la A-A, tal como se muestra en la figura 39.

Fuerza Actuador horizontal: 90 000 N

Cortante sobre la sección A-A:

Área Sección A-A = 1 800x700 – 1 600x500 = 460 000 mm²

$$V_C = 0,17\lambda\sqrt{f_C}b_wd \quad [\text{NSR 10 (C.11-3)}]$$

$\lambda = 1$ (Concreto normal)

$$V_C = 0,17 \cdot 1 \cdot \sqrt{21} \cdot 460\,000 = 358\,357 \text{ N}$$

$$0,5\phi V_C = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 358\,357 = 134\,384 \text{ N} > 90\,000 \text{ N}$$

Por lo tanto, no se requiere refuerzo a cortante. Sin embargo, se proveerá el mínimo.

$$A_{V,\min} = 0,062\sqrt{f_C} \frac{b_w s}{f_{yt}} = 0,062\sqrt{21} \frac{200 \cdot 100}{420} = 13,53 \text{ mm}^2 \quad (\text{suponiendo } s = 100 \text{ mm})$$

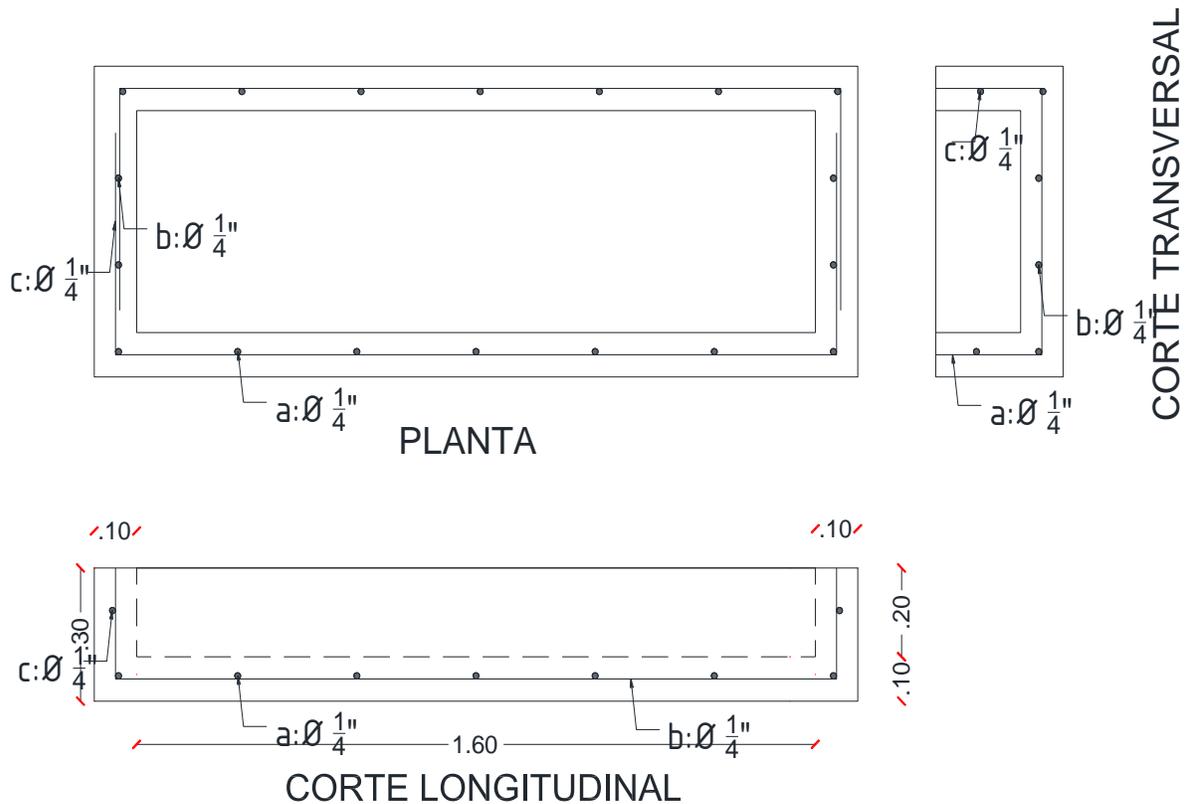
$$\text{Debe ser mayor que: } 0,35b_w s / f_{yt} = 0,35 \cdot 200 \cdot 100 / 420 = 35 \text{ mm}^2$$

Se usará para refuerzo de cortante, en sentido horizontal, 1Φ1/4"@15cm

En sentido vertical se usarán un refuerzo en U conformado por 1Φ1/4"@25cm

En la figura 34 se muestra este refuerzo.

Figura 40. Refuerzo de las vigas Cimiento y Corona



5.3.5. Cálculo del refuerzo del muro de concreto

El ensayo, en lo que se refiere al muro de tapia reforzado con un muro de concreto acoplado, se efectuará con un muro de concreto de 5 cm de espesor. Este espesor podría considerarse pequeño si se tratara de un muro aislado, pero dado que en toda su área va a estar acompañado por el muro en tapia, este le brindará apoyo lateral.

El cálculo del refuerzo se ha efectuado mediante modelamiento numérico en ETABs con licencia de propiedad de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS, en el cual se ha considerado un muro de concreto solo, soportando una carga horizontal monótonica en su extremo superior, a la altura de una viga con la sección de 70cm x 30 cm, correspondiente a la viga corona.

Para el efecto se ha supuesto que el muro con su carga de segundo piso y peso propio que incluye la masa del muro en tapia, está sometido a una carga horizontal igual a la mínima que se estima, se someterá al muro durante el ensayo.

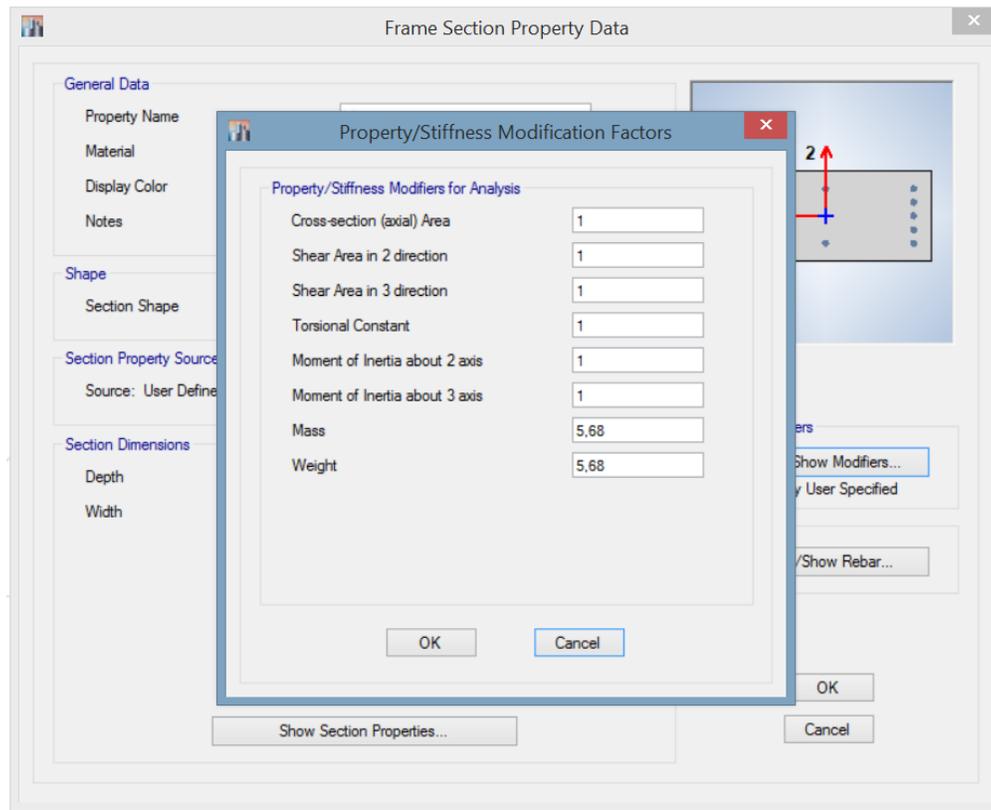
Factor de modificación de la masa de la viga corona:

La masa y peso de la viga corona ha sido afectada por un factor que se muestra en lo que viene (ver figura 41), para tener en cuenta el valor total de la carga vertical que se ha calculado como correspondiente a las del segundo piso. Igualmente, se ha afectado la masa del muro en concreto, para tener en cuenta la masa del muro en tapia. Se han supuesto unas restricciones para desplazamiento lateral del muro cada 40 cm en los sentidos de la altura y el largo del muro, para tener en cuenta los anclajes con el muro en tapia.

Factor de modificación de la Masa de la viga corona:

$$\frac{\text{Masa } 2^{\circ}\text{Piso} + \text{Masa Viga}}{\text{Masa Viga}} = \frac{2447 + 523}{523} = 5,68$$

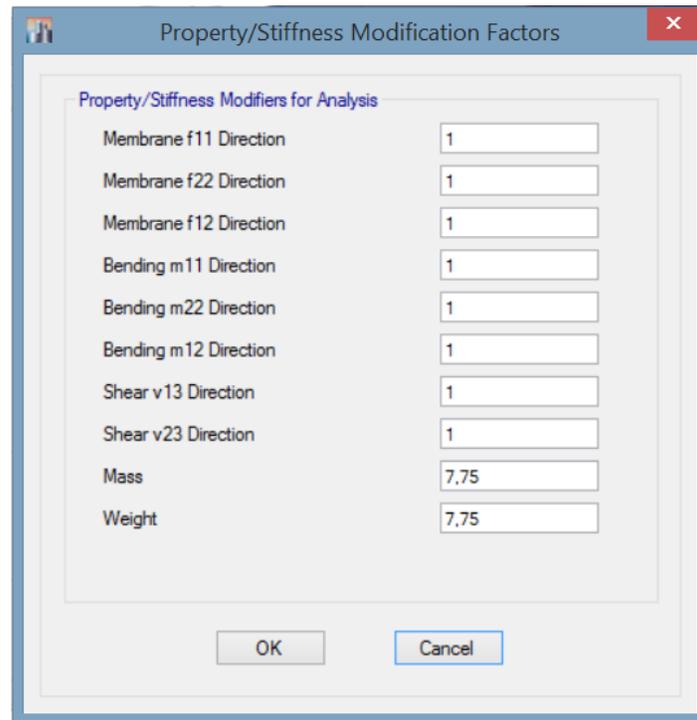
Figura 41. Modificación de la masa de la Viga Corona



Factor de modificación de la Masa del muro: (ver figura 42)

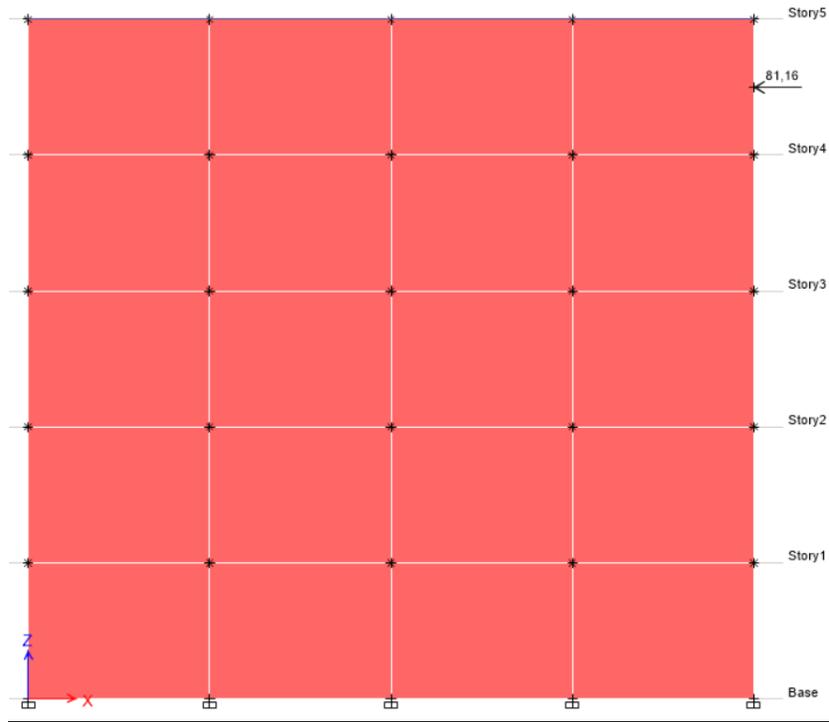
$$\frac{\text{Masa Muro Tapia} + \text{Masa Muro Concreto}}{\text{Masa Muro Concreto}} = \frac{810 + 120}{120} = 7,75$$

Figura 42. Modificación de la masa del muro de concreto



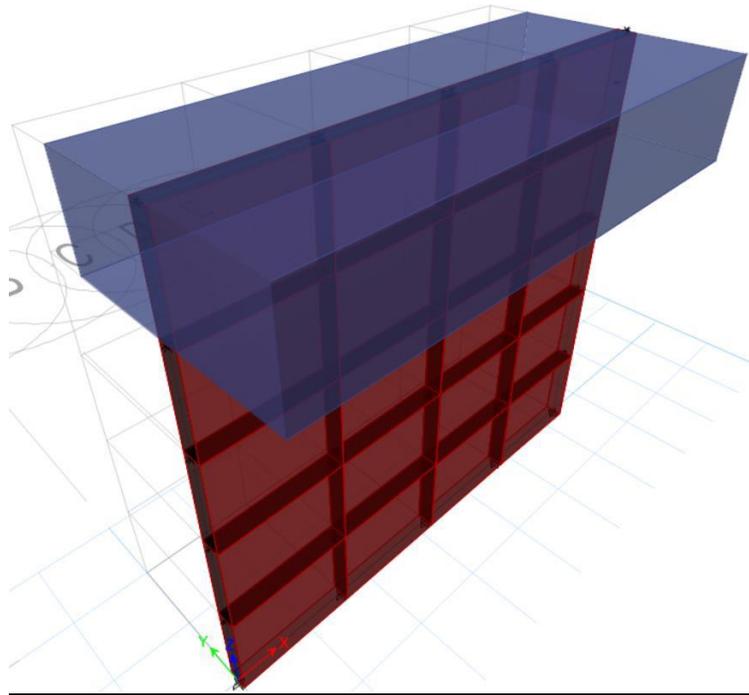
En la Figura 43 se muestra al muro en vista lateral, con la carga horizontal aplicada a la altura media de la viga corona.

Figura 43. Elevación del muro. Carga horizontal aplicada



En la Figura 44 se muestra al muro en vista tridimensional..

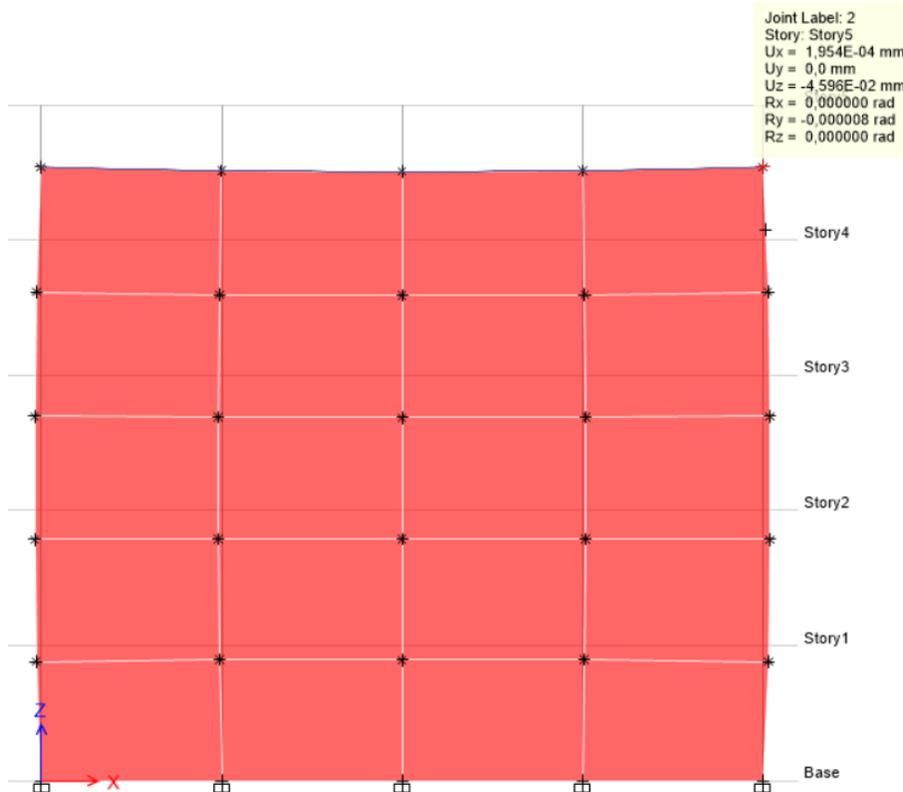
Figura 44. Vista Axonométrica Extruida del Muro



Deformación del muro

El programa arroja una deformación del muro, en la zona elástica, de 0,0002 mm (ver figura 45). En la prueba se espera que el valor de esta deformación sea mucho mayor.

Figura 45. Deformada del muro por Cargas Horizontal y Vertical



Refuerzo del muro

El muro de concreto se dotará de un refuerzo vertical y horizontal, de acuerdo con los resultados del cálculo numérico, a sabiendas de que la deformación máxima que va a sufrir es mayor que la arrojada por el programa, la cual debe corresponder a una carga mayor, aunque no proporcional porque a ese nivel de carga el muro muy posiblemente estará en su zona plástica (Ver Figura 46).

Figura 46. Refuerzo vertical requerido

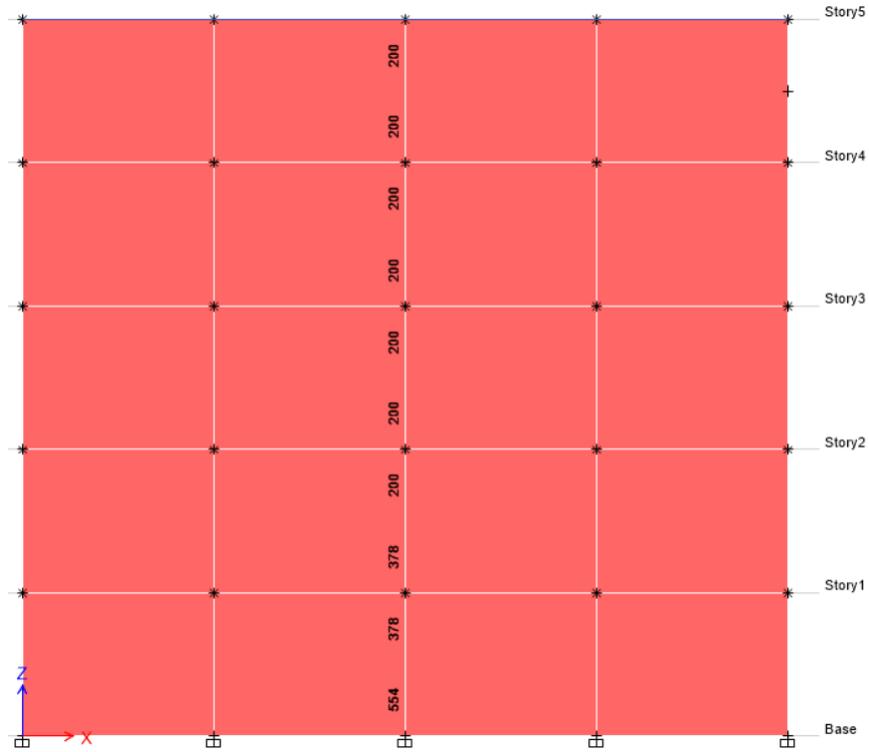


Tabla 2. Refuerzo vertical y horizontal requerido en el muro de concreto
(Extraída del software utilizado)

TABLE: Shear Wall Pier Summary - ACI 318-11																		
Story	Pier Label	Station	Design Type	Edge Rebar	End Rebar	Rebar Spacing mm	Required Reinf %	Current Reinf %	Pier Leg	Leg X1 mm	Leg Y1 mm	Leg X2 mm	Leg Y2 mm	Shear Rebar mm ² /m	Boundary Zone Left mm	Boundary Zone Right mm	Warnings	Errors
Story5	P1	Top	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Top Leg 1	0	0	1600	0	125			No Message	No Message
Story5	P1	Bottom	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Bottom Leg 1	0	0	1600	0	152,5			No Message	No Message
Story4	P1	Top	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Top Leg 1	0	0	1600	0	152,5			No Message	No Message
Story4	P1	Bottom	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Bottom Leg 1	0	0	1600	0	150,5			No Message	No Message
Story3	P1	Top	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Top Leg 1	0	0	1600	0	150,5			No Message	No Message
Story3	P1	Bottom	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Bottom Leg 1	0	0	1600	0	148,5			No Message	No Message
Story2	P1	Top	Uniform	6	6	250	0,25	0,57	Top Leg 1	0	0	1600	0	148,5			No Message	No Message
Story2	P1	Bottom	Uniform	6	6	250	0,47	0,57	Bottom Leg 1	0	0	1600	0	146,5			No Message	No Message
Story1	P1	Top	Uniform	6	6	250	0,47	0,57	Top Leg 1	0	0	1600	0	146,5			No Message	No Message
Story1	P1	Bottom	Uniform	6	6	250	0,69	0,57	Bottom Leg 1	0	0	1600	0	144,6			No Message	No Message

En la Tabla 2, se observa el refuerzo a cortante requerido (Horizontal).

Con base en lo anterior se proveerá el siguiente refuerzo:

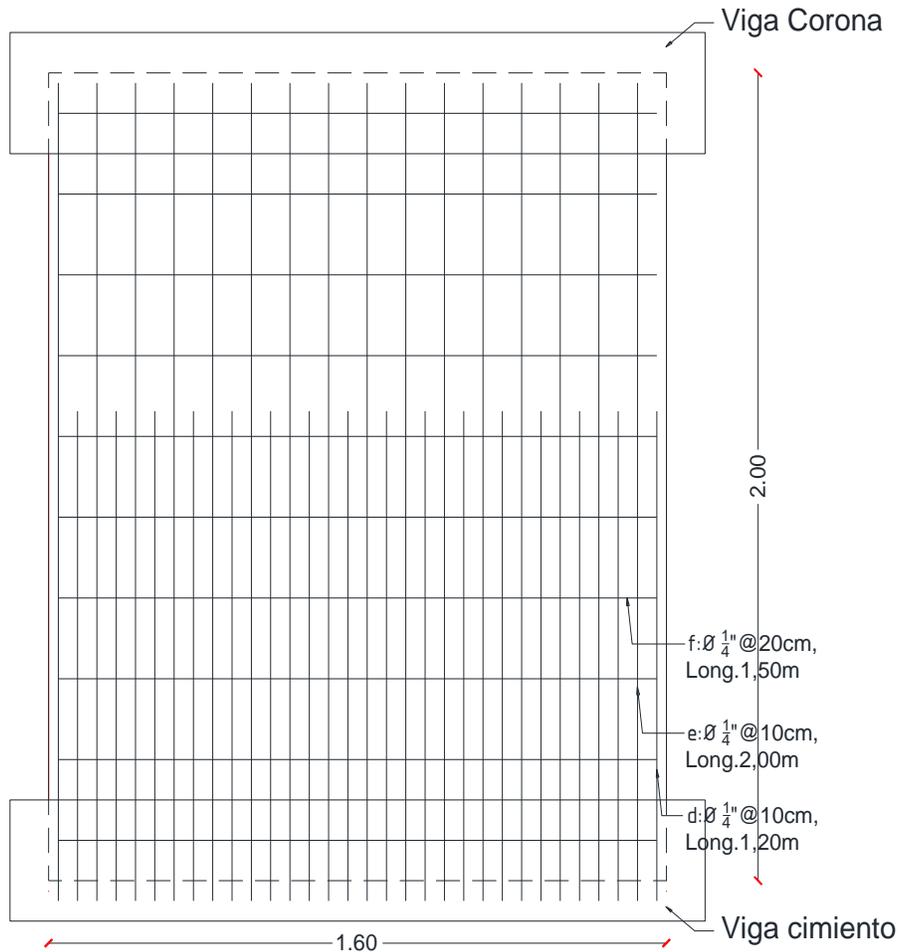
Refuerzo Vertical en la base: $1 \phi \frac{1}{4}'' @ 5 \text{ cm.}$

Refuerzo Vertical en la mitad superior: $1 \phi \frac{1}{4}'' @ 10 \text{ cm.}$

Refuerzo Horizontal: $1 \phi \frac{1}{4}'' @ 20 \text{ cm.}$

Finalmente, en la Figura 47 se muestra el refuerzo del muro de concreto.

Figura 47. Refuerzo vertical y horizontal requerido



5.3.6. Cálculo de los conectores

Los conectores se calculan teniendo en cuenta la exigencia estructural que le significa la función que van a desempeñar: En el momento del sismo, el edificio sufre las consecuencias del desplazamiento, tratando de seguir el mismo, obviamente, no a la misma frecuencia del sismo en la base sino a la frecuencia que le permite su masa y su coeficiente de rigidez. Si este muro se encuentra acoplado mediante conectores a un muro de concreto, cada uno tenderá a desplazarse a su frecuencia natural, lo que significa que entre los dos tratará de haber un desplazamiento diferencial. Esta es la razón por la cual los conectores se ven exigidos estructuralmente.

La máxima exigencia sucederá en los momentos en que la diferencia entre los desplazamientos de las dos masas es máxima, para el efecto es necesario conocer la curva de comportamiento de cada masa y la del sistema conjunto.

En el Anexo D se hace un análisis dinámico de los muros. Como resultado de este análisis se concluye que efectivamente sucederá esta tendencia al desplazamiento diferencial entre los muros y que deben existir unos conectores que impidan que este desplazamiento se cristalice.

Ahora bien, como consecuencia de la baja dureza de la tierra, en conjunto con su bajo módulo de elasticidad, los conectores no sufrirán un desplazamiento transversal a su eje localizado en un punto específico del mismo, que pudiera significar una acción de corte en dicho punto; en cambio, tenderán a adoptar una posición diagonal causada por esta acción transversal, para nuevamente quedar soportando una tracción perpendicular a su sección transversal. Esta disposición final del conector significará una mayor longitud que implicará un incremento en el esfuerzo a que estará sometido. A continuación se calcula el esfuerzo a que estarán sometidos estos conectores.

En la figura 48 se muestra esta situación.

$$\Delta L = \sqrt{L_0^2 + \Delta L_{Transv}^2} - L_0 = \sqrt{450^2 + 5^2} - 450 = 0,02777692 \text{ mm}$$

La deformación unitaria sería:

$$\Delta_{Unit} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,02777692}{450} = 6,17265E-05 \text{ mm}$$

Esto significaría un esfuerzo de trabajo en cada conector, de:

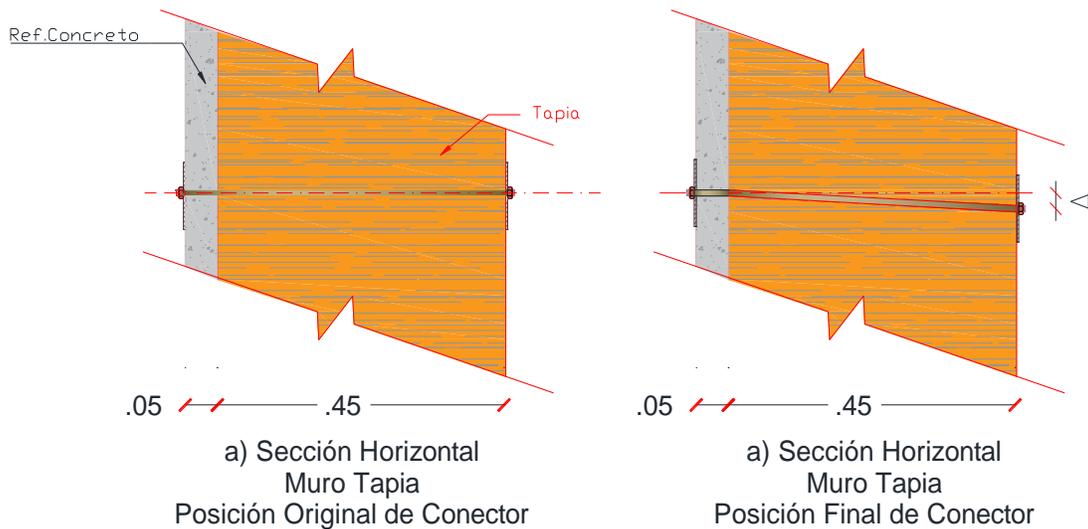
$$f_s = E \Delta_{Unit} = 210 \text{ E}+09 \text{ Pa} \times 6,17265E-05 = 12962565 \text{ Pa}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Sección requerida:

$$\text{Esfuerzo admisible a tracción} = \Phi \times 0,4 \times f_y = 0,9 \times 0,4 \times 420 \text{ MPa} = 151200000 \text{ Pa}$$

Figura 48. Esquema para cálculo de conector



Se puede apreciar que el fundamento del cálculo es que la sección de los conectores es tal que permite que el muro de tierra se desplace toda la elongación que acusa su comportamiento dinámico si no estuviera conectado con el muro de concreto, esto implica una sección muy pequeña. El resultado que obtenemos es que el esfuerzo al que estarían sometidos los conectores en este caso, sería muy pequeño. Óbviamente que si se aumenta la sección de los conectores, el desplazamiento diferencial entre los muros se disminuiría.

Como se observa, el esfuerzo a tracción admisible del conector es muy superior al esfuerzo de trabajo a que estará sometido (inclusive podría ser hasta 10 veces la deformación esperada sin problema) y, por lo tanto, la sección que se requiere implementar en el mismo para que cumpla adecuadamente su función, es muy pequeña.

Finalmente, teniendo en cuenta experiencias anteriores tomadas de ([4], pág. 5-14), se colocarán conectores en varilla de acero de $\Phi 3/8'' @ 50\text{cm}$ tanto vertical como horizontalmente.

En el capítulo de Conclusiones se muestra un detalle de como podría ser implementado el conector y la separación entre ellos.

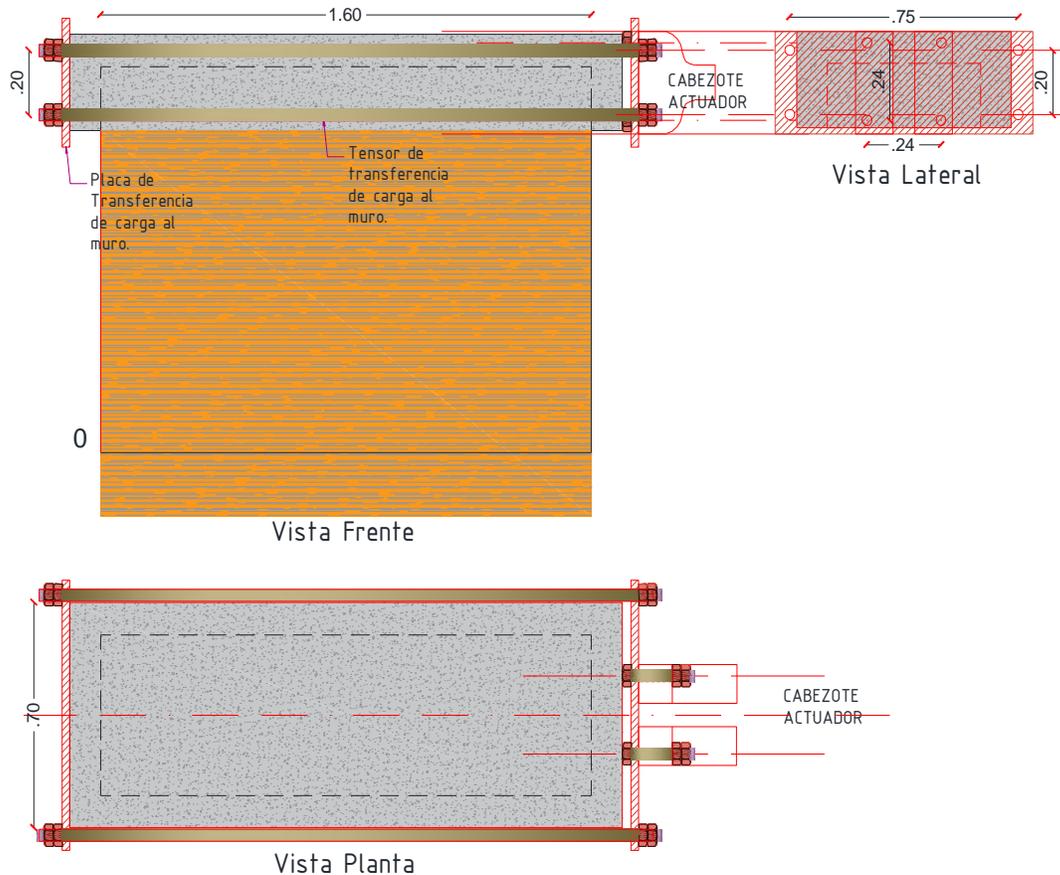
5.3.7. Diseño del mecanismo de sujeción del muro al actuador

Para el efecto hay que tener en cuenta que la carga horizontal que aplicará el actuador será cíclica, lo cual significa que ejercerá compresión cuando su movimiento esté en su semi-ciclo positivo y ejercerá tracción cuando esté en el

semi-ciclo negativo, se debe utilizar un mecanismo de sujeción que mantenga al muro conectado con el actuador en todo momento durante el ensayo.

Este mecanismo debe cumplir requerimientos de resistencia y de deformación con el fin de que no altere sustancialmente la lectura de deflexión que registra el aparato durante el recorrido negativo. En la figura 49 se muestra esquemáticamente este mecanismo.

Figura 49. Esquema del mecanismo de acople de muro con el actuador horizontal



Puede apreciarse que la carga se aplicará al muro directamente durante su recorrido positivo. En cambio, durante el recorrido negativo, la carga se aplicará al muro mediante la Placa de Transferencia, que se conecta al cabezote del actuador mediante unos tensores. Estos tensores, por su longitud, se constituyen en el componente crítico por la deformación que sufrirán al estar sometidos a esta carga, alterando la medida de la deflexión que registrará el sistema digital del actuador horizontal. Esta alteración será importante si los tensores no tienen la sección apropiada. En la figura 50 se muestran varios casos de este tipo de ensayos realizados en laboratorios de varias Universidades. En ellos se observan los tipos de herrajes que se usan para efectuar esta conexión Actuador - Muro.

El actuador del laboratorio de Caracterización de Materiales de la UIS no cuenta con este aditamento y hubonecesidad de diseñarlo y proveerlo con el fin de poder hacer el ensayo.

El criterio que se ha utilizado para el diseño de este componente ha tenido en cuenta la precisión que se hizo en la Sección 5.3.3.1, numeral 2, “el objetivo de la investigación es determinar el comportamiento relativo entre los dos muros, uno sin reforzar y otro reforzado con un muro de concreto,...”. No es de sustancial importancia determinar con gran exactitud cuanto más resistente es el muro reforzado, aunque sí vale la pena determinar el orden de magnitud de la mejora. Esta reflexión se hace con el fin de precisar qué tan exacta debe ser la información lograda de los ensayos, puesto que en la medida en que la exactitud sea mayor, los tensores deben ser de mayor diámetro, tal como se muestra en los cálculos que siguen:

De los cálculos efectuados en la Sección 5.2.3. “Cálculo de la Carga Horizontal”, se estima que para el muro reforzado será necesario aplicar una carga horizontal de aproximadamente 200 kN, evento en el cual la deformación que se calcula es de 0,5 mm.

Para el primer intento de dimensionamiento se asumirá una carga de diseño de 200 kN y una deformación de máximo una milésima de la deflexión máxima supuesta para el muro reforzado. El mecanismo que se utilizará tiene la forma indicada en el esquema mostrado en la figura 49.

Diseño de los tensores:

Carga a transmitir:	200 000 N
Número de tensores:	4
Def.Elást.Máx. calculada muro:	0,75 mm
Def.Elást.Máx. cal/ada tensor:	10% = 0,075 mm
Longitud tensor:	1725 mm
E:	210 000 N/mm ²

$$A = \frac{PL}{\Delta E} = 5476,19 \text{ mm}^2. \Phi = 83,5 \text{ mm}$$

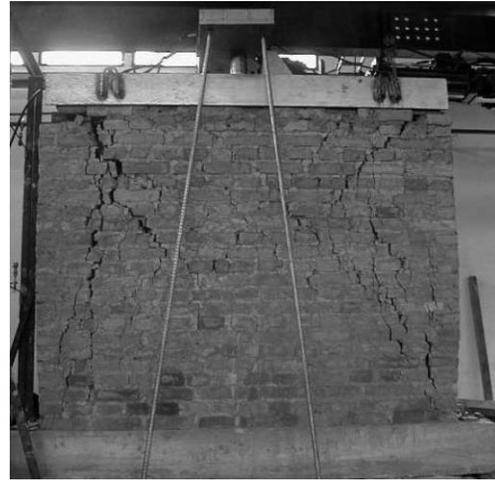
Que corresponde a una varilla de 3 1/2". Es decir, que se deben proveer cuatro (4) barras de 3 1/2".

El problema no solo lo constituye esta dimensión, sino que eso conlleva a un punto de aplicación de esta carga en la placa de transferencia que genera un momento en su punto de apoyo con la viga corona del muro, que nuevamente redundo en que dicha placa debe ser robusta para que la deformación generada por este concepto sea despreciable.

Figura 50. Ensayos de muros que muestran el mecanismo de acople con el actuador horizontal



Ensayo efectuado en la Universidad de Sevilla, España. 2011. ([25], pág. 50)



Ensayo efectuado en la Universidad de Los Andes, Col. 2007. ([3], pág. 298)



Ensayo efectuado en la Universidad Católica del Perú. 2005. ([6], pág. 8)

En consecuencia, en el presente proyecto se optará por dimensionar los componentes de este aditamento con el criterio de una baja deformación para el muro sin reforzar y una resistencia adecuada para el muro reforzado. Tal como se hace a continuación:

Carga a transmitir:	51 100	N
Número de sensores:	4	
Def.Elást.Máx. calculada muro:	5 mm	

Def.Elást.Máx. cal/ada tensor: 10% = 0,5 mm
 Longitud tensor: 1 725 mm
 E = 210 000 N/mm²

$$A = \frac{PL}{\Delta E} = 209,88 \text{ mm}^2. \Phi = 16,35 \text{ mm}$$

Que corresponde a una varilla de 5/8". En caso de usar una varilla de 1 1/2", la deformación sería:

Area 1 1/2": 1 125 mm²

$$\Delta = \frac{PL}{AE} = 0,093 \text{ mm}$$

Que corresponde de a un porcentaje del 1,86% de la deformación del muro, que podría considerarse bueno.

Chequeo para carga de: 200 000 N

$$f_s = \frac{P}{A} = 44,444 \text{ N/mm}^2 = 44,44 \text{ MPa} \ll 420 \text{ MPa}$$

Estos tensores se aplicarán lo más cerca posible a la viga de concreto con el fin de minimizar la deformación de la placa de transferencia de la carga al muro.

Chequeo de la Placa de Transferencia de Carga al Muro

En la figura 51 se observan los parámetros idealizados para el diseño.

Se observa que la exigencia estructural de la platina cercana al actuador es mayor que la que sufre la platina alejada.

Para la platina cercana se llega a un espesor de 1 1/2", como se muestra en el cálculo siguiente:

Momento máximo: 100 000 N x 0,25 m = 25 000 N.m

$$I = 0,32 \times 0,0381^3 / 12 = 1,41753 \text{E-}06 \text{ m}^4$$

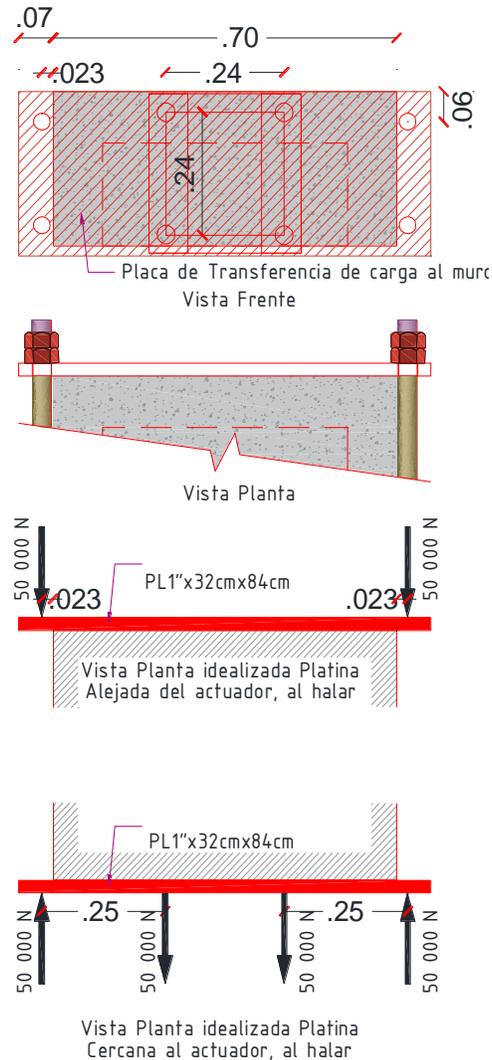
$$c = 0,0381 / 2 = 0,01905 \text{ m}$$

$$\text{Área} = 0,32 \times 0,0381 = 0,0122 \text{ m}^2$$

$$f_s = Mc/I = 335 971 719,1 = 336 \text{ MPa. Se puede aceptar}$$

$$f_v = F/A = 12 303 149,61 \text{ } \sigma = 12,3 \text{ MPa. Bien}$$

Figura 51. Placas de Transferencia. Parámetros para su diseño



Platina Lejana al Actuador

Espesor Utilizado: $\frac{3}{4}$ "

Momento máximo: $100\,000\text{ N} \times 0,019\text{ m} = 1\,900\text{ N.m}$

$I = 0,32 \times 0,019^3 / 12 = 1,82907\text{E-}07\text{ m}^3$

$c = 0,019 / 2 = 0,0095\text{ m}$

Área = $0,32 \times 0,019 = 0,0061\text{ m}^2$

$f_s = Mc/I = 98\,684\,210,53 = 98,6\text{ MPa}$ Bien

$f_v = F/A = 24\,671\,052,63 = 25\text{ MPa}$ Bien

Cálculo del número de tuercas:

Diámetro en la base de las roscas: 27,1 mm

Área Cortante Base Rosca: 85,14 mm²/mm

Cortante: $V_s = \frac{F}{A} = 2349,15 \text{ MPa/mm}$

Si se permite un $V_{\text{máx}}$ de $0,4V_{\text{fluencia}}$, o sea: 168 Mpa

Se requeriría una rosca de largo: 13,98 mm

O sea, con una tuerca sería suficiente. Teniendo en cuenta el carácter dinámico de la prueba, se usarán dos tuercas a cada lado.

5.4. ESTADO DE ESFUERZOS INICIALES DEL MURO

Originalmente el muro estará sometido a una carga vertical correspondiente al peso de la viga, el actuador, cuya carga ha sido dimensionada para representar, en conjunto con el peso de la viga, la carga que usualmente soporta un muro por concepto de la presencia de un segundo piso, y su propio peso. Esta carga es (Ver sección 5.3.3.1):

Σ Cargas Verticales = 33 920 + 5 232 + 20 160 = 59 312 N

Sección Transversal = 500mm x 1 600mm = 800 000 mm²

$$\sigma = \frac{V}{A} = \frac{59\,312}{800\,000} = 0,07414 \text{ MPa}$$

Capacidad esperada del muro a compresión: 1,56 MPa (Sección 5.2.3.2.)

Es decir que la capacidad del muro a compresión estaría solicitada por concepto de la carga inicial vertical en un 4,74%. A este esfuerzo se sobrepondrán, en cada punto del muro, los esfuerzos causados por la carga horizontal.

5.5. MATERIAL DE TIERRA UTILIZADO

5.5.1. Búsqueda del material

Para el efecto, se hicieron averiguaciones preliminares sobre distintas fuentes. Una fue el aeropuerto Palonegro de Bucaramanga, donde para esas fechas estaban ejecutando un gran movimiento de tierra. Otra fue proveniente de un sitio céntrico de la ciudad, carrera 20 con calle 24. Una tercera fuente posible que se investigó fue en el anillo vial, a la altura de El Corcel y la cuarta fue un material proveniente del casco urbano de Piedecuesta, donde a la sazón estaban iniciando una construcción, el Conjunto Terrazas de Mensulí.

Del material del aeropuerto Palonegro se tomó muestra y se hizo la prueba de granulometría, la cual se puede apreciar en el anexo A, Este material resultó con un porcentaje de finos de apenas el 30%, que es muy pequeño [10].

Del sitio céntrico de Bucaramanga, se apreció a la vista que el contenido de materiales finos era mínimo, por debajo del recomendable para este uso, que es del 40% al 50% [10]. Por esta razón, se desechó.

Del sitio anexo al Anillo Vial, también se apreció un contenido de finos por debajo del mínimo recomendado [8, 10]. Por esta razón, también se desechó.

Finalmente, del sitio ubicado en Piedecuesta, se tomó material a una profundidad entre 2 y 3 metros. Del análisis de granulometría se concluyó que el material era apropiado. Piedecuesta es una localidad en la que la construcción en tapia pisada ha sido una tradición. Se escogió este material, cuya granulometría se muestra en el Anexo A, Sección A.2. y que se resume en la Tabla 5.

5.5.2. Granulometría recomendada para el material a utilizar en construcciones en tierra

A continuación, se muestran algunos conceptos referentes a la granulometría conveniente para el material de los muros de tapia pisada:

“No todas las tierras son adecuadas para la construcción de tapia pisada: Se estima que la mejor tierra debe estar compuesta por, gravilla de 0 a 15%, arenas de 40 a 60%, Limos de 3,5 a 20% y arcillas de 15 a 25%.” ([8], pág. 43)

“Se sabe que las proporciones deseadas son 50% a 60% de material grueso (gravas y arenas) (y) 50% a 40% de material fino (arcillas y limos). Si los resultados muestran composiciones diferentes, ya es muestra que el suelo requiere (de) estabilización.” ([10], pág. 14)

En la Tabla 3 se muestra una comparación de propiedades granulométricas de los suelos de Barichara, San Gil y Piedecuesta, tres regiones en las que se utilizó mucho esta técnica de construcción.

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos del ensayo de granulometría para suelos procedentes de Barichara, San Gil y Piedecuesta.

([10], pág. 22)

TIPO DE SUELO		BARICHARA	SAN GIL	PIEDECUESTA
GRANULOMETRIA	%G	2.78	1.56	0.42
	%A	3.87	4.76	39.64
	%F	93.36	93.77	59.94
LIMITES	LL	45	45	32
	LP	31	32	24
	IP	14	13	8
CLASIFICACION	SUSC	ML	ML	SM

En la Tabla 4 se puede apreciar la distribución de tamaños utilizada en unos experimentos en el Instituto de Investigaciones y Pruebas de Materiales, en Berlín, Alemania.

Tabla 4. Propiedades granulométricas de los materiales utilizados en construcciones en tierra,

([51], pág. 329)

Granulometric properties of the used earthen materials (mass%).

Material	Gravel and sand >0.063 mm	Silt = 0.002–0.063 mm	Clay <0.002 mm
Earth block	43	45	12
Earth mortar	55	37	14
Rammed earth	64	25	11
Cob	18	61	21

5.5.3. Granulometría del material de tierra utilizado en el ensayo

En la Tabla 5, se muestra la granulometría resumida del material utilizado en el ensayo. Esta se ha elaborado de los datos suministrados por el laboratorio de la UIS según el protocolo de ensayos mostrado en el Anexo A.2.

Tabla 5. Propiedades granulométricas del material utilizado en el ensayo

Clasificación	Cantidad %
Gravas	0,00
Arenas	51,22
Finos	48,78
Suma	100,00

Tipo de Suelo: SM

Se puede apreciar que el material tiene una cantidad de finos que corresponde al rango ideal, de acuerdo con la literatura existente al respecto, sin embargo, no cuenta con arcillas. No obstante, dado que este material corresponde a una zona en la que la construcción con tapia pisada ha sido una tradición, se usará para el experimento.

5.6. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS

5.6.1. Organización de los operarios

Para la construcción de los muros se organizó un equipo ejecutor conformado por un maestro, un ayudante con experiencia en obras de albañilería, un auxiliar de logística y los dos estudiantes de pregrado que tomaron este proyecto como tema de proyecto de grado, como se mencionó en la Sección 5.1, los estudiantes German Arvey Pico Fonseca y John Taylor Herrera Rodríguez. Ellos, los estudiantes, se encargaron de hacer desde labores de mano de obra, hasta extracción y preparación de muestras para ensayos, toma de resultados e interpretación de los mismos, de acuerdo al alcance establecido en su Plan de Proyecto.

5.6.2. Proceso de construcción

Como primera actividad, se fundieron las vigas base (ver figuras 52 y 53). A continuación, una vez fraguadas dichas vigas, se procedió a la construcción de los muros. Después de montada la formaleta, la cual era metálica, se extendió el material tierra en el piso. Este material tierra estaba depositado en una pila en el sitio asignado por los administradores del laboratorio, ubicado en una zona en el exterior del mismo, a sea, a la intemperie. Aunque este material una vez recibido en el sitio se cubrió con un plástico de color negro, estuvo sometido al sol durante varios días, lo que produjo su secamiento a unos niveles de humedad por debajo del 10%.

Siguiendo las instrucciones de la literatura consultada al respecto, se humedeció en forma estimativa, teniendo en cuenta el siguiente criterio práctico:

“Se puede hacer una simple prueba durante la marcha, para determinar qué tan lista esta una tierra para usarse. Primero se debe ver húmeda pero no empapada. Se debe poder apretar fácilmente, a mano, un puñado de la tierra hasta formar una bola firme. En esta prueba, una tierra con un contenido de humedad demasiado alto se sentirá pegajosa y no formará una bola firme y sólida al apretarla. Por otra parte, si hay poca presencia de humedad, la tierra no se compactará ni permanecerá ligada en absoluto. La bola de tierra exitosamente compacta será firme y sólida, no dura o pegajosa. La tierra compactada a mano se puede dejar caer sobre una superficie firme desde una distancia de aproximadamente un metro. Si la bola se rompe, el contenido de humedad es adecuado, si no, hay demasiada humedad presente.” ([78], pág. 42)

De esta forma se logró un adecuado manejo práctico del parámetro humedad, que es un factor importante en el procedimiento de construcción del muro en tapia. En el Anexo B, Sección B.1, se observa, en los resultados del ensayo de humedad del material logrado, que esta fue de 9,31%, lo cual muestra la efectividad de dicho criterio práctico.

A continuación, se procedió a vaciar el material en el compartimiento creado por las formaletas, en capas de aproximadamente 15 cm (ver figuras 54 y 56) y a compactarlo mediante un pisón de madera, con el extremo inferior en forma de paleta, con dimensiones aproximadas en planta de 40 cm x 5 cm y altura de paleta de 50 cm. La altura del cabo, de 5 cm de diámetro era de aproximadamente 1,0 m, el tipo de madera fue Zapán (ver figura 57). La medida de un grado de compactación adecuado fue la obtención de una altura final de capa de aproximadamente 10 cm, esto se hizo con la ayuda de una tabla marcada (ver figura 55).

Una vez construidos los dos muros, uno de 50 cm de espesor y el otro de 45 cm, se procedió a desencofrar, lo cual se hizo al día siguiente de vaciada la tierra. Sin embargo, se apreció la aparición de una grieta temprana a una altura de aproximadamente 50 cm desde la corona (ver figuras 57), lo que llevó a la decisión de demoler los muros (ver figura 59).

Una vez analizada la situación, con el fin de encontrar explicación al fenómeno de agrietamiento, se planteó como hipótesis, que la causa pudo haber sido la desencofrada muy rápida de los muros, lo cual daría lugar a un proceso de secamiento muy rápido, cuando la masa de tierra aún carecía de capacidad para absorber las fuerzas de tracción que aparecen en su masa por la reducción del volumen de agua existente en la misma. Por esta razón se decidió que en el segundo intento de construcción de los muros se dejaría la formaleta durante dos días más con el fin de garantizar la formación de un elemento monolítico.

En el segundo intento, se desarrollaron los primeros pasos descritos, hasta la construcción de los muros. Después de desencofrados los muros, se procedió a fundir la viga corona. En el muro de 45 cm de espesor, antes de fundir la viga corona,

se fundió la capa de concreto armada, para completar los 50 cm de espesor. Es importante anotar que en la realidad doméstica, esta capa en concreto se fundiría estando el muro de tapia completamente seco, sin embargo, en esta aplicación académica, con el fin de desocupar la mano de obra contratada y que los muchachos de pregrado tuvieran la posibilidad de obtener su grado dentro de su semestre (cosa que no fue posible por razones que se salieron de las manos), se fundió estando aún con mucha humedad, lo que originó que ambos materiales crearon una superficie de junta con mucha adherencia, originando agrietamiento vertical en el muro de tapia a todo lo largo de dicha junta. Esto no debería alterar el comportamiento de esta dupla una vez sean sometidos a carga, puesto que no se cuenta con que estos dos materiales estén unidos en esta capa. La conexión es llevada a cabo por los conectores, en este caso metálicos.

En la etapa de construcción de las vigas corona se tuvo en cuenta no cargar los muros, lo cual se logró mediante el apuntalamiento de dichas vigas por un tiempo de un mes aproximadamente (ver figura 62).

Sin embargo, no obstante, la medida tomada de dejar las formaletas por más tiempo, nuevamente aparecieron las grietas en ambos muros (ver figura 62). El análisis que se hizo en este momento se soporta en las siguientes bases:

- i. El proceso en la realidad cotidiana consiste en la construcción del primer metro de altura de los muros en todo el perímetro y sitios de la edificación donde vayan estos muros. Una vez terminado este recorrido, se procede a construir el segundo metro de altura, y así sucesivamente. Es decir, que estructuralmente se está induciendo una grieta en esas alturas, que es posible que con el tiempo vaya desapareciendo, pero, por lo menos en esa etapa de la construcción donde el secado de la tierra es acentuado y la resistencia es baja, evita la creación de grietas.
- ii. La tierra utilizada, a pesar de que es la utilizada en muchas construcciones de Piedecuesta, carece de arcillas. Esto se puede apreciar en el análisis granulométrico (Ver Anexo A)

Esto llevó a la decisión de recortar los muros para lograr sendas piezas monolíticas de muro de tierra (ver figuras 64 y 65). Los muros finalmente quedaron de 1.40 m de altura incluyendo los empotramientos, altura que se consideró apropiada al largo del mismo, 1,60 m, de acuerdo con las dimensiones relativas entre altura y largo de los muros cotidianos.

A continuación, se muestran las fotos aludidas del proceso:

Figura 52. Proceso de fundida de viga de base.

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 53. Viga de base fundida.

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 54. Formaleteada de los muros.

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 55. Regla para controlar el espesor de las capas de tierra.

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 56. Apisonado de la tierra.

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 57. Pisones utilizados.

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 58. Primer juego de muros.

(Hubo que demolerlos por aparición de una grieta a la misma altura en ambos)

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 59. Demolición de los muros

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 60. Hechura de nuevos muros

(Fecha Foto: 21/2/2017)



Figura 61. Fundida de la pantalla en concreto armado

(Fecha Foto: 21/02/2017)



Figura 62. Apuntalamiento de la viga corona para no cargar el muro

(Fecha Foto: 03/06/2017)



Figura 63. Aparición de grieta nuevamente, a una altura de unos 50 cm de la corona

(Fecha Foto: 03/06/2017)



Figura 64. Muro solo en tapia recortado para eliminar la zona desprendida por la grieta

(Fecha Foto: 03/06/2017)



Figura 65. Muro en tapia reforzado recortado para eliminar la zona desprendida por la grieta.

(Fecha Foto: 03/06/2017)



5.7. ENSAYOS EFECTUADOS

Se hicieron los siguientes ensayos:

- Ensayos de granulometría del material tierra.
- Ensayos de humedad en distintas fechas.
- Ensayos de compresión del material tierra en distintas fechas.
- Ensayos de carga de los dos muros, sometiéndolos a cargas simultáneas de compresión y cortante cíclico.

5.8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

5.8.1. Ensayos de granulometría del material tierra

Ver Anexo A.

5.8.2. Ensayos de humedad en distintas fechas

Ver Anexo B.

5.8.3. Ensayos de compresión del material tierra en distintas fechas

Ver Anexo C.

5.8.4. Ensayos de carga de los dos muros, sometiéndolos a cargas simultáneas de compresión y cortante cíclico

5.8.4.1. Implementación de la carga vertical

Como se ha descrito en la Sección 5.2.2, la carga vertical se implementó en dos formas cuya sumatoria era la carga que representa el peso al que está sometido un muro de primer piso en un edificio de dos pisos. Así:

- Peso viga Corona 5 232 N
- Peso herrajes y tensión cable: 3 404 N

El resto, mediante un actuador vertical: 30 516 N

Características del actuador vertical: Marca: MTS
Capacidad a compresión: 365 kN
Capacidad a tracción: 240 kN

Carrera: 254 mm

5.8.4.2. Implementación de la carga horizontal

La carga horizontal se implementó mediante un actuador con las siguientes características.

Características del actuador horizontal: Marca: MTS
Capacidad a compresión: 500 kN
Carrera: 508 mm

Este actuador estaba controlado mediante un computador programado con un software que permite definir la forma de la carga y su magnitud. Para el caso se escogió una forma sinusoidal con amplitud creciente.

La forma se escogió atendiendo la experiencia derivada de ensayos similares hechos en otros centros de investigación, como se muestra a continuación, Figuras 66 y 67:

Figura 66. Gráfica que muestra la señal de carga horizontal aplicada en un ensayo en la Universidad de Los Andes

Tomado de ([3], pag 297)

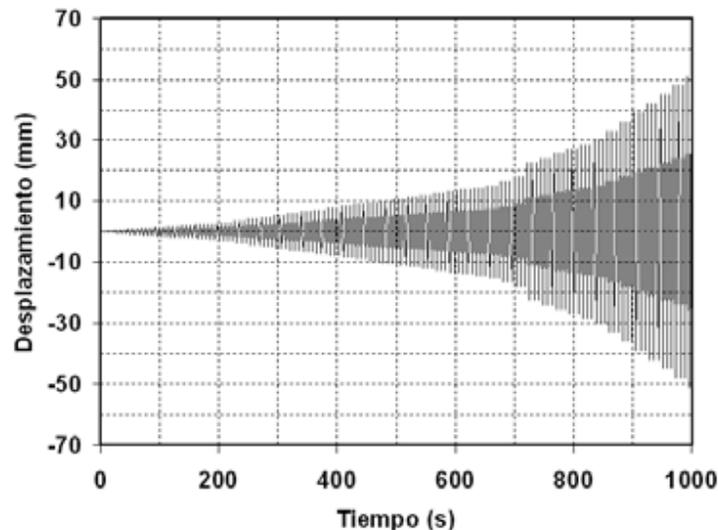


Figura 67. Modulación de la carga para ensayo efectuado en la Universidad Industrial de Santander

Tomado de ([8], pag 54)

FASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Do (mm)	0.25	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10	12.5	15	17.5	20
CICLOS	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

Por otro lado, en ([73], pag 146) se encuentra la siguiente descripción de la carga horizontal aplicada en un ensayo similar “Se aplicaron desplazamientos cíclicos horizontales a una frecuencia constante de 0.1 Hz, con incrementos en la amplitud (2.5 mm por cada paso) y con picos repetidos tres veces por cada amplitud de desplazamiento.”¹

Con esas referencias, se decide:

El control de la carga será por desplazamiento, con los siguientes parámetros:

A. Etapa Inicial

Frecuencia: 0,1 Hz
 Desplazamiento Máximo Inicial (Amplitud): 0.2 mm
 Incremento inicial del desplazamiento: 0.2 mm hasta llegar a 1.0 mm de desplazamiento.
 Duración del desplazamiento en cada etapa: 3 ciclos

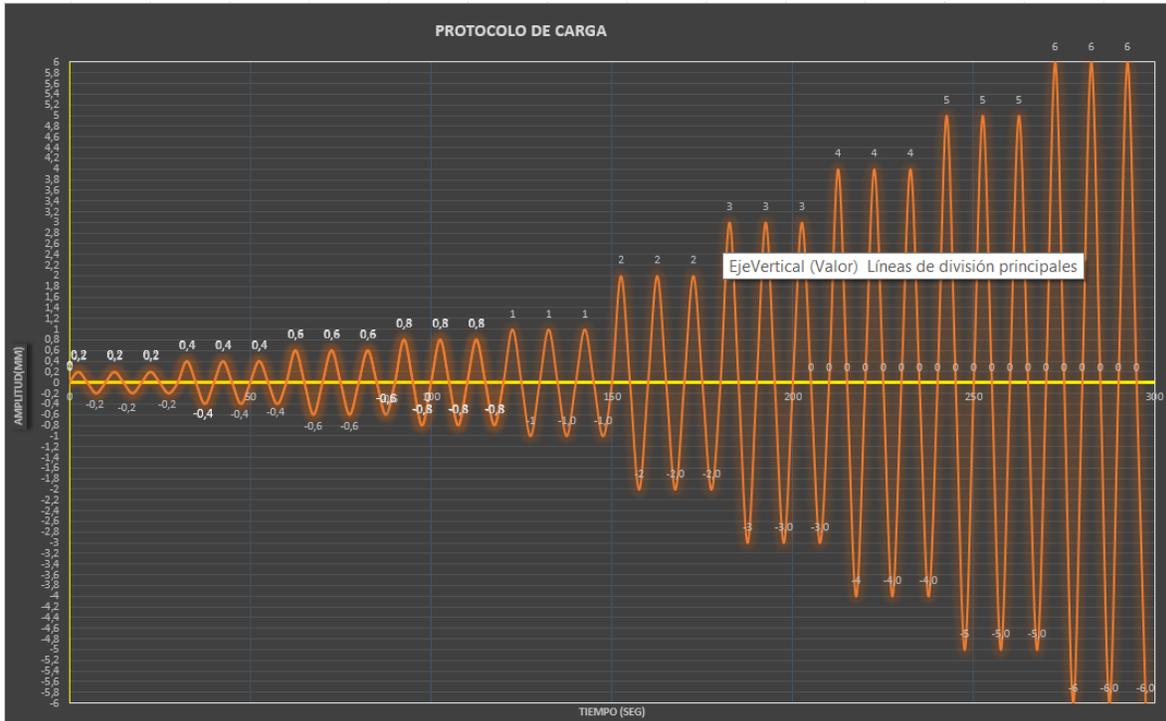
B. Etapa Final

A partir de 1 mm de desplazamiento,
 Incremento del desplazamiento: 1 mm hasta el final.
 La prueba se terminará cuando, en la deformación controlada, la carga horizontal comience a decrecer.

En la figura 68 se observa la gráfica del protocolo de carga descrito.

¹ El original está en inglés. Traducción hecha por el autor

Figura 68. Gráfico de carga diseñado para la prueba



5.9. INFRAESTRUCTURA DEL LABORATORIO, PREPARACIÓN Y EQUIPO DE TRABAJO DURANTE LOS ENSAYOS

Los ensayos se efectuaron en el laboratorio de pesados de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, Edificio Alvaro Beltrán Pinzón, del cual se muestra la siguiente vista interior (Figura 69). Este laboratorio cuenta con los elementos básicos para efectuar este tipo de pruebas. Sin embargo, como siempre sucede para pruebas especiales, como es el caso, fue necesario complementar el sitio con algunos elementos estructurales, que fueron diseñadas de acuerdo con las características geométricas y de carga de los ensayos. Ver Sección 5.3.

Figura 69. Vista del Laboratorio. Personal preparando la prueba.



En la Figura 70 se observa la colocación de los sensores. Se colocó uno en la base a 35 cm del piso, otro a media altura, 70 cm del piso, y un tercero en la viga corona a 105 cm del piso.

Figura 70. Montaje de sensores



En la Figura 71 se muestra al equipo humano que tuvo a su cargo los ensayos.

Figura 71. Equipo responsable de los ensayos.



De izquierda a derecha: Ing. Jaime Vega, estudiante de maestría en investigación en Ingeniería Estructural UIS, Rafael Arismendi, candidato al título de Magister en Profesionalización en Ingeniería Estructural UIS, Jaime Cadena, encargado del laboratorio, Álvaro Novoa y, Germán Pico, candidato al título de Ingeniero Civil.

5.10. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE CARGA EN LOS MUROS

5.10.1. Muro en tapia pisada

5.10.1.1. Dinámica del muro en Tapia Pisada

Antes que todo es importante describir como fue el comportamiento de la estructura a nivel dinámico. Como se dijo en la Sección 5.8.4.2, el actuador horizontal fue programado con una onda de amplitud creciente con una frecuencia de 0,1 Hz, o sea un período de 10 s. Estos fueron los parámetros finales del movimiento, puesto que el actuador estaba apoyado en un muro de reacción, que se supone que no tiene desplazamiento, o el mismo es despreciable, significando un movimiento forzado, para el muro. De no ser así, la vibración del muro sería el resultado no solamente de la frecuencia del actuador, sino también de las características de rigidez y masa del muro. En conclusión, los parámetros de vibración fueron:

Frecuencia: 0,1 Hz

Período: 10 s

Otro aspecto importante para entender los resultados es que las alternancias negativas de acuerdo con la gráfica corresponden al movimiento del émbolo que produce compresión en la cara cercana al actuador, de tal manera que sus posiciones de máxima amplitud para generar tracción en cada cara del muro son los que se relacionan en la Tabla 6. También se observa que el movimiento de empuje al muro es de mayor amplitud que el de tracción.

Tabla 6. Tiempos de máxima elongación del movimiento del muro

Ver Sección 5.9.1.2 para la referencia de tiempos y ciclos.

Tiempo (s)	Ciclo	Cara Cercana Actuador	Cara Lejana Actuador
18	$\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión
33	$\frac{3}{4}$ ciclo	Compresión	Tracción
48	1 $\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión
63	1 $\frac{3}{4}$ ciclo	Compresión	Tracción
78	2 $\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión
93	2 $\frac{3}{4}$ ciclo	Compresión	Tracción
108	3 $\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión
123	1 $\frac{3}{4}$ ciclo	Compresión	Tracción
138	2 $\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión
153	2 $\frac{3}{4}$ ciclo	Compresión	Tracción
168	3 $\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión
183	3 $\frac{3}{4}$ ciclo	Compresión	Tracción
198	4 $\frac{1}{4}$ ciclo	Tracción	Compresión

Con estas aclaraciones, se muestra en la siguiente sección, el comportamiento del muro en cada momento.

5.10.1.2. Comportamiento del muro en Tapia Pisada

En el muro en tapia pisada bajo el aumento progresivo de la carga horizontal se presentó el comportamiento que se puede apreciar en la siguiente secuencia de fotos tomadas con tres cámaras de propiedad de la Universidad Industrial de Santander, Oficina de Producción Teleuis, una Canon 7000 con lente gran angular y dos cámaras Canon VIXIA HFR 700.

Además, se contó con la aplicación GOM Correlate, versión libre, manejada por los estudiantes de Maestría en Ingeniería Civil, modalidad de Investigación, Jaime Enrique Vega Peña y Carlos Julio Ramírez Bello.

La información generada por este software y los sensores, en conjunto con la que suministró el programa del actuador horizontal se combinó para lograr la relación fuerza-deformación que permitiera dibujar las curvas de histéresis.

En el material entregado a la biblioteca se incluyen en presentación digital los resultados del ensayo para ambos muros. También se incluyen los videos tomados.

Las fotos muestran el progreso del proceso en su parte final. Los tiempos y los ciclos con que se correlaciona cada foto mostradas en las Figuras 73 a 86, se refieren a los acusados en la Figura 72, que no es el real, puesto que la foto triplica dicho tiempo como resultado de la programación que se hizo de tres fotos por segundo, en tanto que la gráfica muestra una posición por cada segundo.

Por esta razón, la gráfica muestra un período de 30 segundos, mientras que en realidad es de 10 segundos.

Figura 72. Referencia de Tiempos y ciclos tomados para los estados mostrados en las fotos 73 a 87

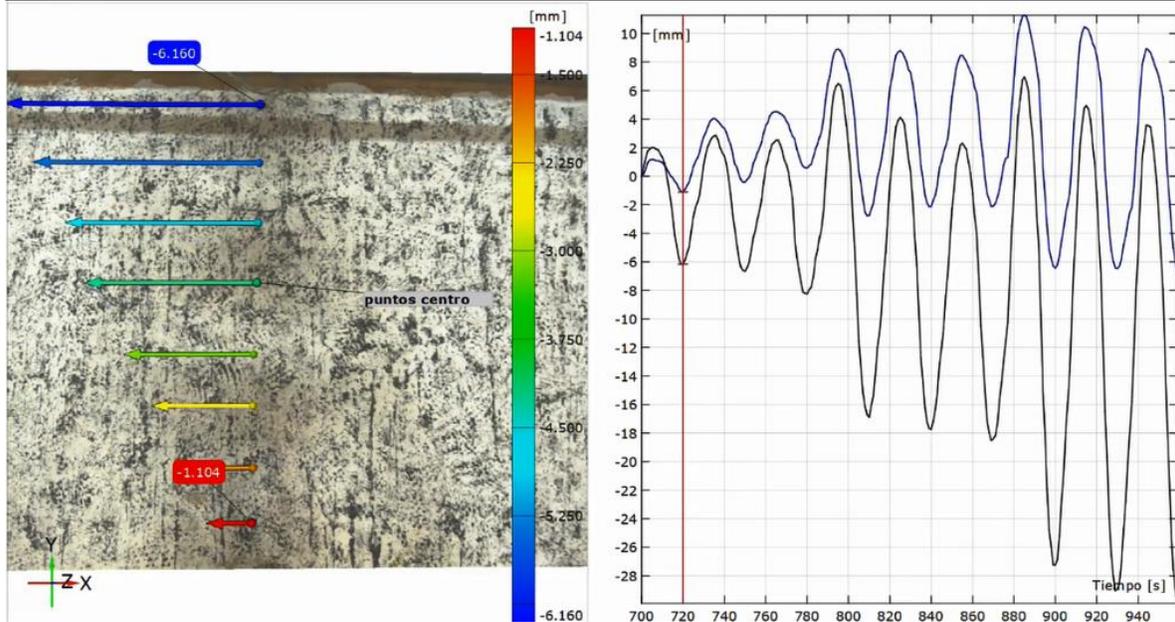


Figura 73. Estado del muro a aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo. 6 s.
Observación: Cara derecha a tracción. No se aprecia alteración del muro.



Figura 74. Estado del muro a $\frac{3}{4}$ de ciclo. 18 s.
Observación: Inicios de grietas. Dos verticales y una en esquina inferior derecha

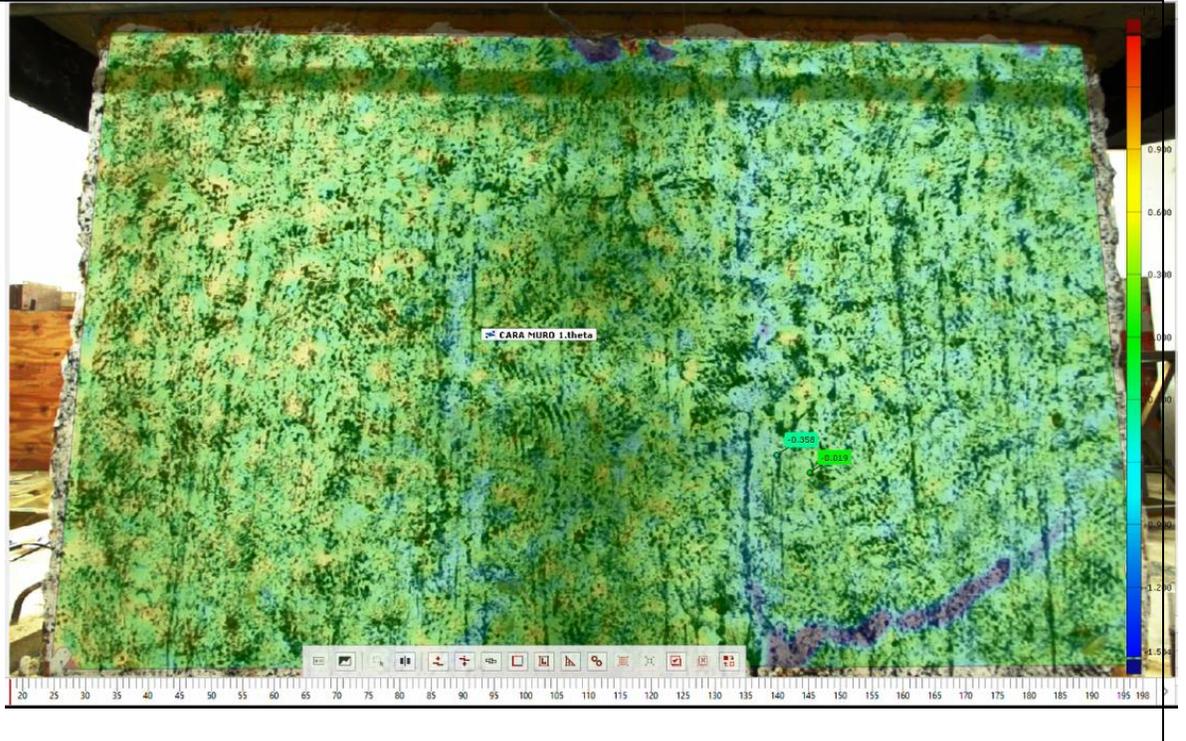


Figura 75. Estado del muro a $1 \frac{1}{4}$ de ciclo. 33 s.

Observación: Cara derecha a compresión. Se abre la brecha esquina derecha



Figura 76. Estado del muro a $1 \frac{3}{4}$ de ciclo. 48 s.

Observación: Cara derecha a tracción. Se agrava la brecha esquina derecha



Figura 77. Estado del muro a $2 \frac{1}{4}$ de ciclo. 63 s.
Cara derecha a compresión. No hay cambio en el estado de grietas.



Figura 78. Estado del muro a $2 \frac{3}{4}$ de ciclo. 78 s.
Observación: Cara derecha a tracción. Se agrava la brecha esquina derecha



Figura 79. Estado del muro a $3 \frac{1}{4}$ de ciclo. 93 s.
Cara derecha a compresión. Se observa grieta extremo izquierdo.

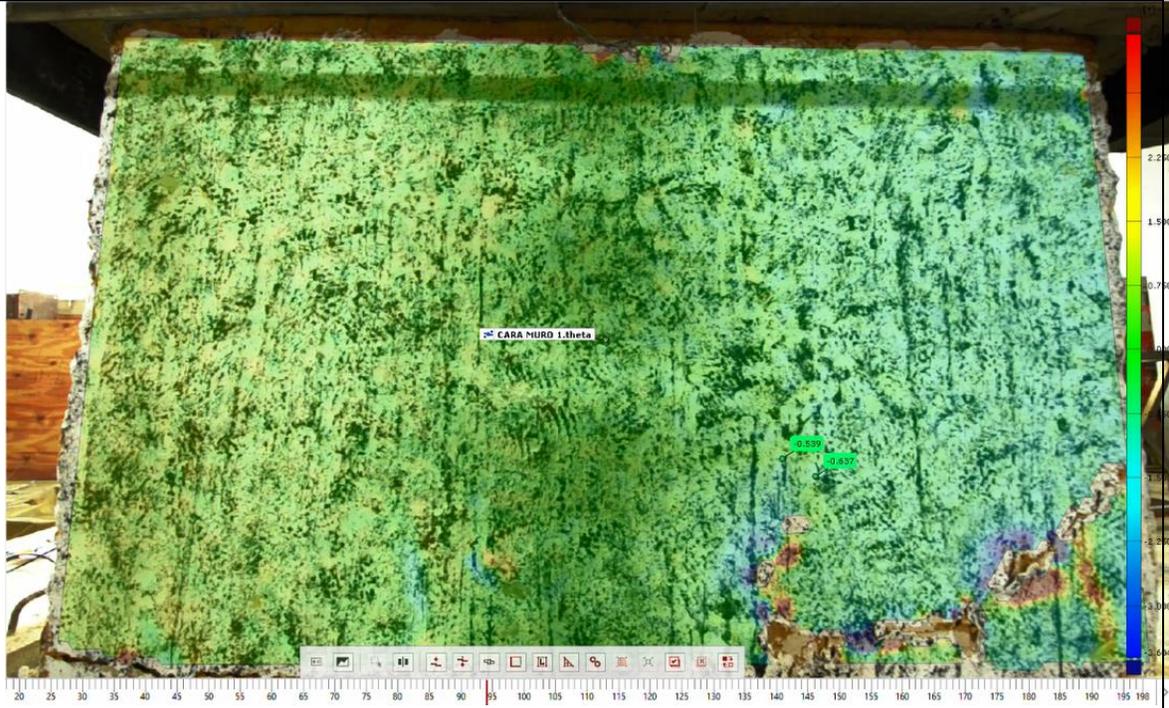


Figura 80. Estado del muro a $3 \frac{3}{4}$ de ciclo. 108 s.
Grieta derecha más abierta.

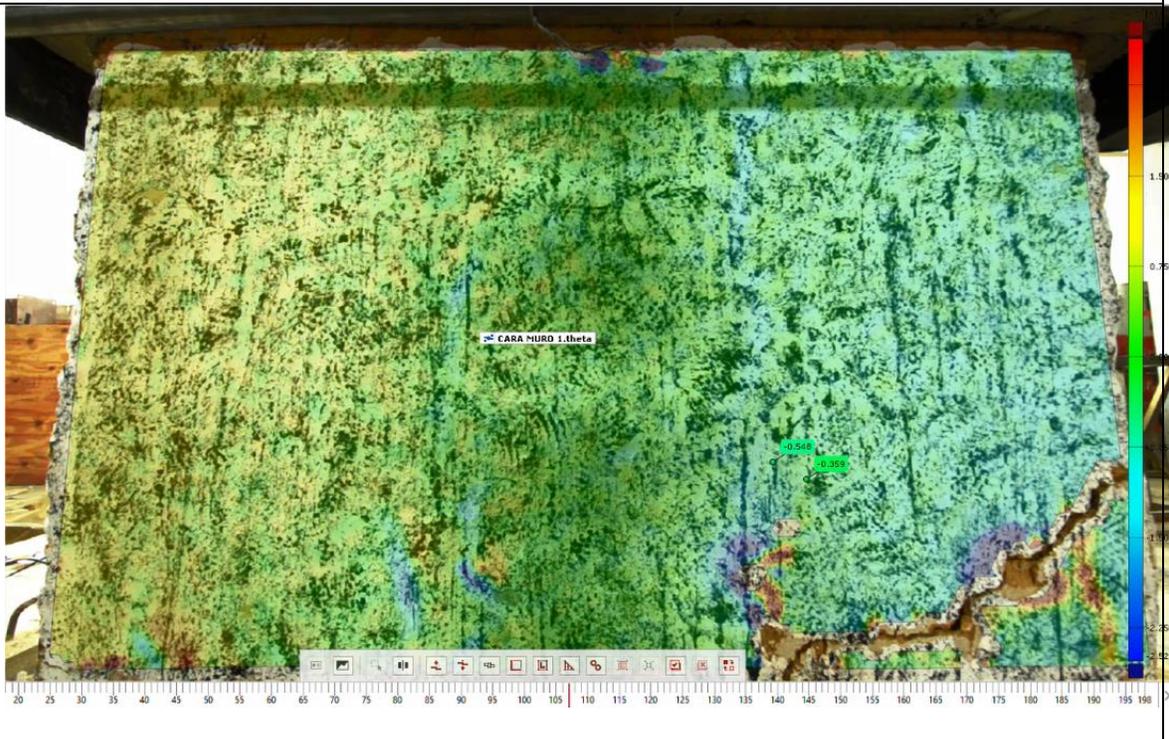


Figura 81. Estado del muro a $4 \frac{1}{4}$ de ciclo. 123 s.
Cara derecha a compresión. Grieta izquierda más abierta.

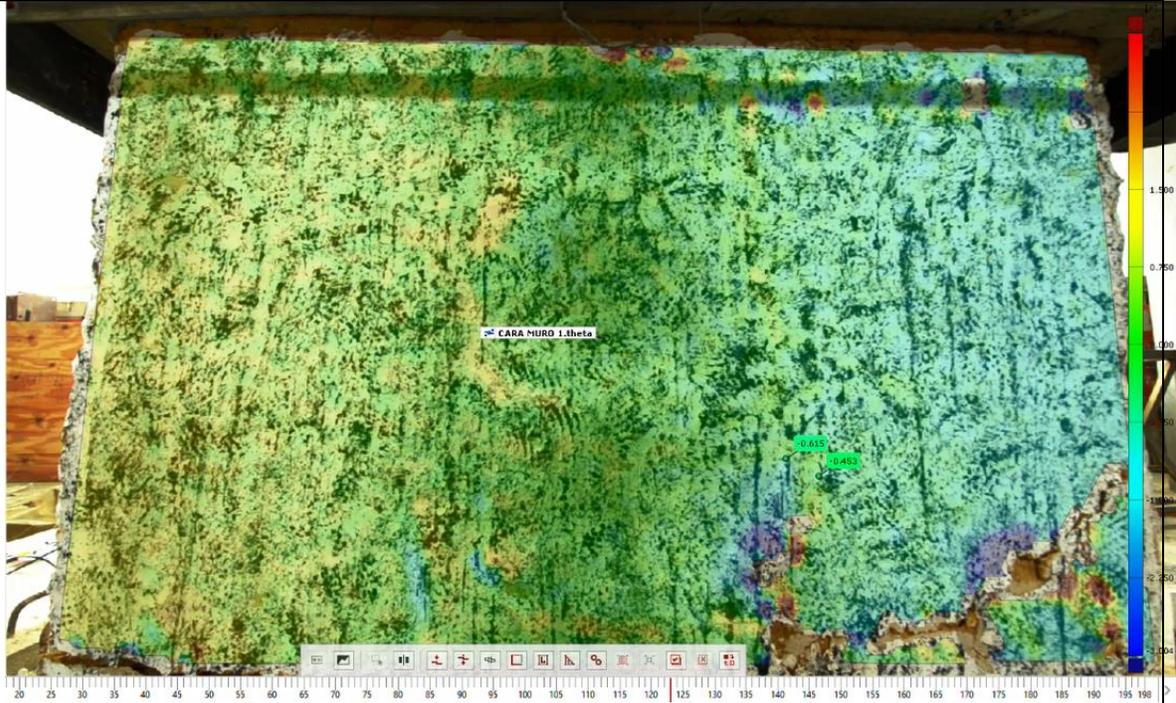


Figura 82. Estado del muro a $4 \frac{3}{4}$ de ciclo. 138 s.
Aparecen otras grietas.

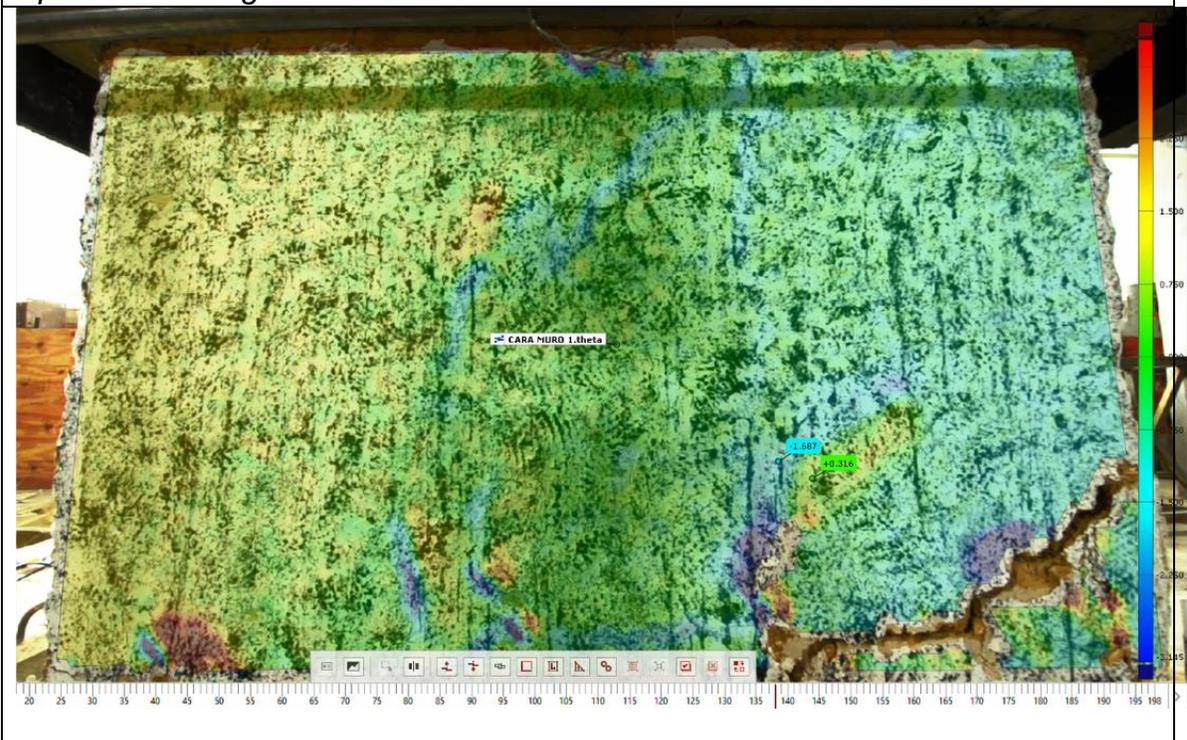


Figura 83. Estado del muro a $5 \frac{1}{4}$ de ciclo. 153 s.
Cara derecha a compresión. Grieta izquierda más abierta.

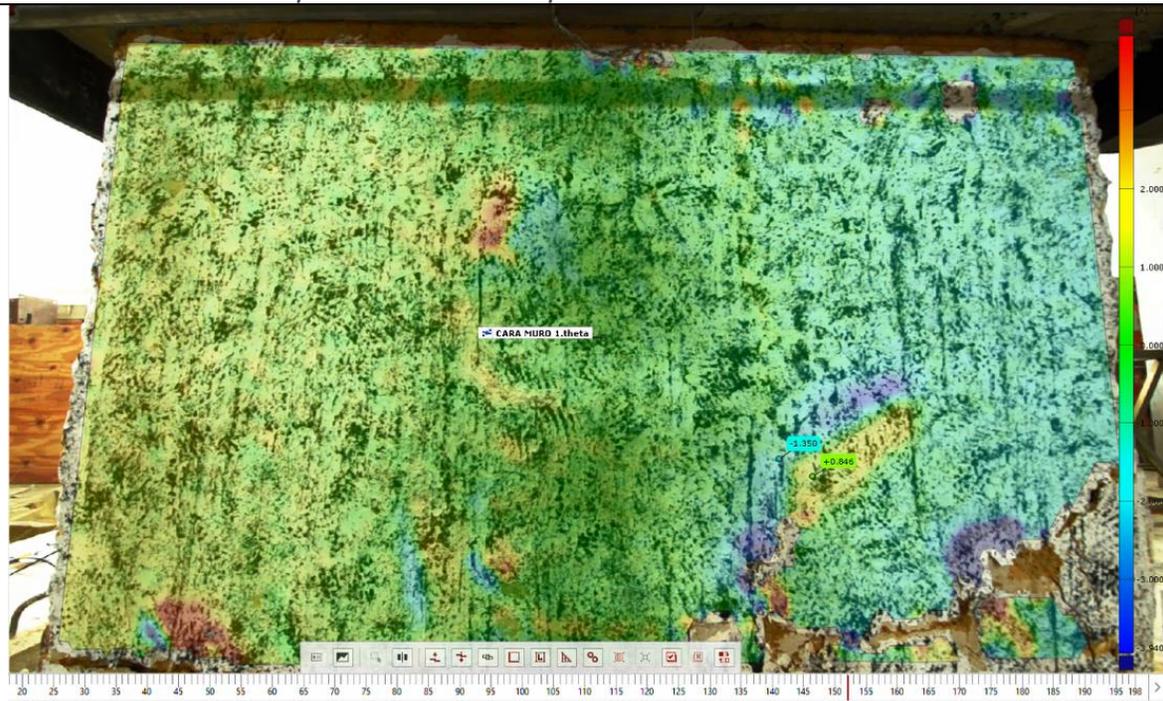


Figura 84. Estado del muro a $5 \frac{3}{4}$ de ciclo. 168 s.
Se prolongan las otras grietas

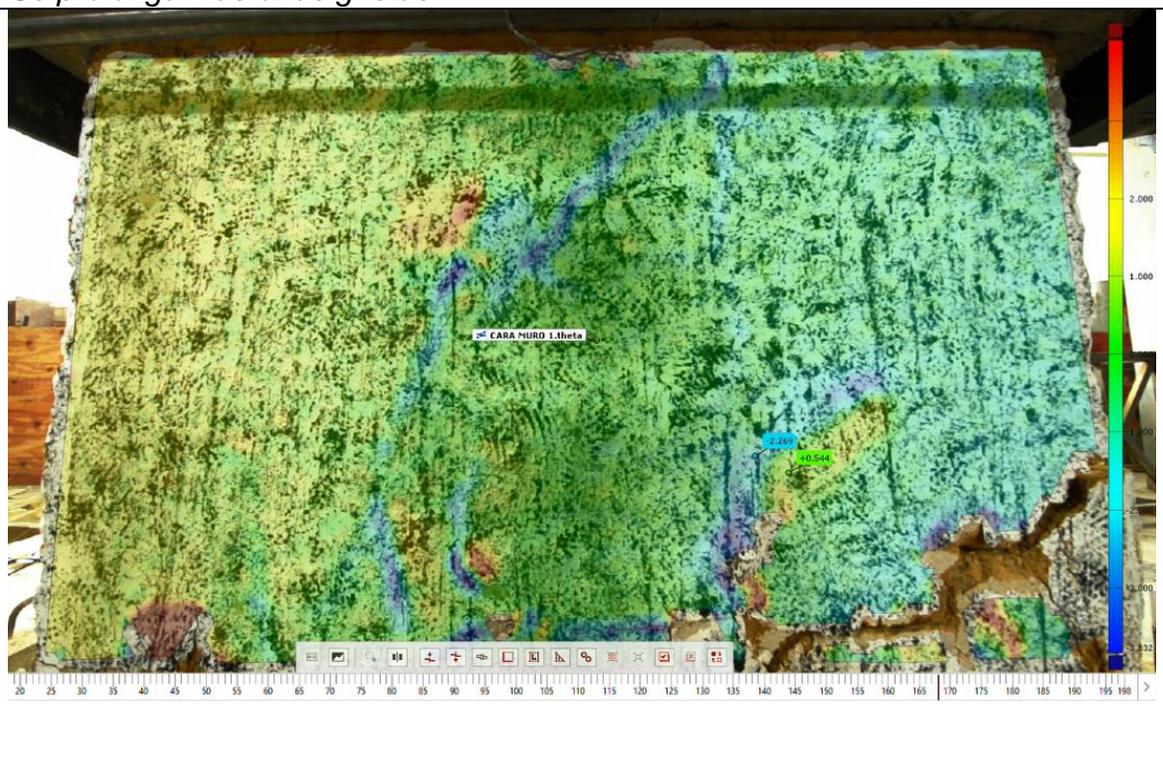


Figura 85. Estado del muro a $6 \frac{1}{4}$ de ciclo. 183 s.
Cara derecha a compresión. Grieta izquierda más abierta.

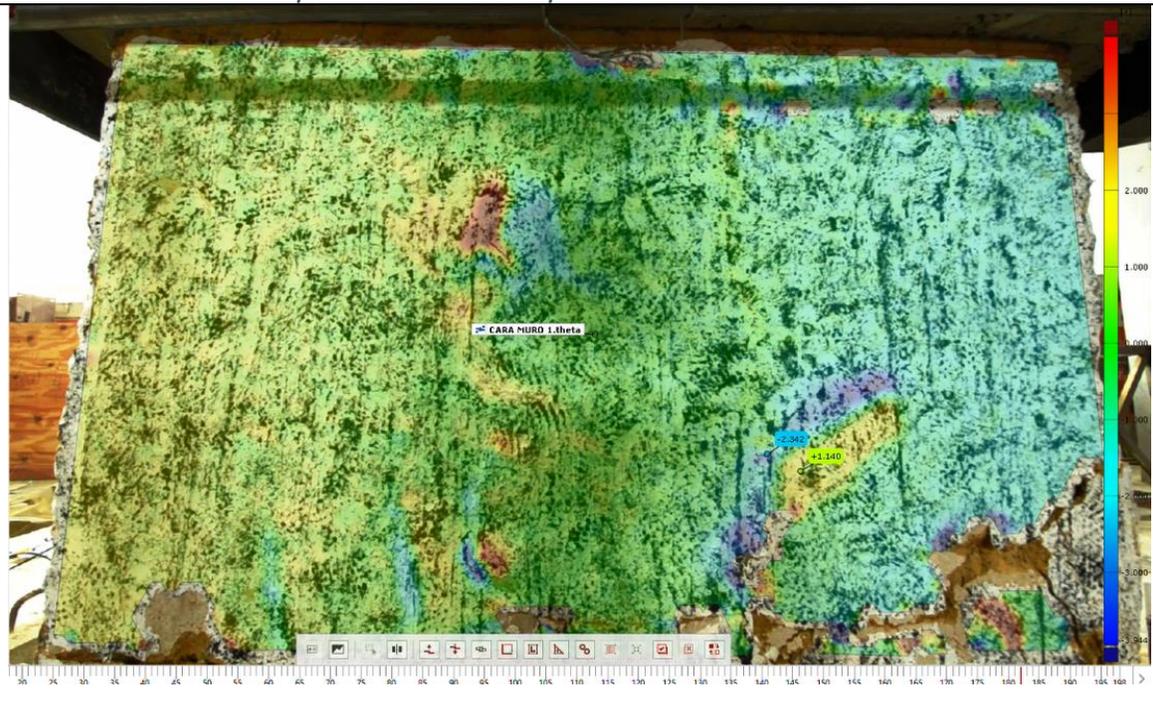
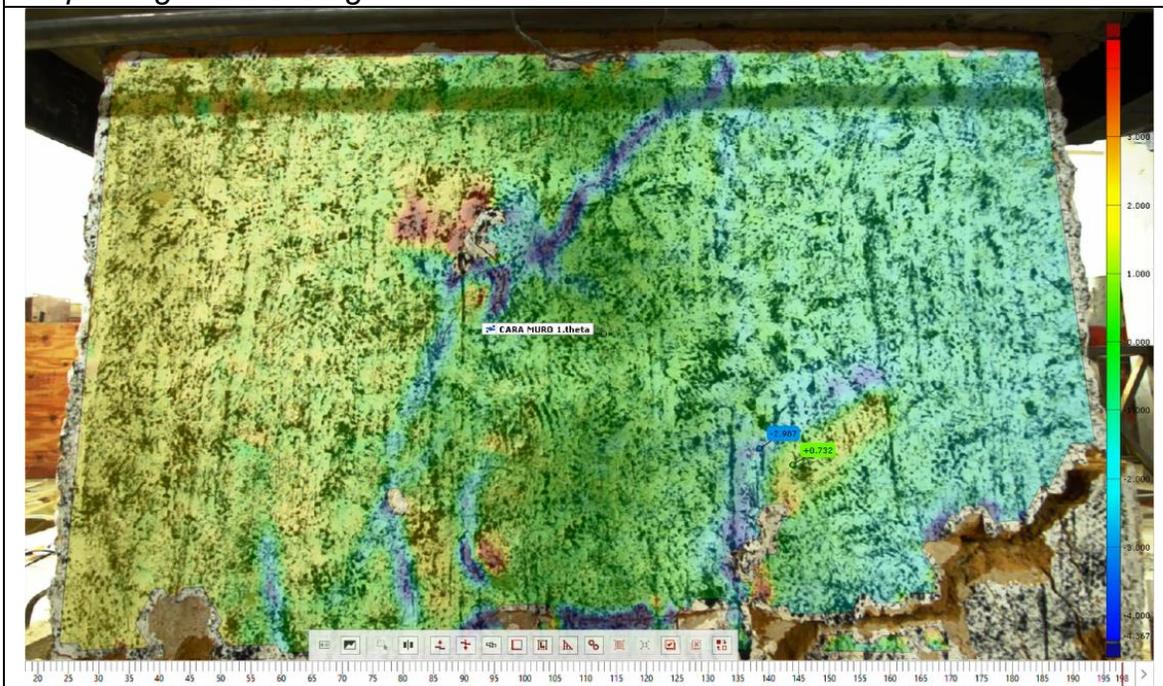


Figura 86. Estado del muro a $6 \frac{3}{4}$ de ciclo. 198 s.
Se prolongan las otras grietas



En las Figuras 87 y 88 se muestran el ciclo de histéresis de la carga horizontal y el correspondiente desplazamiento de la viga corona, obtenidos de las curvas cíclicas para cada paso de carga. Las gráficas muestran tanto la parte de tensión como la de compresión de las curvas cíclicas.

Figura 87. Ciclos de histéresis para el muro de tapia

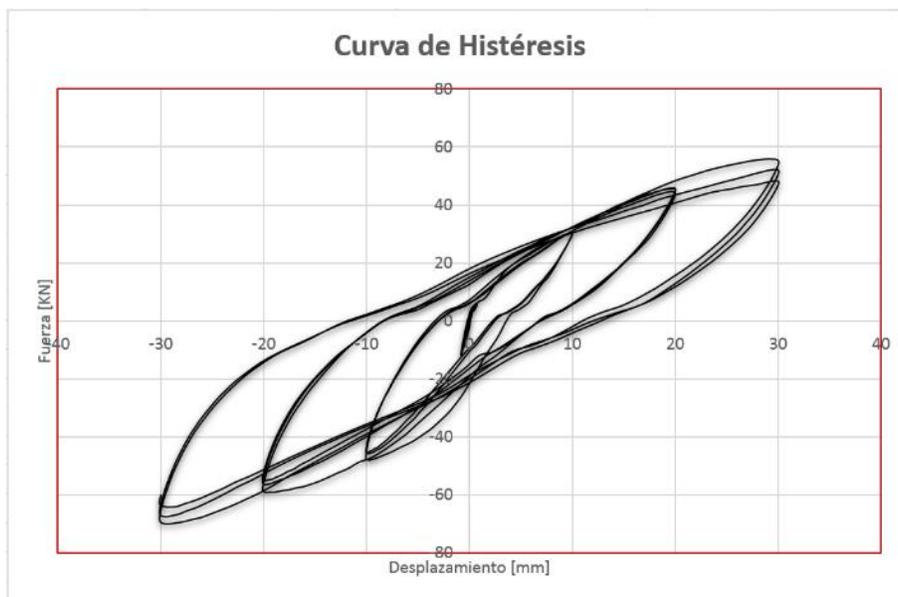
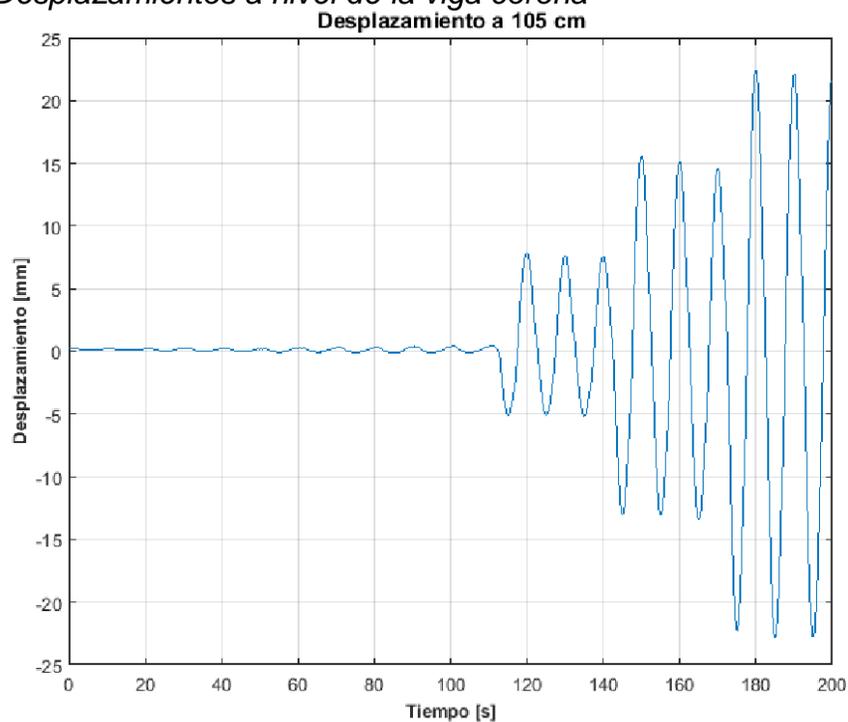


Figura 88. Desplazamientos a nivel de la viga corona



5.10.1.3. Comportamiento del muro en Tapia Pisada reforzado

En el muro en tapia pisada conectado con una pantalla de concreto reforzado, bajo el aumento progresivo de la carga horizontal se presentó el comportamiento del muro de tapia que se puede apreciar en la secuencia de fotos, Figuras 89 a 98.

Figura 89. Estado del muro a los 195 s.

Observación: Cara izquierda a tracción. No se aprecia alteración del muro.

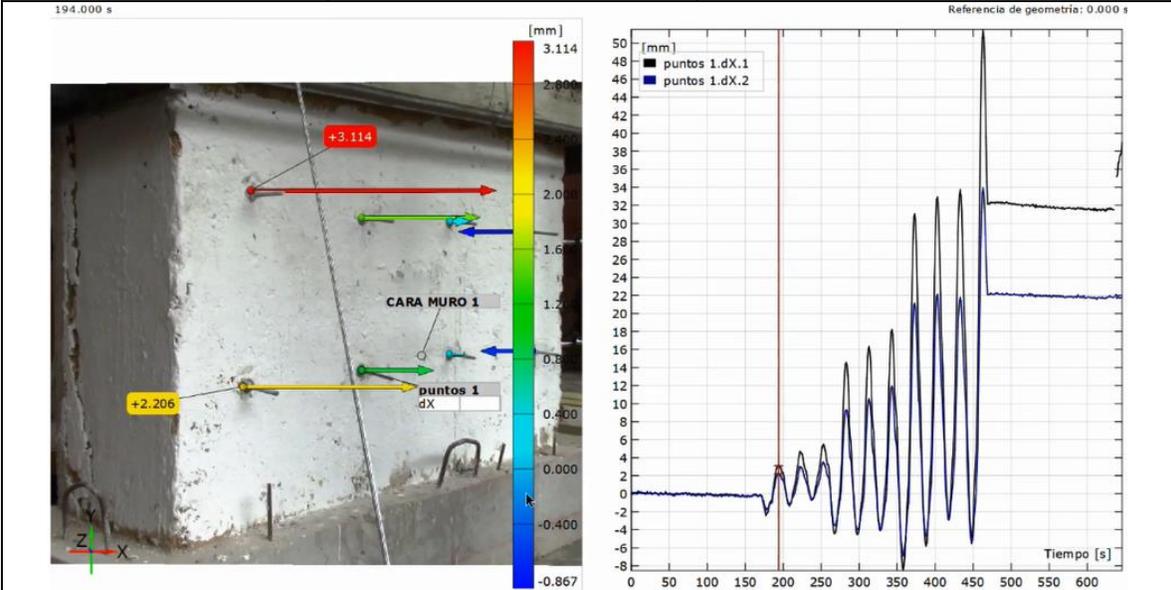


Figura 90. Estado del muro a 225 s

Observación: Cara izquierda a tracción. No se aprecia alteración del muro.

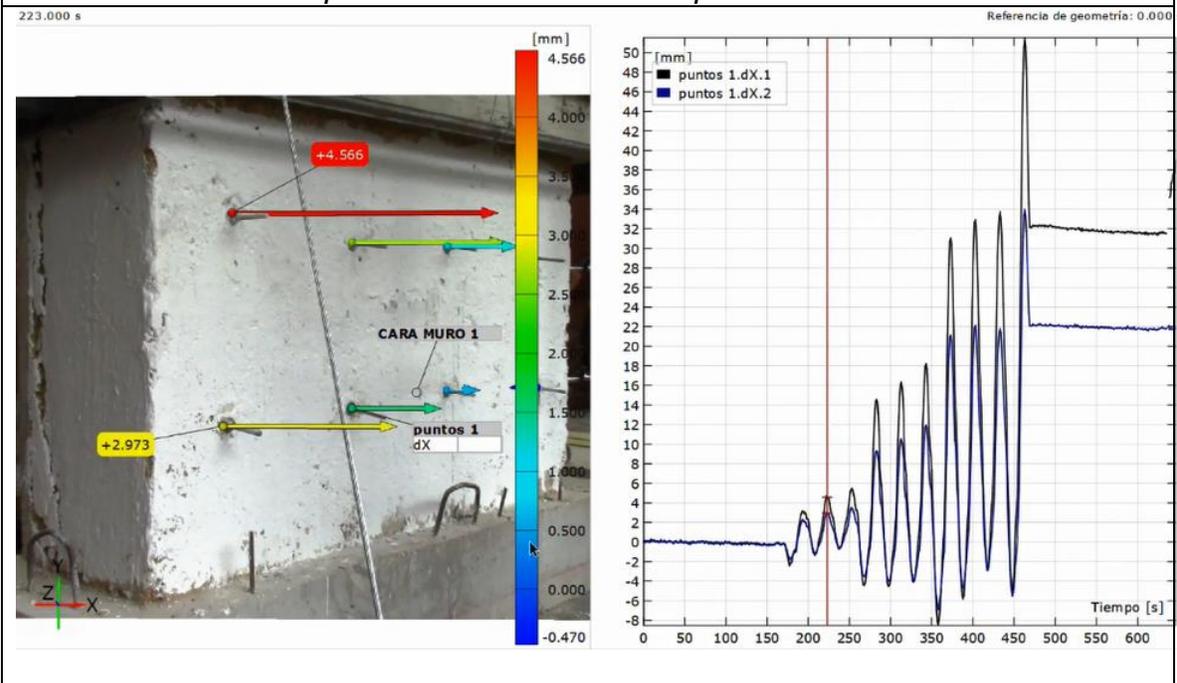


Figura 91. Estado del muro a 255 s

Observación: Cara izquierda a tracción. No se aprecia alteración del muro.

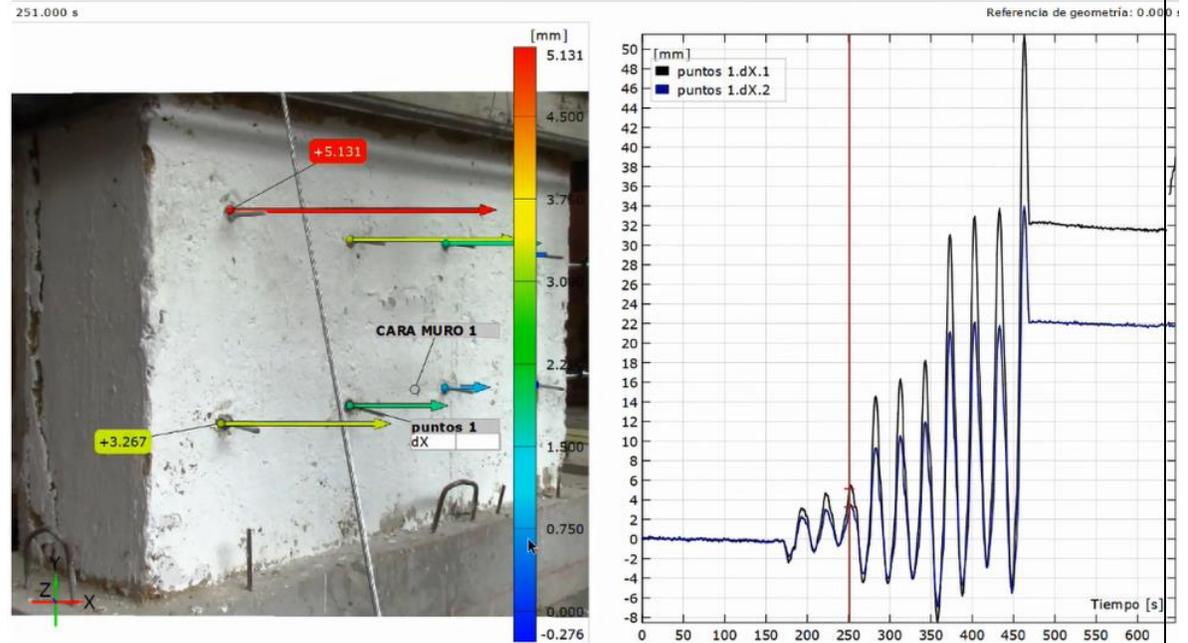


Figura 92. Estado del muro a 285 s

Observación: Cara izquierda a tracción. Se observa una tímida grieta en la esquina izquierda.

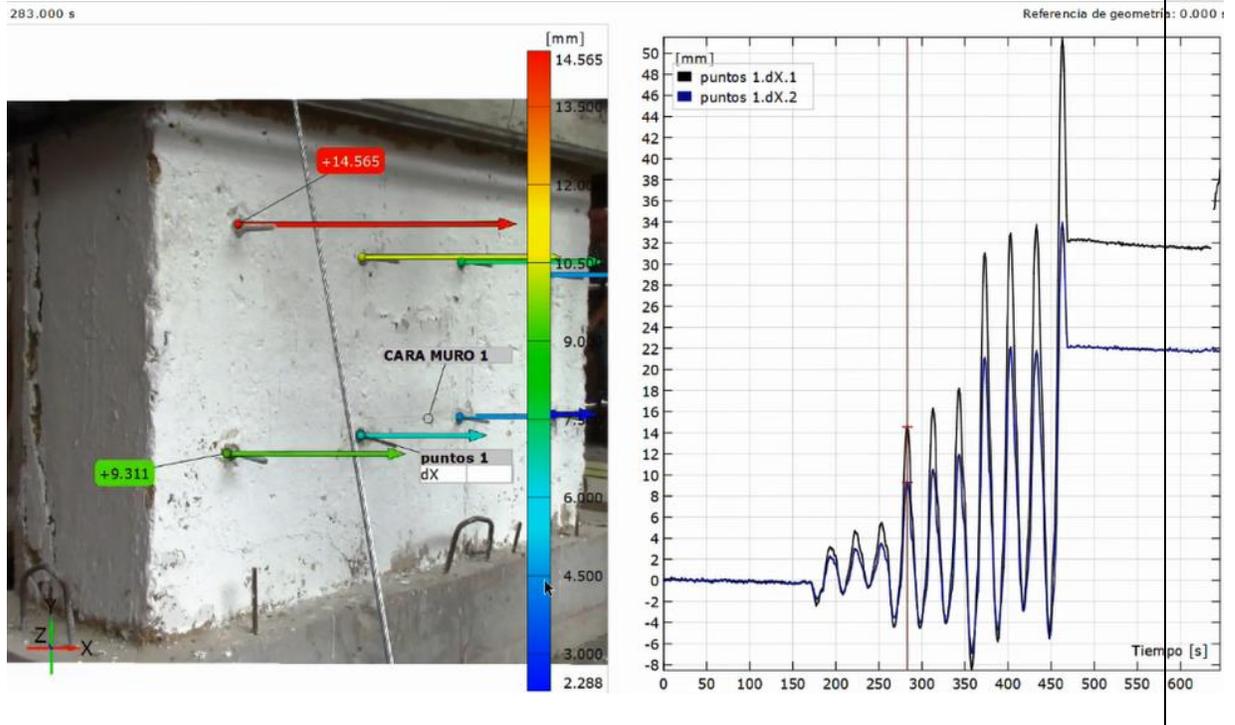


Figura 93. Estado del muro a 315 s

Observación: Cara izquierda a tracción. La grieta de la izquierda se abre un poco más. En este punto, se observa que el muro de concreto se ha desprendido de su base-

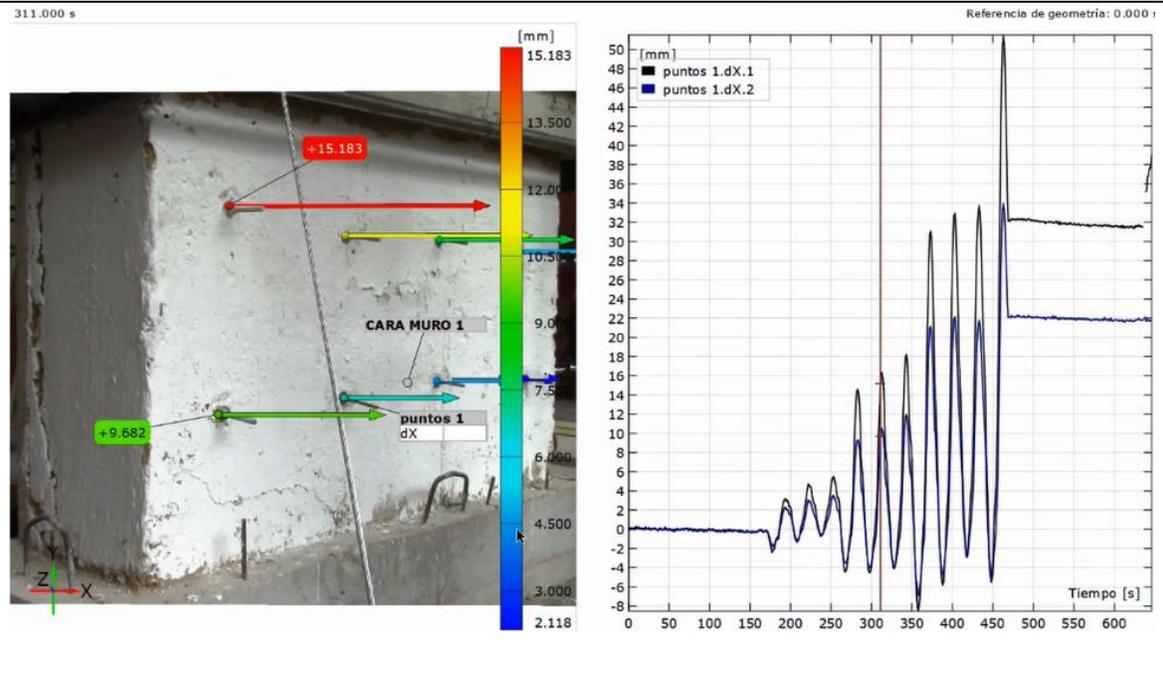


Figura 94. Estado del muro a 345 s

Observación: Cara izquierda a tracción. Continúa la grieta en su proceso de apertura, causada por la falla del anclaje del muro de concreto

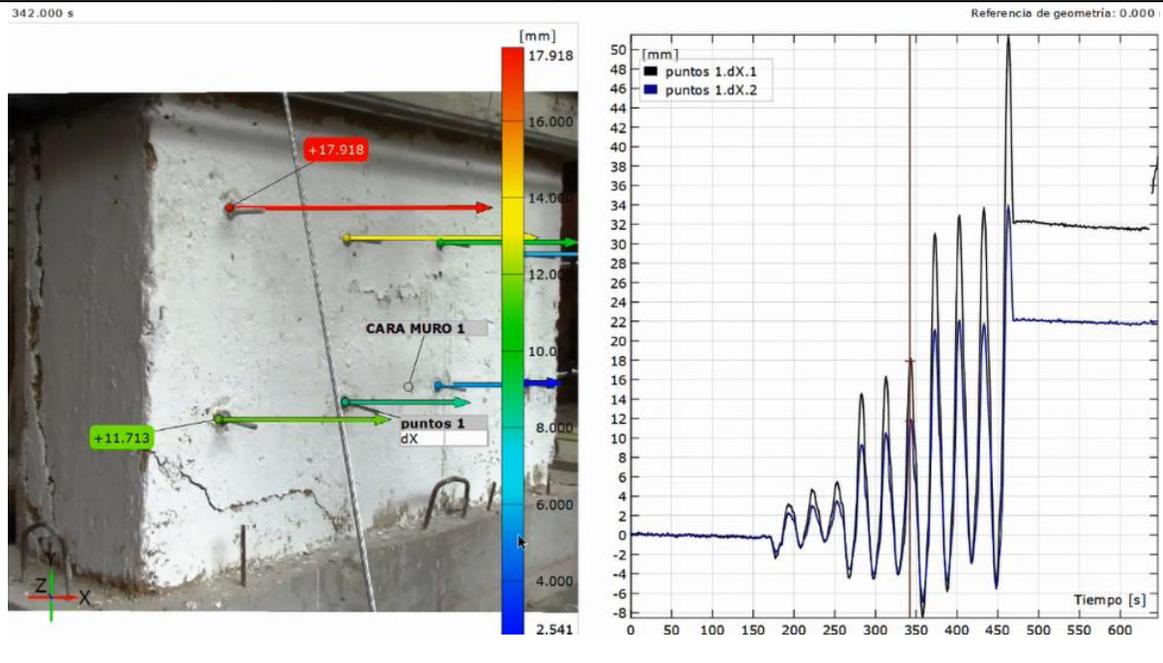


Figura 95. Estado del muro a 375 s
Observación: Cara izquierda a tracción.

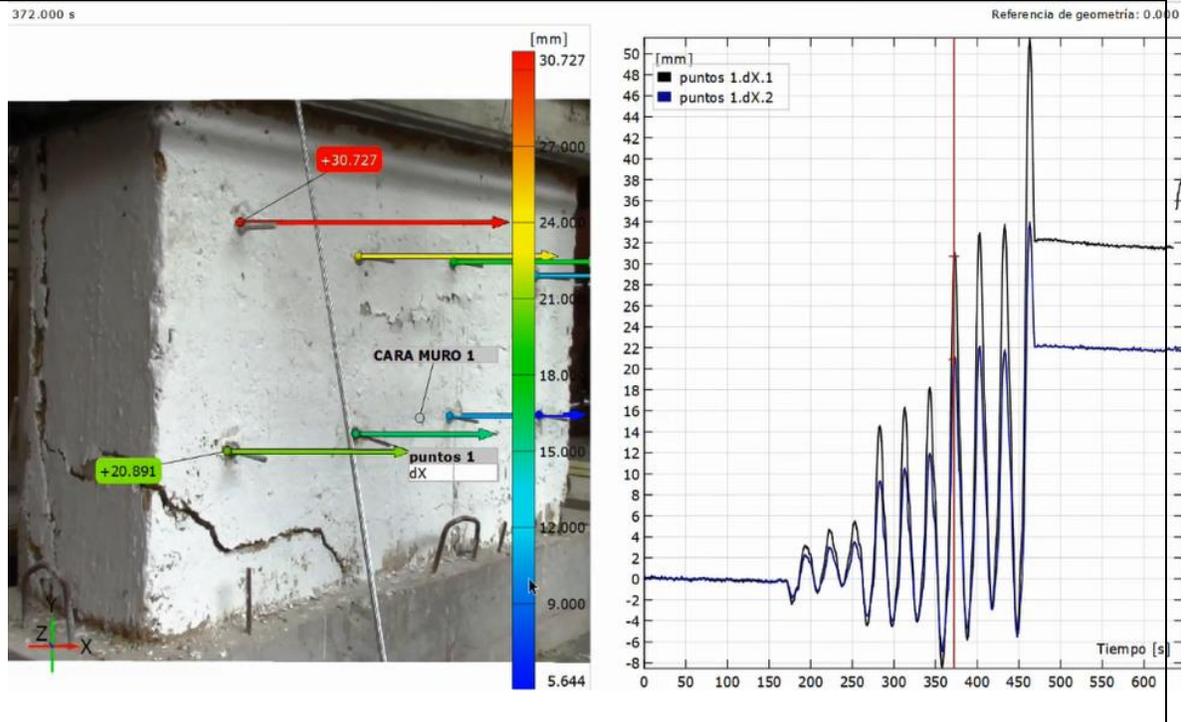


Figura 96. Estado del muro a 405 s
Observación: Cara izquierda a tracción.

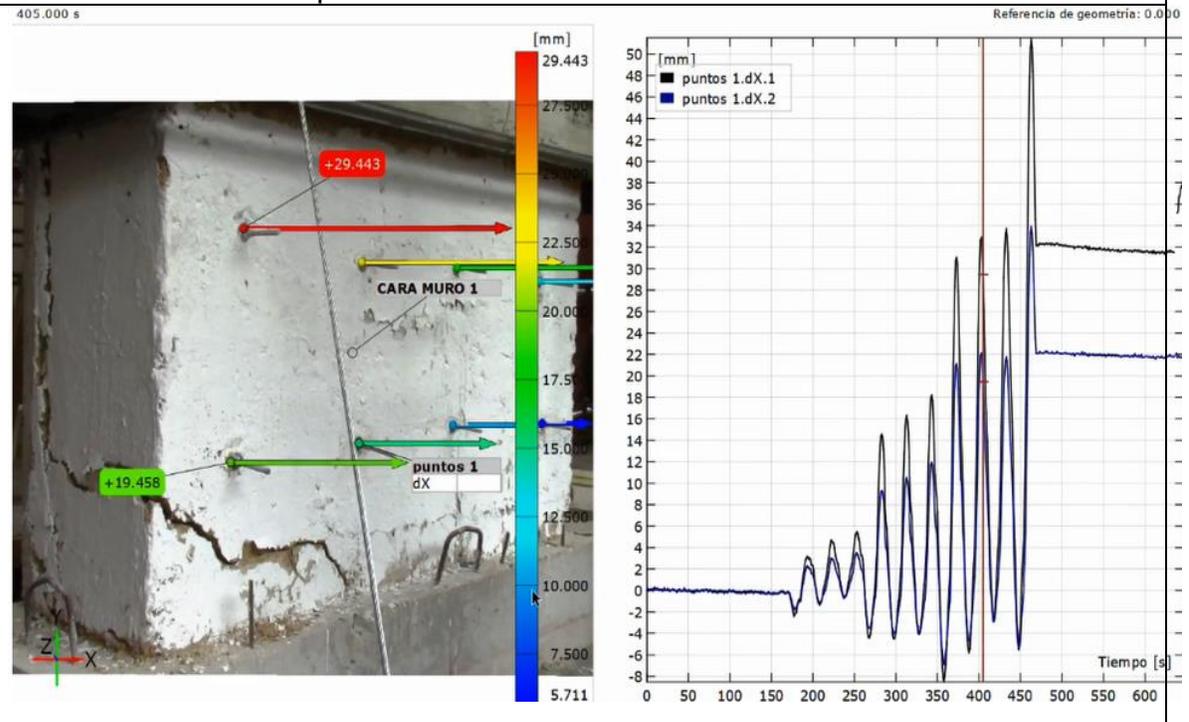


Figura 97. Estado del muro a 435 s

Observación: Cara izquierda a tracción.

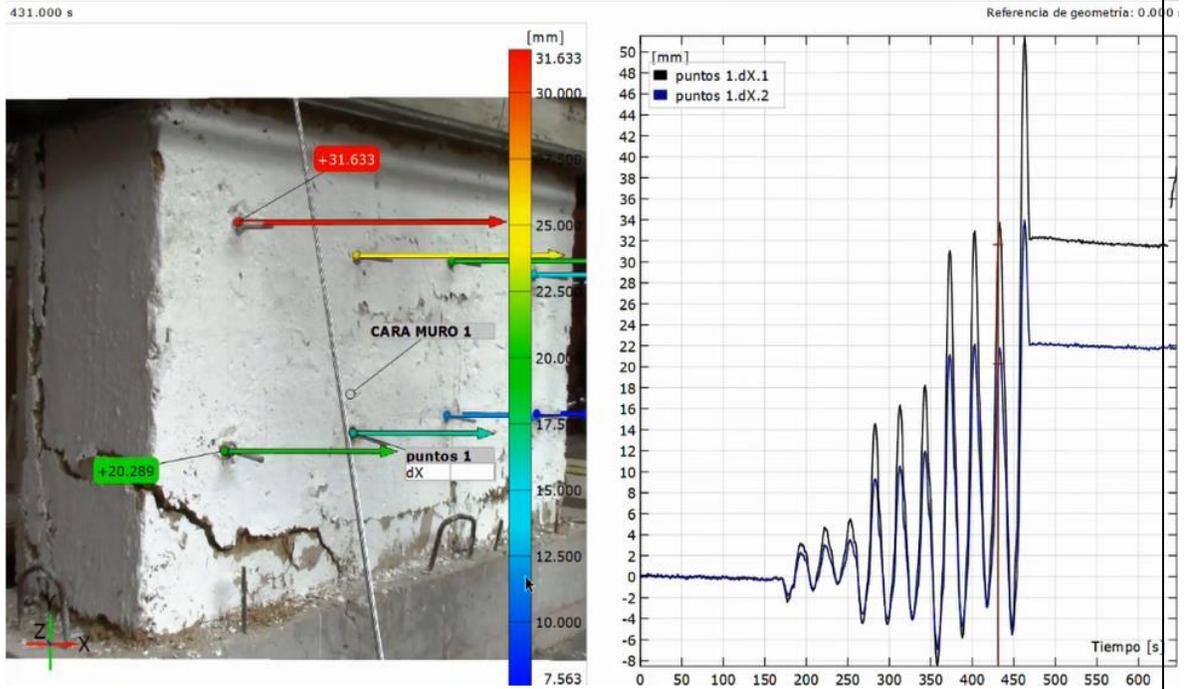
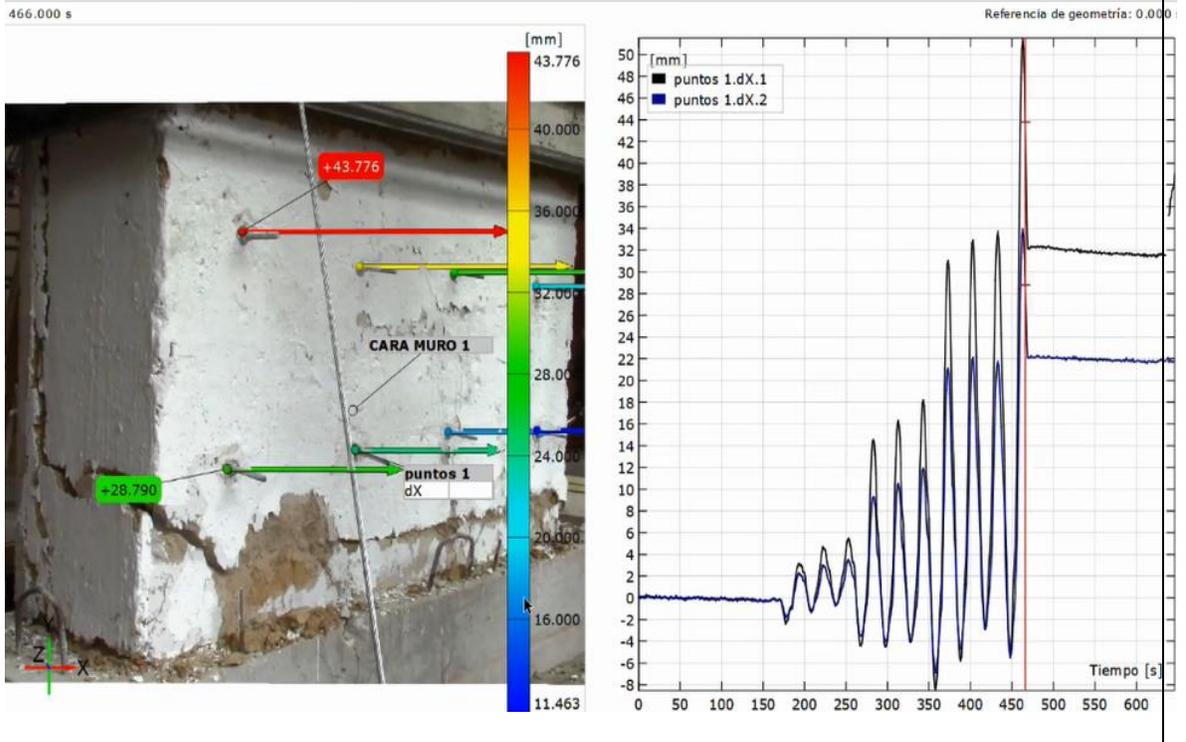


Figura 98. Estado del muro a 465 s
Observación: Cara izquierda a tracción.



En las Figuras 99 y 100 se muestran el ciclo de histéresis de la carga horizontal y el correspondiente desplazamiento de la viga corona para el caso del muro reforzado, obtenidos de las curvas cíclicas para cada paso de carga. Las gráficas muestran tanto la parte de tensión como la de compresión de las curvas cíclicas.

Figura 99. Ciclos de histéresis para el muro de tapia reforzado

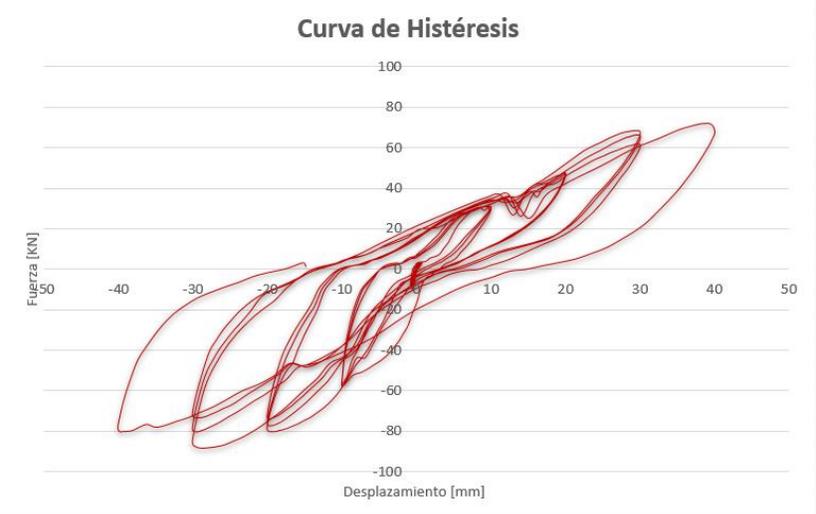
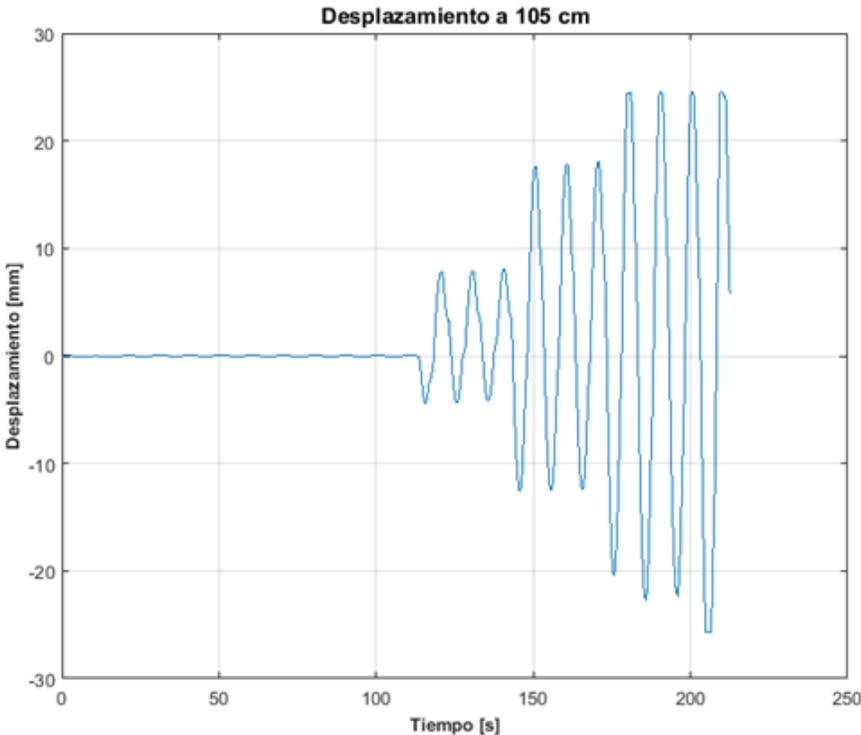


Figura 100. Desplazamientos a nivel de la viga corona en el muro de tapia reforzado

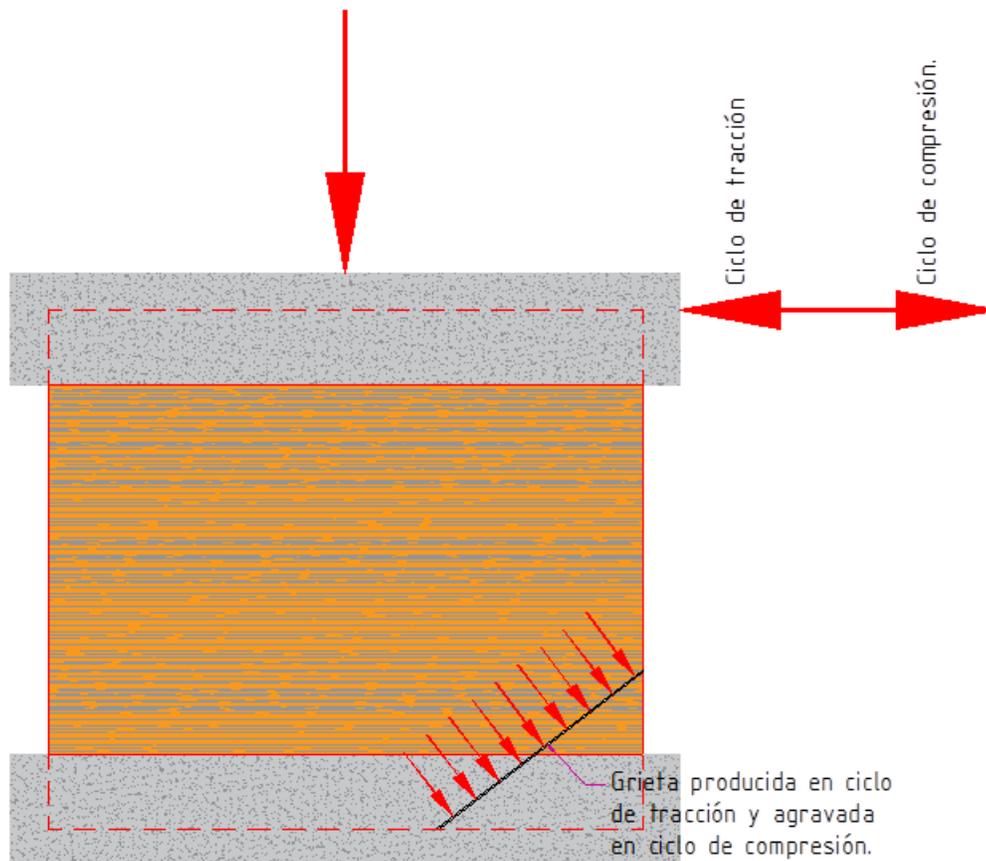


5.11. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.11.1. Muro de Tapia Pisada

Se presentaron grietas típicas de falla a tracción, en las esquinas inferiores, tanto del lado correspondiente al actuador, como del lado opuesto al mismo (Fig. 72). Estas grietas tienden a ser perpendiculares a la diagonal, en cada caso y se agravan cuando el lado correspondiente está a compresión. Es decir, la falla a tracción crea una cuña desprendida del resto del muro que es empujada en cada ocasión en que la zona de la grieta está sometida a compresión. Esto se ha tratado de mostrar esquemáticamente en la Figura 101.

Figura 101. Esquema de mecanismo de falla presentado en el muro de tapia pisada



Por otro lado, se observa que la falla que se desarrolló en la esquina cercana al actuador apareció primero y alcanzó mayor dimensión que la de la esquina opuesta (inferior). Esto fue el resultado de lo expresado en la sección 5.3.7, referente a que

la acción de empuje del muro produce en el mismo una mayor deformación que la de halado, ya que esta última se transmite al muro a través de la platina lejana que está conectada a la máquina mediante los tensores que sufren deformación, pero de todas formas se observa que este comportamiento del muro expresado a través del agrietamiento sucede en ambas esquinas, como resultado del carácter cíclico de la carga aplicada.

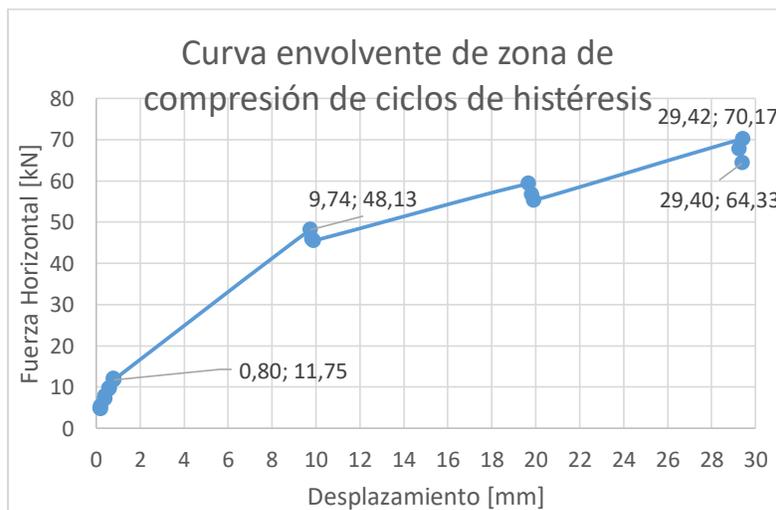
A partir de los 138 s, en que había sucedido $4 \frac{3}{4}$ ciclos (Fig. 82), se evidencian otras grietas casi paralelas que tienen el mismo sentido de la primera y que por lo tanto se puede decir que corresponden al mismo mecanismo de falla, es decir, que se producen en fase de tracción y se agravan en fase de compresión.

En la Figura 74, al comienzo del experimento, se observa un detalle interesante, unas grietas verticales que demarcan una zona central, parecieran ser unas grietas de compresión generadas por la carga vertical principal causada por el correspondiente actuador. Al parecer, el carácter puntual de esta carga no fue eliminado completamente por la viga corona. Sin embargo, esta situación fue desapareciendo en la medida en que la carga horizontal fue creciendo y tomando así importancia en el estado de esfuerzos en la masa del muro.

No aparecieron grietas diagonales que evidenciaran esfuerzos de flexión. El comportamiento de las grietas fue la típica de tracción y cortante.

La figura 102 muestra la gráfica de la curva envolvente para el caso en que la carga aplicada causa compresión en la cara izquierda del muro, es decir, el embolo del actuador empuja al muro. Los resultados de las pruebas muestran un $H_{m\acute{a}x}$ del orden de 49,1 kN y un $d_{m\acute{a}x}$ del orden de 19,587.

Figura 102. Curvas Cortante-Compresión contra desplazamiento de muro de tapia pisada



De esta gráfica, en conjunto con las fotos mostradas en las Figuras 73 a 86, se extraen los puntos mostrados en la Tabla 7.

Corrientemente el comportamiento estructural de un elemento permite definir cuatro estados límites. El límite de comportamiento lineal, el límite de comportamiento elástico, corrientemente denominado de agrietamiento porque sucede cuando aparecen las primeras grietas, el límite de carga máxima y el límite de carga última. Estos puntos para este tipo de material, con poca resistencia a la flexión, situación típica de los materiales no dúctiles como es el caso de la tierra y el concreto, pueden quedar reducidos a tres, teniendo en cuenta que el límite de comportamiento lineal se tiende a confundir con el de comportamiento elástico. Sin embargo, en este caso, combinando los recursos de observación del comportamiento durante de la prueba, en el que se pudo apreciar el momento de formación de la primera grieta, con el comportamiento de la curva, se han tratado de identificar estos cuatro puntos.

Tabla 7. Resultados de las pruebas en diferentes estados límites para el muro de tapia

Carga [kN]	Desplazamiento [mm]
$H_l = 11,75$	$\Delta_l = 0,80$
$H_t = 48,13$	$\Delta_t = 9,74$
$H_{m\acute{a}x} = 70,17$	$\Delta_{fm\acute{a}x} = 29,42$
$H_u = 64,33$	$\Delta_u = 29,40$

Donde:

H_l, Δ_l : Valores de H y Δ máximos con comportamiento lineal, hasta donde la variación H- Δ es lineal.

H_t, Δ_t : Valores de H y Δ máximos con comportamiento lineal, hasta donde aparezcan grietas a tracción.

$H_{m\acute{a}x}, \Delta_{m\acute{a}x}$: Valores de H máximo logrado por el muro y el correspondiente valor de Δ .

H_u, Δ_u : Valores de H y Δ últimos .

La primera no-linealidad ocurrió en los desplazamientos del orden de 0,388 mm debido a la primera grieta por tracción en las esquinas inferiores (límite de agrietamiento a tracción, H_t, Δ_t). Las primeras grietas fueron determinadas por medio

de una observación cualitativa de la superficie del muro después de cada etapa de desplazamiento y las deformaciones fueron monitoreadas por el sensor ubicado en la viga corona.

De la curva también se puede apreciar un segundo punto importante, que es donde la pendiente varía abruptamente y se observa una discontinuidad en la misma, produciéndose inclusive un tramo de pendiente negativa. Este punto podría ser catalogado como el límite elástico (H_t , d_t). La discontinuidad denota la aparición repentina de una grieta, que disminuye el momento de inercia de la sección horizontal, degradando en esa forma la resistencia a la flexión y al cortante. Las deformaciones fueron monitoreadas por el sensor ubicado en la viga corona.

Posteriormente, con el aumento gradual de la carga se obtuvieron los valores máximos de carga ($H_{máx}$) y desplazamiento ($d_{máx}$). Estas condiciones representan el tercer estado límite y está caracterizado por la formación de una cuña en la esquina empujada por un puntal de compresión en los momentos en que el sentido de la carga lo permite.

Finalmente, se tienen los valores de carga y desplazamiento en los cuales se aprecia una degradación de la resistencia, antes de llegar al desplazamiento experimental máximo y al colapso.

Para interpretar adecuadamente la curva de histéresis hay que tener en cuenta que el semiciclo desarrollado en los cuadrantes 2 y 3, abcisas negativas, corresponde al movimiento del émbolo en el sentido de empujar al muro. Eso explica porqué los valores de Fuerza aplicada y desplazamiento son mayores en el cuadrante 3 que en el cuadrante 1. Todo eso atendiendo la explicación dada en la Sección 5.3.6, ya que al halar al muro, la acción se ejerce a través de los tensores y la platina, que sufren algo de deformación, causando así una menor deformación en el muro y, por lo tanto, una menor carga sobre él.

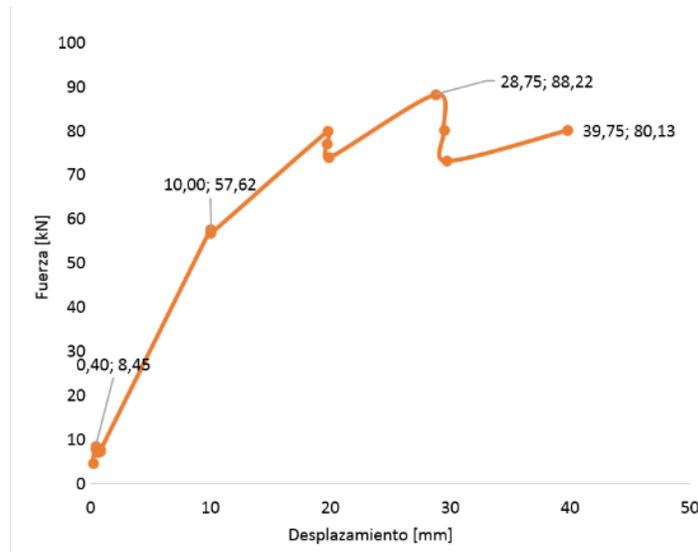
5.11.2. Muro de Tapia Pisada reforzado

Antes de hacer el análisis de lo observado en este muro, es importante precisar que el muro de concreto falló en su anclaje a la viga cimiento, hecho que se observó en el segundo 315, es decir que su falla fué anterior, posiblemente en el segundo 285, cuando se apreció lo que se llamó una tímida grieta (ver Figura 91). Esto quiere decir que el muro combinado no desarrolló toda su capacidad. Sin embargo, en la descripción que sigue se puede apreciar que lo que se logró desarrollar del ensayo muestra que los resultados son positivos.

Tal como se puede apreciar de las fotos, la falla del muro de tapia fue a tracción y fue causada por el desprendimiento del muro de concreto de la fundación.

La figura 103 muestra la gráfica de la curva envolvente para el caso en que la carga aplicada causa compresión en la cara derecha del muro, es decir, el émbolo del actuador empuja al muro. Los resultados de las pruebas muestran un $H_{m\acute{a}x}$ del orden de 88,22 kN y un $d_{m\acute{a}x}$ del orden de 28,75 mm.

Figura 103. Curvas Cortante-Compresión contra desplazamiento de muro de tapia pisada reforzado



De esta gráfica, en conjunto con las fotos mostradas en las Figuras 88 a 97, se extraen los puntos mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de las pruebas en diferentes estados límites del Muro de Tapia Reforzado

Carga [kN]	Desplazamiento [mm]
$H_l = 8,45$	$\Delta_{l1} = 0,40$
$H_t = 57,62$	$\Delta_t = 10,00$
$H_{m\acute{a}x} = 88,22$	$\Delta_{m\acute{a}x} = 28,75$
$H_u = 80,13$	$\Delta_u = 39,75$

Las cargas desarrolladas por el muro reforzado en relación con las obtenidas por el muro de tapia solo, en cada uno de los estados límites, lograron una mejoría que se puede observar en la Tabla 9.

5.11.3. Análisis comparativo de los muros

Esta comparación se llevará a cabo a través de los resultados obtenidos en laboratorio. Para el efecto se muestra a través de la figura 104 las curvas Carga-Deformación de los dos muros.

Figura 104. Curvas Cortante-Compresión contra desplazamiento de los muros de tapia pisada y tapia pisada reforzado

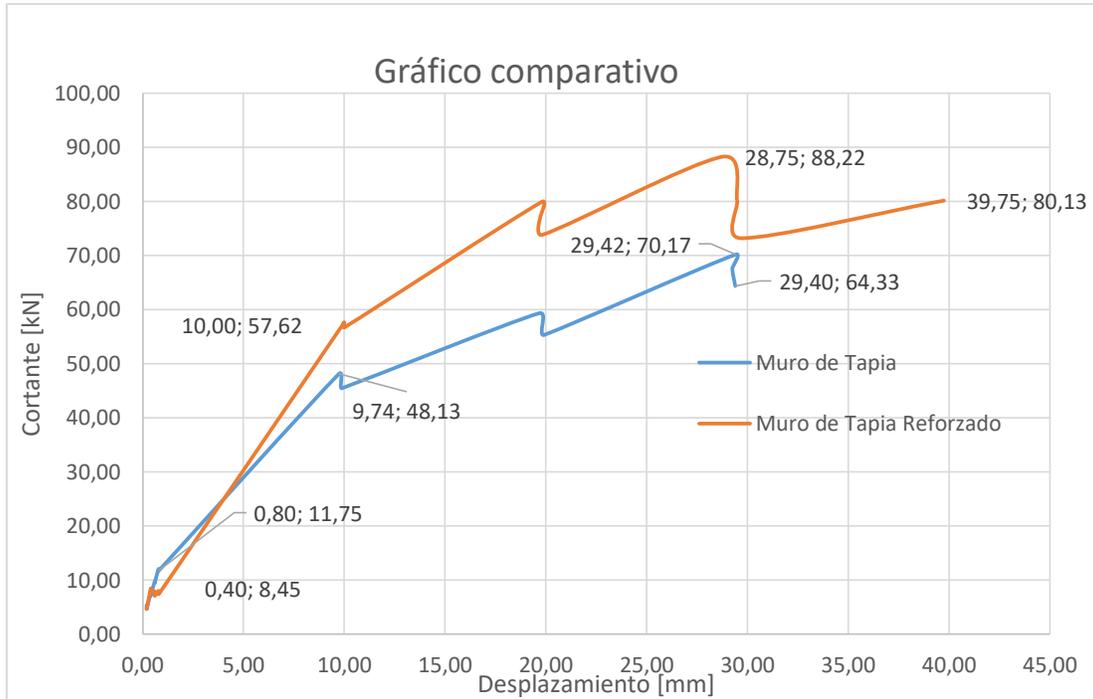


Tabla 9. Tabla comparativa de resultados de las pruebas en diferentes estados límites de cada muro

Límite	Muro en Tapia sola	Muro en Tapia-Concreto	Aumento en capacidad
Lineal	11,75 kN	8,45 kN	-28,1%
Elástico o de Agrietamiento	48,13 kN	57,62 kN	19,7%
Carga Máxima (*)	70,17 kN	88,22 kN	25,7%
Carga Última (*)	64,33 kN	80,13 kN	24,6%

(*): Es importante tener en cuenta que estos bajos valores en el incremento de capacidad del muro reforzado en relación con el no reforzado, en estos límites, se debe al desprendimiento del muro de concreto de su base.

A excepción del punto del límite lineal, todos los demás límites muestran un aumento en la capacidad del muro reforzado. El menor valor del límite lineal del muro reforzado es un hecho que merece una investigación más extensa para determinar si se trata de un caso fortuito o si corresponde a la naturaleza del comportamiento del concreto, porque la realidad es que el comportamiento posterior de las probetas muestra el aporte positivo que la capa de concreto añadida al muro significa para el mismo.

5.11.4. Sobre los esfuerzos y las deformaciones

Teniendo en cuenta que en el transcurso de este trabajo se han obtenido resultados provenientes de varias fuentes, es la intención mostrar una comparación entre ellos.

5.11.4.1. Muro de tierra

Tabla 10. Comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos para el muro de tierra

	CÁLCULO NUMÉRICO	CÁLCULO NTCM-2004	CÁLCULO MANUAL	ENSAYOS
En la base del muro				
Esfuerzo Máximo de Tracción (MPa)	0,12	0,01*	0,42*	0,07*
Esfuerzo Máximo de compresión (MPa)	0,14	0,13*	0,56*	0,07*
En la corona del muro				
Esf. Mínimo de compresión (MPa)	0,03	**	**	**
Esf. Máximo de compresión (MPa)	1,38	**	**	**
Otros				
F máx. Horizontal en comportamiento elástico (N)	54000.	9498,00	81156,00	48130,00
Desplazamiento elástico (mm)	0,04	**	5,00	9,74

(*) Estos valores han sido calculados en proporción a la carga horizontal y determinando el momento de inercia de la sección no agrietada.

(**) En estos casos no se cuenta con la información

5.11.4.2. Muro de Tierra-Concreto

Tabla 11. Comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos para el muro de Tierra-Concreto

	CÁLCULO MANUAL	ENSAYOS
En la base del muro		
Esfuerzo Máximo de Tracción (MPa)	1,10*	0,05*
Esfuerzo Máximo de compresión (MPa)	1,24*	0,05*
En la corona del muro		
Esf. Mínimo de compresión (MPa)	**	**
Esf. Máximo de compresión (MPa)	**	**
Otros		
F máx. Comportamiento elástico (N)	191450,00	57620,00
Desplazamiento elástico (mm)	0,30	0,40

(*) Estos valores han sido calculados en proporción a la carga horizontal y determinando el momento de inercia de la sección no agrietada.

(**) En estos casos no se cuenta con la información

En cuanto a la fuerza máxima de comportamiento elástico del muro de tierra, puede apreciarse que su valor, 48130 N, es muy parecido al estimado mediante el método numérico, 54 000 N, pero muy alejado del cálculo manual, 81 156 N, como también de la fórmula de la norma mejicana NTCM-2994, 9 498 N. Por otro lado, la deformación acusada en este punto es muy diferente al del cálculo numérico, estando más cercano a este último punto el observado en el punto caracterizado como límite lineal, 0,40 mm.

Se observa también que los esfuerzos de compresión y tracción en las zonas en las que característicamente, estos muros son menos resistentes, son relativamente parecidos en los calculados para el ensayo, en proporción a la carga presente en el momento límite de comportamiento elástico, y el obtenido mediante el método numérico. Estos esfuerzos no fueron medidos en taller sino calculados, con base en la carga medida en dicho punto de la curva.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El reforzamiento de los muros de tapia pisada con pantallas de concreto acopladas al mismo mediante pasadores de acero es técnicamente factible.
- Aún teniendo en cuenta que el ensayo del muro reforzado no desarrolló toda su potencialidad, por la falla que presentó por falta de anclaje en la viga base, del refuerzo del muro de concreto, La resistencia al cortante mostró una mejora de aproximada en al menos un 20% a nivel del punto de comportamiento lineal y 25% en los correspondientes puntos de carga máxima y carga última.
- En futuras investigaciones en este sentido, hay que acentuar la atención en el anclaje del refuerzo de la pantalla de concreto, especialmente el colocado en los bordes anterior y posteriores de la misma, en el sentido de la carga horizontal. Los muros de concreto deben ser anclados adecuadamente al cimiento con el fin de que puedan desarrollar toda su potencialidad.
- La combinación simbiótica Muro de tapia-Pantalla de concreto permite que el muro de tapia siga aportando su capacidad a resistir cargas verticales, incluyendo las de estas componentes de los sismos, y la pantalla se encargue de las cargas horizontales, principalmente provenientes de los sismos.
- En cuanto a la relación Costo-Beneficio de esta modalidad de reforzamiento, hay que recordar que el sesgamiento contenido en el nombre del proyecto “Reforzamiento Estructural Con Muros Estructurales De Edificios De Grupo De Uso II, III Y IV Construidos En Tapia Pisada” excluye la aplicación de esta técnica a las construcciones para viviendas, para las que hay soluciones posiblemente menos costosas. En cambio en los edificios correspondientes a los tipos de uso aludidos se encuentran las construcciones de vieja data consideradas como patrimonios nacionales y mundiales, cuyo valor económico solo puede ser tasado como consecuencia de este reconocimiento que la humanidad le ha transferido, pero también trayendo a valor presente los ingresos futuros que por concepto de la explotación turística, este bien inmueble puede significar. Tal como se acusa en la Introducción, en Colombia están registrados “1.133 Monumentos Nacionales y 47 Centros Históricos, de los cuales el 80% se encuentra construido en tierra”.

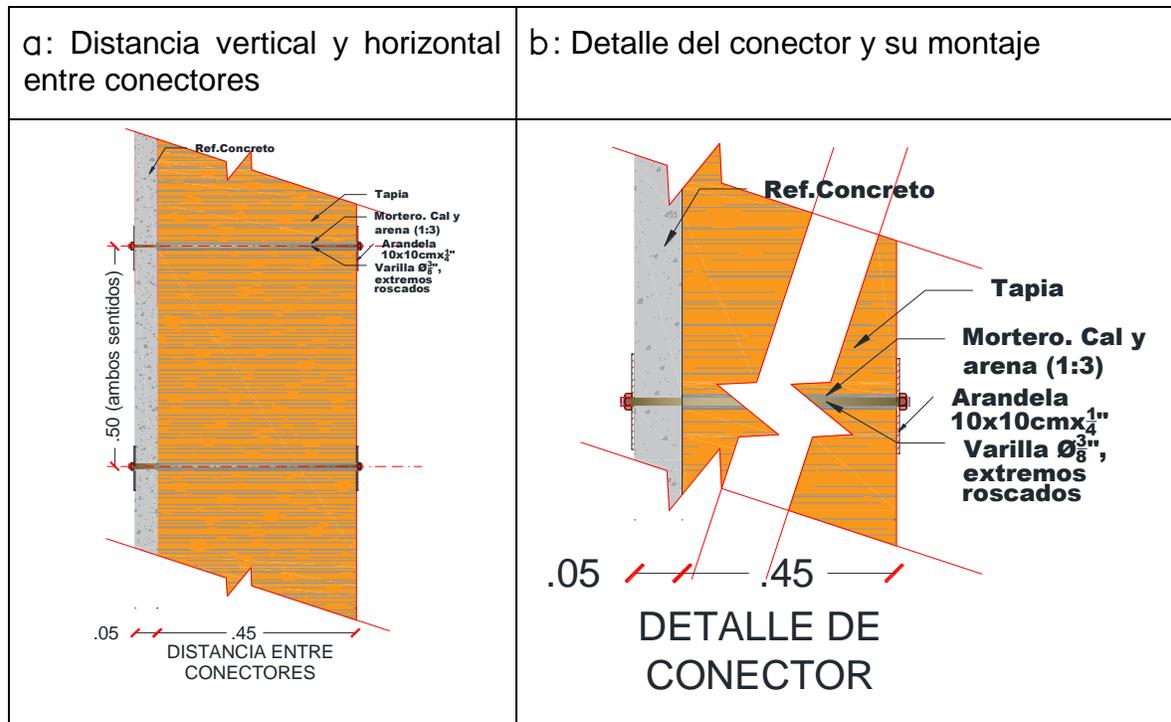
▪ Sobre los conectores

En la sección 5.3.6 se hizo una estimación del esfuerzo al que pueden estar sometidos los conectores en un momento de sismo. Con base en ese cálculo se muestra en la Figura 105 una propuesta de diseño, que fue la implementada en el laboratorio.

Durante el ensayo se observó el buen comportamiento de los conectores, sin embargo, ello no quiere decir que la propuesta utilizada sea la óptima, para llegar a ello deberá llevarse a cabo una investigación más exhaustiva y dedicada.

A continuación se muestran detalles sobre la propuesta:

Figura 105. Detalle de los conectores y su instalación



6.2. RECOMENDACIONES

- Se debe seguir con las investigaciones alrededor de este tema. Hay una gran necesidad a nivel mundial por cuanto gran cantidad de estos bienes están cobijados por acuerdos internacionales, liderados por la ONU, por constituir la memoria histórica de la humanidad, que se debe preservar. Pero, además, porque estos edificios pueden generar un beneficio a nuestra economía, a través del fomento al turismo y a la recreación contemplativa.
- Convendría profundizar sobre el tema del anclaje del muro de concreto al de tapia pisada, en cuanto a su diámetro y a la interdistancia entre ellos, con el fin de generar las mejores condiciones de acoplamiento.

- Se debe estudiar más en profundidad el tema del espesor de la capa de concreto, igual que su refuerzo.
- Sería conveniente que la viga corona sea de mayor rigidez o simular la carga vertical no mediante un actuador, sino con varios, por la dificultad para eliminar el efecto de concentración de carga con un solo actuador. Igualmente, el actuador vertical significa una restricción en el desplazamiento horizontal del extremo superior del muro.
- Sería conveniente que la prueba de laboratorio se hiciera no mediante actuadores sino en mesa vibratoria, por su mayor fidelidad en la simulación de las condiciones reales de comportamiento de la estructura en caso de sismo.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- [1] AFANADOR GARCÍA, Nelson; CARRASCAL DELGADO, Mayerly; BAYONA CHINCHILLA, Marvin Joseph. Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pisada. En: Revista Facultad de Ingeniería, UPTC. Vol.; 22. No 35 (Jul - Dic. 2013); p. 47-59.
- [2] DÍAZ RIVEROS, Carlos Alberto. En la rehabilitación de la arquitectura en adobe incide la huella del objeto valorado desde la perspectiva del patrimonio cultural en el centro antiguo de Villavicencio: Puntualizando procedimientos. En: Cap&cuca. Vol.; 6 (Nov. 2011); p. 1-13.
- [3] YAMÍN LACOUTURE, Luis Eduardo; PHILLIPS BERNAL, Camilo; REYES ORTÍZ, Juan Carlos; RUÍZ VALENCIA, Daniel. Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. En: Apuntes. Vol.; 20. No 2 (2007); p. 286-303.
- [4] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA AIS, Y RED DE SOLIDARIDAD SOCIAL DE LA PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Colombia. 2005.
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Estructuras - Intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda - Requisitos del proyecto estructural. Versión final comité. Chile. Sept, 2013.
- [6] BLONDET, Marcial; VARGAS, Julio; TARQUE, Nicola. Reflexiones sobre la normatividad para la construcción sismorresistente de edificaciones de adobe. Lima - Perú, 2006, 16p. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [7] MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO. Reglamento Nacional de Edificaciones. Decreto Supremo No. 011-2006 - Vivienda. Norma E 080 Adobe. Primera edición. Lima – Perú. 2006.
- [8] NAVARRO GARCÍA, Oscar Andrés; QUIRÓZ RAMIREZ, Erison. Reparación y reforzamiento de construcciones informales. Bucaramanga, 2012, 128p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.
- [9] YAMIN, Luis E.; RODRÍGUEZ, Ángel E.; FONSECA, Luis R.; REYES, Juan C.; PHILLIPS, Camilo A. Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa

vibratoria. Bogotá, 2005, 16p. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.

- [10] BENÍTEZ RODRÍGUEZ, Lina María; NAVAS CORENA, Camilo José. Influencia de las propiedades físico – mecánicas en el material tierra para construcción con tapia pisada. Bucaramanga, 2009, 147p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.
- [11] RUIZ VALENCIA, Daniel; LÓPEZ PÉREZ, Cecilia; RIVERA, Juan Carlos. Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales. En: Apuntes. Vol.; 25. No 2 (Jul - Dic. 2012); p. 226-239.
- [12] Cortés, W. L.; CRUZ, Ricardo. Evaluación sismo resistente de edificaciones antiguas de tapia pisada de adobe. En: UIS Ingenierías. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, UIS. Vol.; 1. No 1 (May. 2002); p. 51-57.
- [13] BATTISTELLI, Alessandra. Tecnología y Patrimonio en tierra cruda en Colombia. El caso de Barichara en Santander. Lucca, Italia, 2005, 72p. PhD candidate in "Technology and management of cultural Heritage". Dipartimento Casa-Città, Politecnico di Torino.
- [14] SÁNCHEZ CÁRDENAS, María Inés; VALDEBENITO MONTENEGRO, Galo. Vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile: Aplicación a los torreones españoles de Valdivia. Valdivia, Chile, 2013, 151p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil en obras civiles). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles.
- [15] GUERRERO BACA, Luis Fernando. Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia. México, 2008, 8p. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.
- [16] RIVERA TORRES, Juan Carlos; MUÑOZ DÍAZ, Edgar Eduardo. Caracterización estructural de materiales de sistemas constructivos en tierra: El adobe. En: Rev. Int. de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil. Vol.; 5(2) (May. 2004); p. 135-148.
- [17] BATTISTELLI, Alessandra. Un método de catalogación del patrimonio arquitectónico en tierra. El caso de Barichara, Colombia. En: Arquitectura construida en tierra, tradición e innovación. Congresos de arquitectura de tierra en cuenca de campos 2004/2009. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva; p. 117-130.

Universidad de Valladolid. {En línea}. 2010. {Oct. 2016}. Disponible en internet: http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2010/2010_9788469345542_p117-130_battistelli.pdf

- [18] PARADA, Walter. Aproximación a la patología del antiguo convento San Francisco de la ciudad de Tunja. En: Trabajo de investigación “Aproximación a la patología del antiguo convento San Francisco de la ciudad de Tunja”. 2013. p. 28-39.
- [19] NORMAS DE QUITO. Informe final de la reunión sobre conservación y utilización de monumentos y lugares de interés histórico y artístico. Quito. 1967.
- [20] MINKE, Gernot. Building With Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture. 2006.
- [21] CID, J.; Mazarron, F. R.; Canas, I. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. The earth building normative documents in the world. En: Informes de la construcción. Vol.; 63, 523 (Jul-Sept 2011); p. 159-169.
- [22] BLONDET, Marcial; VILLA GARCÍA M., Gladys; BRZEV, Svetlana. Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor. Abr. 2003.
- [23] MINKE, Gernot. Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Segunda edición en castellano. Editorial fin de siglo, 2005. 222p.
- [24] MINKE, Gernot. Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra. Forschungslabor für Experimentelles Bauen. Universidad de Kassel, Alemania. Tercera edición revisada y ampliada, Abr. 2005. 52p.
- [25] ASTORGA PANTOJA, Sergio; SOLÍS MUÑIZ, Mario. Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales. Sevilla, Nov. 2011, 172p. Universidad de Sevilla. Escuela técnica superior de ingeniería.
- [26] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR 10. Título A-10: Evaluación e intervención de edificaciones construidas antes de la vigencia de la presente versión del reglamento. Bogotá. 2010.

- [27] MALDONADO RONDÓN, Esperanza; CHIO CHO, Gustavo. Estimación de las funciones de vulnerabilidad sísmica en edificaciones en tierra. En: Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte. No. 25 (2009); p. 180-199.
- [28] GRAMLICH Ashley Nicolle. A concise history of the use of the rammed earth building technique including information on methods of preservation, repair, and maintenance. Oregon, Mar. 2013, 203p. Tesis (Master en Ciencias). Universidad de Oregon.
- [29] CABALLERO ESTEBAN, Javier; SOLAR SANTOS, Delcy Mayerling. Aspectos a tener en cuenta en la vulnerabilidad sísmica para edificaciones en tapia pisada en la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga, 2007, 188p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.
- [30] MINISTERIO DE CULTURA, REPÚBLICA DE COLOMBIA. Cartilla patrimonio cultural para todos. Bogotá. Jun. 2010.
- [31] CONGRESO DE COLOMBIA. Ley No 1185 de 2008.pdf. Mar. 2008.
- [32] CONGRESO DE COLOMBIA. Ley No 397 de 1997.pdf. Ago. 1997.
- [33] CHINCHILLA MALDONADO, Guillermo Eduardo. Alternativa de refuerzo contra efectos de sismo, para viviendas de adobe existentes. Guatemala, 2006, 92p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.
- [34] TORREALVA DÁVILA, Daniel. Título 1. Caracterización de daños en construcciones de adobe. Perú, Jun. 2003, 42p. Pontificia Universidad Católica del Perú. Departamento de Ingeniería. Sección Ingeniería Civil.
- [35] ZEGARRA, Luis; SAN BARTOLOMÉ, ÁNGEL; QUIUN, Daniel; GIESECKE, ALBERTO. Manual técnico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y en la sierra. Perú, Mar. 1997, 20p. Cooperación Alemana al Desarrollo, Centro Regional de Sismología para América del Sur y Pontificia Universidad Católica de Perú.
- [36] TENA COLUNGA, Arturo; JUÁREZ ÁNGELES, Artemio; SALINAS VALLEJO, Víctor Hugo. Resistencia y deformación de muros de

mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales. En: Revista de Ingeniería Sísmica. No. 76 (Ene-Mar 2007); p. 29-60.

- [37] INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y NORMALIZACIÓN DE LA VIVIENDA, ININVI. Construcción con Tapial. Documento técnico. Primera edición. Perú, Dic.1989, 65p.
- [38] TOLLES, E. Leroy; KIMBRO, Edna E.; WEBSTER, Frederick A.; GINELL, William S. Estabilización sísmica de edificios de interés histórico (Seismic stabilization of historic adobe structures. Final report of the getty seismic adobe project). The Getty Conservation Institute. Los angeles. 2000.
- [39] CHUQUIMIA Edward; HAIDER, Josef; QUIUN, Daniel. Construcción sismo resistente en adobe: Una alternativa para edificaciones públicas. 2006
- [40] LÓPEZ PÉREZ, Cecilia; RUIZ VALENCIA, Daniel; JÉREZ BARBOSA, Sandra; QUIROGA SAAVEDRA, Pedro; URIBE ESCAMILLA, Jairo; MÑOZ DÍAZ, Edgar. Rehabilitación sísmica de muros de adobe de edificaciones monumentales mediante tensores de acero. En: Apuntes. Vol.; 20. No 2 (2007); p. 304-317.
- [41] DEL RÍO MUÑOZ, MÓNICA; SAN JOSÉ ALONSO, Jesús Ignacio; JOVÉ SANDOVAL, Félix. Análisis de la repercusión de los tratados y manuales históricos en España y Europa en el estudio de la técnica de la tapia. En: Construcción con tierra. Investigación y documentación XI CIATTI 2014. Congresos de arquitectura de tierra en cuenca de campos; p. 34-44. Valladolid. {En línea}. Jul 2015. {Oct. 2016}. Disponible en internet: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2015/003deIrio.pdf>
- [42] VIÑUALES, Graciela María; MARTINS NEVES, Cecilia M. ; FLORES, Mario O.; RÍOS, Luis Silvio. Arquitectura de tierra en Iberoamérica. 2003. 146p.
- [43] BARBETA, Gabi. Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el Siglo XXI . Barcelona, 2000, 163p. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, ETSAB.
- [44] RODRIGUES FILHO, Raymundo. El uso de la tierra como elemento constructivo en Brasil: un corto panorama del proceso histórico,

- manejo, usos, desafíos y paradigmas. En: Apuntes. Vol.; 20. No 2 (2007); p. 232-241.
- [45] ARIAS RODOLFI, Chemané. La tapia como técnica constructiva actual en las Parroquias Chacantá y El Molino. Estado Mérida, Venezuela. En: Anuario GRHIAL, Universidad de los Andes. No 6 (Ene-Dic 2006); p. 205-230.
- [46] CARRANZA, Marcela. ¿Existen técnicas adecuadas de construcción con tierra para países sísmicos?. Barcelona, Abr. 2010, 39p. Tesis (Master en Arquitectura y Sostenibilidad). Universidad Politécnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, ETSAB.
- [47] ÁREA TECNOLÓGICA DEPARTAMENTO REGIONAL NORTE DE ARQUITECTURA. UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE ARQUITECTURA. REGIONAL NORTE, UDELAR. X SIACOT. Seminario iberoamericano de arquitectura y construcción con tierra. El diseño de la arquitectura de tierra. Publicación financiada por CSIC. Salto – Uruguay, 2010, 334p.
- [48] FUNDACIÓN COTEC PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA. Innovación en el sector del patrimonio histórico. Madrid, 2010, 119p.
- [49] MANIATIDIS, Vasilios; WALKER, Peter. A review of rammed earth construction. DTi Partners in Innovation Project "Developing Rammed Earth for UK Housing". Bath, Reino Unido, May. 2003, 118p. University of Bath. Natural Building Technology Group. Department of Architecture & Civil Engineering.
- [50] DEL PINO, Virginia; ESTRAMIL, Verónica. Arquitectura con tierra. Bioconstrucción en cooperativas de viviendas por ayuda mútua. Montevideo - Uruguay, 2014, 75p. Tesis (Arquitectura). Universidad de la República. Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo.
- [51] MICCOLI, Lorenzo; MÜLLER, Urs.; FONTANA, Patrick. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. En: Construction and Building Materials. No. 61 (2014); p. 327-339.
- [52] MARRERO, Mercedes. Apuntes sobre la pertinencia y la factibilidad de aplicación de las tecnologías constructivas. El caso de la mampostería estructural de bloques de concreto. En: Tecnología y construcción. Vol.; 15-1 (1999); p. 45-56.
- [53] MINISTERIO DEL DESARROLLO URBANO. DIRECCIÓN GENERAL SECTORIAL DE EDIFICACIONES. REPÚBLICA DE VENEZUELA. MINISTERIO DE FOMENTO. COMISIÓN

- VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Norma venezolana: Criterios y acciones mínimas para el proyecto de edificaciones. Caracas - Venezuela. 2002.
- [54] CENTRO DE INVESTIGACIÓN HABITAT Y ENERGÍA, CIHE, SI, FADU, UBA. INSTITUTO DE ARTE AMERICANO, IAA, FADU, UBA. Construcción con tierra/ 2. 1ra Edición. Buenos Aires, Argentina: 2006, 68p.
- [55] MARIN, Toni. Norma UNE de bloque de tierra comprimida. En: EcoHabitar. No. 22 (2009); p. 22-24.
- [56] DE LA TORRE RANGEL, O; LOPÉZ VÁZQUEZ, R.; SALAZAR HERNÁNDEZ, A.; ROLDÁN CABRERA, J.C. Evaluación estructural y comportamiento de las reparaciones efectuadas a edificaciones históricas. En: Revista de ingeniería sísmica. No. 70 (2004); p. 1-26.
- [57] PEÑA MONDRAGÓN, Fernando; LOURENCO, Paulo B. Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas. En: Revista de ingeniería sísmica. No. 87 (2012); p. 47-66.
- [58] LOZANO MERCADO, Joaquín; RAMÍREZ DE ALBA, Horacio; FLORES MACIAS, Oscar. Estado del arte del análisis de mamposterías sin refuerzo en construcciones antiguas. SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL. XVI CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL. Acapulco, Gro, 2004.
- [59] GARCÍA GÓMEZ, Natalia. Edificios históricos de mampostería y herramientas para su estudio estructural. En: Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos. No. 16 (2012-2013); p. 106-113.
- [60] CEDEÑO, Alberto. Valoración de las condiciones de la estructura antigua. En: Diseño y sociedad. No.25-26 (Otoño 2008 – Primavera 2009); p. 72-81.
- [61] GUTIÉRREZ MARTÍNEZ, Carlos A.; FLORES CORONA, Leonardo; LÓPEZ MARTÍNEZ, César. Sismo de Coyuca de Benítez del 7 de octubre de 2001, Aspectos sismológicos y su impacto en infraestructura. Informes técnicos. 1a. Edición. México: CENAPRED, 2007. 42p.
- [62] LOZANO MERCADO, Joaquín. Estado del arte de las mamposterías sin refuerzo. En: Ingeniería y tecnología. Año 1, No. 2 (Feb. 2006); p. 14-17.
- [63] ALCOCER, Sergio M.; AGUILAR, Gerardo; FLORES, Leonardo; BITRÁN, Daniel; DURÁN, Roberto; LÓPEZ BÁTIZ, Oscar A.; PACHECO, Miguel A.; REYES, Carlos; URIBE, Claudia M.;

- MENDOZA, Manuel J. El sismo de Tehuacán del 15 de Junio de 1999. Informes técnicos. México: CENAPRED, Jul. 1999. 197p.
- [64] NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA . {En línea}. {Nov. 2016}. Disponible en: <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/745.pdf>
- [65] FONT, F.; HIDALGO, P. La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. Rammed earth in Spain: current techniques and examples. En: Informes de la construcción. Vol., 63, No. 523 (Jul – Sept 2011); p. 21-34.
- [66] BRAIN, Isabel; MORA, Pía. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. CENTRO DE POLÍTICAS PÚBLICAS UC. Emergencia y reconstrucción: el antes y después del terremoto y tsunami del 27-F en Chile. Aprendizaje en material habitacional, urbana y de seguros. Primera edición. Chile: Fundación MAPFRE, 2012. 187p.
- [67] MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. Proyecto de intervención estructural de construcciones de tierra. Norma técnica Minvu, NTM 002. Chile. Dic. 2013.
- [68] CENTRO DE INVESTIGACIÓN HABITAT Y ENERGÍA SI-FADU-UBA. INSTITUTO DE ARTE AMERICANO SI-FADU-UBA. Construcción con tierra 3. 1ra Edición. Buenos Aires, Argentina: Dic 2007, 104p.
- [69] ALDERETE, Carlos Eduardo; ARIAS, Lucía Elizabeth; MELLACE, Rafael Francisco; LATINA, Stella Maris; SOSA, Mirta Eufemia; FERREYRA. Mampostería con tierra estabilizada comprimida. Tucumán, Argentina, 2006, 8p. Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATiC) . Univesidad Nacional de Tucumán. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- [70] ARIAS, Lucía Elizabeth; ALDERETE, Carlos Eduardo; MELLACE, Rafael Francisco; LATINA, Stella Maris; SOSA, Mirta Eufemia; FERREYRA. Diseño y análisis estructural de componentes constructivos con tierra cruda. Tucumán, Argentina, 2006, 12p. Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATiC). Univesidad Nacional de Tucumán. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- [71] ARTEAGA MEDINA, Karen Tatiana; MEDINA, Óscar Humberto; GUTIERREZ JUNCO, Óscar Javier. Bloque de tierra comprimida como material constructivo. Compressed earth blocks, as

construction material. En: Revista Facultad de Ingeniería, UPTC. Vol.; 20. No 31 (Jul - Dic. 2011); p. 55-68.

- [72] MAS, Jorge Marcelo; KIRSCHBAUM, Carlos Federico; TONELLO, Graciela Lucía. Vivienda rural en suelo – cemento: Investigación, transferencia y autoconstrucción. En: Construcción con tierra. Tecnología y Arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en cuenca de campos 2010/2011. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva; p. 351-366. Universidad de Valladolid. {En línea}. 2011. {Nov. 2016}. Disponible en internet: http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2011/2011_9788469481073_p351-366_mas.pdf
- [73] MICCOLI, Lorenzo; DROUGKAS, Anastasios; MÜLLER, Urs. In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling. En: Engineering Structures. No. 125 (2016); p. 144-152.
- [74] BUI, Q.-B.; HANS, S.; MOREL, J.-C.; DO, A.-P. First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings. En: Engineering Structures. No. 33 (2011); p. 3690-3695.
- [75] NOWAMOOZ, H.; CHAZALLON, C. Finite element modelling of a rammed earth wall. En: Construction and Building Materials. No. 25 (2011); p. 2112-2121.
- [76] Autores Varios (Oct. 2011). La Tapia Pisada una Técnica Ancestral. Barichara Reconstruyendo una Tradición Ecológica: Recuperado de *WordExpress.com*. <https://reconstruyendotradicioneologica.wordpress.com/la-tapia-pisada-una-tecnica-ancestral/>.
- [77] Autores Varios (Marzo 2014). Al Principio La Tierra. Estudio de la tapia en Restauración de Arquitectura Histórica no monumental – Universidad Politécnica de Valencia: Recuperado de *WordExpress.com*. <https://tierrah.wordpress.com/2014/03/>.
- [78] GUERRERO BACA Luis Fenando. El tapial, un sistema constructivo patrimonial. En: Revista Foro Académico. No. 2 (2009); p. 41-47.

ANEXOS

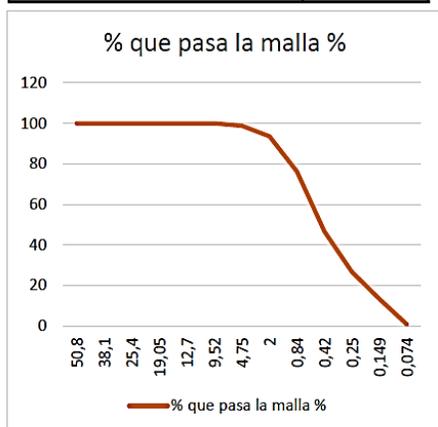
Anexo A. GRANULOMETRÍA DE LA TIERRA UTILIZADA

A.1. GRANULOMETRÍA DE MATERIAL EXTRAIDO DE MOVIMIENTO DE TIERRA EN PALONEGRO.

FECHA: Noviembre 4 de 2017
 PROYECTO: Construcción de Muros de Tapia Pisada
 LOCALIZACIÓN: Aeropuerto

Peso tara (gr)	309,7
Tara+muestra humeda (gr)	1309,7
Tara+muestra seca (gr)	1173,5
Peso agua (gr)	136,2
Peso muestra seca (gr)	863,8
Humedad(%)	15,77

Peso inicial de la muestra (gr)	850
Peso despues del lavado (gr)	596,5
Finos lavados (gr)	253,5



Malla No	Abertura	Peso del suelo retenido	Porcentaje retenido parcial
****	mm	gr	%
2"	50,8	0	0
1 1/2"	38,1	0	0
1"	25,4	0	0
3/4"	19,05	0	0
1/2"	12,7	0	0
3/8"	9,52	0	0
No 4	4,75	7,2	1,21
10	2	30,6	5,14
20	0,84	104,1	17,48
40	0,42	175,7	29,50
60	0,25	119,5	20,06
100	0,149	79,7	13,38
200	0,074	74,8	12,56
Pasa 200	****	4	0,67
Suma	****	595,6	100,00

Clasificación	Cantidad (gr)	Cantidad %	Limite Inferior %
Gravas	37,80	4,45	0
Arenas	553,8	65,15	40
Finos	257,5	30,29	35
Suma	849,10	99,89	****

A.2. GRANULOMETRÍA DE MATERIAL EXTRAIDO CONSTRUCCIÓN EN PIEDECUESTA.



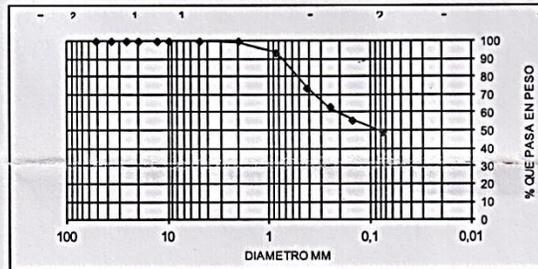
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE GRANULOMETRIA INV E- 123**

FECHA Enero 16 de 2017 SONDEO _____
 PROYECTO Construcción de Muros en Tapia Pisada MUESTRA _____
 LOCALIZACION Piedecuesta PROFUNDIDAD 2,5 m

PESO TARA (Kg)	305,1	
TARA+MUESTRA HUMEDA (Kg)	1305,1	
TARA+MUESTRA SECA (Kg)	1164,7	
PESO AGUA (Kg)	140,4	
PESO MUEST. SECA (Kg)	859,6	
HUMEDAD (%)	16,33%	

PESO INICIAL DE LA MUESTRA g: 800,00
 PESO DESPUES DE LAVADO g: 412,50
 PORCENTAJE DE ERROR %: 0,20

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA	MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	g	%	%	****	mm	g	%	%
2"	50,8	0,00	0,00	100,00	10	2	5,10	0,64	99,36
1 1/2"	36,1	0,00	0,00	100,00	20	0,84	49,20	6,15	93,21
1"	25,4	0,00	0,00	100,00	40	0,42	158,00	19,75	73,46
3/4"	19,05	0,00	0,00	100,00	60	0,25	85,90	10,74	62,73
1/2"	12,7	0,00	0,00	100,00	100	0,149	58,80	7,35	55,38
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	200	0,074	52,80	6,60	48,78
No 4	4,75	0,00	0,00	100,00	PASA 200	*****	388,60		
SUMA	*****	0,00	0,00		SUMA	*****	798,40	51,23	
					TOTAL		798,40		



GRAVAS= 0,00 %
 ARENAS = 51,23 %
 FINOS= 48,78 %

CLASIFICACION SUCS: SM Arena Limosa

VoBo:
 Ing. Wilfredo De Toro R.
 Director Escuela de Ingeniería Civil

REVISO:
 Ing. Eduardo A. Castañeda P.
 Jefe Laboratorio Suelos y Pavimentos



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 LIMITES DE ATTERBERG INV E- 125-126**

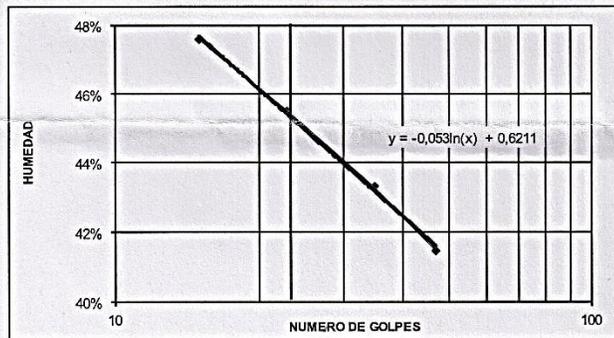
FECHA: Enero 16 de 2017 SONDEO: _____
 PROYECTO: Construcción muros en Tapia Pisada MUESTRA: _____
 LOCALIZACION: Pieduesta (Santander) PROFUNDIDAD: 2,5 m

LIMITE LIQUIDO

CAPSULA No	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA g	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO g	PESO CAPSULA + SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA %
13	47	7,20	47,10	35,40	11,70	28,20	41%
22	35	6,80	47,50	35,20	12,30	28,40	43%
23	23	7,10	47,70	35,00	12,70	27,90	46%
28	15	7,30	47,30	34,40	12,90	27,10	48%

LIMITE PLASTICO

14		7,20	21,90	18,80	3,10	11,60	27%
30		7,40	21,30	18,50	2,80	11,10	25%



LIMITE LIQUIDO : 45%
 LIM. PLASTICO : 26%
 IND. DE PLASTI. : 19%
 CLASIFICACION SUCS. : SM

VoBo:

[Signature]
 Ing. Wilfredo Del Toro R.
 Director Escuela de Ingenieria Civil

REVISO:

[Signature]
 Ing. Eduardo A. Castañeda P.
 Jefe Laboratorio Suelos y Pavimentos

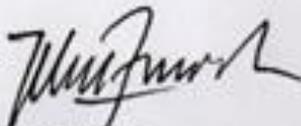
Anexo B. ENSAYOS DE HUMEDAD

B.1. ENSAYOS DE HUMEDAD DE MUESTRA DE MEZCLA PARA HACER LOS MUROS, DÍA 0


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E-122

FECHA: Febrero 15 de 2017 SONDEO: _____
 PROYECTO: Construcción de Muros en Tapia Pisada MUESTRA: _____
 LOCALIZACIÓN: Piedecuesta PROFUNDIDAD: _____

CÁPSULA NO.	PESO CÁPSULA	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO	PESO CÁPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA
g	g	g	g	g	g	%
1	7,2	1327,2	1196,5	116,7	1189,3	8,31%

VoBo: 
 Ing. Wilfredo Del Toro R.
 Director Escuela de Ingeniería Civil

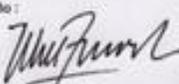
REVISO: 
 Ing. Eduardo A. Castañeda P.
 Jefe Laboratorio Suelos y Pavimentos

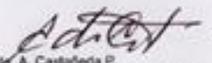
B.2. ENSAYO DE HUMEDAD DE MUESTRAS TOMADAS EN LAS FECHAS INDICADAS Y PROBADAS EN MARZO 27 DE 2017. TIEMPOS DE SECADO: 54 Y 47 DÍAS


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

FECHA: Marzo 27 de 2017 MUESTRA: _____
 PROYECTO: Construcción de muro en Tapia Pisada PROFUNDIDAD: _____
 LOCALIZACIÓN: Piedecuesta (Santander)

MUESTRA	CAPSULA	PESO CAPSULA	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA
	No.	g	g	g	g	g	%
8 DE FEBREO	3	9,8	1481,7	1461,5	20,2	1451,7	1,39%
15 DE FEBREO	4	12,6	1301,9	1272,7	29,2	1260,1	2,32%

VoBo: 
 Ing. Wilfredo Del Toro
 Director Escuela de Ingeniería Civil

REVISO: 
 Ing. Eduardo A. Castañeda P.
 Director Laboratorio de Caracterización de Materiales

B.3. ENSAYO DE HUMEDAD DE MUESTRAS TOMADAS EN LAS FECHAS INDICADAS Y PROBADAS EN ABRIL 20 DE 2017. TIEMPOS DE SECADO: 78 Y 71 DÍAS.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

FECHA: Abril 20 de 2017

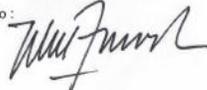
PROYECTO: Construcción de muro en Tapia Pisada

LOCALIZACION: _____

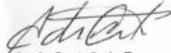
MUESTRA: 8 a 15 de febrero

PROFUNDIDAD: _____

MUESTRA	CAPSULA	PESO CAPSULA	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA
	No.	g	g	g	g	g	%
	11	12,6	576,8	562,8	14	550,2	2,54%
	15	9,8	1137,2	1091,5	45,7	1081,7	4,22%
	8	10,1	602,5	588,1	14,4	578	2,49%

VoBo: 

Ing. Wilfredo Del Toro
Director Escuela de Ingenieria Civil

REVISO: 

Ing. Eduardo A. Castañeda P.
Director Laboratorio de Caracterización de Materiales

B.4. ENSAYO DE HUMEDAD DE MUESTRAS TOMADAS EN LAS FECHAS INDICADAS Y PROBADAS EN MAYO 5 DE 2017. TIEMPOS DE SECADO: 93 Y 86 DÍAS.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

FECHA: Mayo 5 de 2017

PROYECTO: Construcción de muro en Tapia Pisada

LOCALIZACION: _____

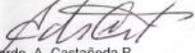
MUESTRA: _____

PROFUNDIDAD: _____

MUESTRA	CAPSULA	PESO CAPSULA	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA
	No.	g	g	g	g	g	%
8 DE FEBRERO	1	9,7	720,2	704,4	15,8	694,7	2,27%
8 DE FEBRERO	2	10,1	1251,1	1235,8	15,3	1225,7	1,25%
15 DE FEBRERO	3	9,6	1266,8	1238,0	28,8	1228,4	2,34%

VoBo: 

Ing. Wilfredo Del Toro
Director Escuela de Ingenieria Civil

REVISO: 

Ing. Eduardo A. Castañeda P.
Director Laboratorio de Caracterización de Materiales

B.5. ENSAYO DE HUMEDAD DE MUESTRAS TOMADAS EN LAS FECHAS INDICADAS Y PROBADAS EN MAYO 10 DE 2017. TIEMPOS DE SECADO: 98 Y 91 DÍAS.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

FECHA Mayo 10 de 2017
 PROYECTO Construcción de muro en Tapia Pisada MUESTRA 8 a 15 de febrero
 LOCALIZACION _____ PROFUNDIDAD _____

MUESTRA	CAPSULA	PESO CAPSULA	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	PESO CAPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA
	No.	g	g	g	g	g	%
8 de febrero	4	9,9	788,5	755,2	33,3	745,3	4,47%
15 de febrero	5	10,0	805,1	764,0	41,1	754	5,45%

VoBo:

Ing. Wilfredo Del Toro
 Director Escuela de Ingeniería Civil

REVISO:

Ing. Eduardo A. Castañeda P.
 Director Laboratorio de Caracterización de Materiales

Anexo C. ENSAYOS DE COMPRESIÓN DEL MATERIAL TIERRA EN DISTINTAS FECHAS

C.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN DE MUESTRAS DE TIERRA TOMADAS EN ESTAS FECHAS Y PROBADAS EN MAYO 9 DE 2017.



LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

INFORME R 092

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN

FECHA DE ENSAYO : MAYO 9 DE 2017
 CLIENTE : RAFAEL CRISTOBAL ARIZMENDI
 MATERIAL : CILINDROS MURO DE TAPIA

CONDICIONES DE ENSAYO

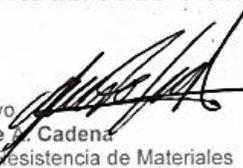
EQUIPO : UNIVERSAL DE ENSAYOS MTS PUNTO DE CARGA: CENTRICA AXIAL
 TEMPERATURA : 23°C HUMEDAD : 70%
 VELOCIDAD ENSAYO : 0.10 mm/s

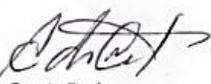
RESULTADOS

Id muestra	Id laboratorio	Carga máxima Kgf	DIMENSIONES		Área Cm ²	Esfuerzo Kgf/Cm ²
			ALTO Cm	Diámetro Cm		
1	V 143	269	15	7.5	44.18	6.08
2	V 144	86.7	15	7.5	44.18	1.96
10	V 145	786.4	15	7.5	44.18	17.80
8-3	V 146	491.6	15	7.5	44.18	11.12
C-1	V 147	343.7	15	7.5	44.18	7.77
O-8	V 148	835.3	15	7.5	44.18	18.90

Observaciones:

1 DECLARAMOS QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REPORTADOS EN ESTE INFORME ESTAN RELACIONADOS CON LOS ESPECIMEN QUE SE HAN IDENTIFICADO Y ENSAYADO. LAS CUALES FUERON ENTREGADAS EN EL LABORATORIO DIRECTAMENTE POR EL CLIENTE.
 2 ESTE INFORME NO DEBE REPRODUCIRSE PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACION DEL CENTRO CARACTERIZACION MATERIALES DE CONSTRUCCION, ESCUELA INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
 3 LA APLICACION Y EMPLEO DE LOS DATOS Y RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME NO SON RESPONSABILIDAD DEL CENTRO CARACTERIZACION MATERIALES DE CONSTRUCCION, ESCUELA INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
 4 LA INFORMACION DECLARADA EN ESTE INFORME ESTA BASADA EN LOS DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE. NO ES COMPETENCIA DEL LABORATORIO LA VERACIDAD DE ESTA INFORMACION.

Ensayo 
 Jaime Cadena
 Lab. Resistencia de Materiales

Revisó 
 Eduardo Castañeda
 Director de Laboratorio

VoBo 
 Wilfredo del Toro
 Director Escuela. Ing. Civil



LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

INFORME R 091

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN

FECHA DE ENSAYO : MAYO 9 DE 2017
CLIENTE : RAFAEL CRISTOBAL ARIZMENDI
MATERIAL : CUBOS MURO DE TAPIA

CONDICIONES DE ENSAYO

EQUIPO : UNIVERSAL DE ENSAYOS MTS PUNTO DE CARGA: CENTRICA AXIAL
TEMPERATURA : 23°C HUMEDAD : 70%
VELOCIDAD ENSAYO : 0.10 mm/s

RESULTADOS

Id muestra	Id laboratorio	Carga máxima Kgf	DIMENSIONES			Área Cm ²	Esfuerzo Kgf/Cm ²
			Largo Cm	Alto Cm	Ancho Cm		
8-4	V 138	80.7	15	15	15	225	0.35
15-4	V 139	256.1	15	15	15	225	1.13
R-10	V 140	1232.1	15	10	15	225	5.47
O-1	V 141	947.5	16	16	16	256	3.70
R-9	V 142	2254.2	15	7	15	225	10.0

Observaciones:

1 DECLARAMOS QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REPORTADOS EN ESTE INFORME ESTAN RELACIONADOS CON LOS ESPECIMEN QUE SE HAN IDENTIFICADO Y ENSAYADO LAS CUALES FUERON ENTREGADAS EN EL LABORATORIO DIRECTAMENTE POR EL CLIENTE.
2 ESTE INFORME NO DEBE REPRODUCIRSE PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACION DEL CENTRO CARACTERIZACION MATERIALES DE CONSTRUCCION, ESCUELA INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
3 LA APLICACION Y EMPLEO DE LOS DATOS Y RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME NO SON RESPONSABILIDAD DEL CENTRO CARACTERIZACION MATERIALES DE CONSTRUCCION, ESCUELA INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
4 LA INFORMACION DECLARADA EN ESTE INFORME ESTA BASADA EN LOS DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE, NO ES COMPETENCIA DEL LABORATORIO LA VERACIDAD DE ESTA INFORMACION.

Ensayo
Jaime A. Cadena
Lab. Resistencia de Materiales

Revisó
Eduardo Castañeda
Director de Laboratorio

VoBo
Wilfredo del Toro
Director Escuela. Ing. Civil

C.2. RELACIÓN DE FECHAS DE TOMAS DE MUESTRAS Y TIEMPOS DE SECADO HASTA LA FECHA DE PRUEBA.

Tabla C.2.1. Fechas de Muestras

Identificación Inicial	Identificación Laboratorio	Tiempo secado
		83 días
2	V 144	
15-4	V 139	
C-1	V 147	
0-1	V 141	
		90 días
1	V 143	
8-3	V 146	
10	V 145	
0-8	V 148	
8-4	V 138	

C.3. ORDENAMIENTO DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

Tabla C.3.1. Resultados de las Puebas

Tiempo secado	Identificación Inicial	Identificación Laboratorio	Resistencia Cilindros de Φ 7,5cm; L:154,0cm	Resistencia Cubos
83 días				
	2	V 144	1,96kg/cm ²	
	15-4	V 139		1,13kg/cm ²
	C-1	V 147	7,77kg/cm ²	
	0-1	V 141		3,70kg/cm ²
90 días				
	1	V 143	6,08kg/cm ²	
	8-3	V 146	11,12kg/cm ²	
	10	V 145	17,80kg/cm ²	
	0-8	V 148	18,90kg/cm ²	
	8-4	V 138		0,35kg/cm ²

C.4. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA PROBABLE A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

Para el efecto se ha desechado los resultados obtenidos de las probetas cúbicas, teniendo en cuenta la alta irregularidad que muestran. Esto pudo deberse a que estos cubos fueron configurados manualmente mediante perfilado del material de los muros que se demolieron y, posiblemente, este perfilado no permitió el logro de una forma con caras paralelas, como lo exige este tipo de probetas, creándose concentraciones de esfuerzos indeseables en la misma, durante la prueba.

Tabla C.4.1. Cálculo Box Cox de la Resistencia Más Alta Probable

ID Muestra	Resistencia	$x = \ln(R_i)$	$(x_i - x_{prom})^2$
1	6,08 kg/cm ²	1,81	0,49
8-3	11,12 kg/cm ²	2,41	0,01
10	17,80 kg/cm ²	2,88	0,14
0-8	18,90 kg/cm ²	2,94	0,19
Prom	13,48 kg/cm ²	2,51	
Suma:			0,83

$$\sigma = 0,454901855$$

$$Z = 0,52440051$$

Resistencia del material con una probabilidad del 70% de no ser excedida

$$\text{Resistencia, } F_p = 15,59 \text{ kg/cm}^2$$

Anexo D. ANÁLISIS DE LOS PASADORES QUE CONECTAN LOS MUROS DE CONCRETO Y TAPIA PISADA. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS MUROS

D.1. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO

Se inicia mostrando el comportamiento diferencial de los muros de tapia pisada y de concreto, Esto con el fin de ilustrar como, de acuerdo con la teoría dinámica, ellos tenderán a asumir un comportamiento dinámico propios consecuente con sus masas y rigideces. Sin embargo, al final se tiene en cuenta que realmente ellos no son independientes sino que están vinculados entre sí no solo mediante los pasadores, sino de un mecanismo de adherencia y de una viga corona, a través de la cual se les imprime el movimiento. También se tendrá en cuenta que el mecanismo de transmisión del movimiento horizontal imprimido al conjunto Tierra-Concreto, no es el que sucede en una situación real de sismo, puesto que en el caso de esta prueba de laboratorio este movimiento es el resultado de una fuerza horizontal aplicada en la corona del muro, en tanto que en la realidad el movimiento es el resultado de una aceleración que sufre cada partícula de cada una de las masas, es decir, es un fenómeno continuo. Esto significa una menor exigencia a los pasadores en el caso real, que en el caso del laboratorio, con una fuerza horizontal aplicada. El laboratorio que mostraría una mayor similitud con el sismo real sería el de la mesa vibratoria.

Finalmente, se compara los resultados del cálculo estimativo con la experiencia conocida de pruebas efectuadas en investigaciones anteriores consultadas.

D.2. CÁLCULO DE LA FRECUENCIA NATURAL DE LOS MUROS

a. Cálculo de la frecuencia natural del muro en tapia pisada

Para el efecto se ha concentrado la masa del muro en el centroide y, para tener en cuenta la mayor densidad del concreto, se ha calculado la posición de la masa teniendo en cuenta la existencia de los dos materiales, el concreto de la viga y la tierra de la tapia pisada.

Densidad del concreto: 2400 kg/m^3

Densidad de la tierra pisada: 1800 kg/m^3

En la figura D.2.1. se muestra el sistema real y el equivalente para su análisis dinámico.

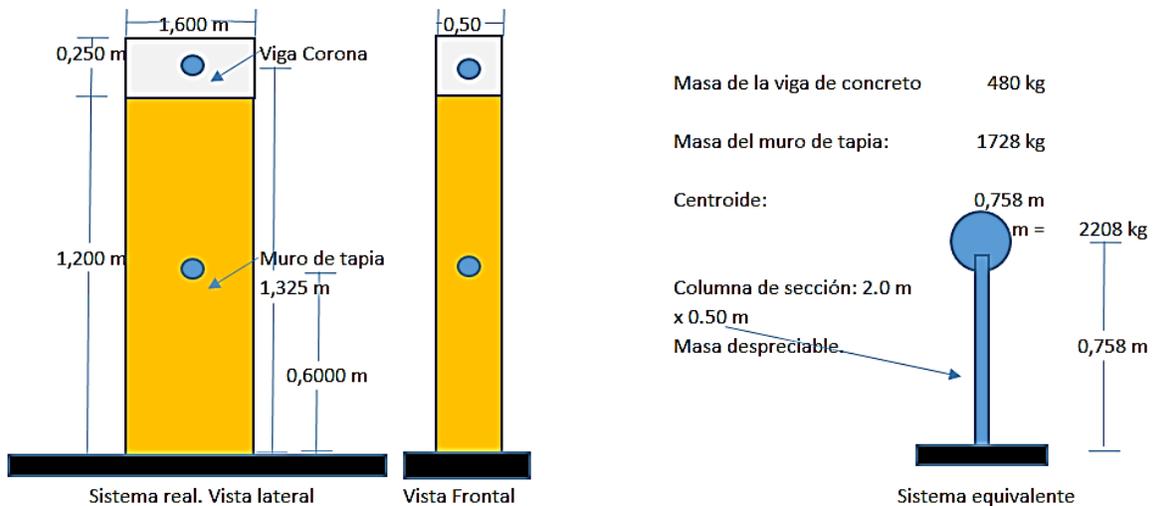
Masa del muro de tapia: $0,50 \times 1,60 \times 1,20 \times 1800 = 1728 \text{ kg}$

Masa de la viga Corona: $0,25 \times 1,60 \times 0,50 \times 2400 = 480 \text{ kg}$

$$\text{Centroide} = \frac{1,325 \times 480 + 0,60 \times 1728}{480 + 1728} = 0,758 \text{ m}$$

Masa Total = 2208 kg

Figura D.2.1. Conversión de sistema real a sistema equivalente



La frecuencia natural de cualquier cuerpo se puede calcular mediante la siguiente expresión, tomada de las notas del Profesor Gustavo Chio Cho en el curso de Dinámica Estructural de la Maestría en Ingeniería Estructural de la Universidad Industrial de Santander.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde: $w_n =$ Frecuencia angular natural

$k =$ Rigidez del muro. $k = \frac{P}{\Delta} = \frac{3EI}{L^3} = 64499,62 \text{ kN/m}$

$I =$ Momento de inercia = $1,71\text{E-}01 \text{ m}^4$

$E =$ Módulo de Elasticidad = 54,78 MPa, Tomado de ([11], pag 52)

L = Altura del muro = 0,758 m

m = Masa del muro = 2208 kg

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{64499,62}{2208}} = 170,91 \text{ rad/s}$$

Frecuencia natural = $f = \frac{w}{2\pi} = 27,20 \text{ ciclos/s}$

Período natural = $T = \frac{1}{f} = 0,0368 \text{ s}$

b. Cálculo de la frecuencia natural del muro de Concreto

En esta sección se calcula la frecuencia a la que vibraría el muro de concreto si actuara solo. Esto con el fin de estimar la diferencia entre su comportamiento y el del muro de tapia pisada.

Módulo de Elasticidad del concreto: 21000,00 MPa

En la figura D.2.2. se muestra el sistema real y el equivalente para su análisis dinámico.

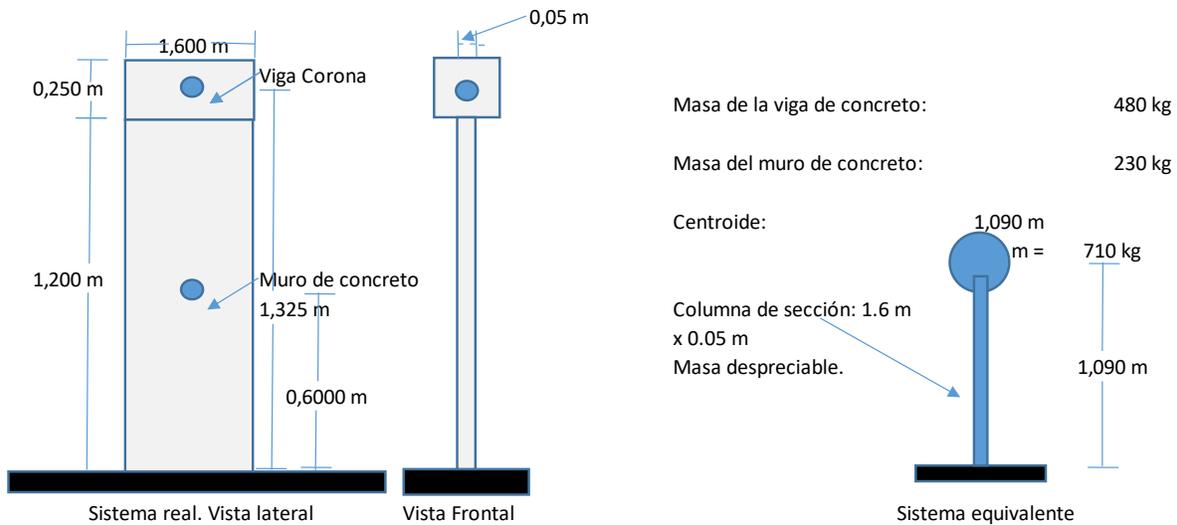
Masa del muro de concreto: $0,05 \times 2400 \times 1,60 \times 1,20 = 230 \text{ kg}$

Masa de la viga Corona: $0,25 \times 1,60 \times 0,50 \times 2400 = 480 \text{ kg}$

$$\text{Centroide} = \frac{1,325 \times 480 + 0,60 \times 230}{480 + 230} = 1,094 \text{ m}$$

Masa Total = 710 kg

Figura D.2.2. Conversión de sistema real a sistema equivalente



A continuación se calcula la frecuencia natural.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde: w_n = Frecuencia angular natural

k = Rigidez del muro. $k = \frac{P}{\Delta} = \frac{3EI}{L^3} = 851842,90 \text{ kN/m}$

Ancho, B: 50 mm

Largo, H: 1600 mm

I = Momento de inercia = $1,71E-02 \text{ m}^4$

$f'c$ = Resistencia característica del concreto = 21 MPa

E = Módulo de Elasticidad Concreto = 21538 MPa , Tomado de (NSR-10, C.8.5.1)

L = Altura del muro = 1,090 m

m = Masa del muro = 710 kg

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{851842,90}{710}} = 1095,0 \text{ rad/s}$$

$$\text{Frecuencia natural} = f = \frac{w}{2\pi} = 174,28 \text{ ciclos/s}$$

$$\text{Período natural} = T = \frac{1}{f} = 0,0057 \text{ s}$$

c. Cálculo de la frecuencia natural del muro combinado Concreto-Tapia pisada

Para el efecto se ha supuesto una unión monolítica entre el muro de tapia y la capa de concreto. También se ha supuesto que este material combinado está concentrado en el centroide y en la determinación del centroide se ha tenido en cuenta las densidades propias de cada material, el concreto de la viga y la tierra de la tapia pisada.

Por otro lado, con base en la reflexión descrita en la sección 5.2.3.2.2 del texto principal de la tesis, se ha supuesto que el muro equivalente es de concreto con el espesor original, pero con una masa igual a la suma. Esta suposición se utilizará en el cálculo de la rigidez. Es una aproximación, que se espera muy cercana a la realidad.

Otra razón para utilizar solo el espesor del muro de concreto con una masa igual a la suma de las de cada una de las capas es que el muro de concreto es la capa que pretendemos sea el elemento estructural y, por lo tanto, va a soportar el cortante. El muro de tapia quedará como un elemento no estructural.

Módulo de Elasticidad del concreto: 21000,00 MPa

Módulo de Elasticidad de la tierra pisada: 54,78 MPa

n = Relación de Módulos de Elasticidad: 383,35.

En la figura D.2.3. se muestra el sistema real y el equivalente para su análisis dinámico.

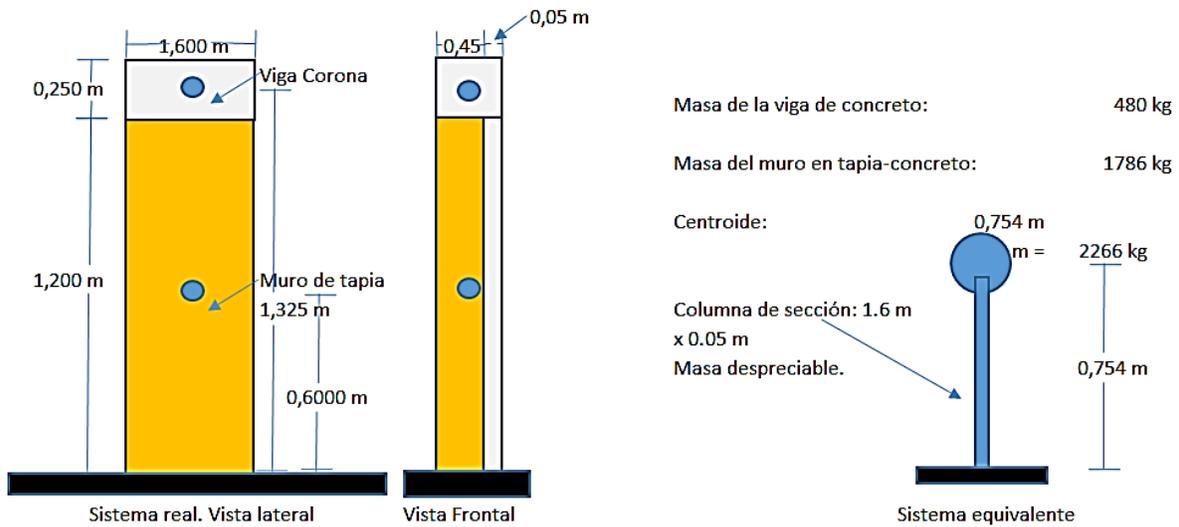
Masa del muro de tapia: $(0,45 \times 1800 + 0,05 \times 2400) \times 1,60 \times 1,20 = 1786 \text{ kg}$

Masa de la viga Corona: $0,25 \times 1,60 \times 0,50 \times 2400 = 480 \text{ kg}$

$$\text{Centroide} = \frac{1,325 \times 480 + 0,60 \times 1786}{480 + 1786} = 0,754 \text{ m}$$

Masa Total = 2266 kg

Figura D.2.3. Conversión de sistema real a sistema equivalente



A continuación se calcula la frecuencia natural.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde: w_n = Frecuencia angular natural

k = Rigidez del muro. $k = \frac{P}{\Delta} = \frac{3EI}{L^3} = 2576628,86 \text{ kN/m}$

Ancho, B: 50 mm

Largo, H: 1600 mm

I = Momento de inercia = $1,71E-02 \text{ m}^4$

$f'c$ = Resistencia característica del concreto = 21 MPa

E = Módulo de Elasticidad Concreto = 21538 MPa , Tomado de (NSR-10, C.8.5.1)

L = Altura del muro = 0,754 m

m = Masa del muro = 2266 kg

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{64492576628,86}{2266}} = 1066,4 \text{ rad/s}$$

Frecuencia natural = $f = \frac{w}{2\pi} = 169,73 \text{ ciclos/s}$

$$\text{Período natural} = T = \frac{1}{f} = 0,0059 \text{ s}$$

Como se puede apreciar de estos resultados, el muro de concreto combinado con el de tapia pisaada tiene una frecuencia natural muy parecida al muro de concreto solo.

D.3. ANÁLISIS DINÁMICO DE LOS MUROS

a. Generalidades

El análisis dinámico se efectúa, teniendo en cuenta el comportamiento de los muros durante el ensayo. En ese momento, los muros van a estar sometidos a una fuerza exterior cíclica, que es la del actuador. Es decir que la situación dinámica se puede aproximar a la de un sistemas de un grado de libertad con vibración forzada armónica. A continuación se calcularán los comportamientos de dos muros. (1): El de tapia pisaada de 45 cm de espesor. (2): El de concreto de 5 cm de espesor, acompañado con el muro de tapia pisaada. Esto con el fin de evidenciar la tendencia que presenta el muro de tapia pisaada de desplazarse mucho más de lo que se desplaza el de concreto en virtud de su rigidez, masa y agente actuador, exigiendo por lo tanto el trabajo de los elementos conectores para mantenerlos unidos.

b. Análisis dinámico del muro de tapia pisaada y espesor 45 cm

Frecuencia del Actuador:	$f =$	0,1 Hz
Frecuencia angular del Actuador:	$\Omega =$	0,63 rad/seg
Frecuencia natural del Muro:	$f_{\text{muro tapia}} =$	27,2 Hz
Frecuencia angular del Muro:	$w =$	170,91 rad/seg
Relación entre frecuencias angulares:	$r = \Omega / w =$	0,004
Razón de amortiguamiento (supuesto):	$\xi = \frac{c}{c_{\text{crit}}} =$	0,05
Frecuencia angular Muro, amortiguada:	$w_D = w\sqrt{1 - \xi^2} =$	170,70 rad/seg
	$tg(\theta) = \frac{2r\xi}{1-r^2} =$	36,7626E-05

Para el caso:

$$\begin{aligned}\Theta &= 0,02^\circ \\ \xi \cdot \omega &= 8,546 \\ u_0 &= 0,000 \text{ m} \\ v_0 &= 0,00 \text{ m/s} \\ P_0 &= 200,00 \text{ kN} \\ k &= 64499,62 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$u_{st} = \frac{P_0}{k} = 0,003101 \text{ m}$$

$$A = u_0 - \frac{u_{st} \cdot \text{sen}(-\theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} = 0,00000114 \text{ m}$$

$$B = \frac{1}{\omega_D} \left[v_0 + \xi \omega A - \frac{u_{st} \cdot \Omega \cdot \text{cos}(-\theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} \right] = -0,00001136 \text{ m}$$

$$\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2} = 0,999986553$$

$$\frac{u_{st}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} = 0,003101 \text{ m}$$

Reemplazando estos valor en:

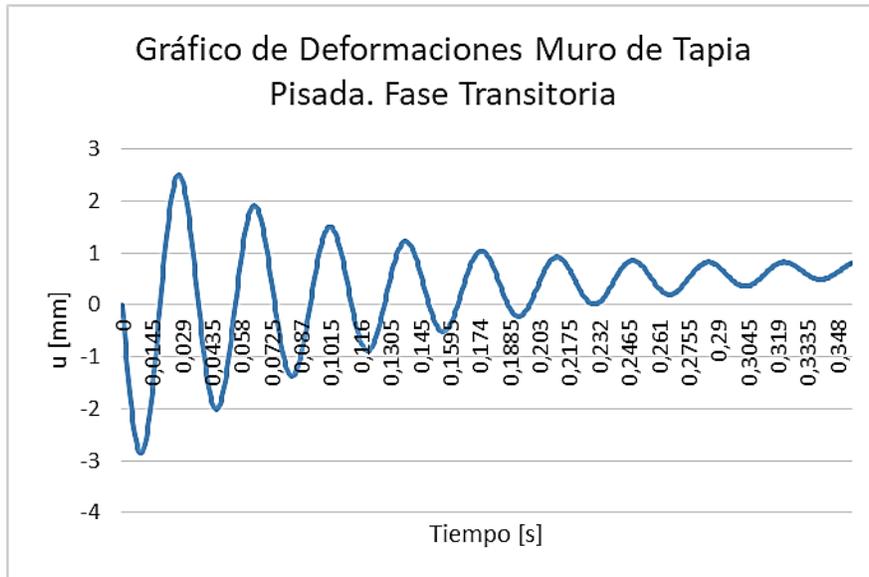
$$u(t) = e^{-\xi \omega t} [A \text{cos}(\omega_D t + B \text{sen}(\omega_D t))] + \frac{u_{st} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t - \theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}}$$

Se tiene la expresión de comportamiento del muro:

$$u(t) = e^{-8,546t} [1,14 \cdot 10^{-6} \cdot \text{cos}(170,7t) - 11,36 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen}(170,7t)] + 0,002171 \cdot \text{sen}(0,63t - 0,02)$$

A esta expresión corresponde la curva de comportamiento en la fase inicial, que es transitoria, mostrada en la gráfica D.3.1.

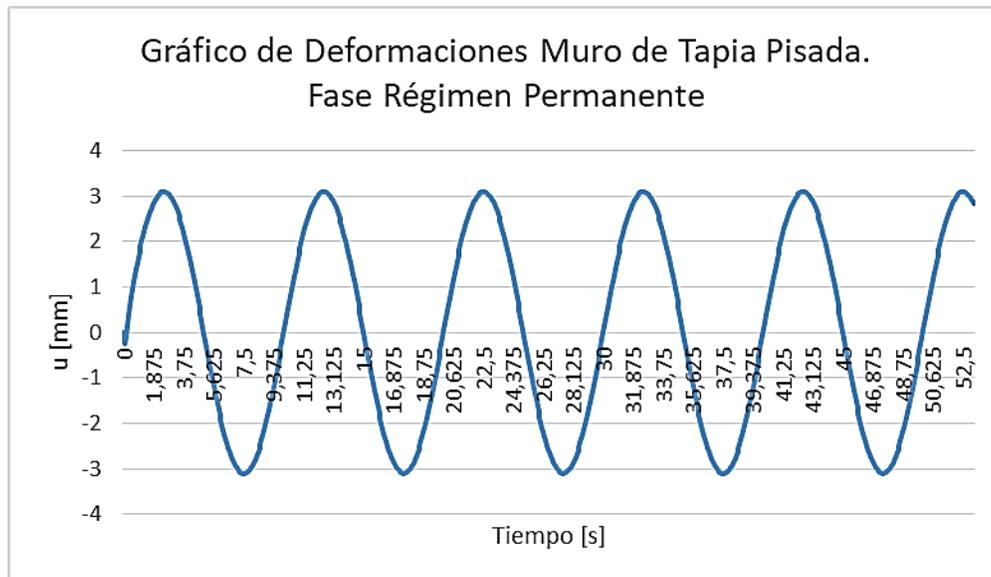
Figura D.3.1. Gráfica del movimiento ondulatorio que se espera del muro de tapia pisada, en su fase transitoria.



En ella se observa que la frecuencia imperante es la natural del muro.

En la gráfica D.3.2. se observa el comportamiento en régimen permanente del muro de tapia si estuviera solo.

Figura D.3.2. Gráfica del movimiento ondulatorio que se espera del muro de tapia pisada, en su fase de régimen permanente.



En ella se observa que la frecuencia imperante es la del actuador. Se observa también que la amplitud del movimiento del muro es de 2,17 mm, pero hay que tener en cuenta que esta amplitud sería a la altura del centroide. Suponiendo que la deformada del muro cumple una ley parabólica, la amplitud a la altura de la corona del muro sería de 5 mm, que es el que se asumió como Δ máximo.

c. Análisis dinámico del muro de concreto y espesor 5 cm, acompañado con el muro de tapia y espesor 45 cm.

Frecuencia del Actuador:	$f =$	0,1 Hz
Frecuencia angular del Actuador:	$\Omega =$	0,63 rad/seg
Frecuencia natural del Muro:	f_{muro} combinado =	170 Hz
Frecuencia angular del Muro:	$w =$	1066,43 rad/seg
Relación entre frecuencias angulares:	$r = \Omega / w =$	0,001
Razón de amortiguamiento (supuesto):	$\xi = \frac{c}{c_{crit}} =$	0,05
Frecuencia angular Muro, amortiguada:	$w_D = w\sqrt{1 - \xi^2} =$	1065,10 rad/seg
	$tg(\theta) = \frac{2r\xi}{1-r^2} =$	5,89177E-05
	$\Theta =$	0,0034 °
	$\xi \cdot \omega =$	53,322
Para el caso:	$u_0 =$	0,000 m
	$v_0 =$	0,00 m/s
	$P_0 =$	140,00 kN
	$k =$	2576628,86 kN/m
	$u_{st} = \frac{P_0}{k} =$	0,000054 m

$$A = u_0 - \frac{u_{st} \cdot \text{sen}(-\theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} = 0,000000003201 \text{ m}$$

$$B = \frac{1}{\omega_D} \left[v_0 + \xi \omega A - \frac{u_{st} \cdot \Omega \cdot \cos(-\theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} \right] = -0,00000003189 \text{ m}$$

$$\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2} = 0,999999655$$

$$\frac{u_{st}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} = 0,000054 \text{ m}$$

Reemplazando estos valores en la expresión de comportamiento dinámico del muro, se tiene la expresión:

$$u(t) = e^{-53,32t} [0,46 \cdot 10^{-8} \cdot \cos(1065,1t) - 4,56 \cdot 10^{-8} \cdot \text{sen}(1065,1t)] + 0,000054 \cdot \text{sen}(0,63t - 0,0034)$$

A la que corresponde la gráfica D.3.3. que muestra el comportamiento en la fase transitoria.

Figura D.3.3. Gráfica del movimiento ondulatorio que se espera del muro combinado Tapia-Concreto, en su fase transitoria.

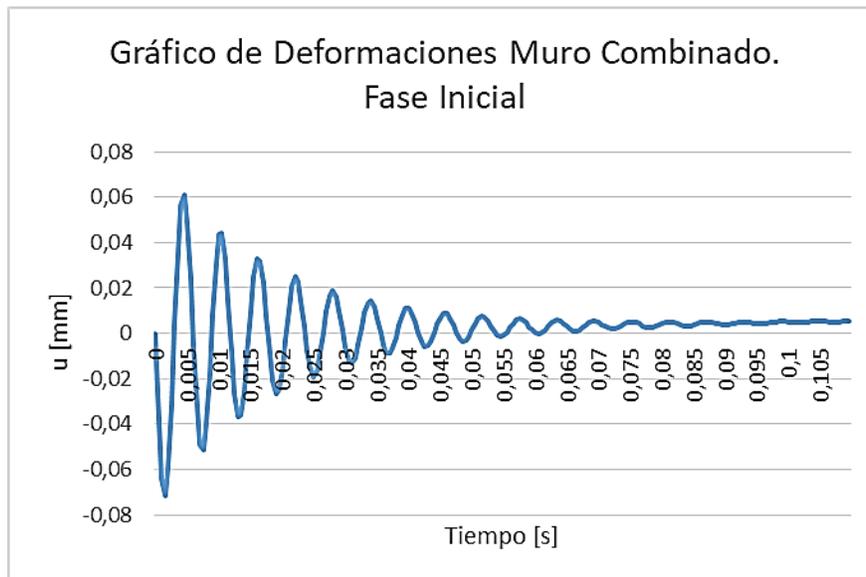
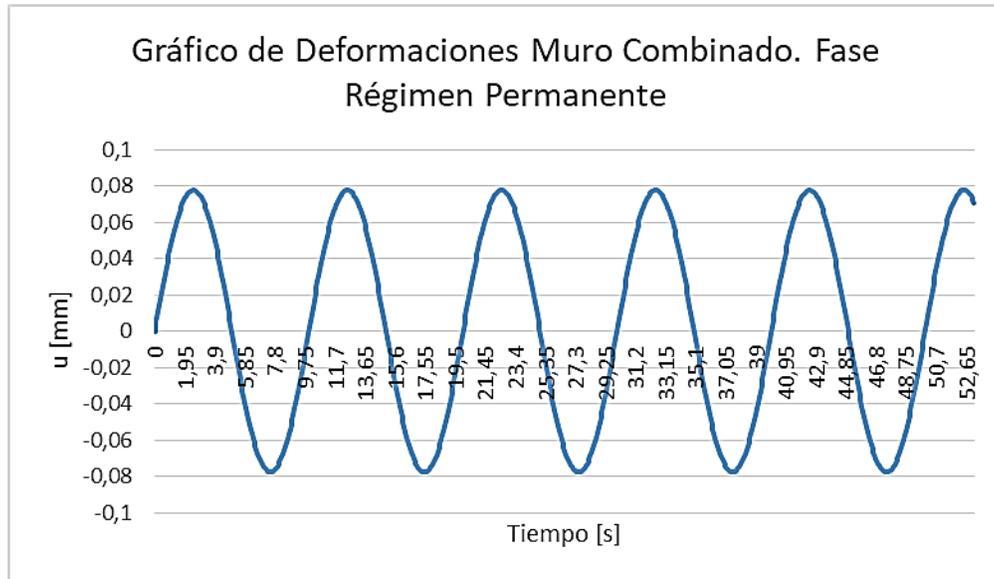


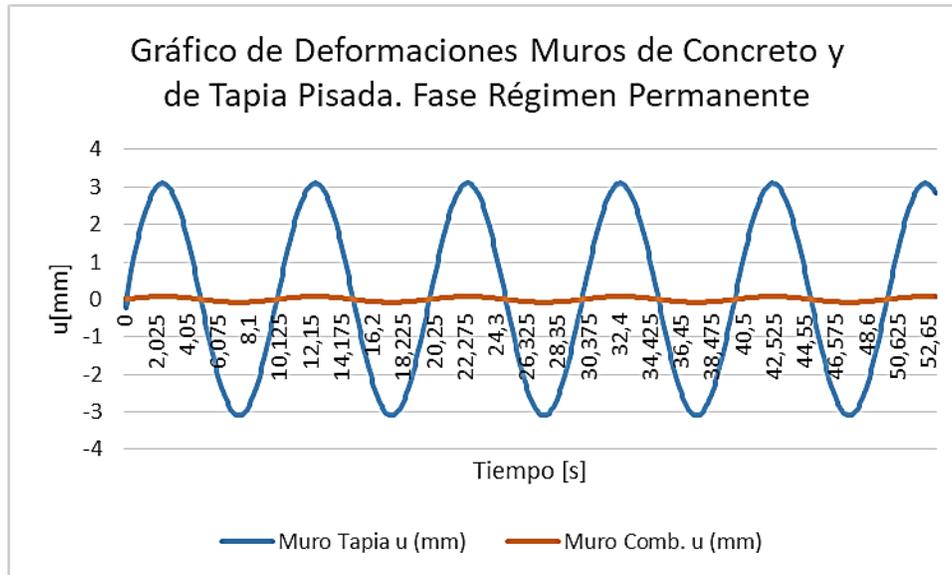
Figura D.3.4. Gráfica del movimiento ondulatorio que se espera del muro combinado Tapia-Concreto, en régimen permanente.



d. Observación del Comportamiento diferencial dinámico del muro de concreto y del muro de tapia

En la gráfica D.3.5. se muestra, en forma conjunta, la curvas de comportamiento en régimen permanente de los muros de tapia y de tapia-concreto, con el fin de observar gráficamente que tanto se diferencian sus desplazamientos y, por lo tanto, la deformación que tenderían a sufrir los conectores, si ellos no se oponen a la misma.

Figura D.3.5. Gráfica comparativa del movimiento ondulatorio que se espera de ambos muros, en régimen permanente.



Se observa que mientras que el muro de concreto casi no se deforma, el de tapia tendería a deformarse significativamente. Este desplazamiento diferencial es el que tienen que contrarrestar los pasadores.

Anexo E. DOCUMENTOS Y VIDEOS RESULTANTES DE LAS PRUEBAS

E.1. PARA LAS PRUEBAS DEL MURO EN TAPIA

En carpeta adjunta se muestran documentos consistentes en datos de resultados obtenidos en la prueba del muro construido en tapia, suministrados por el software de los actuadores, conteniendo desplazamientos suministrados por los extensómetros y cargas suministradas por el computador. También, videos y gráficas de desplazamiento en puntos del muro a alturas de 35 cm, 70 cm y 105 cm.

E.2. PARA LAS PRUEBAS DEL MURO EN TAPIA-CONCRETO

En carpeta adjunta se muestran documentos consistentes en datos de resultados obtenidos en la prueba del muro construido en tapia y reforzado con pantalla de concreto, suministrados por el software de los actuadores, conteniendo desplazamientos suministrados por los extensómetros y cargas suministradas por el computador. También, videos y gráficas de desplazamiento en puntos del muro a alturas de 35 cm, 70 cm y 105 cm.