

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA TÉCNICA VERNÁCULA
DE MUROS EN TAPIA PISADA CON INCLUSIÓN DE CAÑA BRAVA**

BRAYAM STEVE NÚÑEZ ROMERO

CRISTIAN ANDRÉS MEJÍA PARADA



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA TÉCNICA VERNÁCULA
DE MUROS EN TAPIA PISADA CON INCLUSIÓN DE CAÑA BRAVA**

BRAYAM STEVE NÚÑEZ ROMERO

CRISTIAN ANDRÉS MEJÍA PARADA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO
DE INGENIERO CIVIL**

DIRECTOR:

PhD. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

A nuestros padres por todo su apoyo en este largo camino.

AGRADECIMIENTOS

A todos los docentes que aportaron a nuestros conocimientos durante nuestra formación profesional.

Al PhD. Sergio Manuel Pineda Vargas por su compromiso y dedicación en el desarrollo de esta meta.

Al Ingeniero Darío Alonso Ramírez Gómez por su colaboración y consejo durante esta investigación.

Al PhD. Néstor Iván Prado García por su aporte en un momento de incertidumbre.

Al personal del laboratorio por su colaboración.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO TEÓRICO	20
Materiales necesarios para la construcción de tapia pisada	21
Suelo:	21
Ensayos de laboratorio	23
Determinación de los tamaños de partículas de los suelos (Norma Invias E-123)	23
Determinación del límite líquido, limite plástico y índice de plasticidad de los suelos. (Norma Invias E-125-126)	24
Relaciones humedad-peso unitario en los suelos (ensayo de normal de compactación)	25
Ensayos de campo	26
Prueba de olor	26
Prueba de la mordedura	26
Prueba del brillo	26
Prueba de sedimentación	26
Prueba del lavado de manos	26
Encofrado o tapial	27
Pisón (Herramienta)	29
Cuadrilla de trabajo de una estructura en tapia pisada	30
Preparador de la tierra	30
Zurronero	30
Pisón (Trabajador)	30
Contra pisón	31
Proceso constructivo de la tapia pisada	31
Comportamiento estructural de la tapia pisada	34
3. DISEÑO METODOLÓGICO	35
Protocolos y pruebas para determinar el desempeño de componentes estructurales y no estructurales	36
Tipología y diseño de especímenes	37

Búsqueda de material idóneo para los especímenes y cantidad de material	39
Ensayos de laboratorio	40
Diseño del montaje del modelo	40
Viga de cimentación	40
Transferencia de carga y sobrecarga	43
4. IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE PRUEBAS	48
Selección y extracción del material	48
Ensayos de granulometría y límites de Atterberg	50
Análisis de resultados	55
Viga de cimentación	58
Transferencia de carga y sobrecarga	61
Construcción de especímenes	65
Montaje e instrumentación	74
Ejecución de pruebas	77
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	78
Prueba lateral de carga cíclica	79
Capacidad de disipación de energía	85
Degradación de la rigidez	87
Patrones de falla	89
Muros A y B	89
Muros C y D	90
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciudad de Alhambra, Granada, España.	14
Figura 2. Intercambio cultural de la tapia pisada	16
Figura 3. Distribución de caña brava en muros de tapia pisada.	17
Figura 4. Mapa de construcciones en tierra y amenaza sísmica.	21
Figura 5. Tamaño de aberturas de los tamices utilizados en el ensayo de granulometría	23
Figura 6 Curva granulométrica de un suelo.....	24
Figura 7. Tipos de suelos del Sistema Unificado De Clasificación De Suelos.....	25
Figura 8. Pisón mecánico.....	27
Figura 9. Módulos de madera de construcciones en España.....	27
Figura 10 Elementos que conforman el tapial.....	29
Figura 11 Tipos de pisonos utilizados en la tapia pisada.	29
Figura 12 Cimentación de un muro de tapia pisada.	31
Figura 13 Construcción y conformación de un bloque de tapia pisada en un muro.....	32
Figura 14 Orden de los golpes realizados al compactar una capa de tierra	33
Figura 15 Proceso de compactación de un bloque de tapia pisada.....	33
Figura 16 Desplazamiento y trabazón horizontal y verticalmente de bloques de tapia pisada	34
Figura 17 Fallas típicas en construcciones de tapia pisada.....	35
Figura 18. Grafica de histéresis de un elemento.	36
Figura 19. Grafica de fragilidad y ductilidad	36
Figura 20 Protocolo de prueba controlado por desplazamientos	
Figura 21 Protocolo de prueba controlado por carga	37
Figura 22 Tapial-Molde/Formaleta utilizada en las construcciones con tapia pisada	38
Figura 23. Pre-dimensionamiento de los especímenes	38
Figura 24. Opción 1 de Cimiento Para disposición de especímenes.	41
Figura 25. Opción 2 de cimiento para disposición de especímenes.	41
Figura 26. Daño local muro en tierra zona superior izquierda (Ubicación del actuador hidráulico).43	
Figura 27 Daño local muro en tierra zona superior izquierda (Ubicación del gato hidráulico)	44
Figura 28 Montaje de experimento viga cabezal.....	44
Figura 29. Diseño de alternativa 1 para transición de carga.....	45
Figura 30. Diseño propuesto para la segunda alternativa	47
Figura 31. Marco articulado e instrumento de carga utilizados en investigación previa.....	48
Figura 32. Lugar de extracción del material.	49
Figura 33. Tipos de suelos hallados en la zona de exploración.....	49
Figura 34. Tipos de suelos encontrados y recolectados para ensayos de laboratorio.	50
Figura 35. Curva granulométrica suelo amarillo.....	51
Figura 36. Curva granulométrica suelo marrón.....	52
Figura 37. Curva de Relaciones humedad-peso unitario.	57
Figura 38. Extracción del material en campo.	
Figura 39. Almacenamiento del material en el laboratorio.	58
Figura 40. Diseño estructural final de las vigas de cimentación.	58
Figura 41. Proceso constructivo de viga de cimentación.....	59
Figura 42. Fundición de vigas de cimentación.....	60

Figura 43. Vigas de cimentación-a los 28 días de su construcción.	60
Figura 44. Perfiles metálicos IPE 140-A36.	61
Figura 45. Diseño de marco articulado.	62
Figura 46. Placa de anclaje diseñada vs Placa de anclaje construida.	62
Figura 47. Pasadores utilizados en las articulaciones del marco de carga.	63
Figura 48. Marco articulado diseñado vs Marco articulado construido.	63
Figura 49. Materiales para la construcción del marco articulado.	64
Figura 50. Unión de dados de concreto por pernos de acero.	64
Figura 51. Encofrado metálico.	65
Figura 52. Primer metro de encofrado muro A y B.	66
Figura 53. Pisón de madera fabricado.	66
Figura 54 . Preparación del material para la construcción de muros A y B.	67
Figura 55. Muestras de humedad tomadas durante de la construcción de los muros.	67
Figura 56 . Construcción del muro A.	68
Figura 57. Armado de formaleta y construcción simultanea del Muro A y Muro B.	68
Figura 58. Muros Desencofrados y terminados.	69
Figura 59. Retiro y limpieza de la Cal del muro ensayado.	69
Figura 60. Volcamiento y demolición del muro.	70
Figura 61. Proceso de demolición y triturado del material.	70
Figura 62. Montaje del encofrado muro C y D.	71
Figura 63. Caña brava.	71
Figura 64. Preparación del material en los muros C y D.	72
Figura 65. Disposición de las cañas longitudinal y transversalmente.	72
Figura 66. Compactación y desencofrado del Muro C.	73
Figura 67. Adecuación de los muros para las pruebas	74
Figura 68. Montaje del marco de carga.	75
Figura 69. Amarre de vigas superiores y maderas de contacto.	75
Figura 70. Acople entre la celda de carga del actuador y el marco articulado.	76
Figura 71. Montaje de sobrecarga en el muro de tapia pisada.	76
Figura 72. Instrumentación ensayo.	77
Figura 73. Gráfica Histéresis Muro A.	79
Figura 74. Gráfica Histéresis Muro B.	80
Figura 75. Gráfica Histéresis Muro C.	80
Figura 76. Gráfica Histéresis Muro D.	81
Figura 77. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro A.	82
Figura 78. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro B.	82
Figura 79. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro C.	83
Figura 80. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro D.	83
Figura 81. Cargas de push & pull a una deriva del 0.20%, 0.80% y cargas máximas.	84
Figura 82. Envoltorio de carga de los muros de prueba.	85
Figura 83. Cálculo de energía disipada en grafica de histéresis.	85
Figura 84. Gráfica de energía total disipada por los muros.	86
Figura 85. Gráfica de energía total disipada hasta 0.8% de deriva.	87
Figura 86. Calculo de rigidez a partir de la gráfica de histéresis.	88

Figura 87. Gráfica de degradación de rigidez.	88
Figura 88. Rigidez de los muros al 0.20%, 0.80% y 1.40% de deriva.	89
Figura 89. Patrón de falla Muros A y B.	90
Figura 90. Patrón de falla Muros C y D.	90
Figura 91. Exposición de la caña brava en la falla a cortante.	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pre distribución de caña brava para especímenes de tapia pisada con inclusión de caña brava	39
Tabla 2. Diseño preliminar del cimiento.....	42
Tabla 3. Predimensionamiento de sobrecarga para alternativa 1	46
Tabla 4. Cálculos de fricción soportada por el suelo según Predimensionamiento de sobrecarga ..	46
Tabla 5. Resultados ensayo de granulometría suelo amarillo.	50
Tabla 6. Resultados ensayo de granulometría suelo marrón.	51
Tabla 7. Resultados limite líquido suelo amarillo.	52
Tabla 8. Resultados limite plástico suelo amarillo.....	53
Tabla 9. Resultados limite liquido suelo marrón	54
Tabla 10. Resultados limite plástico suelo marrón	54
Tabla 11. Clasificación de suelos.	55
Tabla 12. Resultados de ensayo de Proctor Estándar.....	56
Tabla 13. Dosificación de mezcla de concreto para vigas de cimentación.	60
Tabla 14. Denominación de muros y tipología.	67
Tabla 15. Resultados de humedades de compactación para cada muro.....	73
Tabla 16. Canales de datos del Data Logger y su ubicación.....	76
Tabla 17. Protocolo para el ensayo de carga lateral cíclica realizado en muros A, B, C y D.	78

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA TÉCNICA VERNÁCULA DE MUROS EN TAPIA PISADA CON INCLUSIÓN DE CAÑA BRAVA

AUTOR(ES): Brayam Steve Núñez Romero
Cristian Andrés Mejía Parada

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sergio Manuel Pineda Vargas

RESUMEN

La tapia pisada ha venido tomando gran auge debido a sus virtudes y a la concientización ambiental de los últimos años. Sin embargo, estos sistemas constructivos no cuentan con suficientes investigaciones que caractericen su comportamiento estructural. De esta manera, detalles constructivos como los que se implementan en Santander en donde se incluye caña brava (*Gynerium sagittatum*) en muros de tapia pisada, no han sido estudiados ampliamente y se confía solo en la tradición empírica de las personas que realizan esta labor. Esta investigación ha traído este conocimiento empírico a la academia y ha analizado el aporte estructural real de la caña brava a este tipo de estructuras, en aras de proporcionar un aval teórico y científico a la aplicación de este proceso constructivo. Para el desarrollo de esta investigación se construyeron dos pares de muros, en donde el primer par tenía la técnica tradicional de tapia pisada y el segundo par contaba con inclusión horizontal de caña brava. A estos muros se les practicó un ensayo de carga cíclica pseudo-estática con ciclos de carga controlados por deflexiones. Con los datos obtenidos se realizaron gráficas de histéresis, las cuales mostraron el comportamiento de los elementos de estudio. Este comportamiento está dado por la envolvente de carga, la cantidad de disipación de energía y la degradación de la rigidez de la estructura. Con estos resultados se observó que los muros con inclusión de caña brava disipan un 70% menos de energía que los construidos en la técnica de tapia pisada convencional según el protocolo desarrollado. Por este motivo se puede concluir que la caña brava dispuesta en sentido horizontal está perjudicando la entereza del elemento y no es recomendable utilizar este tipo de inclusión, por cuanto crea planos de fallas en la estructura y acelera el proceso de deterioro de esta.

PALABRAS CLAVE:

Tapia Pisada, Caña Brava, Derivas, histéresis

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: STRUCTURAL ANALYSIS BEHAVIOR OF THE VERNACULAR TECHNIQUE OF RAMMED EARTH WALLS WITH REED INCLUSION.

AUTHOR(S): Brayam Steve Núñez Romero
Cristian Andrés Mejía Parada

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sergio Manuel Pineda Vargas

ABSTRACT

The rammed earth technique is making a big impact nowadays because of its advantages and the environment awareness embraced in the latest years. Although, those kinds of constructions do not have enough research that show clues about its behavior under seismic effects and general structural performance. Thus, constructive details like the one that take place at the Department of Santander, in which reed (*Gynerium sagittatum*) is introduced in rammed earth walls, had not been studied properly and the details are just trust by the empirical tradition implemented by the workers of those techniques. The research brought this empirical tradition to academic field and analyzed the real structural contribution of the reed in this kind of structures, for the sake of supply a theoretical and scientific guarantee for this constructive process. For the development of this research, two pairs of rammed earth walls were built. The first pair were rammed earth walls without inclusion of other materials, the second pair had a horizontal inclusion of reed. A quasi-static cyclic test was implemented on the walls, with a controlled push & pull load cycle by drift ratios. With the gathered data, hysteresis' graphics were made and the curves show the behavior of the studied elements. This behavior is shown by the load envelope curve, the dissipated energies and the stiffness degradation of the structure. The results show that the walls with the inclusion of reed dissipates 70% less energies than the ones who were built with the common rammed earth technique. For this reason, the main conclusion here is that the reed inclusion in horizontal direction cause harm to element integrity and it is not suitable using this sort of technique, because creates fault plans in the structure and speed up the wall's degradation process.

KEYWORDS:

Rammed Earth, Reed, Drift Ratio, Hystericis

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

La tapia pisada es una antigua técnica en tierra armada, poco tecnificada e investigada, que ha perdurado por años como sistema constructivo y que, a pesar de la modernización y el surgimiento de procesos industriales de construcción, no muestra indicios de desaparecer (Gama Sanchez, 2007). Esta es una de las razones por las que vale la pena volver en el tiempo para hacer un análisis global de su historia y luego un estudio localizado, más detallado, que permita conocer como esta técnica consiguió aparecer en el departamento de Santander en Colombia y, adicionalmente, como han sido sus variantes a lo largo de su tiempo de existencia.

Como es bien conocido a lo largo de la historia de la humanidad, las religiones, los lenguajes, las tradiciones y otros aspectos antrópicos se han transmitido por medio del intercambio cultural que, en tiempos pasados no se llevaba a cabo de manera necesariamente pacífica, sino por medio de diferentes guerras y enfrentamientos bélicos, muchos de ellos por el control y dominio territorial (López Pérez, 2015). Reconociendo los inicios de la construcción en tierra en la China Neolítica hacia 5000 a. C. y la consolidación de sus técnicas en toda la China milenaria hacia 2000 a. C. (Hall, Lindsay, & Krayenhoff, 2012), se puede limitar el recorrido de la construcción en tierra hacia Santander en el siglo VIII (año 711), llevada por el patrón de guerra y conquista del Reino Visigodo que ocupaba gran parte de la península ibérica desde el siglo V, lugar que fue invadido y conquistado al sur de su territorio por los musulmanes quienes provenían del norte de África con la intención de expandir su territorio y dominio. De esta manera se consolidó el territorio controlado por los musulmanes en la península ibérica también denominado al-Ándalus (Collins, 1991). Una vez los musulmanes se establecen al sur de la península ibérica, inician la construcción de ciudades y poblaciones aplicando técnicas constructivas propias de las construcciones al norte de África. Entre estas técnicas de construcción se encuentran la construcción en tierra armada por medio de adobe y bloques de tierra; esta técnica constructiva consiste en el levantamiento de muros por medio de hiladas de bloques de tierra secados al sol, pegados entre sí por tierra en estado saturado o barro (Galvis, 2016). Aplicando estos conocimientos constructivos los musulmanes en su época de oro realizaron grandes construcciones en la península ibérica que demostraban el poder y la posición que ocupaban. El mayor ejemplo de esto es la ciudad de Alhambra (*Figura 1*), que se levanta sobre uno de los puntos más elevados de la ciudad de Granada, en la colina de Sabika. De esta manera los musulmanes conferían un claro símbolo de poder al reino visigodo y ocupaban una posición estratégicamente fuerte contra todas las posibles invasiones de estos. A lo largo de esta época de

expansión, conquista y construcción se consolidó el Reino Nazarí de Granada, estado musulmán situado en el sur de la península ibérica (Collins, 1991).



Figura 1. Ciudad de Alhambra, Granada, España. (Tomado de Google Imágenes)

Al mismo tiempo que el Reino Nazarí se consolidaba, los ibéricos, en respuesta a la invasión iniciaban la reconquista desde el norte aproximadamente en el año 722 con la rebelión de Don Pelayo; de esta manera volvieron a su poder territorios ya conquistados y culturizados por los musulmanes. Por tanto, los hoy llamados españoles entraron en un cruce de culturas en el que los métodos de construcción musulmanes fueron tomados y adaptados a las técnicas constructivas locales de la época. Esta reconquista española finaliza en el año de 1492 con la conquista de Granada por parte de los Reyes Católicos (GRAMLICH, 2013). A lo largo de estos 750 años la influencia de las construcciones en tierra armada en la península ibérica se incrementó, y ese mismo año de 1492 los Reyes Católicos financiaron la partida de Cristóbal Colón en la búsqueda de una nueva ruta comercial con Asia a través del océano atlántico conllevando esto al descubrimiento del “nuevo mundo” y posteriormente a la conquista de América (López Pérez, 2015).

Mucho tiempo antes de que los españoles llegaran al actual territorio colombiano, las primeras culturas indígenas importantes no nómadas ya habían aparecido, aproximadamente hacia el año 500 a. C. (Gama Sanchez, 2007). Culturas originarias como por ejemplo los Muisca se dedicaban al caciquismo y construían sus asentamientos en zonas planas, que por lo general estuvieran bajo el follaje de los árboles, conectándolos por medio de redes de caminos. Las construcciones en su mayoría eran realizadas como una pequeña casa de planta rectangular o circular, cuyas paredes eran fabricadas en bahareque, técnica de tierra armada en la que se forma un entramado de madera anclado al piso que era cubierto en sus aberturas con barro, y la cubierta formada en general por hojas de palma o paja que eran puestas sobre un ramillete de elementos de madera (López Pérez, 2015). Este tipo de asentamientos y las empalizadas que los rodeaban eran el principal resguardo de los indígenas ante las condiciones climáticas, los animales salvajes y otras tribus indígenas rivales,

y constituyen esta tradición ancestral como el punto de inicio de la cultura de la construcción en tierra en el país.

Una vez los españoles llegaron al actual territorio colombiano e iniciaron su respectiva conquista, las técnicas indígenas tuvieron que adecuarse a las innovaciones constructivas implementadas por los españoles. De esta manera las ciudades españolas fundadas en el actual territorio colombiano entre los años 1500 y 1600, aproximadamente, fueron construidas con bahareque debido a que muchas de las zonas conquistadas por los españoles ya contaban con este tipo de construcción indígena (López Pérez, 2015). Para la mitad del siglo XVI los españoles empiezan a preocuparse por la defensa de sus territorios debido a las constantes incursiones indígenas que buscaban la reconquista de sus dominios, por lo que para los españoles se hizo necesaria la construcción de fortificaciones y murallas en las cuales, predominaban las técnicas de construcción en adobe y tapia pisada; estas construcciones eran mucho más pesadas y por tanto más resistentes ante los ataques indígenas. Ya para los siglos XVII y XVIII los españoles dominaban el territorio colombiano y ante la paz que presentaban sus dominios iniciaron la construcción de ciudades de mayores tamaños y más fortalecidas. De esta manera se empieza a ver el tradicional trazado de ciudades en damero, en el cual, el centro de la ciudad era conformado por edificaciones como el parque, la iglesia, el mercado y las instituciones políticas; estas construcciones en su mayoría eran edificaciones de dos pisos en tapia y adobe (López Pérez, 2015). Durante estos años, la tapia pisada vivió un tiempo de esplendor en el que se convirtió en la técnica más popular para la construcción y en la más usada en todo tipo de edificaciones. Ya para inicios del siglo XIX la arquitectura española y sus técnicas constructivas finalizan su traspaso cultural; en esta misma época el territorio colombiano se independiza del dominio del imperio español, el cual deja plasmada su tradición constructiva en el territorio nacional, forjando las bases para el desarrollo de más y nuevas técnicas constructivas (Rivero Bolaños, 2007). De esta manera se concluye el intercambio cultural iniciado en el siglo VIII por los musulmanes hacia los españoles e igualmente el realizado por los españoles al actual territorio colombiano desde el siglo XVI hasta el siglo XIX (Figura 2).

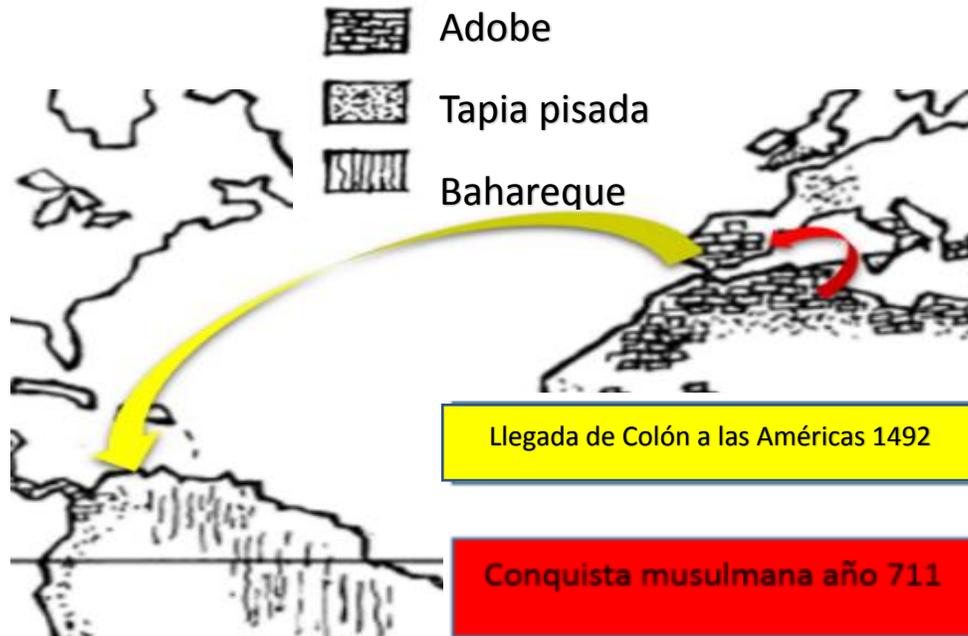


Figura 2. Intercambio cultural de la tapia pisada (GRAMLICH, 2013)

Tradicionalmente estas técnicas de construcción en tierra reinaron hasta la llegada del concreto a Colombia a finales de la segunda mitad del siglo XIX (Cementos del caribe, 1994). De estas técnicas de construcción vernáculas, una de las más asentadas en Santander ha sido la de construcción de muros en tapia pisada. Se puede decir entonces, que esta técnica no depende de recursos externos sino únicamente de materiales hallados en el medio local y al mismo tiempo se construye con mano de obra de la región. Las edificaciones se construyen con la experiencia desarrollada a lo largo del tiempo por artesanos tradicionales y sus diseños se basan puramente en la repetición de construcciones pasadas y no en estudios técnicos o científicos de las propiedades físico-mecánicas de los materiales o del sistema constructivo. Tampoco se consideraban las solicitaciones a las que se pudiera ver expuesta la estructura de tierra armada en condiciones usuales provocadas por cargas gravitacionales y/o condiciones ambientales (Afanador Garcia, Carrascal Delgado, & Bayona Chinchilla, 2013). La tapia pisada no es considerada por las normas colombianas actuales como un sistema con funciones estructurales suficientes para ser usado en zonas de riesgo sísmico, debido a que posee una debilidad frente a esfuerzos cortantes provenientes de movimientos dinámicos como sismos. No obstante, países como el Perú cuentan ya con normativas para la construcción de este tipo de edificaciones (Norma Técnica De Edificación, NTE, 199) (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007)

Llama la atención que en municipios del departamento de Santander, Colombia, que es una zona predominantemente con alta actividad sísmica debido a la presencia de fallas tectónicas como la del Caribe, Nazca y Sudamericana, y posicionado en el nido sísmico de Santa Marta-Bucaramanga (Gama Sanchez, 2007), se usen y subsistan aún técnicas de construcción en tierra armada como el bahareque y la tapia pisada. A la tapia pisada en Santander se le adiciona, tradicionalmente, un material extra en el proceso constructivo, conocido como Caña Brava (*Gynerium sagittatum*) (Cardona Naranjo, Calderón Arias, & Martínez Figueroa, 2015). Esta Caña Brava es dispuesta de manera longitudinal y transversal entre las capas compactadas de tierra armada durante el proceso constructivo (Figura 3) (Davila Corzo & Puentes Puentes, 2004).

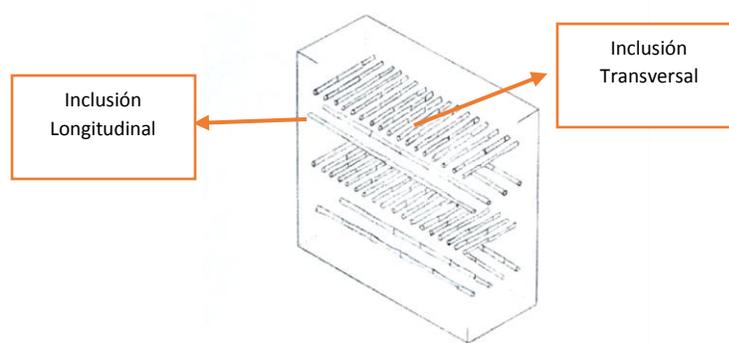


Figura 3. Distribución de caña brava en muros de tapia pisada. (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000)

No obstante, aunque la inclusión de caña brava en este tipo de edificaciones sea reconocida entre los artesanos que construyen con esta técnica (Tapieros) (Rivero Bolaños, 2007), es ésta una práctica que, como muchas en la construcción, proviene de técnicas tradicionales y empíricas en los procesos constructivos que no tiene respaldo técnico o evidencia científica alguna de su eficiencia, y que solo se han transmitido de generación en generación entre las personas que se dedican a esta labor.

La tapia pisada ha tenido en la actualidad un significativo auge alrededor del mundo, principalmente por motivos culturales, artísticos y estéticos. Es por esto que se han realizado investigaciones para comprender su comportamiento y buscar alternativas para mejorar su vida útil. Localmente existen estudios como uno realizado en la Universidad Industrial De Santander (UIS), en el que se hicieron pruebas estáticas a muros de tapia pisada con inclusión horizontal de caña brava y se comparó su desempeño con muros que incluían refuerzo horizontal y vertical en caña brava, pero no se realizó una comparación con un muro de tapia pisada convencional, para verificar si la caña brava tiene

alguna utilidad estructurante en este sistema constructivo (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000). Otro trabajo de grado esta vez realizado en la Universidad Pontificia Bolivariana se enfocó en determinar y analizar la caracterización de los diferentes tipos de tierra utilizados en el proceso constructivo con tapia pisada por medio de ensayos geomecánicos y mineralógicos, pero sin realizar ningún análisis del comportamiento estructural de la construcción. (Davila Corzo & Puentes Puentes, 2004). A nivel nacional se tienen importantes investigaciones en cuanto a tapia pisada; una de los más relevantes es un estudio realizado por la Universidad De Los Andes en el cual analizan el comportamiento estructural de la técnica de tapia pisada utilizada actualmente y proponen alternativas de rehabilitación sísmica viables desde el punto de vista técnico (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007). Aunque este es uno de los estudios más completos realizados en el país en cuanto al análisis estructural y sísmico de la tapia pisada, no se utilizó ningún tipo de reforzamiento con Caña Brava por tanto siguen sin existir estudios en el país que le den un respaldo o un rechazo científico a la inclusión de este material en este tipo de estructuras, aunque sea una técnica ampliamente utilizada en el departamento de Santander. A nivel mundial también existen diferentes investigaciones que estudian el comportamiento de las estructuras en tapia pisada y proponen algunas mejoras y reforzamientos. Algunos ejemplos de las investigaciones más recientes e importantes que se han desarrollado a lo largo del mundo han sido publicadas en revistas como: *Construction and Building Materials* (Emin Arslan, Emiroglu, & Yalama, 2017) (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014) (T. Bui, B. Bui, Limam, & Maximilien, 2014) y *Engineering Structures* (B. Bui, Hans, C. Morel, & P. Do, 2011) (Miccoli, Drougkas, & Müller, 2016). Sin embargo, en ninguna de ellas analiza el comportamiento estructural de la tapia pisada con inclusión de reforzamientos como la Caña Brava por tanto se puede estar seguro de concluir que, hasta el momento, no hay ningún estudio a nivel mundial basado en el tema que esta investigación afronta. Cabe resaltar que todos los estudios anteriormente nombrados y otros que han sido consultados, son usados como fundamento teórico y práctico para el desarrollo de esta investigación.

El propósito entonces de este estudio es traer ese conocimiento empírico tradicional a la academia y, aplicando conocimientos de la ingeniería actual, la mecánica de suelos y en general las ciencias físico-mecánicas, analizar el aporte estructural real de la Caña Brava a este tipo de construcciones en el departamento de Santander. Los resultados de pruebas de carga pseudo-dinámicas y estáticas son mostrados aquí, producto del diseño, implementación y análisis del experimento físico de especímenes construidos en el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento estructural de muros de tapia pisada tradicionalmente construidos con inclusión de caña brava, dispuesta de forma longitudinal y transversal, sometiéndolos a pruebas pseudo-dinámicas y estáticas de carga.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un experimento que permita recrear en el laboratorio la construcción de muros en tierra armada tradicionales en Santander y las pruebas estructurales a aplicar sobre dichos muros.
- Analizar la respuesta estructural de muros construidos en tapia pisada con la inclusión de caña brava y comparar su desempeño respecto a muros convencionales sometidos a diferentes pruebas de carga.
- Determinar la utilidad estructural de la caña brava en el sistema constructivo de Tapia Pisada en Santander, a partir de resultados provenientes de pruebas de laboratorio y, adicionalmente, estudiar la posibilidad de inclusión de otros materiales como reemplazo de la caña brava en la estructura.

2. MARCO TEÓRICO

Para hablar con criterio de la tapia pisada se hace necesario recurrir a una serie de conceptos y teorías en cuanto a su concepción misma y al origen de sus procesos constructivos. El primer concepto en el que se debe ahondar para poder hablar de tapia pisada es el de vernacular: considerándose como todo aquello que es propio del territorio o de la región, algo nativo de una parte específica del territorio (Gómez M., 2010). Cada técnica de construcción vernacular es única debido a que sus diferentes tipologías han sido desarrolladas dependiendo de condiciones climáticas (radiación solar durante el día, régimen de lluvias y de vientos) y geomorfológicas de la zona en las que se han utilizado. Así mismo, los materiales empleados son diferentes en cada región para cada tipología y las técnicas constructivas han dependido de la forma de vida y prácticas económicas y culturales de sus habitantes. En general, la arquitectura vernacular ha logrado adaptarse a diferentes necesidades a las que se han visto expuestos sus habitantes y brindar una solución digna de vivienda a las comunidades albergadas (García-Reyes & Anzellini, 2016).

Dentro de estas técnicas vernaculares una de las más reconocidas es la construcción en tierra. Se estima que alrededor del 30-40% de la población del mundo vive o trabaja en este tipo de estructuras (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014), las cuales requieren mantenimiento rutinario debido a que son relativamente débiles ante los efectos del ambiente y a que sus capacidades de resistencia a esfuerzos de cargas estáticas se consideran inferiores a las de estructuras convencionales de concreto. Si a todo esto le sumamos que muchas de estas construcciones están ubicadas en zonas de actividad sísmica y que su resistencia a los esfuerzos dinámicos no ha sido estudiada a profundidad, el asunto de su durabilidad es puesta en duda (*Figura 4*). Un detalle adicional que puede perjudicar la durabilidad de estas estructuras es la incorrecta intervención de las mismas por parte de los propietarios quienes, por desconocimiento, pueden debilitar las construcciones en procesos de adecuaciones locativas. Aun así, existen muchas construcciones en tierra armada que han soportado devastadores terremotos y siguen siendo habitables (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).

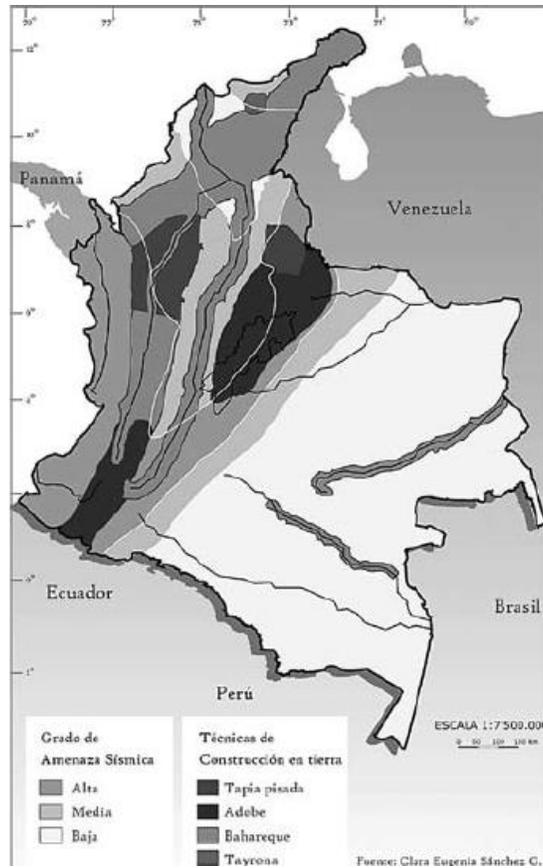


Figura 4. Mapa de construcciones en tierra y amenaza sísmica. (Gama Sanchez, 2007)

Se puede afirmar entonces que la tapia pisada es una técnica vernacular en tierra simple, debido a que solo se usa suelo en estado natural que se obtiene por lo general del sitio de construcción, en el que únicamente se hace un cernido, aireado y humedecimiento del mismo previo a su compactación, dentro de un encofrado denominado tapial (Maldonado Ramos, Castilla Pascual, & Vela Cossio, 1997).

Materiales necesarios para la construcción de tapia pisada

Suelo:

La tapia pisada es una técnica amigable con el medio ambiente ya que se utilizan materiales normalmente no modificados del sitio en donde se va a realizar la obra y por consiguiente el gasto energético por concepto de producción y transporte de los mismos materiales es poco considerable

(B. Bui, Hans, C. Morel, & P. Do, 2011). Debido a esto, el principal aspecto a tener en cuenta para iniciar una construcción en tapia pisada es el material en sí mismo con el que van a ser construidos los muros de tapia pisada. No obstante, se ha generado la creencia errónea de que todo suelo, no orgánico, se puede utilizar para realizar construcciones de tapia pisada, lo cual no es necesariamente cierto. Existen investigaciones que dan pautas en cuanto a que tipo de tierra y composición es adecuada para la construcción en tapia pisada. Por ejemplo, en el manual de construcción de tapia pisada del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) se muestra que la granulometría ideal de material para realizar construcciones en tapia pisada debe ser de: gravillas (0 al 15%), arenas (40 al 50%), limos (20 al 35%) y arcillas (15 al 25%) (SENA, 2012). Por otra parte, un estudio reciente publicado en la revista *Construction and Building Materials* apunta a que el suelo ideal para la construcción en tapia pisada consiste de una combinación de arcillas (10-40%), limos (10-40%) y arenas del (35-65%), señalando también que el contenido de arcilla en el suelo es el más importante debido a que la arcilla es la que brinda la cohesión entre todas las partículas del suelo compactado, mientras se ve sometido al fenómeno de contracción durante el secado posterior a la construcción del bloque de tapia pisada. Los estudios de igual forma se refieren a que el tamaño máximo de las partículas de suelo debe ser de 2 mm para la construcción con esta técnica y el tamaño máximo del agregado debe ser de 20-25 mm (Emin Arslan, Emiroglu, & Yalama, 2017). Un estudio publicado en la revista *Applied Clay Science* concluye que se produce mayor plasticidad en la tierra a utilizar, al usar un porcentaje de arcillas similar al considerado ideal para construir tapia pisada y un agregado de un tamaño máximo de 4 mm, es decir arenas. De igual forma concluyeron que al usar una dosificación 1:1 de arcilla y arena se evitan fisuras por contracción. (Emiroğlu, Yalama, & Erdoğan, 2015). Otro factor importante a la hora de construir la tapia pisada es el contenido de humedad que se debe utilizar para la tierra. Aunque muchos estudios apuntan a que el proceso de compactación se debe realizar con el contenido óptimo de humedad arrojado en la prueba de Proctor estándar, la cual provee el peso específico seco máximo (B. Bui, Hans, C. Morel, & P. Do, 2011), otros estudios por su parte afirman que, si se está trabajando con suelos arcillosos, el contenido de humedad que optimiza la compactación entre capas está determinado por un 20% más del arrojado en el Proctor estándar (Miccoli, Drougkas, & Müller, 2016).

Ensayos de laboratorio

Para poder conocer las características de los suelos se tienen una serie de ensayos de laboratorio y de campo que permiten hallar una tierra apta para la construcción de las estructuras de tapia pisada según lo especificado en los diferentes estudios presentados.

Determinación de los tamaños de partículas de los suelos (Norma Invias E-123)

Este ensayo de laboratorio permite conocer la distribución de partículas de una porción de suelo extraída tal cual como se encuentra en el terreno y la determinación de sus constantes físicas. El ensayo consiste en la separación de las partículas del suelo por medio de una serie de tamices que contienen aberturas estandarizadas según cada tamaño de partícula (Figura 5).

75 mm (3")	2.00 mm (No. 10)
50 mm (2")	850 μm (No. 20)
37.5 mm (1-1/2")	425 μm (No. 40)
25 mm (1")	250 μm (No. 60)
19.0 mm (3/4")	106 μm (No. 140)
9.5 mm (3/8")	75 μm (No. 200)
4.75 mm (No. 4)	

Figura 5. Tamaño de aberturas de los tamices utilizados en el ensayo de granulometría (*Instituto Nacional De Vías , 2012*)

Al final del ensayo se toma como referencia el peso de la muestra inicial y se hallan los porcentajes de cada tamaño de partícula de grava, arenas y finos; con estos porcentajes se grafica una curva granulométrica que permite observar con mayor facilidad la distribución de partículas del suelo (*Figura 6*).

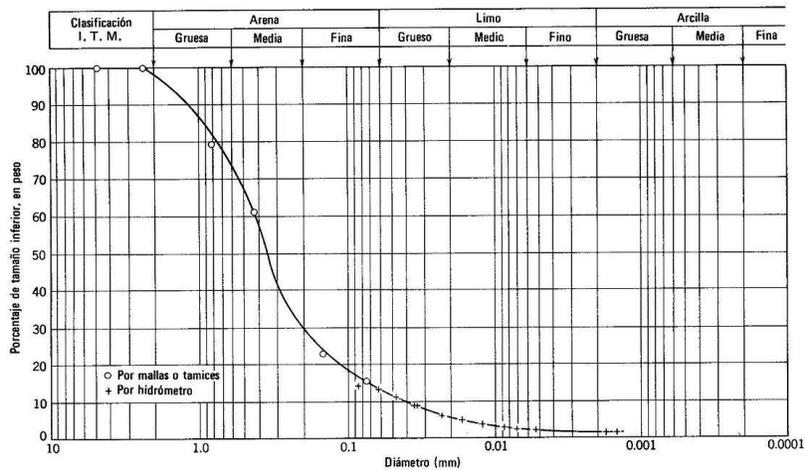


Figura 6 Curva granulométrica de un suelo (*Instituto Nacional De Vías , 2012*)

Determinación del límite líquido, límite plástico y índice de plasticidad de los suelos. (Norma Invias E-125-126)

El límite líquido de un suelo se halla por medio de tanteos, en los cuales, una porción de suelo se humedece y se esparce sobre una copa de Casagrande dividiéndose en dos partes con un ranurador, esas dos partes fluyen como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la copa al iniciar su funcionamiento, el límite líquido es la humedad en la que las dos partes fluyen a los 25 golpes de la copa. El límite plástico por otra parte se determina formando rollos de aproximadamente 3.2 mm de una porción de suelo y presionándolos hasta que su contenido de agua se disminuye hasta el punto en que se produce un agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es el porcentaje de humedad más bajo con el que se pueden formar rollos de suelo, sin que estos se agrieten o desmoronen.

La determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad interviene en varios sistemas de clasificación de suelos, dado que contribuyen a la caracterización de la fracción fina de los suelos. El sistema de clasificación unificado de suelos permite, por medio de los resultados de la prueba de granulometría y las pruebas de límite líquido y plástico, clasificar el tipo de suelo ensayado con un nombre distintivo y las proporciones de cada tipo de partícula hallada en el suelo. La realización de estos ensayos permite conocer qué tipo de suelo será utilizado para la construcción de la estructura de tapia pisada, e igualmente, permite compararlo con los estándares establecidos

por las diferentes investigaciones e instituciones para la construcción de muros en tapia pisada (Figura 7).

Símbolos del grupo	Nombres típicos
GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos
GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos
GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.
GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plástico
CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas dobles
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas
OH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad
Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos.

Relaciones humedad-peso unitario en los suelos (ensayo de normal de compactación)

Este ensayo se desea realizar no con el fin de ayudar a la clasificación del suelo porque no aporta nada a este ítem, más ayuda a dar una idea sobre la relación de la humedad con el peso unitario en el material a evaluar, lo cual es muy importante porque ayuda a conocer la cantidad de agua necesaria para que a un suelo ser compactado obtenga el mayor peso unitario y así tener una estructura suelo-agua eficiente y más resistente, aparte de que ayuda a tener una comparación entre la teoría y la experimentación sobre la cantidad de humedad que contiene un suelo con el cual se construye un muro en tapia pisada respecto a la humedad optima real de ese suelo; se debe tener muy en cuenta que se utiliza de referencia la normativa INV E-141-13 que trata sobre un ensayo de compactación normal ya que en la construcción tradicional de muros en tapia pisada se utiliza un pisón y el suelo se compacta de manera manual, por lo cual este ensayo es el adecuado por cuanto la humedad optima puede variar si se trata de una compactación manual a una compactación más tecnificada como con un pisón neumático, u otro elemento para una compactación modificada.

Figura 7. Tipos de suelos del Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (Bautista Garcia, 2014)

Ensayos de campo

Comúnmente en la construcción artesanal de muros en tapia pisada en Colombia no se llevan a cabo estudios tan experimentados para la selección de la tierra, por tanto, se tienen una serie de estudios en campo que realizan los artesanos de la tapia pisada para determinar si la tierra hallada en la zona es apta para la construcción de los muros de tapia pisada.

Prueba de olor

En este ensayo se toma un poco de material húmedo para detectar el olor a moho comúnmente característico en los suelos con mucho contenido orgánico. Con este ensayo de campo se permite descartar suelos orgánicos los cuales no son aptos para la construcción de la tapia pisada (BORGES RAMOS, 2010).

Prueba de la mordedura

En este ensayo se toma un poco de suelo y se aplasta con los dientes, si el suelo no cruje es arcilloso, si cruje ligeramente el suelo es limoso, pero si el suelo cruje desagradablemente es arenoso (BORGES RAMOS, 2010).

Prueba del brillo

Se forma una bola compacta de suelo húmedo y luego se parte por la mitad con un cuchillo observando las superficies resultantes, se trata de arcillas cuando las superficies son brillantes; de limos cuando son poco brillantes y arenas cuando son opacas (BORGES RAMOS, 2010).

Prueba de sedimentación

Se muele una pequeña cantidad de tierra para agregarla a una botella con el mismo volumen de agua y posteriormente agitarla. Las arenas se decantarán primero debido a que son las partículas más pesadas seguidas de los limos y por último se depositaran las arcillas que son las partículas más ligeras (BORGES RAMOS, 2010).

Prueba del lavado de manos

Se lavan las manos después de haber manipulado la tierra en estado húmedo, si al aplicar agua las manos se sienten jabonosas y difíciles de limpiar el suelo contiene más arcillas, si la tierra se trata polvorosa y fácil de enjuagar se trata de limos.

Por medio de estas pruebas de campo los tapieros identifican un material demasiado orgánico o demasiado arenoso para descartarlo y un material con un porcentaje más alto de arcillas que de limos lo cual se prefiere en la construcción de tapia pisada (BORGES RAMOS, 2010).

Encofrado o tapial

Los tipos de encofrado que se utilizan para la construcción de los muros de tapia pisada dependen netamente de los recursos y la tecnificación con los que se cuenta en la región en la que se realiza el proyecto. En las construcciones de tapia pisada desarrolladas en países avanzados, la tecnificación ha permitido reducir los tiempos del proceso constructivo y la mano de obra utilizada en este. Por ejemplo, en países como España pionero en construcción de tapia pisada, se manejan módulos de encofrado mucho más grandes y fáciles de armar (Figura 9) y la compactación es realizada con un pisón de funcionamiento mecánico mucho más rápido y efectivo que el pisón manual convencional (Figura 8).



Figura 8. Pisón mecánico



Figura 9. Módulos de madera de construcciones en España

(Font & Hidalgo, 2011)

Por otra parte, en países como Colombia, la tecnificación del proceso constructivo se ha visto impedida por el hecho de que la tapia pisada no es un tipo de construcción avalada por las normas del país, esto da paso a que las nuevas construcciones de tapia pisada se lleven a cabo en zonas donde la reglamentación constructiva no es tan estricta, es decir zonas rurales. Por tanto, el encofrado utilizado para la construcción de muros en tapia pisada se limita comúnmente, en muchas partes del país, a un solo módulo de madera denominado tapial y conformado por:

- Dos tablonces laterales de madera con unas dimensiones aproximadas de 1 metro de alto por 2.1 metros de largo. Estos tablonces deben ser de una madera resistente debido a que soportan la presión generada por la tierra dentro del encofrado sin pandearse, y al mismo tiempo son los que le dan la altura y longitud a cada sección de muro que se vaya construyendo.
- Las tapas del encofrado son conformadas por dos paneles de madera de aproximadamente 1.2 metros de alto y 0.5 metros de ancho (Espesor del muro). Estos paneles deben ser rectos debido a que son los encargados de darle el aplomo al muro de tapia pisada.
- La unión de las tapas del encofrado y los paneles laterales es dada por 3 pares de cercos o maderos. Los dos primeros pares se denominan parales, los cuales, cuentan con una longitud que rebasa 50 cm la altura de los tablonces laterales. Estos parales se ubican a los costados de los paneles laterales y son los encargados de cerrar estos contra las tapas del encofrado. Los parales son ajustados en su parte superior a los tablonces laterales del tapial, por medio de un lazo cuyo nudo permite introducir un pequeño madero denominado bastón que actúa como torque y cierra los paneles laterales en su parte superior. En su parte inferior los parales son atornillados, por las comúnmente llamadas agujas, al bloque inferior de tapia en el cual se han dejado previos agujeros para poder pasar los tornillos, estos agujeros son rellenados posteriormente con el material del muro, las agujas permiten sostener el tapial a medida que se avanza en altura del muro y facilitar el procedimiento constructivo de este.
- El último par de maderos es puesto entre la cara exterior de las tapas del muro y los parales. Este madero cumple la función de no permitir la apertura de las tapas del tapial en su parte superior.

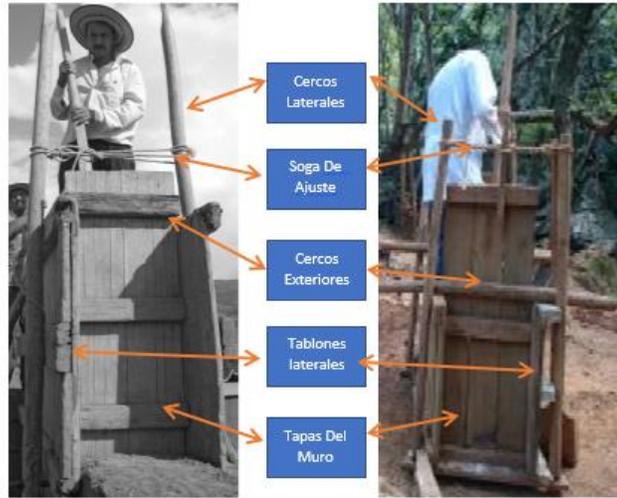


Figura 10 Elementos que conforman el tapial (Rivero Bolaños, 2007)

Pisón (Herramienta)

El pisón es la herramienta utilizada para realizar la compactación de la tierra dentro del encofrado. Como fue nombrado anteriormente, el pisón utilizado en países más tecnificados es mecánico debido a que aumenta el rendimiento de estas construcciones. En Colombia los tapieros por lo general trabajan en zonas muy remotas y no manejan este tipo de tecnificación, debido a su costo y dificultad de adquisición, por tanto, los pisones manuales de madera siguen siendo la opción más utilizada en las construcciones de tapia pisada. Estos pisones son conformados por un mango que debe ser ergonómico, y su punta o cabeza cuya forma puede ser cónica en forma de cuña o de base plana. Aunque este es el tipo de pisón más común y recomendado por los tapieros, las bases de los pisones pueden tener todo tipo de formas y varían dependiendo de la tradición de cada zona (Figura 11). Al mismo tiempo el peso del pisón debe oscilar entre 5 kg y 9 kg teniendo en cuenta que este debe brindar comodidad a la persona encargada de apisonar la tierra.

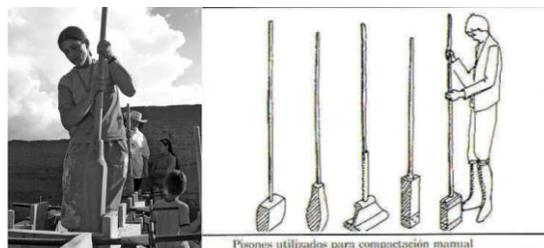


Figura 11 Tipos de pisones utilizados en la tapia pisada. (Rivero Bolaños, 2007)

Cuadrilla de trabajo de una estructura en tapia pisada

Las construcciones de tapia pisada se llevan a cabo usualmente por cuatro personas, cada una encargada de cumplir una función diferente pero vital para el desarrollo del proyecto.

Preparador de la tierra

Es la persona encargada de extraer y preparar la tierra escogida para la construcción de los muros de tapia pisada. Por lo general se encarga de destruir y pulverizar los grumos de tierra hallados, retirar la materia orgánica del suelo y controlar la humedad de la tierra hasta tenerla en el punto óptimo para su compactación. El preparador de tierra debe tener suficiente experticia para realizar los respectivos ensayos de campo que permitan determinar que la tierra si está en su punto de humedad óptimo y no se encuentra ni muy seca, porque no compactara, o muy barrosa, porque se pega al pisón o se esparce fuera del golpe sin compactar (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000).

Zurronero

Es la persona encargada de llevar la tierra ya preparada al tapial y depositarla dentro de éste. Se llama zurronero debido a que la canasta en la que se solía cargar la tierra en años anteriores se denominaba zurrón. En la actualidad la tierra por lo general es cargada en sacos (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000).

Pisón (Trabajador)

El pisón es la persona con más experiencia de la cuadrilla y su labor no es solo pisar el material que el zurronero deposita dentro del tapial sino que también se encarga de vigilar la cantidad del material necesario para cada capa de compactación, constatar que el material preparado este en su punto óptimo de compactación, dirigir el montaje y el traslado del tapial al igual que el aplomado de este, llevar el ritmo de la obra con su compactación y decidir cuándo cada capa ha sido compactada de manera óptima. En caso de haber refuerzos para la tapia pisada es el que se encarga de disponerlos dentro del tapial y compactar con ellos (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000).

Contra pisón

Es la persona encargada de ayudarle al pisón en sus labores y sigue normalmente sus órdenes en cuanto a compactación y armado de formaleta (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000).

Proceso constructivo de la tapia pisada

En la elaboración de este tipo de construcciones la cimentación es uno de los puntos con mayor importancia debido a que aísla los muros de tapia pisada del suelo y por consiguiente de su humedad propia, principal enemigo de este tipo de construcciones (Maldonado Ramos, Castilla Pascual, & Vela Cossio, 1997). Para la construcción de la cimentación se realiza una excavación lineal a lo largo del perímetro de los muros que posteriormente es llenada con rocas (angulosas o redondeadas) similares en tamaño y forma a las utilizadas en los concretos ciclópeos (Figura 12) (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007).

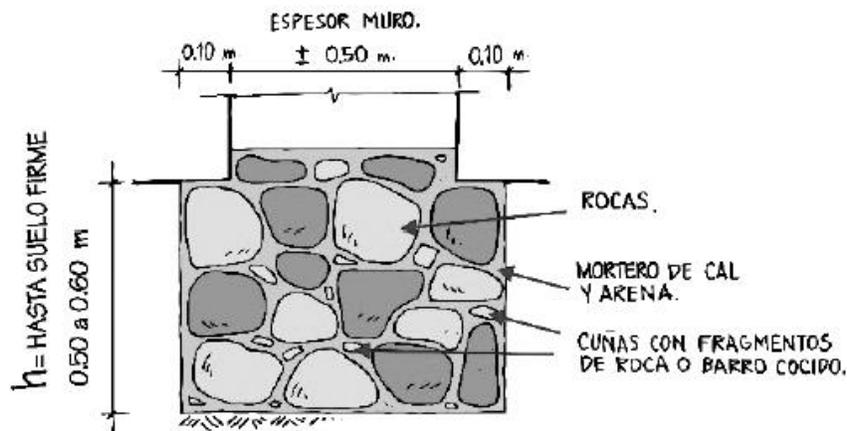


Figura 12 Cimentación de un muro de tapia pisada. Tomado de (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007)

Una vez las rocas han llenado la excavación y sobresalen de esta, se procede a armar el tapial y todos sus elementos nombrados anteriormente, donde el interior de este debe estar respectivamente aplomado. Este tapial debe brindar un espacio cómodo para trabajar dentro de él. Se recomienda que previo a disponer la primera capa de suelo sobre la junta, se coloque una capa o “cama” de cal y arena, y unas piedras planas con la intención de que, al empezar la compactación, la tierra se filtre por las juntas de las rocas del sobre-cimiento (SENA, 2012).

Las construcciones de los muros de una estructura de tapia pisada se realizan por medio de trabazón de bloques compactos, similar a la construcción de mampostería, solo que en bloques considerablemente más grandes (aproximadamente 140 veces mayores en volumen que un bloque H15) y sin ningún tipo de material de adherencia entre bloques debido a que están contruidos uno sobre otro. En el medio local los espesores de los muros de tapia pisada varían entre 0.5 m y 1.2m (entre más grueso sea el muro, mejor estabilidad y capacidad tendrá para contrarrestar esfuerzos laterales) (Gernot, 2001). Los bloques con los que se realiza la tapia pisada se construyen de forma monolítica (Figura 13), aunque las diferentes juntas creadas entre todos los bloques compactos hacen que la construcción completa no sea estrictamente considerada monolítica (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).

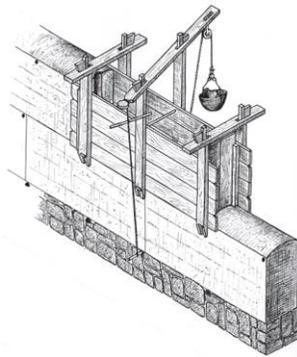


Figura 13 Construcción y conformación de un bloque de tapia pisada en un muro. Tomado de (Font & Hidalgo, 2011)

Estos bloques son generados por medio de un proceso de compactación in situ de capas de tierra en el que el zurroneador deposita la tierra dentro del tapial y el pisón y contrapisón se encargan de esparcirla y verificar que no superan los 15 cm dentro del tapial mencionado con anterioridad, estas capas son compactadas por medio del pisón de madera y se debe pisar de manera ordenada primero por los lados y luego por el centro (Figura 14) hasta que la capa alcanza un espesor de aproximadamente 10 cm hasta que el sonido del pisón al golpear la tierra cambia y el pisón no deja marca considerable en la superficie. Todas las capas deben tener entre 10 y 15 cm, ya que se ha demostrado que capas con más de 15 cm no son compactadas adecuadamente (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).



Figura 14 Orden de los golpes realizados al compactar una capa de tierra (Gernot, 2001)

Cuando se finalice la compactación de la capa se procede a rellenar con 15 cm de suelo y a la compactación de la siguiente este proceso es repetido hasta terminar la compactación de todo el bloque de tapia pisada (Figura 15). A lo largo de la construcción del bloque de tapia pisada se acostumbra a usar caña brava como inclusión a los muros, cada 40 cm o 50 cm aproximadamente, iniciando con las cañas en el sentido paralelo al largo del muro (Longitudinalmente) y alternándose con las cañas paralelas al ancho del muro (Transversalmente).

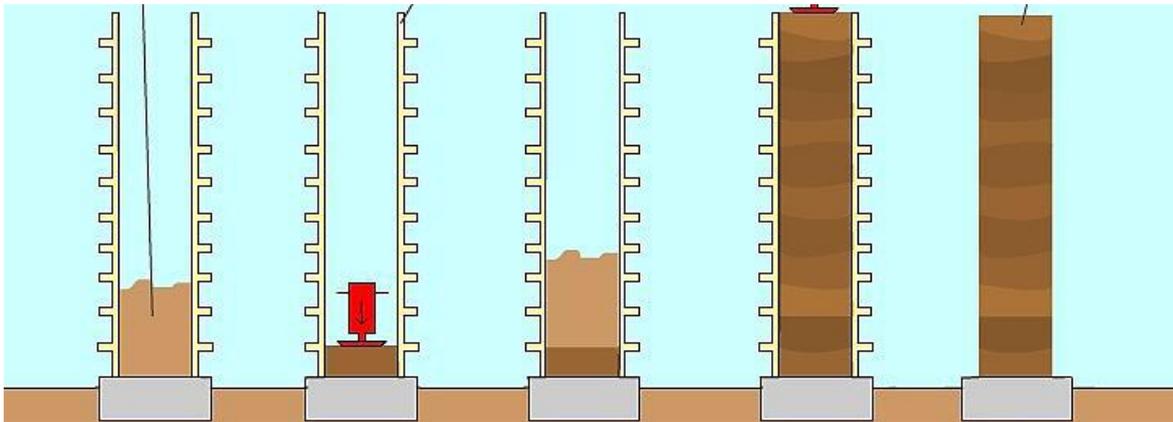


Figura 15 Proceso de compactación de un bloque de tapia pisada (GRAMLICH, 2013)

Una vez completada la altura de un bloque se procede con el desplazamiento horizontal del tapial y se inicia la compactación del bloque adyacente. Una vez terminada la primera hilera de bloques el tapial debe ser desplazado de manera vertical (Figura 13), para de esta forma continuar con la siguiente hilera, la cual debe ir desplazada horizontalmente para generar la trabazón requerida en estas construcciones (Figura 16) y al mismo tiempo con el fin de evitar las fisuras verticales que se producen por la junta entre dos bloques verticales (SENA, 2012).

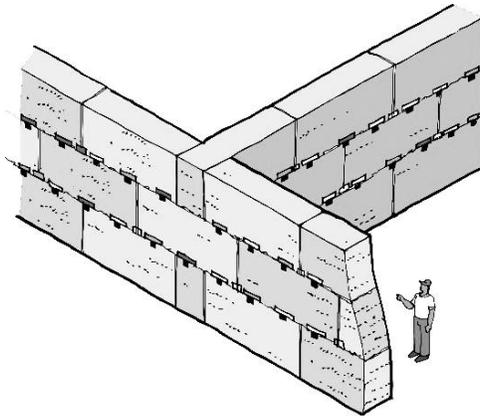


Figura 16 Desplazamiento y trabazón horizontal y verticalmente de bloques de tapia pisada (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007)

Comportamiento estructural de la tapia pisada

La tapia pisada es un sistema estructural conformado por muros de carga, los cuales, cuentan con una resistencia a compresión que satisface las cargas estáticas y sollicitaciones verticales de este tipo de construcciones. La resistencia de la tapia pisada depende entonces de factores tales como: la granulometría de la tierra, el contenido de humedad, la compactación y las estabilizaciones que se le hayan realizado al suelo. Para valores de densidad aparente entre un rango de 1700 y 2400 kg/m³ se obtienen, según los registros de investigación, resistencias a la compresión de entre 1.5 a 4 MPa (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014). Por otra parte, desde el punto de vista de la sismica las construcciones de tapia pisada no son muy recomendables, debido a que, al ser sometidas a una carga horizontal solo dependen de su capacidad de resistir esfuerzos a cortante, para los cuales, las construcciones en tierra tienen una resistencia muy baja comparadas con otro tipo de estructuras construidas hoy en día (Afanador Garcia, Carrascal Delgado, & Bayona Chinchilla, 2013). Así mismo, debido a que los muros deben ser de espesores muy grandes para soportar las cargas perpendiculares y horizontales aplicadas a los muros, típicas en los sismos, el peso tan alto de estas construcciones puede generar fuerzas de inercia considerables durante un sismo. Aun así, múltiples investigaciones alrededor del mundo apuntan a la forma en que deben ser diseñadas, construidas y reforzadas las construcciones en tapia pisada para que puedan tener un comportamiento satisfactorio ante los efectos de las fuerzas horizontales ocasionadas en los sismos (Gernot, 2001). Igualmente, aunque hallan múltiples investigaciones, el comportamiento sísmico depende de muchos parámetros, típicos del sitio donde se lleva a cabo cada construcción en tapia pisada, tales

como la sísmica de la zona, los tipos de materiales utilizados en la construcción, sistemas constructivos y las características ambientales. Siendo esto así cada construcción en tierra y cada estudio arroja resultados diferentes dependiendo de estos aspectos (Gernot, 2001). Las fallas típicas de estos muros se presentan cuando hay esfuerzos de flexión perpendiculares al plano del muro, altos empujes horizontales que generan fallas a cortante y mal apoyo o exceso de peso en la cubierta

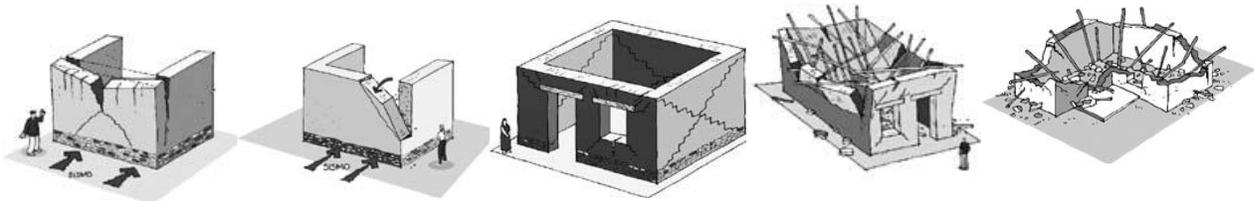


Figura 17 Fallas típicas en construcciones de tapia pisada (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007)

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Toda investigación que involucre en sus objetivos el comportamiento estructural de un elemento debe estudiar la resistencia frente a diferentes tipos de excitaciones, así como su respuesta estructural, es decir, fuerzas externas, esfuerzos internos, deformaciones y tensiones generadas por el elemento estudiado (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Junio 2007). En la investigación planteada en este documento se busca realizar una comparación entre dos tipos de elementos estructurales: los muros en tapia pisada construidos comúnmente respecto a los muros en tapia pisada con inclusión de caña brava construidos en Santander, que, aunque arquitectónicamente sean muy similares, presentan una diferencia en cuanto a lo que los compone en su interior como estructura. Por tanto, se debe tener en cuenta que el tipo de prueba a realizar en los especímenes debe generar datos que al ser analizados permitan describir el comportamiento estructural de las dos tipologías de muro y hacer una comparación de estas. Debido a que el objetivo general de esta investigación es realizar un análisis pseudo-dinámico y estático de los especímenes, la selección del ensayo se debe realizar teniendo en cuenta este punto clave.

Protocolos y pruebas para determinar el desempeño de componentes estructurales y no estructurales

Gran parte de las investigaciones encabezadas a analizar el comportamiento estructural de un elemento se basan en el documento numero 461 realizado por la FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA 461). En este documento se describen que tipos de protocolos y de pruebas se pueden realizar a los elementos que componen las edificaciones, para permitir una mejor comprensión del comportamiento de estos ante fuerzas externas. Los protocolos de prueba a aplicar para un análisis pseudo estático, en el cual se enfoca esta investigación, dependen de una serie de variables con las que cuenta el elemento que se va a ensayar.

Prueba de cizallamiento o “Racking Testing”: Esta prueba es utilizada en elementos que usualmente no son tomados en cuenta en el diseño estructural, es decir, componentes que no aportan ninguna rigidez a la estructura en conjunto. Debido a esto, la respuesta estructural y por tanto los datos obtenidos en este tipo de pruebas son los de un elemento con un comportamiento estructural frágil (*Figura 19 - Zona Roja*).

Prueba histerética: Este tipo de prueba es aplicada a elementos estructurales, es decir, que aportan rigidez a la estructura en conjunto. De este ensayo se obtienen datos de fragilidad de un elemento que tiene mayor capacidad de disipación de energía (*Figura 19 - Zona Azul*) y al mismo tiempo se pueden conocer las características estructurales de los componentes las cuales pueden ser utilizadas para realizar modelos analíticos del elemento (*Figura 18*).

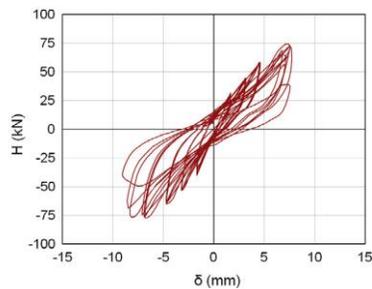


Figura 18. Grafica de histéresis de un elemento.

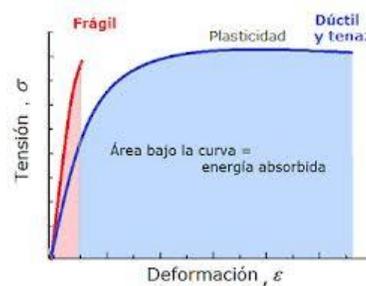


Figura 19. Grafica de fragilidad y ductilidad

(Miccoli, Urs, & Fontana, 2014)

Estas pruebas consisten en la aplicación de un protocolo de prueba cíclico que puede ser controlado por deformaciones (Figura 20) en el cual se toman los datos de las cargas necesarias para realizar un desplazamiento determinado a un espécimen, o un protocolo de prueba cíclico controlado por cargas (Figura 21) donde se toman los desplazamientos generados por una carga específica aplicada al elemento, cada uno de los controles depende de qué tipo de datos se necesitan para el análisis.

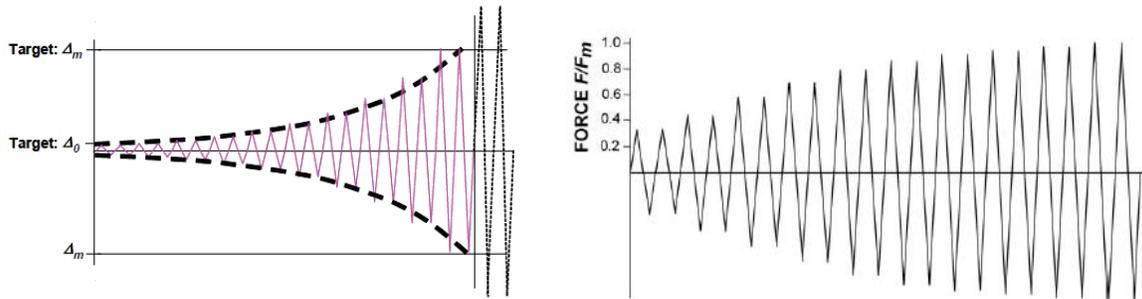


Figura 20 Protocolo de prueba controlado por desplazamientos Figura 21 Protocolo de prueba controlado por carga

(FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Junio 2007)

Tipología y diseño de especímenes

Los especímenes de la investigación se describen como muros de tapia pisada y muros en tapia pisada con inclusión de caña brava. Para la construcción de elementos con la técnica vernácula de muros en tapia pisada se requiere de un suelo con cierta composición y caracterización de sus propiedades físico-mecánicas, no es posible establecer una ecuación sobre la medida exacta de peso o volumen de tierra que se requiere ya que eso depende de la calidad del suelo utilizado y de si tendrá algún tipo de estabilización o inclusión de otros tipos de materiales (SENA, 2012). Los muros que serán construidos para las pruebas son bloques enteros y compactos, debido a su viabilidad como elemento monolítico para realizar un análisis estructural. Para la construcción de estos bloques se puede utilizar un molde de madera o metal como se menciona en el marco teórico (Gernot, 2001).

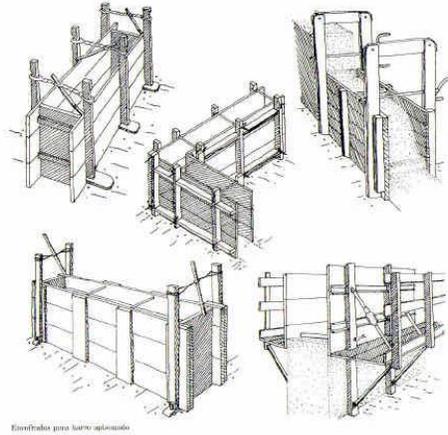


Figura 22 Tapial-Molde/Formaleta utilizada en las construcciones con tapia pisada (Gernot, 2001)

Teniendo en cuenta la tipología del espécimen se debe analizar el dimensionamiento del mismo, para ello se consideran diferentes aspectos. El primero de ellos está relacionado con la idea de replicar la técnica con la cual se construyen los muros de tapia pisada en la región de Santander, la cual consiste en la construcción por bloques con un molde en madera constituido por paneles llamado tapial cuyo espesor común es de 50 cm (Figura 22). Las investigaciones previas que se han realizado en la temática componen el segundo aspecto que se tuvo en consideración. En estas, el dimensionamiento dependió de la escala de los especímenes y estructuras a comparar (Emin Arslan, Emiroglu, & Yalama, 2017) (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014). Las dimensiones implementadas en estos estudios se mantuvieron en un rango de 1.00x1.50x0.20m a 1.50x1.50x0.25. El último aspecto analizado es el tipo de pruebas que se planean realizar. Para esto se tiene en consideración que en un protocolo de carga cíclica es más sencillo producir una deriva a un elemento con un dimensionamiento en el cual la altura del espécimen sea mayor a su longitud.

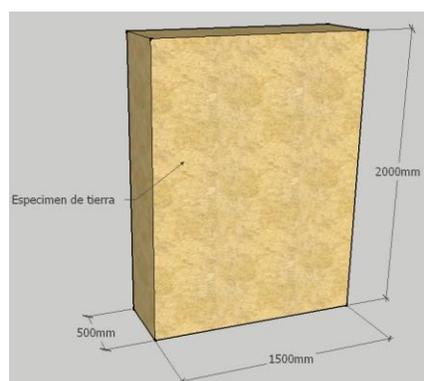


Figura 23. Pre-dimensionamiento de los especímenes

Con base en los aspectos mencionados previamente se sugiere que los especímenes a edificar tanto para los muros con inclusión de caña brava como los que no contaban con dicha inclusión mantengan un espesor de 50 cm buscando la relación con los muros que se encuentran contruidos en las diferentes regiones de Colombia. Igualmente, se recomienda que la longitud del espécimen sea al menos 3 veces el espesor del mismo, por lo que se propone una longitud de 1.50 metros. Por último, se plantea que los muros tengan una altura de aproximadamente 2.00 metros buscando deformar el muro como fue mencionado previamente en este capítulo (Figura 23). Para los especímenes en tapia pisada que además contienen en su estructura una inclusión del material denominado caña brava, se recomienda según investigaciones preliminares (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000) y a lo tradicionalmente utilizado en el departamento de Santander, una distribución horizontal de la caña brava en filas longitudinales intercaladas con filas de caña transversales a una altura de 0.40 m cada una (Figura 3) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Pre distribución de caña brava para especímenes de tapia pisada con inclusión de caña brava

Disposición preliminar de caña brava para especímenes con dicha inclusión				
	Longitud	Separación entre c/u	Separación a Caras Exteriores del Espécimen	Separación entre Filas
	m	m	M	m
Longitudinal	1.350	0.100	0.075	0.400
Transversal	0.350	0.116	0.075	0.400

Búsqueda de material idóneo para los especímenes y cantidad de material

En la búsqueda de un suelo apto para la construcción de los especímenes se plantea la recolección de un material que guarde cierta proporción con la tipología de suelo utilizado en estructuras de tapia pisada. La cantidad de muros a ejecutar debe ser una muestra representativa que permita obtener datos y realizar una comparación entre ellos, por tanto, se sugiere que sean contruidos al menos tres muros para cada tipo de estructura.

$$\text{Material necesario para 3 especímenes} = 3 * 1.3 * (2 * 1.5 * 0.5) = 5.85 \text{ m}^3$$

***NOTA:** El valor de 1.3 se refiere a que se considera un factor de expansión del suelo del 30%

Ensayos de laboratorio

Para conocer las cualidades del suelo con el que se cuenta para la construcción de los especímenes, se tienen que realizar una serie de ensayos que permitan afirmar la calidad del material y a partir de esta en caso de tener más de un tipo de suelo, seleccionar el material de trabajo. Para una clasificación de suelos se requieren los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y relación humedad-densidad máxima o compactación explicados con anterioridad en el marco teórico de este documento.

Diseño del montaje del modelo

Para realizar el experimento se considera utilizar un muro de reacción perteneciente al laboratorio de estructuras. Igualmente, se hace necesario de un cimiento en el cual apoyar los especímenes con el fin de prevenir daños dentro del laboratorio relacionados con la construcción. Adicionalmente, para la correcta ejecución del experimento es necesario transmitir la carga de una manera eficiente, al elemento a ensayar, asegurando que la carga que se aplique sea la misma que reciba el espécimen y esta se distribuya eficientemente en la entereza del mismo. Por último, también se debe tomar en cuenta una sobrecarga para el espécimen, debido a que estas estructuras tienen que soportar una carga vertical referente a la cubierta u otros componentes de la estructura.

Viga de cimentación

Una viga o placa de cimentación se hace necesaria con el objeto de prevenir daños al laboratorio a la hora de realizar la construcción de los muros ya sea por el montaje del encofrado con el que se construyen los especímenes, o por el elemento utilizado para la compactación de los mismos. Igualmente se quiere proteger la estructura de tapia pisada de la humedad que pueda ponerla en riesgo (Figura 12). El cimiento que se decida incorporar tiene que ser capaz de ser izado y

transportado dentro del laboratorio, además de contar con la cualidad de permitir su anclaje a la losa rígida que hace parte del muro de reacción para prevenir el deslizamiento de los muros al aplicar una carga horizontal. Con esta finalidad se propone que cada extremo de la placa cuente con 4 orificios de una pulgada de diámetro distanciados centro a centro aproximadamente a 20 centímetros (la misma dimensión y separación que los orificios de la losa rígida). Como primera opción se propone una viga en concreto reforzado que trabaje como una placa. Su diseño estructural preliminar se realiza teniendo en cuenta las cargas aproximadas del pre-dimensionamiento de los especímenes. El diseño propuesto contaría con el refuerzo de acero visualizado en la Tabla 2.

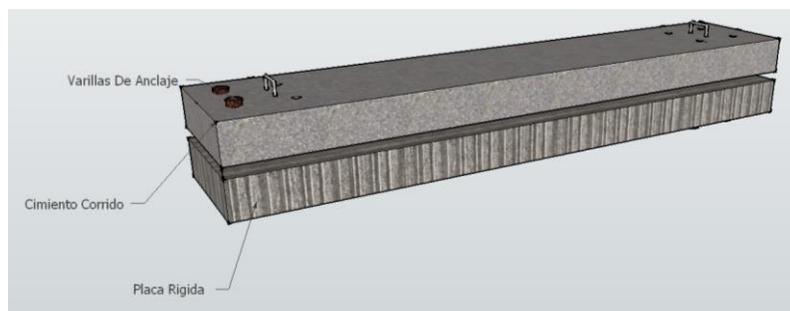


Figura 24. Opción 1 de Cimiento Para disposición de especímenes.

Se plantea como segunda alternativa para este ítem, la misma placa de cimentación, pero con un sobrecimiento de rocas que permita recrear de mejor manera los cimientos de una construcción en tapia pisada y a su vez con la hipótesis de que la trabazón entre roca y suelo no permita al muro deslizarse al ser sea sometido a una carga horizontal. Su diseño estructural y dimensionamiento es el mismo al de la primera opción (Figura 25).

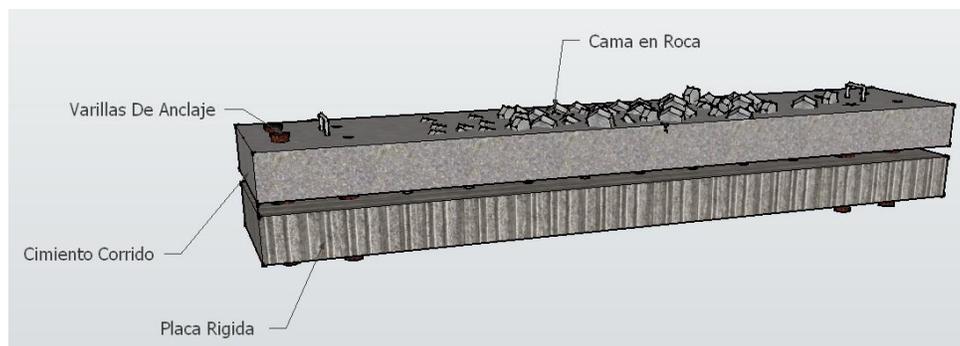


Figura 25. Opción 2 de cimiento para disposición de especímenes.

Tabla 2. Diseño preliminar del cimiento

Dimensionamiento de placa cimiento según espécimen			
F'c	LARGO	ALTO	ANCHO
21 MPa	m	m	m
Espécimen	1.50	2.00	0.50
Placa	2.10	0.15	0.50
Detalles superficiales			
Longitud c/u Extremos	Diámetro de orificios	Distancia centro a centro de orificios	Cantidad de orificio por extremo
m	m	m	4
0.3	0.0254	0.2	
Diseño preliminar de cimiento corrido			
Cargas evaluadas			
Carga permanente	KN/m	CARGA TRANSITORIA	KN/m
Peso Propio aproximado	7.56	Carga viva aproximada	1.60
Carga mayorada	11.63	Momento Máximo	3.27
Refuerzo con barras de acero			
	#Barra	Cantidad	Espaciamiento
			m
Flexión	3	4	0.133
Fraguado Y Temperatura	3	7	0.4

Transferencia de carga y sobrecarga

A la hora de obtener la respuesta estructural del muro que se va a ensayar se debe garantizar una correcta transferencia de carga a todo el elemento y este al mismo tiempo debe ser capaz de absorberla y transmitirla a toda su extensión, para que de esta manera la fuerza aplicada no se concentre en un solo punto y genere una falla local del espécimen. Se puede observar en diferentes investigaciones que los muros de tierra armada no son capaces por si solos de absorber directamente la carga producida por un actuador o algún otro instrumento y transmitirla a toda su extensión produciéndose así una falla local en el punto de contacto entre el instrumento de carga y el muro (Figura 26 y Figura 27), por tanto, se debe contar con un elemento externo que permita un correcto enlace entre la carga y el elemento sin ofrecer resistencia alguna que altere los datos del comportamiento real del espécimen. Además, es necesario tener en cuenta la carga vertical o sobrecarga que se debe adicionar a los muros, esto con el fin de asemejar la carga vertical que soportan las estructuras tradicionalmente. Dicha carga debe ser al menos la referente a la cubierta que es la mínima carga soportada por este tipo de elementos y que se asemeja a un valor de 1 Ton/m (Prada Diaz & Rivero Bolaños, 2000), (Nabouch, y otros, 2016).

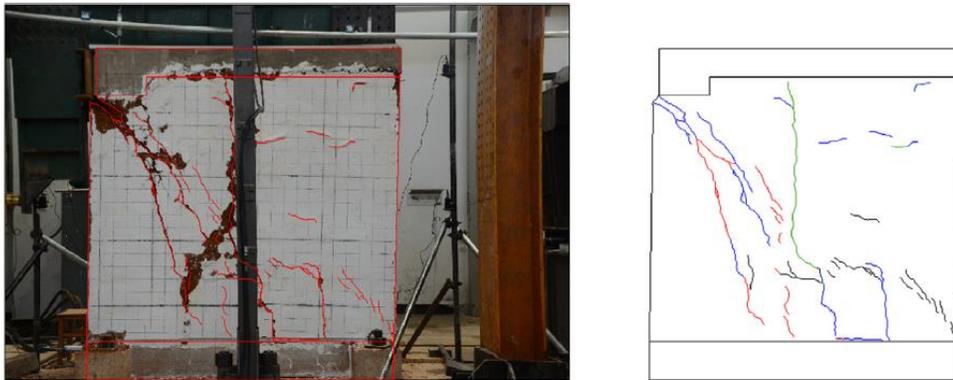


Figura 26. Daño local muro en tierra zona superior izquierda (Ubicación del actuador hidráulico)
(Liu, Wang, & Wang, 2015)



Figura 27 Daño local muro en tierra zona superior izquierda (Ubicación del gato hidráulico) (Prada Díaz & Rivero Bolaños, 2000)

A lo largo de la revisión bibliográfica se presentan diferentes alternativas de transmisión de carga y sobrecarga para pruebas de carga horizontal a muros y al mismo tiempo los diferentes montajes de los experimentos. En un primer documento se puede observar que se realiza la transmisión de carga por medio de una viga cabezal que cuenta con una sobrecarga aplicada por dos actuadores eléctricos (Figura 28) (Nabouch, y otros, 2016).



Figura 28 Montaje de experimento viga cabezal (Nabouch, y otros, 2016)

Basándose en este documento se concibe una alternativa para realizar la transmisión de carga a los especímenes. Esta idea consiste en construir unas vigas en concreto reforzado lo suficientemente pesadas (Teniendo como un mínimo valor de 1 Ton/m) que cumplan la función de sobrecarga y a su vez sean el acople entre la celda de carga del actuador y el espécimen (Figura 29), evitando así que el muro de tierra armada sea intervenido en alguna parte de su estructura y tener una

trasmisión eficiente de carga. Esta idea se basa en la hipótesis de que el muro de tierra genere la suficiente fuerza de fricción con el concreto de la sobrecarga impuesta, evitando el deslizamiento de esta y generando el desplazamiento horizontal del espécimen. Para el diseño preliminar de esta alternativa se propone utilizar una metodología de análisis de soporte al deslizamiento utilizada en muros de contención donde se analizan las cargas actuantes frente a las fuerzas resistentes. En este particular caso se tiene en cuenta las cargas de fricción del suelo, las cargas de fricción entre el suelo y el concreto reforzado y las cargas referentes al peso de la estructura que serían el sistema de marco de carga-sobrecarga. Basándose en la teoría de Rankine con la cual se analiza la estabilidad de un muro de contención al deslizamiento, y asumiendo: la sobrecarga a imponer como un muro de contención, la parte superior del espécimen como su suelo de fundación y el empuje de tierras como una fuerza generada por el instrumento de carga, se calculan las fuerzas de fricción resistentes y las fuerzas de fricción actuantes. Se debe tener en cuenta que para el cálculo de dichos valores eran necesarios datos sobre las propiedades físico-mecánicas del suelo que se estaba analizando, para lo cual se toma de referencia (HERNANDEZ QUINTERO & JEREZ SEPULVEDA, 2006) donde se tienen valores aproximados de dichas propiedades.

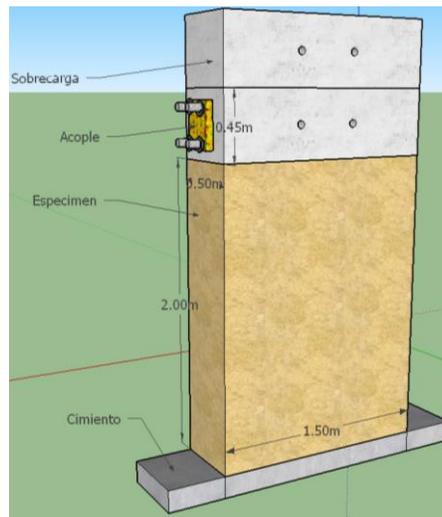


Figura 29. Diseño de alternativa 1 para transición de carga

$$F_{HR1} = N * \tan(\vartheta)$$

$$F_{HR2} = K * C * \beta$$

$$\vartheta = K * \phi, \text{ Donde } \rightarrow \frac{1}{2} < K < \frac{2}{3}$$

Ecuación 1. Ecuaciones para cálculo de resistencia por fricción de Rankine en muros de contención

Donde:

- F_{HR1} = Fuerzas horizontal resistente debido a la fricción.
- F_{HR2} = Fuerza horizontal resistente debida a la cohesión
- δ = Angulo de fricción entre el suelo (Especimen) y el muro (Sobrecarga)
- N= Fuerza normal, contemplada como la sumatoria de fuerzas verticales
- B=Ancho de la sobrecarga
- C= Cohesión del suelo
- ϕ = Angulo de fricción del muro

Tabla 3. Predimensionamiento de sobrecarga para alternativa 1

Dimensionamiento de sobrecarga		
Peso	2.4	Ton/m ³
Concreto		
Numero de vigas	2	
Largo	1.5	m
Ancho	0.5	m
Alto	0.45	m
Peso Total	1.62	Ton

Tabla 4. Cálculos de fricción soportada por el suelo según Predimensionamiento de sobrecarga

Calculo de fricción concreto-suelo		
N	3.24	Ton/m
δ	13.58	°
C	1.20	Ton/m ²
β	1.50	m
ϕ	27.15	o
K	0.50	
F_{HR1}	0.78	Ton/m
F_{HR2}	0.90	Ton/m
F_{HTotal}	0.84	Ton
Carga horizontal aproximada	8.00	Ton

Es necesario mencionar que para la primera alternativa propuesta el peso del concreto se toma según el peso específico dado por el código colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10, 2010), que por conservación se toma un valor de K igual a 0.5 y que la sumatoria de fricción (F_{HTOTAL}) está dividida por el ancho de la sobrecarga para tener un valor comparativo con la carga horizontal soportada por especímenes de tapia pisada en previas investigaciones (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).

Con base en el documento (Miccoli, Drougkas, & Müller, 2016) se plantea una segunda propuesta la cual consiste en la construcción de una viga cajón en concreto reforzado que se encuentre cerrada en sus cuatro caras y que se apoye en la parte superior del muro y que cuente con una conexión con el instrumento de carga y que al mismo tiempo otorgue una superficie óptima para incluir una sobrecarga sobre ella; para dicha sobrecarga, siguiendo el documento tomado de base, se utilizarían entre 2 y 3 actuadores que proporcionen una carga vertical uniformemente distribuida en la longitud como se muestra en la Figura 30.

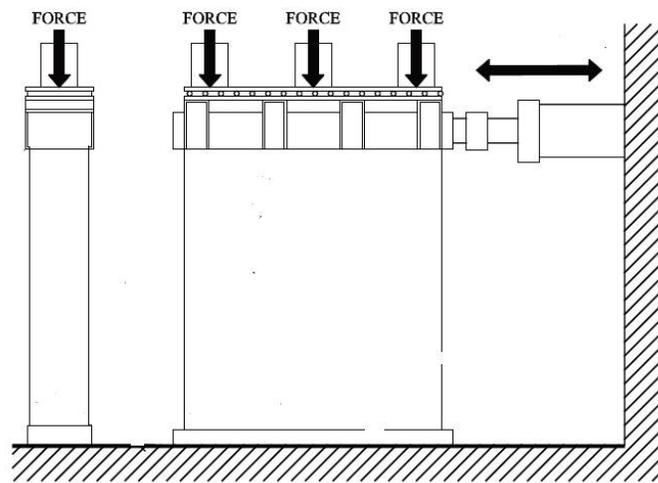


Figura 30. Diseño propuesto para la segunda alternativa (Miccoli, Drougkas, & Müller, 2016)

Como tercera alternativa se encuentra un estudio que muestra una se realiza la transmisión de carga por medio de un marco articulado (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014) de libre movimiento al cual se le acopla el actuador hidráulico y permite una óptima transferencia, con la idea de que al tener un movimiento libre las vigas y columnas del marco articulado no ofrecen ninguna resistencia y por tanto el comportamiento estructural que se obtiene es estrictamente del espécimen ensayado (Figura 31). Se propone el diseño de un marco articulado el cual permitiera acoplar el instrumento de carga designado para el experimento (como sugerencia un actuador hidráulico que se encuentran en el laboratorio de estructuras y que dispone de una celda de carga de carga con capacidad de 200 KN).



Figura 31. Marco articulado e instrumento de carga utilizados en investigación previa (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014)

Este marco articulado debe ser en acero y sus columnas y vigas deben tener un articulada que permita el movimiento libre del espécimen frente a la prueba a la cual se someta. Para esta alternativa otro punto a tener presente es la sobrecarga para la cual con este tipo de marco de prueba sería posible izar una estructura de concreto o bultos de algún material que asemejen el peso mínimo de carga vertical referente a la cubierta, la alternativa de colocar actuadores verticales no es considerada viable debido a el tipo de marco propuesto, un esquema básico de esta alternativa sería el presentado en la Figura 30 31 (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014), teniendo en cuenta que en ese experimento no tomaron en consideración la sobrecarga a la que debe estar sometida el elemento.

4. IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE PRUEBAS

Selección y extracción del material

Para calcular el material necesario en la construcción de los muros en tapia pisada, se decidió mantener el dimensionamiento sugerido en el diseño del experimento (0.5 x 1.5 x 2.0 m). El planteamiento inicial contemplaba tres muros en tapia convencional y tres muros en tapia pisada con inclusión de caña brava, sin embargo, dado que el laboratorio solo tenía capacidad para la construcción simultánea de dos muros, la muestra representativa se redujo a dos especímenes para cada tipología de muro.

$$\text{Material necesario para 2 especímenes} = 2 * 1.3 * (2 * 1.5 * 0.5) = 3.90 \text{ m}^3$$

Se realizó una exploración en el campus perteneciente a la Universidad Pontificia Bolivariana y sus alrededores en búsqueda de un material apto para la construcción de los especímenes. Durante esta actividad se encontró un espacio que además de contar con diferentes tipos de suelo, se localizaba en un terreno despejado del cual se podría obtener el suficiente material y efectuar el trabajo sin interrumpir las actividades diarias de la Universidad o de sus usuarios (Figura 32).



Figura 32. Lugar de extracción del material.

En la zona de estudio mencionada se encontraron tres tipos de suelos: el primero de un color amarillo, el segundo suelo de un color rojizo y el tercero contaba con un color marrón oscuro (Figura 33).



Figura 33. Tipos de suelos hallados en la zona de exploración.

Se tomó una muestra de aproximadamente 15 Kg para cada suelo (Figura 34) con el fin de aplicar los ensayos de granulometría y límites de consistencia, realizar su clasificación y determinar que suelo se adaptaba mejor a los estándares establecidos en la construcción de tapia pisada. El suelo rojizo fue descartado de la clasificación debido a que se localizaba en un talud que no podía ser intervenido con una excavación. Se aclara que las muestras recolectadas eran muestras alteradas ya que para los ensayos de clasificación se usan este tipo de muestras.



Figura 34. Tipos de suelos encontrados y recolectados para ensayos de laboratorio.

Ensayos de granulometría y límites de Atterberg

En el ensayo de granulometría se tomó una muestra de cada tipo de suelo, se le realizó un lavado de finos y posteriormente el tamizado según lo indicado en la norma. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Resultados ensayo de granulometría suelo amarillo.

Suelo amarillo				
Peso total de la muestra (gr): 1615		Peso de la muestra después del lavado (gr): 832		
Malla	Abertura	Peso retenido	Retenido parcial	Pasa
No.	(mm)	(g)	(%)	(%)
½"	12.7	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	2.00	0.12	99.88
No 4	4.75	8.00	0.50	99.38
10	2	37.00	2.29	97.09
20	0.84	439.00	27.18	69.91
40	0.42	218.00	13.50	56.41
60	0.21	84.00	5.20	51.21
100	0.149	16.00	0.99	50.22
200	0.074	21.00	1.30	48.92
Fondo		790.00	48.92	0.00
	Total	1615.00	100	

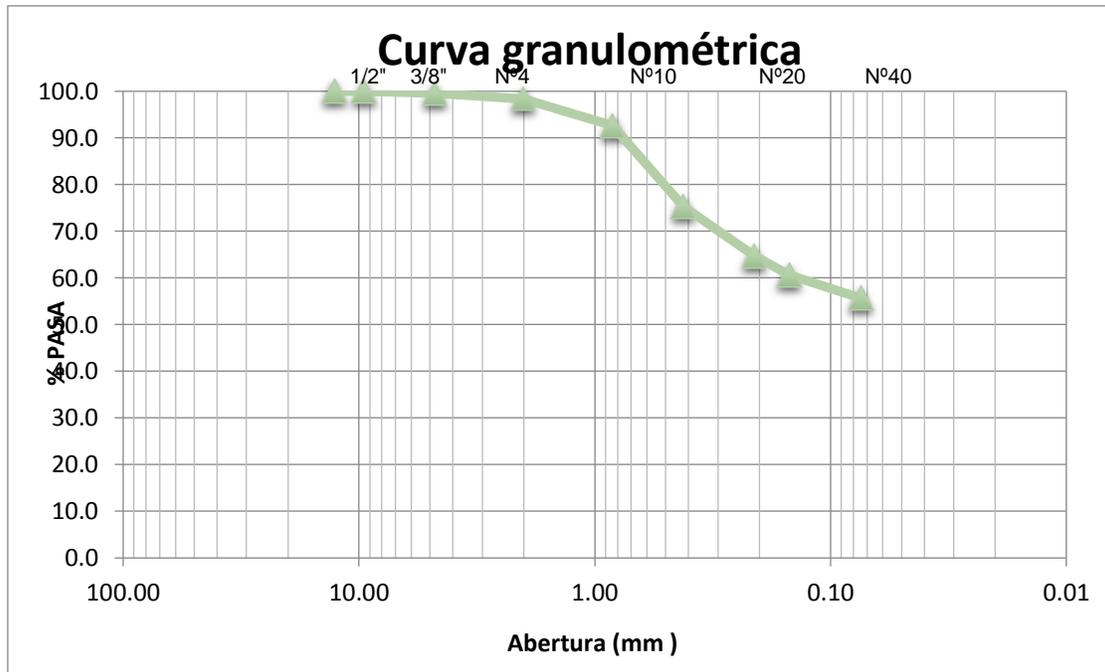


Figura 35. Curva granulométrica suelo amarillo.

Tabla 6. Resultados ensayo de granulometría suelo marrón.

Suelo marrón oscuro				
Peso total de la muestra (gr): 676		Peso de la muestra después del lavado (gr): 303		
Malla	Abertura	Peso retenido	Retenido parcial	Pasa
No.	(mm)	(g)	(%)	(%)
½"	12.7	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	0.00	0.00	100.00
No 4	4.75	3.00	0.44	99.56
10	2	8.00	1.18	98.37
20	0.84	39.00	5.77	92.60
40	0.42	117.00	17.31	75.30
60	0.21	72.00	10.65	64.64
100	0.149	27.00	3.99	60.65
200	0.074	34.00	5.03	55.62
Fondo		376.00	55.62	0.00
	Total	676.00	100.00	

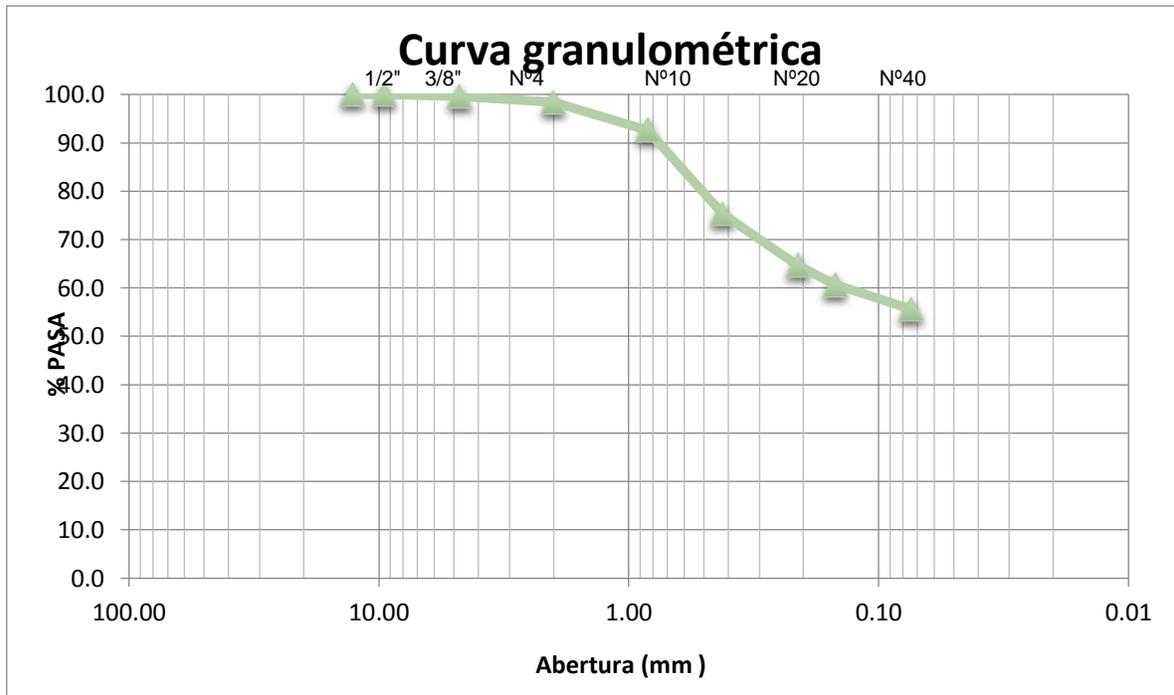


Figura 36. Curva granulométrica suelo marrón.

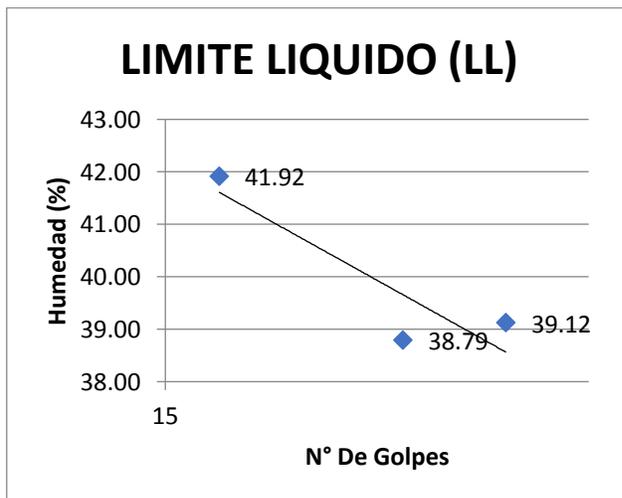
Posteriormente fueron realizados los ensayos de límites de Atterberg cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 7. Resultados limite líquido suelo amarillo.

Límite líquido suelo amarillo								
Prueba No.	Capsula No.	Número de Golpes	Peso cápsula+ Suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	peso del suelo seco	contenido de agua (W)
			g	G	g	g	g	%
1	165	33	32.57	26.51	6.06	11.02	15.49	39.12
2	139	26	31.51	25.54	5.97	10.15	15.39	38.79
3	7	17	42.90	36.57	6.33	21.47	15.10	41.92

Tabla 8. Resultados limite plástico suelo amarillo.

Límite plástico suelo amarillo							
Prueba No.	Capsula No.	Peso cápsula+ Suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	contenido de agua (W)
		g	g	g	g	g	%
1	50	19.72	16.80	2.92	13.61	6.11	47.79
2	1004	28.15	25.50	2.65	19.15	9.00	29.44



Límite líquido (25 Golpes)	LL (%)	40.01
Límite plástico	LP (%)	38.62
Índice de plasticidad	IP (%)	1.39

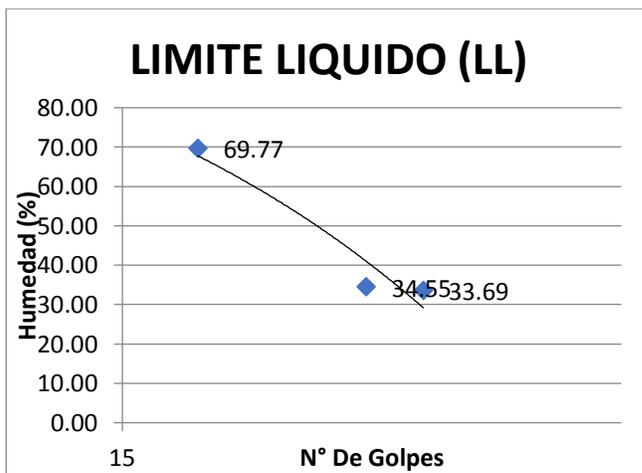
Figura 37. Grafica de límite líquido suelo amarillo.

Tabla 9. Resultados limite liquido suelo marrón

Límite líquido suelo marrón oscuro								
Prueba No.	Capsula No.	Número de Golpes	Peso cápsula+ Suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	peso del suelo seco	contenido de agua (W)
			g	g	g	g	g	%
1	888	31	47.15	40.18	6.97	19.49	20.69	33.69
2	29	27	49.62	42.89	6.73	23.41	19.48	34.55
3	69	18	57.18	44.97	12.21	27.47	17.50	69.77

Tabla 10. Resultados limite plástico suelo marrón

Límite plástico suelo marrón oscuro							
Prueba No.	Capsula No.	Peso cápsula+ Suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	peso del suelo seco	contenido de agua (W)
		g	g	g	g	g	%
1	176	29.58	27.07	2.51	14.89	12.18	20.61
2	110	26.95	24.32	2.63	11.02	13.30	19.77



Límite líquido (25 Golpes)	LL (%)	47.00
Límite plástico	LP (%)	20.19
Índice de plasticidad	IP (%)	26.80

Figura 38. Grafica límite líquido suelo marrón.

Análisis de resultados

Tabla 11. Clasificación de suelos.

	Suelo amarillo	Suelo marrón oscuro
GRAVAS	0.62 %	0.44 %
ARENAS	50.46%	43.94
FINOS	48.92%	55.62 %
	-ES UN SUELO GRUESO: Porque más del 50% de la muestra no pasó por el tamiz N ^o 200.	-ES UN SUELO FINO: Porque más del 50% de la muestra pasa por el tamiz N ^o 200.
	-ES UNA ARENA: Porque más del 50% de la fracción gruesa pasó por el tamiz N ^o 4.	-Material de baja plasticidad: Porque el limite liquido es inferior a 50
	No se puede clasificar como una Arena Bien Gradada (Sw) o una Arena Mal Gradada (Sp) porque el porcentaje de finos no es menor al 5%.	
	-No es ni SW-SM, SW-SC, SP-SM ni SP-SC porque el porcentaje de finos no está entre 5% y 12%.	
	El material puede ser una Arena Limosa (Sm) o una Arena arcillosa (Sc) debido a que el porcentaje de finos es mayor al 12% se determina esta condición por medio de la ecuación de la carta de plasticidad	El material puede ser una Arcilla de baja plasticidad (CL) o un Limo de baja plasticidad (ML) debido a que el porcentaje de finos es mayor al 12% se determina esta condición por medio de la ecuación de la carta de plasticidad
Límite líquido	40.01	47.00
Límite plástico	38.62	20.19
Índice de plasticidad	1.39	26.80
	$I_p = 0.733 \times (Ll - 20)$ $\rightarrow I_p = 0.733 \times (40.01 - 20) \rightarrow I_p = 14.66$	$I_p = 0.733 \times (Ll - 20)$ $\rightarrow I_p = 0.733 \times (47 - 20) \rightarrow I_p = 19.79$
	Como nuestro índice de plasticidad es menor, el suelo se ubica por debajo de la línea A, lo que le da la clasificación de una Arena Limosa (SM) .	Como nuestro índice de plasticidad es mayor, el suelo se ubica por encima de la línea A, lo que le da la clasificación de una Arcilla de baja plasticidad (CL) .

Los diferentes estudios en tapia pisada recomiendan que el suelo a utilizar cuente con un porcentaje de arenas mayor al de limos y que de igual forma este sea mayor al de arcillas. Basándose en esto y en los resultados de los estudios se decidió escoger como suelo óptimo para la construcción de los especímenes la Arena Limosa color amarillo hallada en la zona. El segundo suelo fue descartado por dos razones. La primera radica en que el porcentaje de arcillas que presentaba este suelo era superior al de arenas lo cual no es muy recomendable en las construcciones de tapia pisada debido al daño que la humedad puede causar en un muro de este tipo. La segunda razón por la que se descarta el material tiene que ver con la logística de la excavación a realizar, debido a que existía una capa vegetal que implicaba un proceso de descapote previo la extracción del suelo.

Se realizó un ensayo de Proctor estándar al suelo escogido para la construcción de los especímenes con el fin de encontrar la humedad óptima de compactación. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 12. Resultados de ensayo de Proctor Estándar.

Datos				
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Peso molde (g)	5867.00	5867.00	5867.00	5867.00
Peso molde+suelo (g)	9697.00	10310.00	10600.00	10247.00
Peso muestra del molde (g)	3830.00	4443.00	4733.00	4380.00
Peso capsula (g)	8.78	6.92	6.97	6.85
Peso capsula+suelo (g)	36.22	40.08	25.43	48.74
Peso capsula+ suelo seco (g)	33.23	35.76	22.32	39.69
Volumen molde (cm³)	2104.92	2104.92	2104.92	2104.92
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Peso de solidos (g)	27.44	33.16	18.46	41.89
Peso agua (g)	2.99	4.32	3.11	9.05
Humedad (%)	10.90	13.03	16.85	21.60
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Masa seca del ensayo (g)	3453.67	3930.89	4050.59	3601.85
Densidad húmeda (g/cm³)	1.82	2.11	2.25	2.08
Densidad seca (g/cm³)	1.64	1.87	1.92	1.71
Peso unitario seco(KN/m³)	16.09	18.31	18.87	16.78
Humedad optima de compactación	17%			

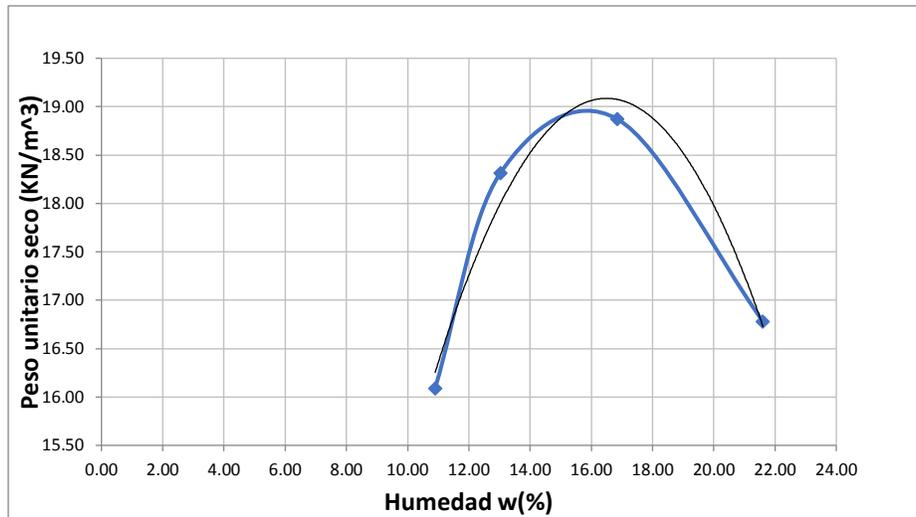


Figura 39. Curva de Relaciones humedad-peso unitario.

Una vez seleccionado el tipo de suelo a extraer y realizados todos los ensayos de laboratorio, se solicitó un permiso para la excavación de 4.0 m³ de este material a la Universidad Pontificia Bolivariana. Posterior a la aprobación del permiso se solicitaron todas las herramientas e implementos de seguridad necesarios para la excavación y se procedió a realizar el trabajo de campo. Para la extracción del suelo seleccionado se realizó una excavación de 4 m de largo por 2 m de ancho con una profundidad de 0.50 m; la extracción del material fue realizada por los autores de la investigación de forma manual y el empacado del material se realizó en costales con un peso aproximado de 35 Kg. Esta actividad tuvo duración de un mes y una vez finalizada la extracción se obtuvo un total de 156 costales para un peso aproximado de 5.5 toneladas de material (Figura 40). El traslado del material al laboratorio fue realizado en una camioneta; se hicieron necesarios 4 viajes de material debido a que el peso máximo soportado por esta era de 1.5 toneladas. El material fue transportado, descargado y dispuesto en el cubículo de almacenaje designado por la Universidad (Figura 41).



Figura 40. Extracción del material en campo.



Figura 41. Almacenamiento del material en el laboratorio.

Viga de cimentación

Se tomó la decisión de construir una placa en concreto reforzado, sin rocas en la superficie, como viga de apoyo para los especímenes. Se descartó la opción del sobre-cimiento en rocas debido a que no se encontró una fuente que corroborara la hipótesis inicial de un mayor agarre al muro en su base. Se realizaron modificaciones al diseño estructural propuesto en la metodología ya que se deben considerar esfuerzos positivos y negativos producto del montaje y el desplazamiento de los elementos. Por tanto, era prudente que el refuerzo de acero fuera ubicado en la parte superior e inferior del elemento trabajando como una viga doblemente reforzada (Figura 42). Se aclara que las cargas de diseño y el método de diseño no fueron alterados.

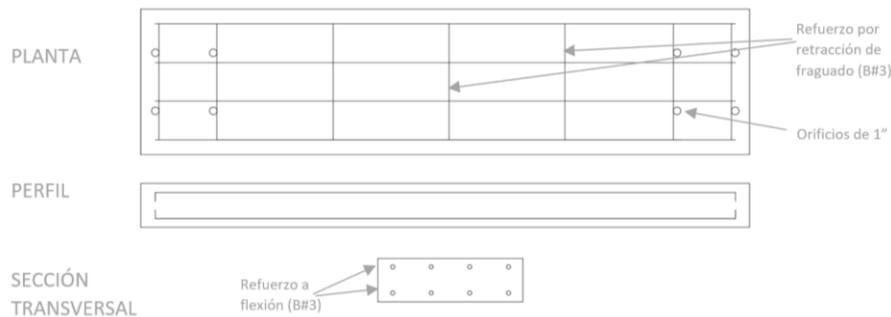


Figura 42. Diseño estructural final de las vigas de cimentación.

Se hizo necesaria la fabricación de dos vigas de cimiento debido a la construcción simultanea de dos muros en tapia pisada. Se realizaron encofrados en madera y se cubrió la zona de trabajo colocando los encofrados, y el acero de refuerzo en posición según lo especificado en el diseño estructural (Figura 43). Fueron utilizadas secciones de tubo de PVC de 1" para garantizar los orificios que permitían el anclaje entre la viga de cimentación y la losa rígida.



Figura 43. Proceso constructivo de viga de cimentación.

Se realizó una mezcla de concreto con dosificación 1:2:3 para una resistencia de 3000 Psi. Con ayuda del personal del laboratorio de estructuras, se preparó la mezcla de concreto y se vertió en el molde de madera (Figura 44). Finalmente se retiraron los moldes de madera y se procedió a un periodo de 21 días de curado (Figura 45). Es de tener en cuenta que la rigidez de los moldes no fue la mejor por tanto las losas de cimentación tuvieron irregularidades durante su fraguado. Los materiales necesarios para la construcción de las dos placas se muestran en la Tabla 13.



Figura 44. Fundición de vigas de cimentación.

Tabla 13. Dosificación de mezcla de concreto para vigas de cimentación.

Dosificación de mezcla para placas de concreto			Relación típica		
relación	1:2:3		cemento	arena	triturado
#Placas	Resistencia	Volumen x placa	Kg	m3	m3
2	PSI	m3	350	0.56	0.8
	3000	0.315			
Cantidad de materiales necesario para la construcción de dos placas			cemento	arena	triturado
			Kg	m3	m3
			110.25	0.18	0.25



Figura 45. Vigas de cimentación-a los 28 días de su construcción.

Transferencia de carga y sobrecarga

Para la selección del marco de carga se analizó cada una de las alternativas planteadas en el diseño metodológico. La alternativa referente a las vigas de sobrecarga con acople se descartó debido a que como se puede observar en la Tabla 3 las fuerzas de fricción existentes entre la sobrecarga y el muro son insuficientes para contrarrestar la carga horizontal máxima estimada a aplicar en el ensayo. Igualmente, la viga cajón fue descartada por la probabilidad de que no se diera una transmisión de carga efectiva en la zona superior del muro y se generara una falla local en la esquina contraria hacia donde iba dirigida la fuerza.

Por lo anterior, la alternativa de un marco articulado en acero era la menos susceptible a generar daños sobre los especímenes, y dado, que hubo la posibilidad de adquirir unos perfiles metálicos de referencia IPE 140-A36 (Figura 46) utilizados en una investigación previa se procedió a realizar el diseño de un marco articulado que se adecuara a las características de estos (Figura 47).



Figura 46. Perfiles metálicos IPE 140-A36.

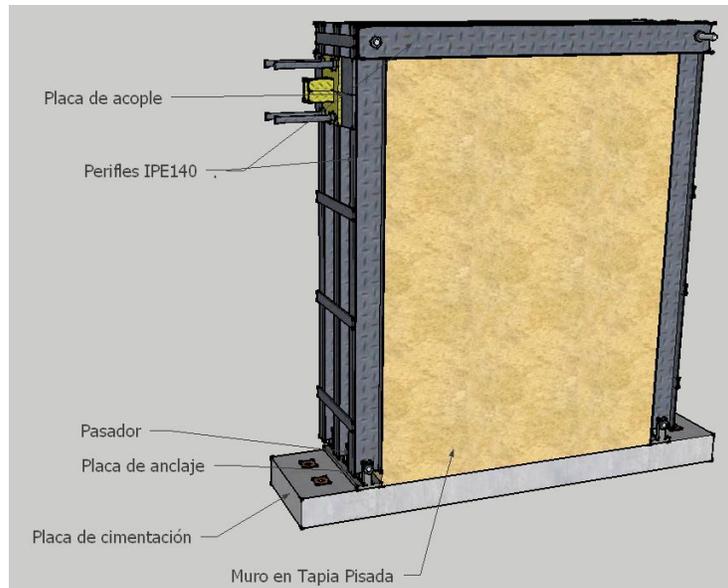


Figura 47. Diseño de marco articulado.

El marco articulado contaba dos placas de anclaje cada una conformada por una platina de acero de $\frac{1}{2}$ " con dimensiones de 0.12x0.50 m, a su vez dos perforaciones de 1" ubicadas en la misma posición de los orificios de la viga de cimentación, estos orificios con el fin de anclar toda la estructura (Marco de carga y viga de cimentación) por medio de tornillos a la losa de reacción. Adicionalmente esta platina contaba con 3 pares soportes de 0.11x0.05 m los cuales tendrían una perforación de 1".

En el proceso de fabricación de la placa de anclaje se siguieron todas las medidas del diseño exceptuando las perforaciones inferiores las cuales debieron ser aumentadas de 1" a 1 $\frac{1}{2}$ " a causa de las irregularidades presentadas en una de las vigas de cimentación (Figura 48).

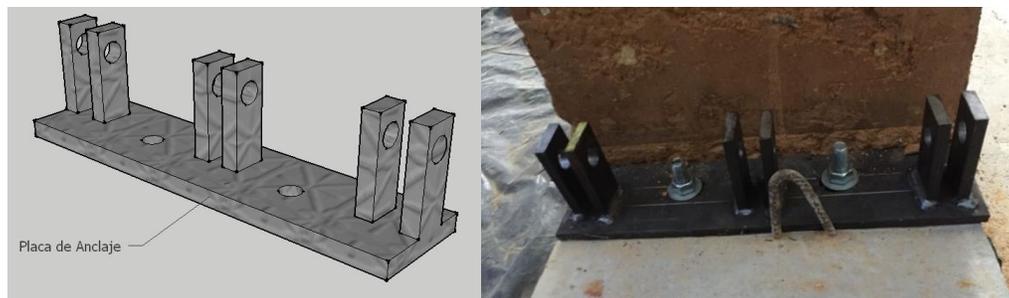


Figura 48. Placa de anclaje diseñada vs Placa de anclaje construida.

Las caras del marco articulado fueron diseñadas con 3 perfiles de una longitud de 2.1 m, unidos por medio de 4 platinas de acero de $\frac{1}{2}$ " con dimensiones de 0.05x0.50 m. Estos perfiles incluyen perforaciones de 1" en sus extremos para ser unidos por medio de un pasador a la placa de anclaje. Adicionalmente una de las caras contaba con una platina de acero de $\frac{3}{4}$ " con dimensiones de 0.30x0.50 m, que incluía 4 tornillos de $\frac{7}{8}$ " con el fin de asegurar un correcto acople entre la celda de carga y el marco articulado (Figura 50). Para la fabricación de las caras del marco articulado se siguieron los lineamientos del diseño planteado teniendo en cuenta que la soldadura utilizada debía asegurar la unión de los elementos durante los ensayos.

Para la unión de las dos caras del marco articulado se utilizaron dos perfiles en sentido horizontal con perforaciones de una 1" en sus esquinas. En las articulaciones del marco fueron utilizadas barras de acero lisas de $\frac{1}{2}$ " y 1", estas barras permitían el movimiento libre buscado en la subestructura (Figura 49).



Figura 49. Pasadores utilizados en las articulaciones del marco de carga.

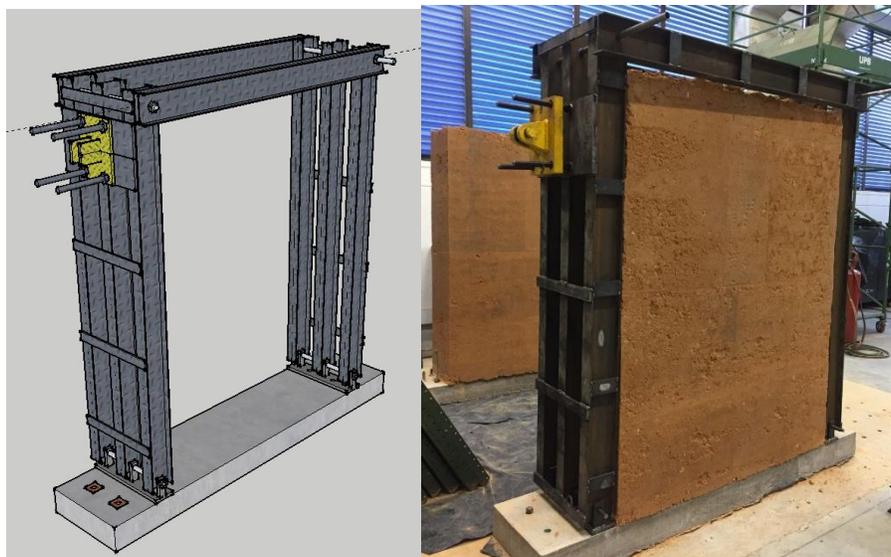


Figura 50. Marco articulado diseñado vs Marco articulado construido.

Todos los elementos fueron soldados y perforados en el laboratorio de procesos industriales perteneciente a la Universidad Pontificia Bolivariana.



Figura 51. Materiales para la construcción del marco articulado.

Para la sobrecarga, se contaba con dos dados en concreto reforzado que, de acuerdo con sus dimensiones, tenían un peso similar al valor necesario a aplicar en el espécimen (1 Ton/m). Los especímenes de concreto fueron unidos por medio de tornillos de acero de $\frac{1}{2}$ " y platinas de acero como se muestra en la Figura 52, esto con el fin de mantener juntos los bloques de concreto a la hora de ser izados y durante los ensayos de carga.



Figura 52. Unión de dados de concreto por pernos de acero.

Construcción de especímenes

En la construcción de los especímenes se decidió utilizar como encofrado la formaleta metálica con la que contaba el laboratorio de construcciones de la universidad. Se descartó el uso del tapial de madera tradicional debido a que no se contaba con uno, y las dimensiones convencionales de este no eran acordes con las de los especímenes a realizar en la investigación. Se trasladó a la zona de trabajo todos los paneles necesarios para la construcción de los dos muros junto con los accesorios necesarios para su montaje (chapetas, ángulos, alineadores, tensores).



Figura 53. Encofrado metálico.

Los paneles de formaleta fueron armados sobre las dos vigas de cemento de los muros hasta una altura de 1 metro, esto con la idea de facilitar la disposición y el compactado del material dentro de los moldes (Figura 54).



Figura 54. Primer metro de encofrado muro A y B.

El metro restante de paneles del muro A sería armado una vez se terminará la compactación de este y se proceda a la compactación del muro B (Figura 59). Para la construcción de los muros se contrató una cuadrilla de Tapieros del municipio de Curití, Santander quienes serían los encargados de replicar la técnica tradicional. La cuadrilla de tapieros estuvo compuesta por un pisón y un preparador de material; el traslado del material fue llevado a cabo por los autores de la investigación. Se hizo necesaria la fabricación de un pisón de madera, de dimensiones sugeridas por los tapieros, que permitiera la compactación del material.



Figura 55. Pisón de madera fabricado.

Como solo dos de los cuatro especímenes se podrían construir simultáneamente, se decidió que los pares de muros realizados fueran de la misma tipología para que contaran con las mismas condiciones constructivas y ambientales a la hora de realizar los ensayos.

Tabla 14. Denominación de muros y tipología.

	Tipología de muro	Dimensiones
MURO A Y B	Tapia pisada convencional	1.5 m X 2.0 m X 0.5 m
MURO C Y D	Tapia pisada con inclusión de Caña Brava	1.5 m X 2.0 m X 0.5 m

La preparación del material se realizó a las afueras del laboratorio de estructuras. Se encontraron conglomerados de material producto de la pérdida de la humedad de este en el sitio de almacenaje. El preparador de material fue el encargado de triturar los conglomerados y añadir la cantidad de agua necesaria para la compactación de este (Figura 56).



Figura 56 . Preparación del material para la construcción de muros A y B.

Una vez preparado el material se tomó un total de 12 muestras de laboratorio (6 del muro A y 6 del muro B) para determinar el porcentaje de humedad utilizado en la compactación y compararlo con el determinado por el ensayo de Proctor estándar (Figura 57).



Figura 57. Muestras de humedad tomadas durante de la construcción de los muros.

Luego de llevar el suelo a la humedad optima, determinada por el preparador de la tierra, y contar con la suficiente cantidad, se procedió a empaclar y depositar el material dentro del encofrado para iniciar la compactación de este. En el proceso de compactación se conformaban capas de

aproximadamente 15 centímetros de espesor de material suelto, que una vez compactadas, tomaban una altura de 10 centímetros (Figura 58). Este proceso fue repetido hasta finalizar la compactación del bloque de un metro de altura.



Figura 58 . Construcción del muro A.

Una vez finalizada la compactación del muro A, a la altura de un metro, el pisón procedió a compactar el muro B. Durante el proceso de compactación de este se realizó el montaje del encofrado del segundo metro del muro A (Figura 59). De esta manera al finalizar la compactación del primer metro del Muro B, el encofrado del segundo metro del Muro A ya se encontraba disponible. Este proceso fue repetido para el montaje del encofrado y la compactación del muro B.



Figura 59. Armado de formaleta y construcción simultanea del Muro A y Muro B.

Una vez terminada la compactación de los dos muros se realizó el desencofrado de estos liberando los alineadores de la formaleta y las chapetas de los paneles. Se presentó un desmoronamiento superficial de los muros al retirar la formaleta, y se tomó en consideración el consejo de los tapieros de que el encofrado debía estar libre de grasa para la construcción de los muros C y D, ya que creaba una adherencia entre el suelo y el encofrado. De igual forma al realizar el desencofrado de los muros se evidencio una inclinación de estos productos del incorrecto aplomado en la formaleta. Sin la posibilidad de corregir estos errores se dejó secar los muros A y B por un periodo de 30 días.



Figura 60. Muros Desencofrados y terminados.

Para la construcción de los especímenes con inclusión de caña brava, se tuvo que realizar la demolición de los muros A y B, la cual se realizó posterior a los ensayos de prueba pseudo-estática. Para esta actividad se retiró el montaje e instrumentación utilizados en las pruebas. De esta actividad cabe resaltar el retiro de la Cal utilizada en una de las caras de los muros debido a que se conoce que la cal es un material utilizado en la estabilización de suelos y no se buscaba esto en las propiedades fisco-mecánicas de los especímenes C y D.



Figura 61. Retiro y limpieza de la Cal del muro ensayado.

Para la demolición de los muros A y B era necesario su desplazamiento, debido a que se iba a realizar un volcamiento de estos y no era conveniente un impacto de esta magnitud sobre la losa de reacción. De igual forma con el fin de disponer el material en un lugar que no obstruyera la construcción de los muros C y D. Con ayuda de la torre grúa los muros fueron llevados fuera de la losa de reacción; posterior a esto se dispuso un plástico negro y se realizó una cuña en la base del muro con la intención generar un volcamiento, adicionalmente se colocaron unos rodillos de acero en el plástico con el propósito de fracturar el bloque de tierra (Figura 62).



Figura 62. Volcamiento y demolición del muro.

A pesar del esfuerzo por fracturar los muros fue necesario triturar los bloques resultantes de la demolición y preparar el material para la construcción de los muros C y D (Figura 63).

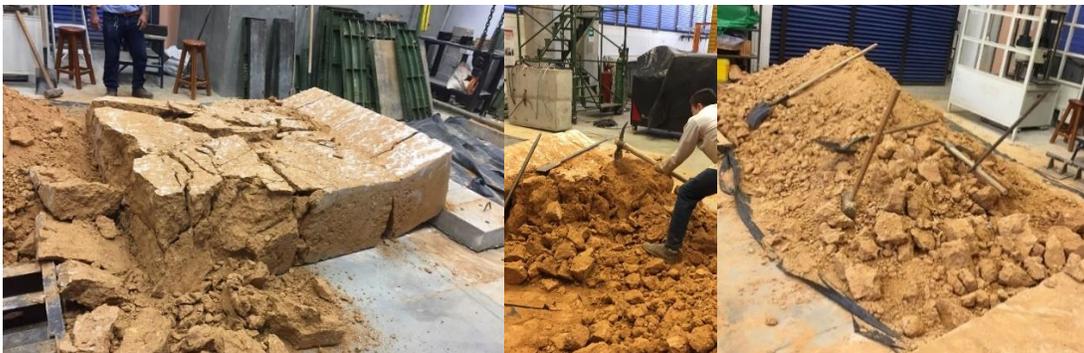


Figura 63. Proceso de demolición y triturado del material.

Para la construcción de los muros C y D se realizó la limpieza de los paneles de formaleta los cuales contaban con grasa y tierra resultado de la construcción de los muros A y B. En el caso de los muros C y D se realizó el montaje del encofrado de forma completa, únicamente dejando una abertura en el segundo metro de cada muro con el fin de depositar el material dentro del encofrado. Esta medida fue tomada para tener un mejor rendimiento en la construcción del muro, al mismo tiempo, que se corrigieron los errores de aplome ocasionados en los Muros A y B (Figura 64).



Figura 64. Montaje del encofrado muro C y D.

Dado que los muros C y D contaban con la inclusión de caña brava, se realizó la búsqueda de este material y se dividió en 16 secciones de 1.35 m y 59 secciones de 0.35 m de longitud (Figura 65) según lo especificado en la Tabla 1.



Figura 65. Caña brava.

Ya con el encofrado armado y el material listo se dispuso a realizar la construcción de los muros C y D. Se contrataron nuevamente los tapieros encargados de la construcción de los muros A y B y se repitió el procedimiento para los nuevos especímenes. En esta ocasión el material se preparó dentro del laboratorio de estructuras lo que agilizo la labor ya que el transporte del material implicaba una menor distancia (Figura 66).



Figura 66. Preparación del material en los muros C y D.

Una vez alcanzada una altura de 40 cm se dispusieron 4 varas de caña brava en sentido longitudinal. De igual forma al alcanzar los 80 cm se dispuso de 19 varas de caña brava en sentido transversal, este proceso fue repetido cada 40 cm de compactación (Figura 67).



Figura 67. Disposición de las cañas longitudinal y transversalmente.

Cabe resaltar que una vez se alcanzó una altura de un metro fue necesario colocar la tapa de la formaleta metálica que hacía falta para poder terminar la compactación del muro. Este proceso fue llevado a cabo en los muros C y D para su construcción. Una diferencia significativa recae en que se hizo necesario un 12 % más de material para la construcción de los muros C y D. Para analizar esto se tomó al igual que en los muros A y B muestras de suelo que permitieran hallar la humedad con la que se había realizado la compactación los muros. Con los muros C y D se presentó el mismo descascamiento visto en los primeros muros, esto permitió concluir que al contrario de lo propuesto por los tapieros el molde debía estar aceitado para evitar este problema.



Figura 68. Compactación y desencofrado del Muro C.

Los porcentajes de humedad del suelo con los que fue construido cada muro son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 15. Resultados de humedades de compactación para cada muro.

	Capsula N	Peso Capsula (g)	Peso capsula + Suelo humedo (g)	Peso capsula + Suelo seco (g)	%Humedad	%Humedad promedio
Muro A	36	17.4	37.2	34	19.28	20.12
	116	6.5	17	15.2	20.69	
	8	27	47.6	44.2	19.77	
	140	21	37.4	34.6	20.59	
	12	6.8	11.6	10.8	20.00	
	25	27.3	56.8	51.8	20.41	
Muro B	46	10.7	22.2	20.4	18.56	17.38
	10	18.5	30.6	28.8	17.48	
	34	14.5	38.2	34.6	17.91	
	110	20.9	30	28.8	15.19	
	58	21.3	44.6	41	18.27	
	23	21.1	47.4	43.6	16.89	
Muro C	59	27.2	53.6	48.8	22.22	22.76
	32	27	52.6	48	21.90	
	4	19	33	30.2	25.00	
	75	6.9	20	17.6	22.43	
	181	6.4	20.4	17.8	22.81	
	61	21.7	38.2	35.2	22.22	
Muro D	48	10.4	22	20	20.83	21.30
	121	8.7	23.2	20.6	21.85	
	173	21.1	39.8	36.5	21.43	
	33	26.9	54.6	49.8	20.96	
	21	21.2	36.2	33.6	20.97	
	19	7.1	19.4	17.2	21.78	

Montaje e instrumentación

Los especímenes se dejaron secar por un periodo mayor a 30 días, una vez terminado este lapso de tiempo se realizó el montaje de toda la prueba. Se cubrió una de las caras de cada muro con Cal, para una mejor visualización de las fallas que se produjeran durante la prueba cíclica. Igualmente, a las caras que no fueron cubiertas con Cal, se les realizó una cuadrícula con el fin de obtener una mejor visualización a la hora de grabar los ensayos (Figura 69).



Figura 69. Adecuación de los muros para las pruebas

Lo primero a realizar fue el montaje del marco de articulado. Para ello primero se colocaron las placas de anclaje sobre la viga de cimentación y se atornillaron por los orificios correspondientes. Posterior a esto se izaron con ayuda de la torre grúa las caras del marco articulado y se unieron a las placas de anclaje por medio de una barra lisa de acero de $1/2''$. Finalmente se colocan los dos perfiles metálicos superiores y por medio de una barra de acero de $1''$ se unen a las caras formando así la estructura del marco articulado (Figura 70). Se debe hacer la anotación que debido al problema de aplome con los especímenes A y B, el marco articulado no encajo perfectamente, es decir quedó libre en una de sus caras, es por esto que se debió colocar maderos para crear un contacto en entre el muro y el marco articulado eliminando así el balanceo generado, este problema no se presentó en los muros C y D. Las vigas superiores del marco articulado se sujetaron entre sí por medio de una varilla de acero que las unía en cada uno de sus extremos (Figura 71).



Figura 70. Montaje del marco de carga.



Figura 71. Amarre de vigas superiores y maderas de contacto.

Una vez instalado el marco articulado se procede a realizar el montaje del actuador hidráulico. El actuador es acoplado al muro de reacción por medio de una platina pernada, y al marco articulado por medio de una platina de acople (Figura 72). La altura del actuador medida desde la base del muro es 1.70 m. Se conectaron al actuador hidráulico las mangueras pertenecientes a la unidad hidráulica, el transductor encargado de controlar el movimiento del émbolo y la celda de carga encargada de medir la carga aplicada.

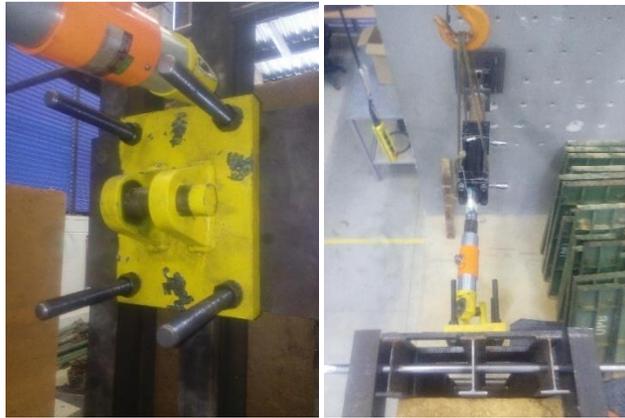


Figura 72. Acople entre la celda de carga del actuador y el marco articulado.

Se realizó el montaje de la sobrecarga por medio de unas guayas de acero. La sobrecarga se mantuvo asegurada a la torre grúa en caso del colapso de los muros durante los ensayos (Figura 73).

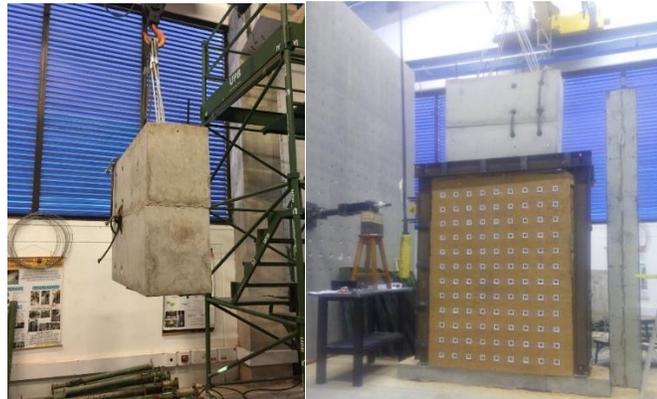


Figura 73. Montaje de sobrecarga en el muro de tapia pisada.

Para finalizar la instrumentación se ubicaron los LVDT (Transformador diferencial de variación lineal) a las diferentes alturas del muro donde se deseaban medir los desplazamientos generados.

Tabla 16. Canales de datos del Data Logger y su ubicación.

<i>Instrumentación</i>					
<i>Sensores</i>	<i>Channel</i>	<i>Coficiente</i>		<i>Altura</i>	
<i>Occidente 1</i>	3	0.01	mm	1900	mm
<i>Oriente 1</i>	1	0.01	mm	1900	mm
<i>Oriente 2</i>	2	0.01	mm	1700	mm
<i>Load Cell</i>	0	0.10	KN	1700	mm

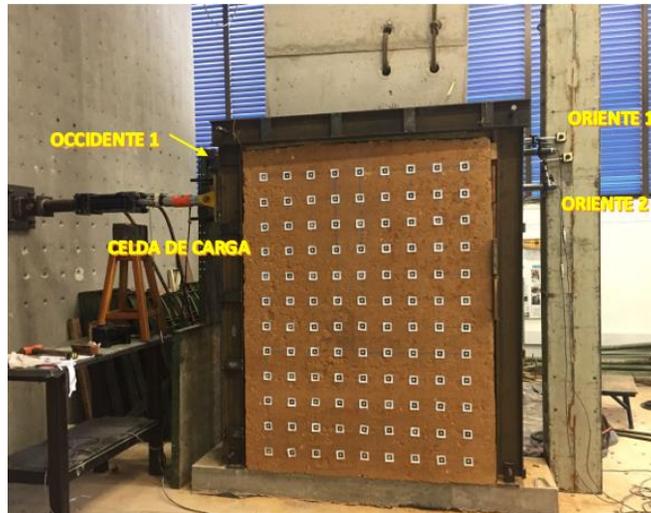


Figura 74. Instrumentación ensayo.

Con el montaje e instrumentación listos, se posicionaron dos cámaras frente a él espécimen a ensayar con el fin de grabar la evolución del muro frente a cada carga cíclica. Para las grabaciones correspondientes al muro A fue necesario girar el muro B, esto debido a que el espacio entre muros no era el suficiente para poder disponer las cámaras. Esto mismo se debió realizar durante los ensayos de los muros C y D.

Ejecución de pruebas

Para las pruebas de carga lateral cíclica a aplicar en los especímenes se decidió realizar un control por deformaciones debido a que se desconoce el comportamiento estructural de este tipo de elemento, lo que dificulta realizar un control por carga. Dicho esto, se tomó como base un protocolo de carga realizado en una investigación previa (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014) en la cual se llevaron a cabo los siguientes ciclos de derivas: 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.35%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.40%, 1.75%, 2.20%, 2.75%, 3.50%, 4.00%, 4.50%, 5.00%, 5.50%, 6.00%, 6.50%. Este protocolo de carga se modificó, debido a que el transductor encargado de controlar el movimiento del actuador hidráulico contaba con una longitud de recorrido de 7 cm, es decir, que para un test “push and pull” o carga cíclica el actuador solo podría realizar un recorrido aproximado de 3.5 cm en cada sentido. Por tanto, la mayor deriva que se podía aplicar a los especímenes era de 1.80%, correspondiente a 34.10 mm calculada en base a la altura de los LVDT Occidente 1 y Oriente 1. Con esta limitante se decidió iniciar los ensayos con una deriva de 0.2% y un aumento progresivo de este mismo porcentaje. Se decidió realizar 3 ciclos por cada porcentaje de deriva (Tabla 17).

Tabla 17. Protocolo para el ensayo de carga lateral cíclica realizado en muros A, B, C y D.

DERIVA	DEFORMACIÓN	CICLOS
%	mm	#
0.20	3.8	3
0.40	7.6	3
0.60	11.4	3
0.80	15.2	3
1.00	19	3
1.20	22.8	3
1.40	26.6	3

Nota: a pesar de que la capacidad del transductor teóricamente daba para conseguir una deriva de 1.8 % durante los ensayos pseudo-estáticos se visualizó que el instrumento de medición gastaba un mayor recorrido de su vástago del que reportaba como medido, por lo que la máxima deriva que se puede reproducir en los ensayos fue una deriva al 1.4%.

El control de la prueba de carga lateral cíclica se debía hacer de forma manual visualizando los desplazamientos en el monitor de la unidad hidráulica y redirigiendo el sentido del actuador al llegar a los límites de cada ciclo. Al mismo tiempo se debía vigilar que el transductor encargado de controlar el actuador hidráulico no acabara su recorrido, porque dada esta situación el actuador no tendría ningún control y realizaría el desplazamiento de su embolo por completo en un sentido.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las deformaciones mostradas en el análisis de resultados son tomadas en base al LVDT denominado Occidente 1, esto por dos motivos:

- La posición de este LVDT era la más alta en los ensayos, lo que nos permite medir un porcentaje mayor de deriva respecto a la altura total del muro.
- Los LVDT oriente 1 y oriente 2, aunque permitían llevar un control de la prueba, perdieron veracidad durante alguno de los ciclos de carga debido a la pérdida de material en la zona o a la inestabilidad de los mismos. Por lo que el LVDT occidente 1 fue el único que tomo datos durante la totalidad de los ciclos y los ensayos.

Prueba lateral de carga cíclica

Se generaron gráficas de histéresis con los datos de fuerza y deformación obtenidos como resultados de la prueba. Estas graficas de histéresis describen el comportamiento estructural de los elementos cuando se ven sujetos a deformaciones o esfuerzos alternantes fuera del rango de respuesta lineal (Mayorga Vela, 2011). Para esto se graficaron las deformaciones en el eje X con sus respectivas cargas en el eje Y. Los desplazamientos positivos de la gráfica se refieren al push aplicado a los muros e igualmente los desplazamientos negativos al pull. Los resultados se muestran en la *Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78.*

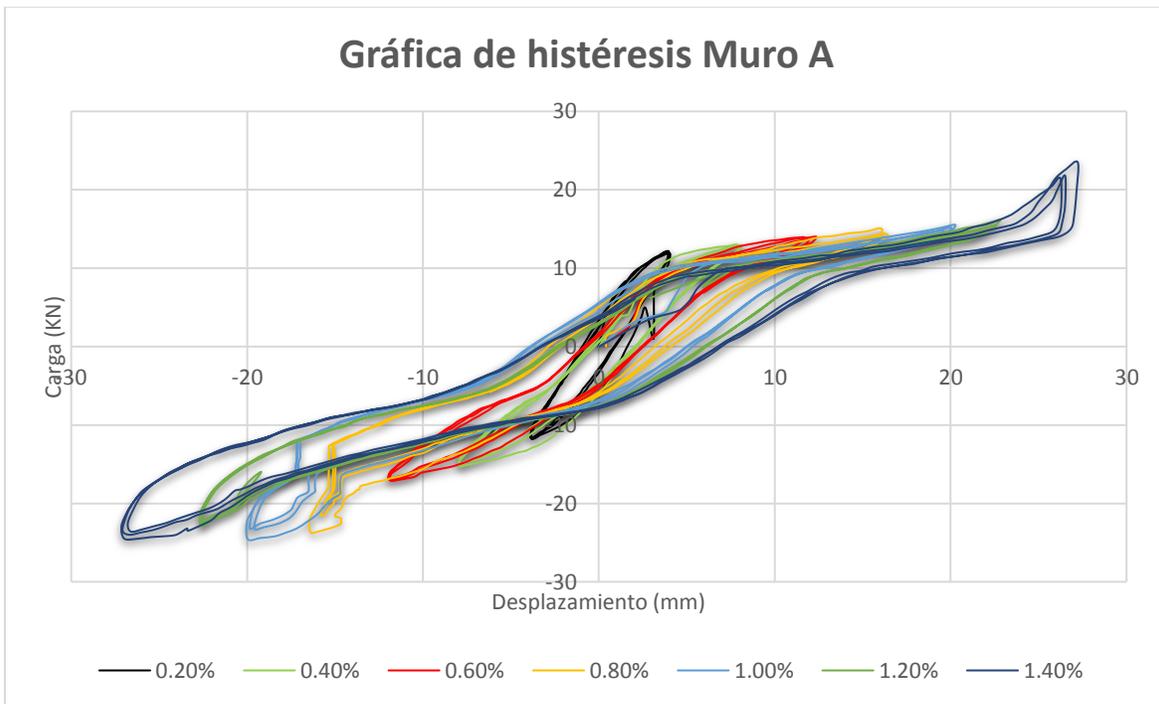


Figura 75. Gráfica Histéresis Muro A.

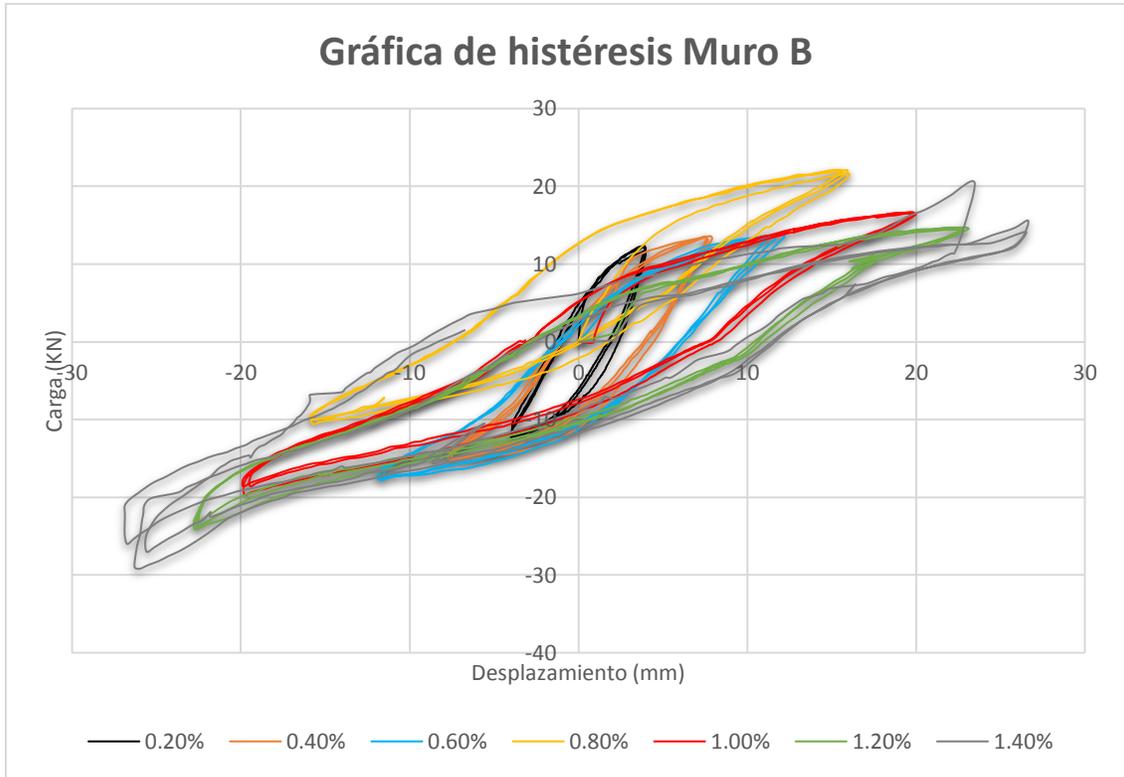


Figura 76. Gráfica Histéresis Muro B.

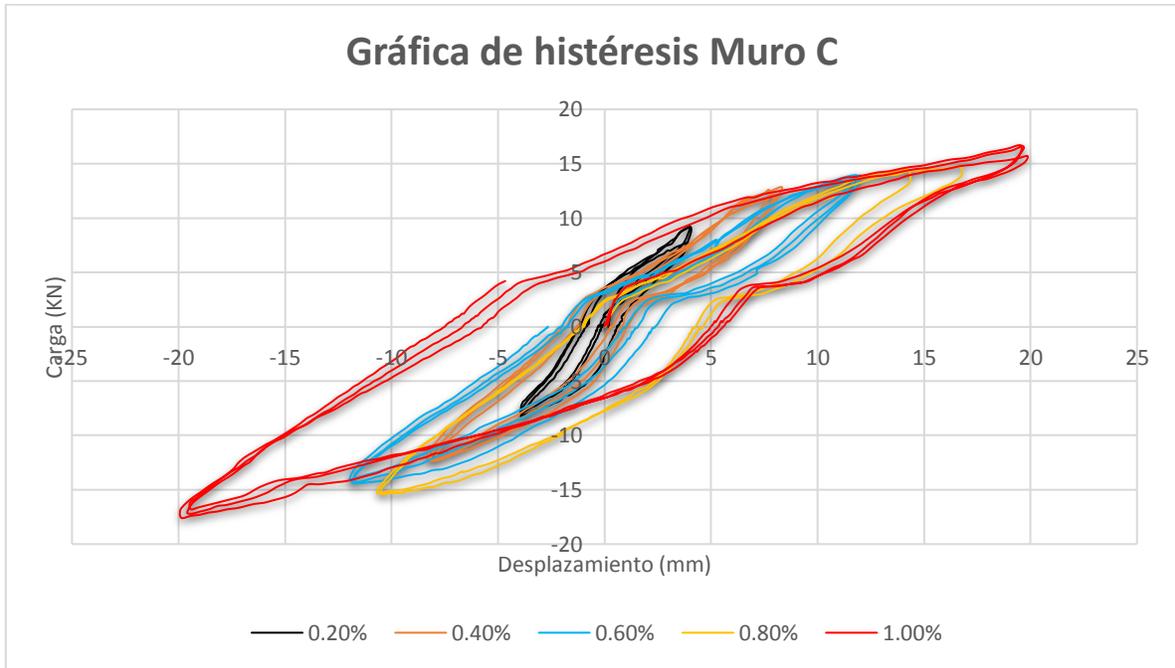


Figura 77. Gráfica Histéresis Muro C.

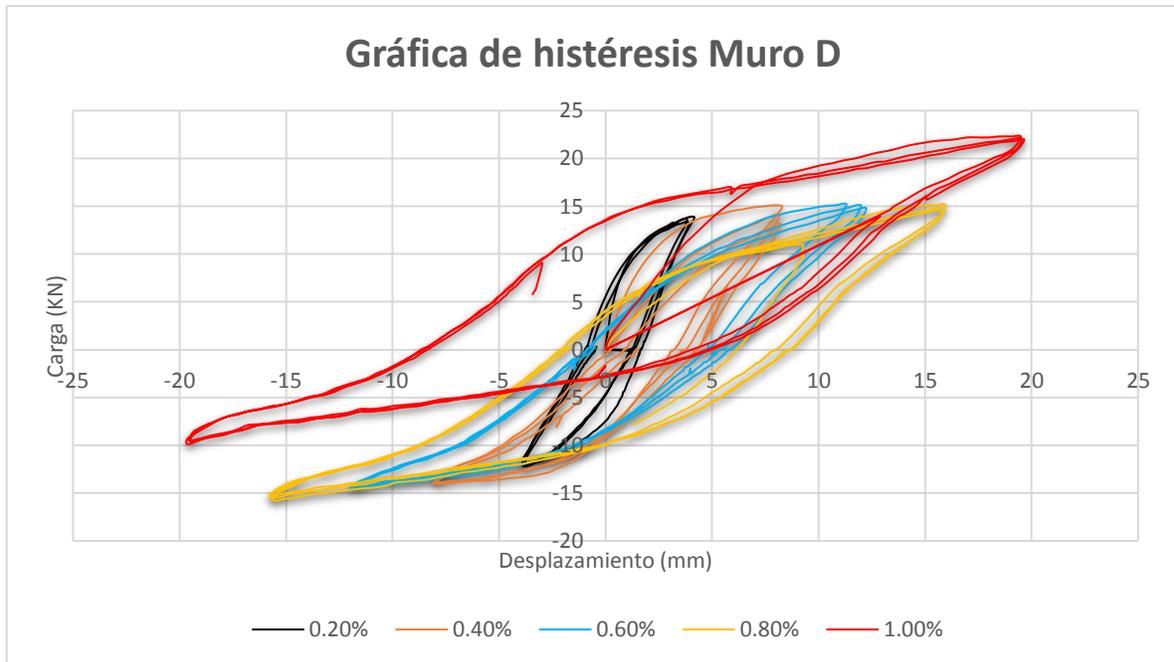


Figura 78. Gráfica Histéresis Muro D.

Como se puede observar en la *Figura 75* y *Figura 76* los muros A y B finalizaron el protocolo de carga de manera satisfactoria. Por el contrario, el protocolo de carga no pudo ser ejecutado por completo en los muros C y D como se muestra en la *Figura 77* y *Figura 78*, debido a que los muros fallaron durante la prueba por lo cual se dio por finalizado el ensayo. Esto ocurrió durante la deriva del 0.80% en los muros C y D, cabe resaltar que se muestra la deriva del 1.00% con el fin de mostrar el comportamiento del elemento luego de su falla. En este ciclo se puede observar que la carga aumenta por lo que se determinó que las condiciones del ensayo habían cambiado debido a que no existía la probabilidad de notar este aumento de carga con la falla presentada por el muro.

Los muros C y D demostraron valores de carga similares a los de los muros A y B durante los ciclos que pudieron ser realizados como se muestra en las *Figura 79*, *Figura 80*, *Figura 81* y *Figura 82*. De igual forma en estas figuras se puede observar que durante el “pull” los muros tienen la tendencia a soportar mayores cargas. En la *Figura 76* se puede observar que la línea correspondiente al ciclo de deriva 0.8% del muro B sale de la tendencia nombrada anteriormente, es decir, soporto más carga en el desplazamiento del “push”. Esto se debe a que al iniciar el ensayo el actuador generó una carga no anticipada, la cual desarrolló este comportamiento singular durante el ciclo. Cabe resaltar que el muro regresó a la tendencia una vez finalizado el ciclo.

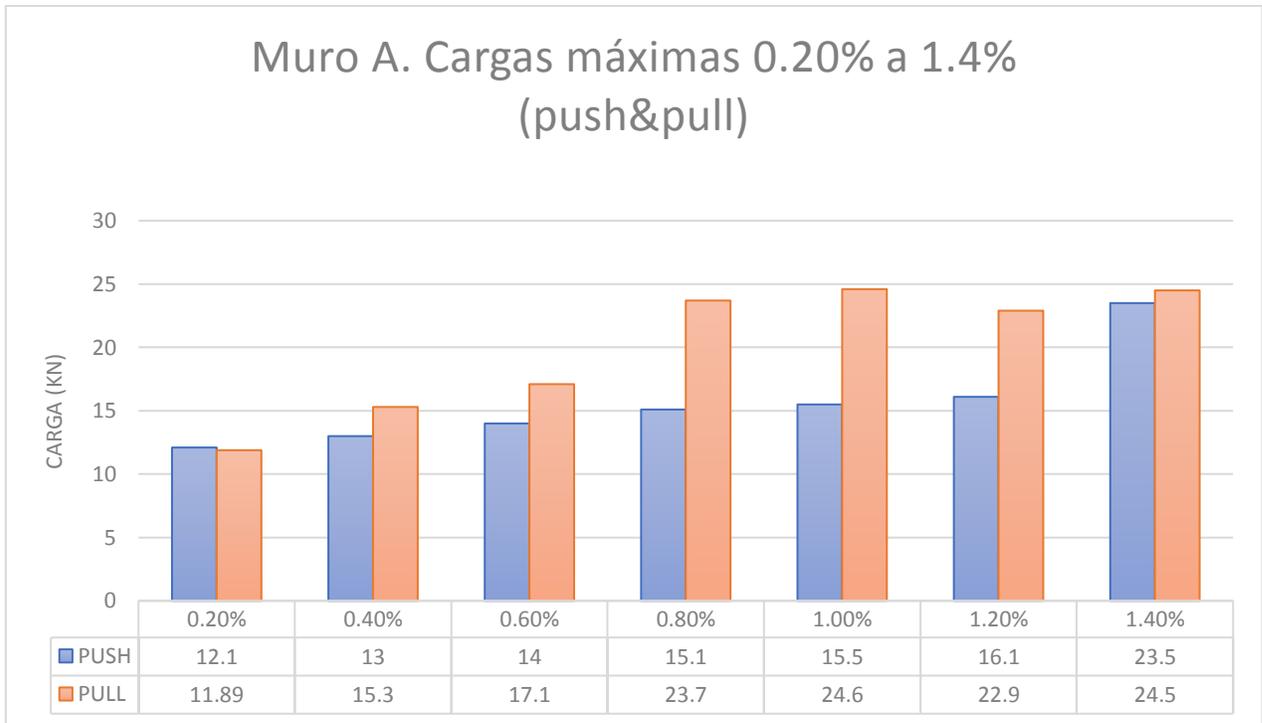


Figura 79. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro A.

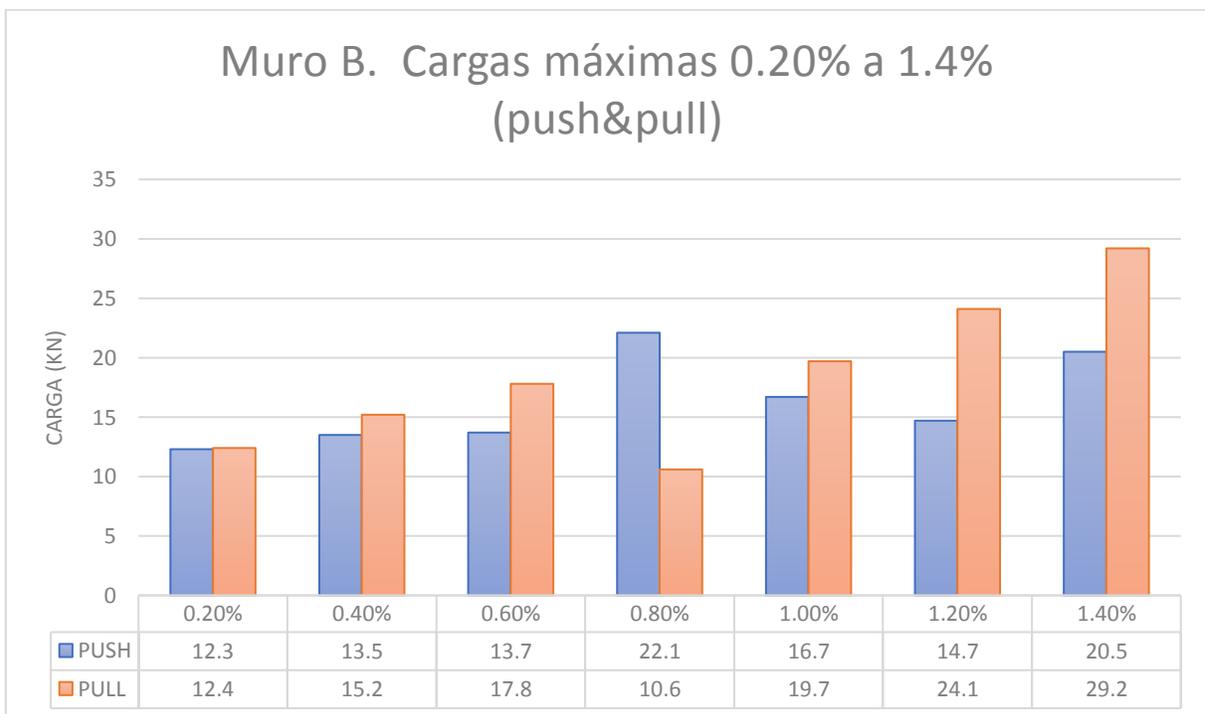


Figura 80. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro B.

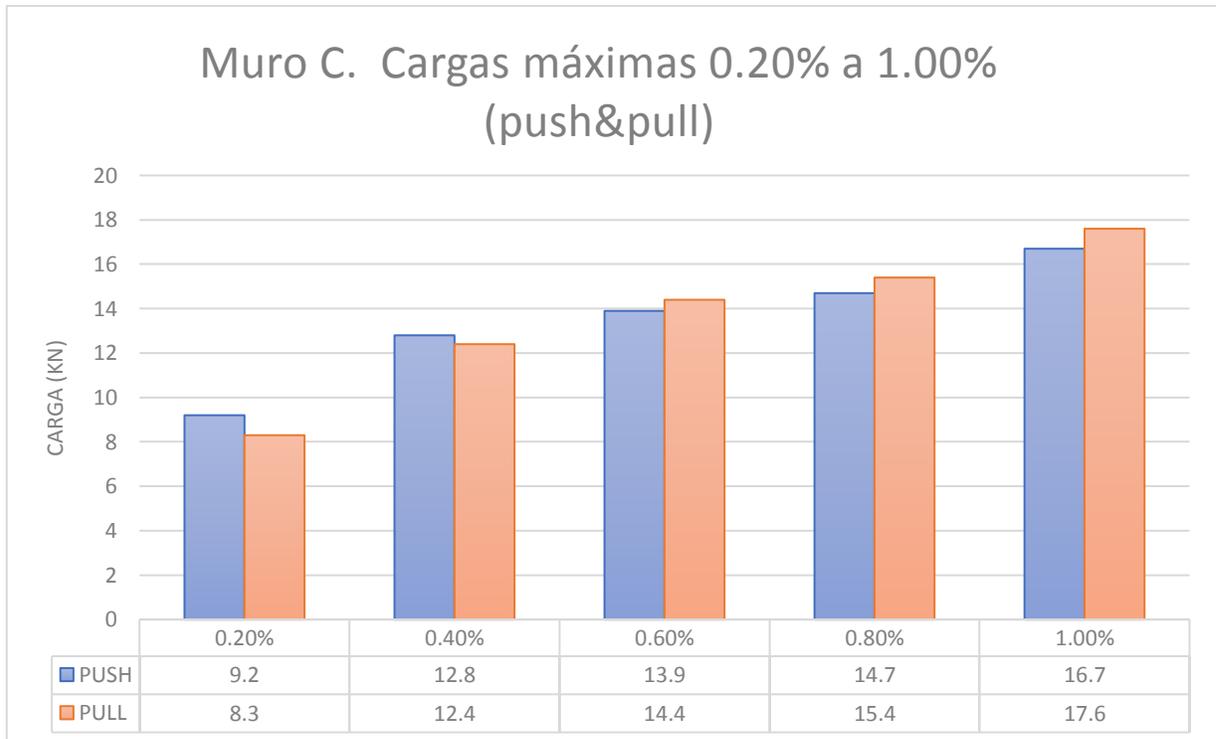


Figura 81. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro C.

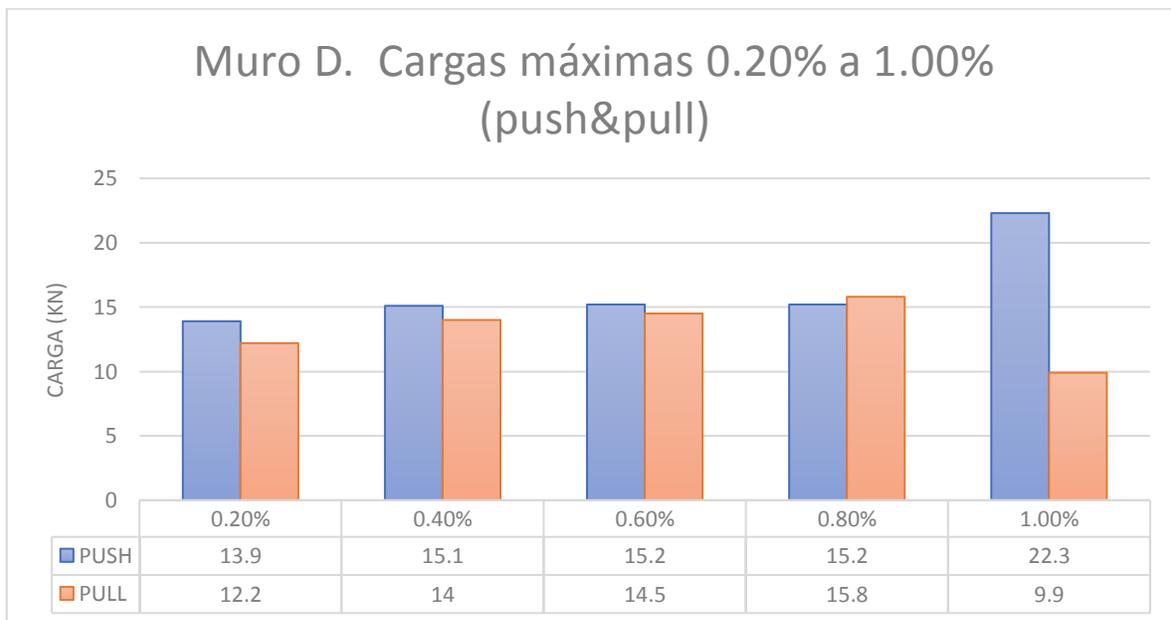


Figura 82. Cargas máximas en push & pull por deriva Muro D.

En la Figura 81 se muestran las cargas de push & pull a una deriva del 0.20%, 0.80% y las cargas máximas soportadas por el espécimen en el ensayo.

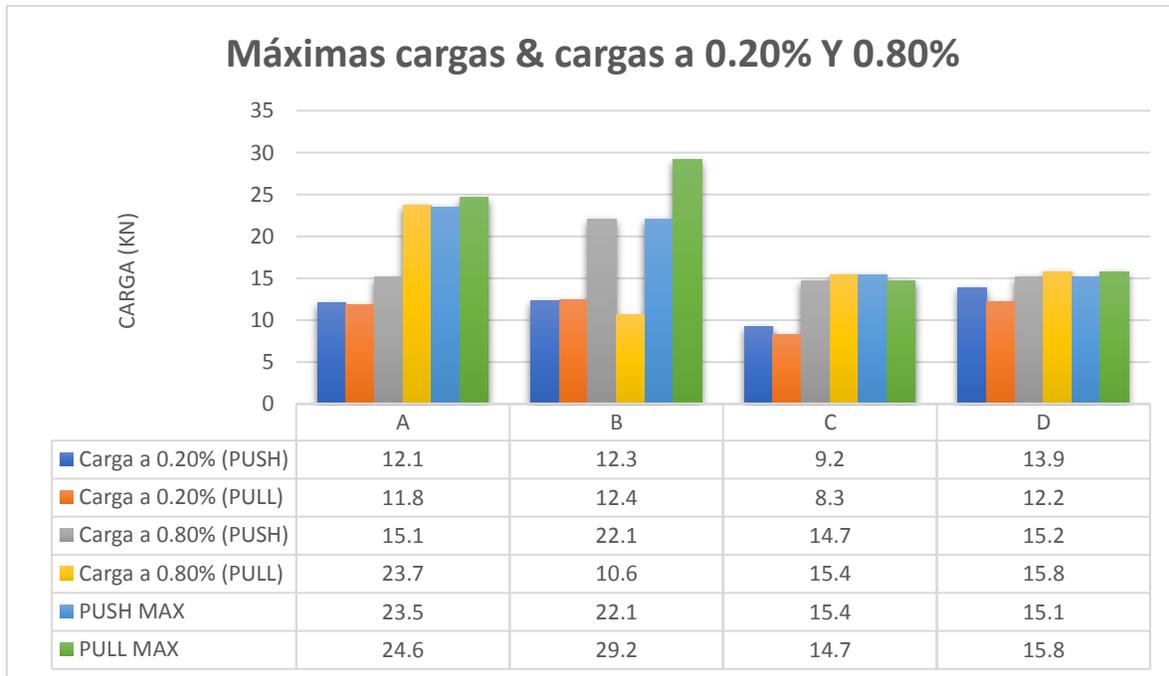


Figura 83. Cargas de push & pull a una deriva del 0.20%, 0.80% y cargas máximas.

De esta grafica se puede analizar que el muro A demostró la capacidad de carga más alta en la dirección del push con una carga de 23.5 kN y un desplazamiento de 27.23 mm en cuanto al Pull el muro B soporto la mayor carga con un valor de 29.2 kN y un desplazamiento de 26.01 mm. Los muros C y D demostraron los menores valores en carga con un valor en push para el muro D de 15.1 kN y un desplazamiento de 7.95 mm y un valor en pull para el muro C de 14.7 kN con un desplazamiento de 16 mm.

De igual forma se realizó una envolvente de carga-desplazamiento con el fin de visualizar las diferencias de carga a los diferentes porcentajes de deriva entre los muros ensayados (*Figura 84*). Como se puede observar el mejor comportamiento ante una carga lateral fue alcanzado por los muros A y B, debido a que no llegaron a la falla, nuevamente se puede observar que los muros C y D obtienen un comportamiento similar a los muros A y B antes de llegar a la falla.

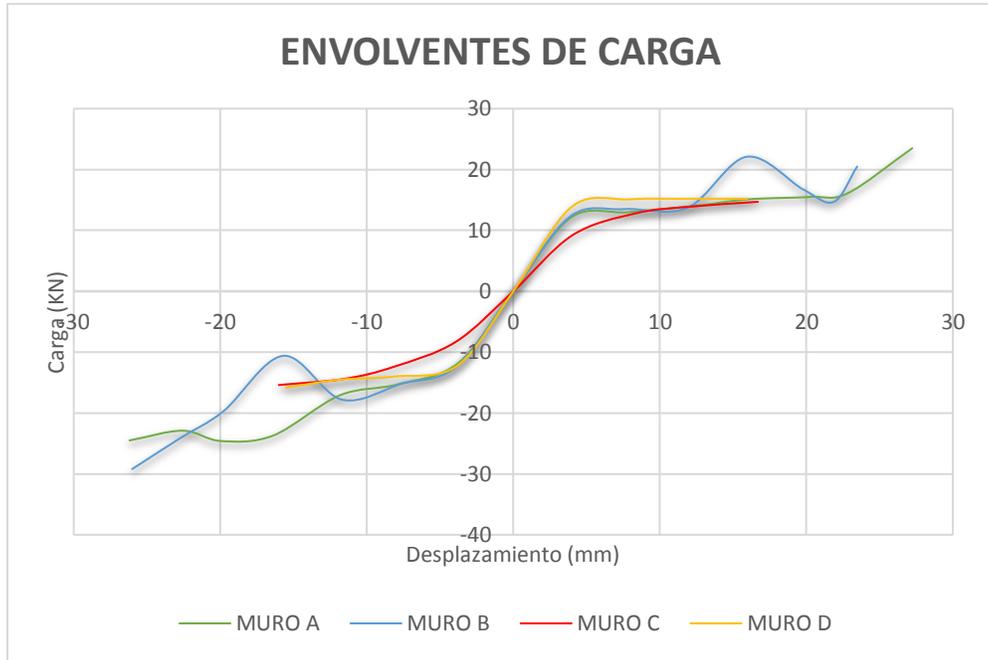


Figura 84. Envoltura de carga de los muros de prueba.

Capacidad de disipación de energía.

Se entiende como energía el trabajo necesario para realizar un desplazamiento. Por tanto, la energía total disipada por los elementos durante los ensayos se calcula como la sumatoria de las áreas comprendidas dentro de la curva de carga-desplazamiento de cada ciclo de histéresis (Figura 85).

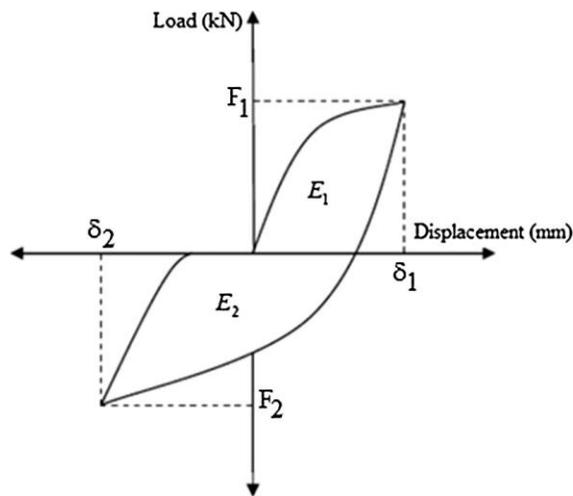


Figura 85. Cálculo de energía disipada en grafica de histéresis. (Emin Arslan, Emiroglu, & Yalama, 2017)

Para el cálculo de la energía disipada se realizaron las gráficas de cada porcentaje de deriva en el programa de AutoCAD y se calculó el área de cada gráfica. Para hallar el total de energía disipada por cada muro durante todo el ensayo se sumaron las áreas calculadas en cada porcentaje de deriva, los totales se muestran en la siguiente figura.

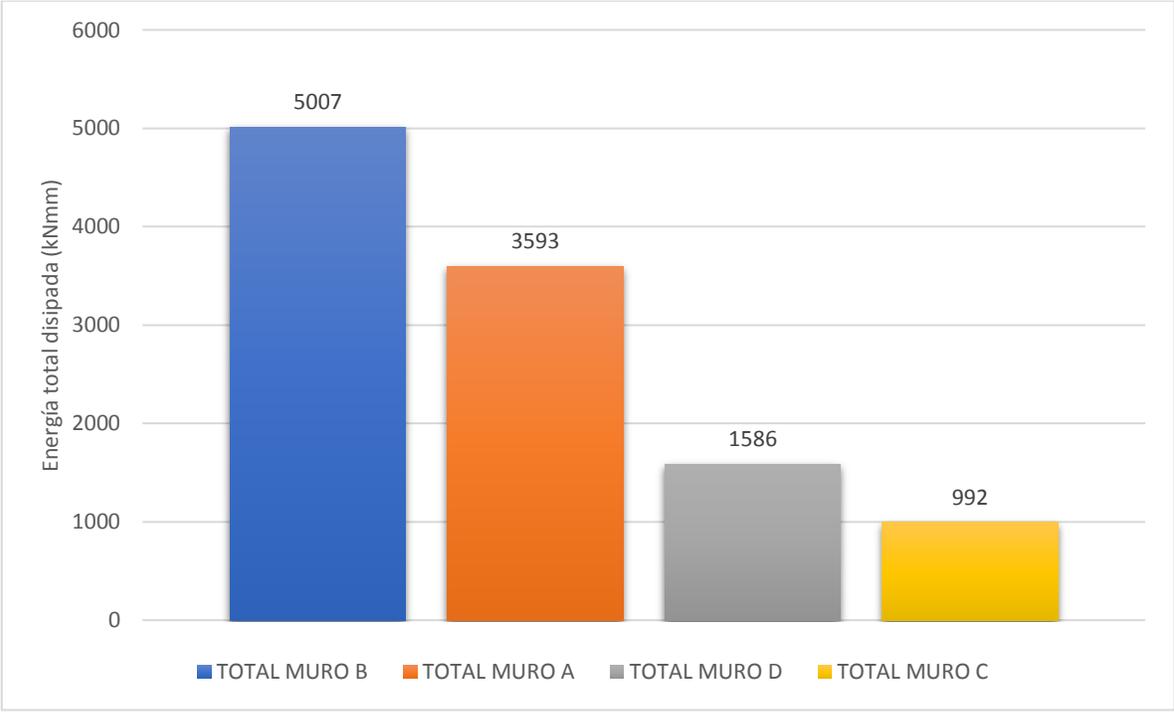


Figura 86. Gráfica de energía total disipada por los muros.

El muro B y el muro A permiten una capacidad de disipación de energía de 5007 y 3593 kN.mm. Por otra parte, los muros C y D debido a la falla prematura presentada demostraron una capacidad de disipación de energía de 1586 y 992 kN.mm aproximadamente (Figura 86)

Igualmente, con el fin de comparar el comportamiento de los muros C y D y los muros A y B se halló la energía disipada por todos los muros hasta el 0.8% de deriva.

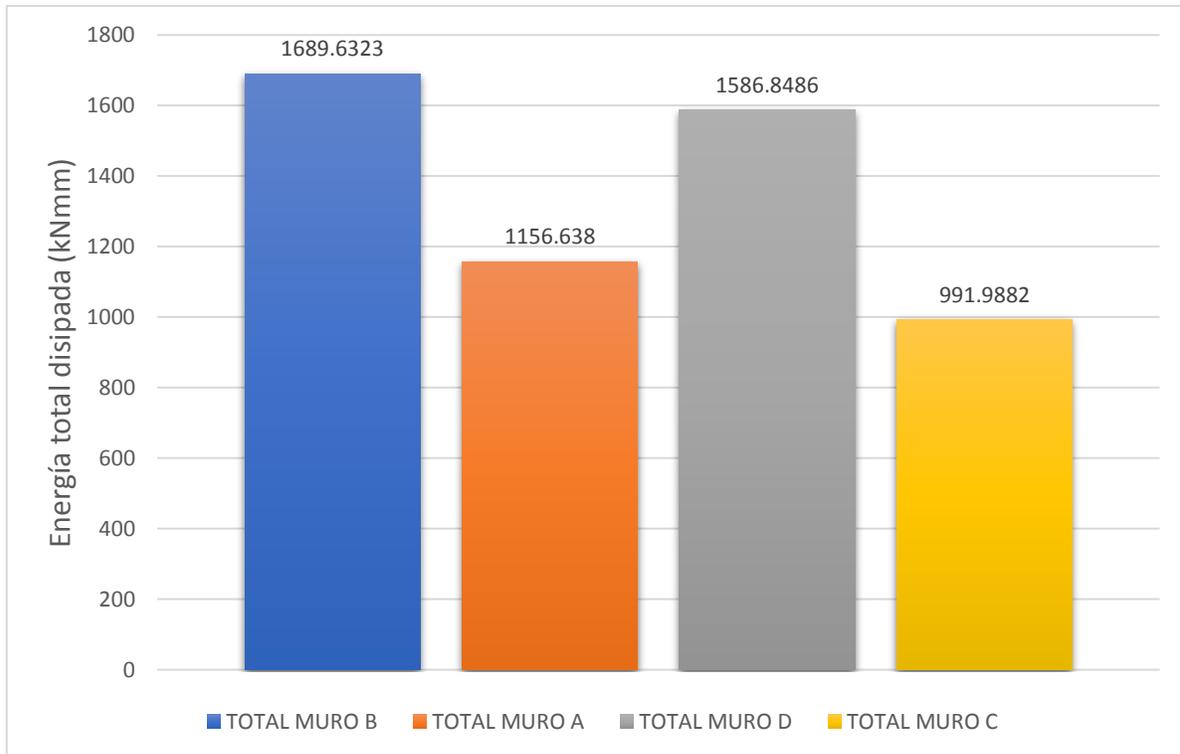


Figura 87. Gráfica de energía total disipada hasta 0.8% de deriva.

Como se puede observar en la Figura 86 el muro con mayor disipación de energía fue el muro B. Los muros C y D aunque tengan una disipación similar de energía en los ciclos iniciales (*Figura 87*), demuestran una disipación de energía total muy por debajo (*Figura 86*) con respecto a los muros A y B debido a que fallaron antes de completar el protocolo de carga.

Degradación de la rigidez

La rigidez es la capacidad de resistir una deformación dada una fuerza aplicada, por tanto, la degradación de la rigidez es la pérdida gradual de resistencia ante diferentes esfuerzos. Para realizar una gráfica de degradación de rigidez se debe realizar una línea recta entre las cargas pico de cada ciclo de histéresis y calcular la pendiente de esta. El promedio de las pendientes de cada deriva es la rigidez en este punto (*Figura 88*). Esta rigidez se grafica contra el porcentaje de cada deriva y se obtiene la gráfica dada en la *Figura 89*.

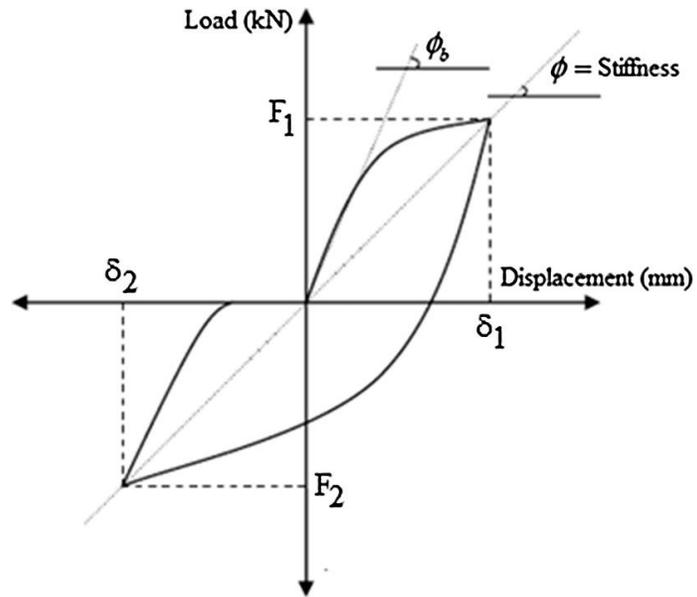


Figura 88. Cálculo de rigidez a partir de la gráfica de histéresis. (Emin Arslan, Emiroglu, & Yalama, 2017)

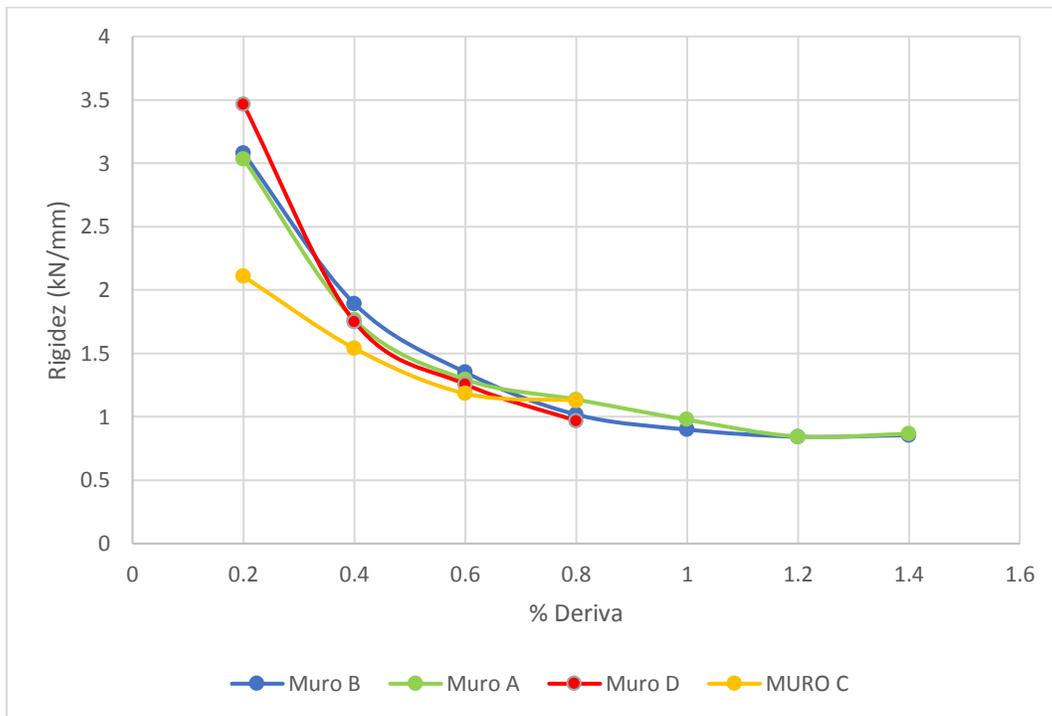


Figura 89. Gráfica de degradación de rigidez.

Se puede observar que la rigidez con la que inicia el muro D es la mayor de todas, pero al mismo tiempo es el espécimen que presenta una pendiente más inclinada, es decir, una degradación más rápida de la rigidez. El muro C, aunque tiende a degradarse menos durante el ensayo presenta una rigidez inicial muy baja con respecto a todos los muros.

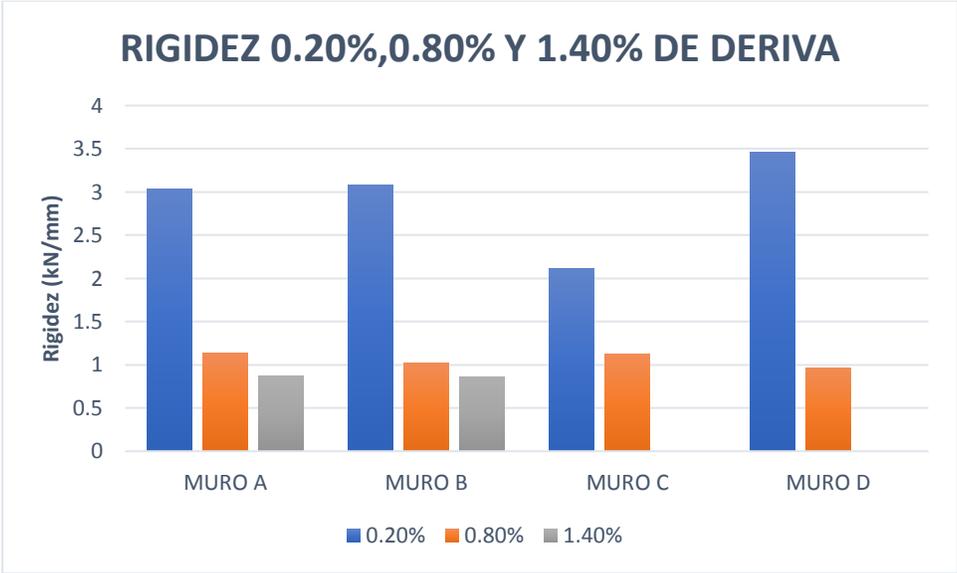


Figura 90. Rigidez de los muros al 0.20%, 0.80% y 1.40% de deriva.

La degradación de la rigidez al 0.80% de deriva de los muros A, B, C y D fue respectivamente del 62%, 66%, 46% y 72%. Esto demuestra que el muro D tuvo una degradación de rigidez acelerada con respecto a los demás especímenes. El porcentaje de deriva de 1.40% alcanzado por los muros A y B demuestran una degradación de rigidez del 72 %.

Patrones de falla

Muros A y B

Durante la prueba de carga cíclica lateral se observó que en las deformaciones máximas de cada ciclo de carga el muro presento una falla de estabilidad por volcamiento producto del momento máximo generado por la carga lateral en el talón del muro. Cabe resaltar que el muro no presentó ninguna fisura ni discontinuidad durante el volcamiento.

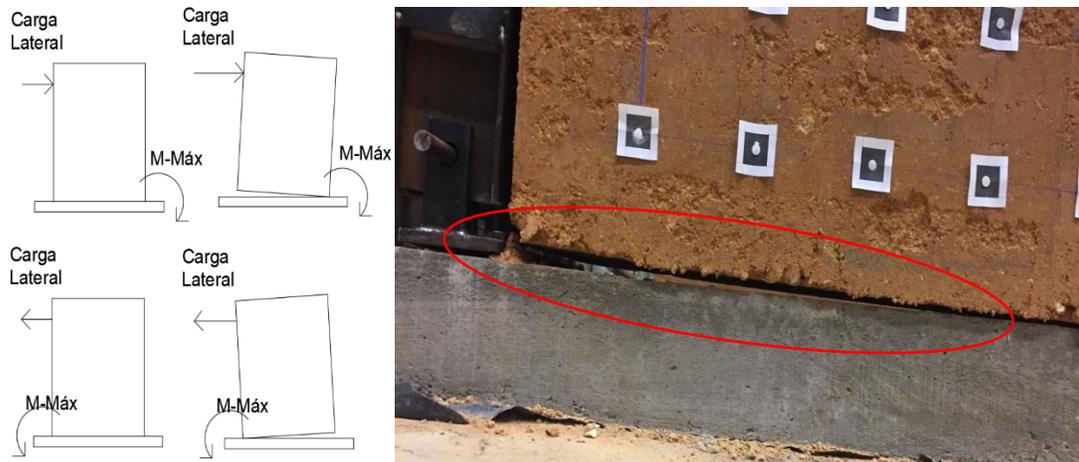


Figura 91. Patrón de falla Muros A y B.

Muros C y D

Los muros C y D mantuvieron inicialmente un comportamiento similar al mostrado en los muros A y B. Sin embargo, al aumentar los desplazamientos laterales se presentó una falla medida a 40 cm respecto al talón del muro, explicada por la siguiente hipótesis: el momento máximo comúnmente se genera en la parte inferior del espécimen, pero al encontrarse un plano de falla antes de este se generó una fisura por cortante que aumento progresivamente en cada ciclo de deriva hasta crear una grieta que dividió los especímenes en dos bloques.

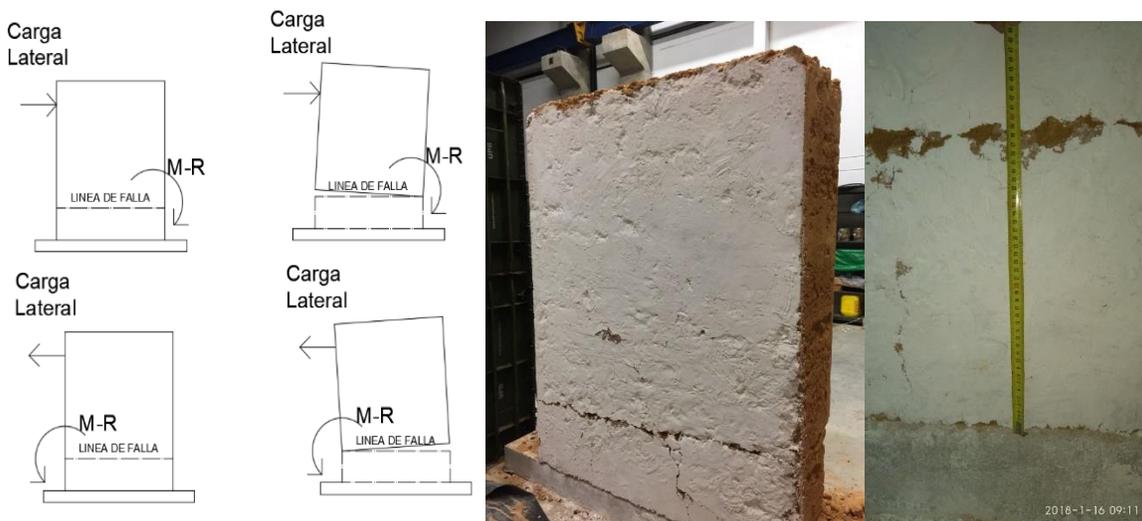


Figura 92. Patrón de falla Muros C y D.

La fisuración de los muros y posterior plano de falla se originó en la primera hilera de caña brava dispuestas en sentido horizontal y longitudinal como se nota en la *Figura 93*

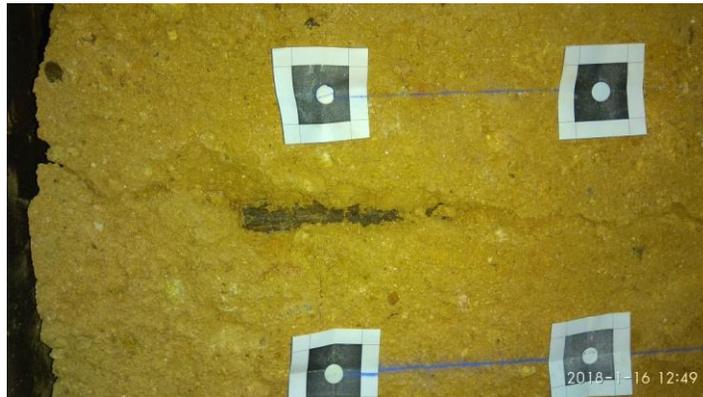


Figura 93. Exposición de la caña brava en la falla a cortante.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La selección del material por medio de ensayos de campo, aunque es aceptada no es recomendada, Esto se debe a que los ensayos de campo miden las propiedades de los materiales de manera cualitativa lo que crea una incertidumbre referente a la calidad de los elementos construidos con técnicas en tierra armada, esto se evidencia en la investigación debido a que las humedades (*Tabla 15*) con las que se construyeron los 4 muros en tapia pisada fueron controladas por la experticia del preparador de material. Como resultado de esto las humedades no son las correspondientes a la humedad óptima dada por el ensayo de relación de humedad-densidad (*Tabla 12*), lo que indica que los muros no fueron compactados con la máxima densidad del suelo.

Se evidencio en las muestras de humedad tomadas durante la construcción (*Tabla 15*) que se agregó una mayor cantidad de agua a los muros C y D esto explica el 12 % de material extra requerido para la construcción de estos, dado que a mayor porcentaje de humedad menor densidad y por tanto se requiere de una mayor cantidad de material. Esto se corrobora también en el muro durante su proceso de secado donde se produjo un fenómeno conocido como contracción por secado que trajo consigo la aparición de fisuras producto de la humedad excesiva.

La escogencia del material es una parte importante a la hora de realizar construcciones en tapia pisada debido a que aunque los rangos sugeridos de fracciones de suelo para construir una estructura de esta tipología son amplios : gravillas (0 al 15%), arenas (40 al 50%), limos (20 al 35%) y arcillas (15 al 25%) (SENA, 2012), el solo hecho de no contar con un porcentaje de material dentro de los rangos implica que la estructura pierde propiedades físico mecánicas del suelo que aportan resistencia a las construcciones en tapia pisada. Un ejemplo de esto es el suelo utilizado para la construcción de los muros objeto de investigación, el cual contaba con un porcentaje mayor de arenas al recomendado lo que implicaba menor cohesión de las partículas, cualidad significativa en la resistencia de un muro en tapia pisada.

Se evidencio que el marco de carga diseñado y construido cumplió con efectividad su propósito de prevenir una falla local en los especímenes de tapia pisada durante el ensayo. De igual forma como se puede observar en las gráficas de histéresis el comportamiento para las direcciones de push y pull fue similar lo que indica que el protocolo de carga y el marco articulado funcionaron de manera satisfactoria.

Los muros A y B demostraron la mayor capacidad de soporte ante una carga lateral, debido a que como se puede observar en las gráficas de histéresis, completaron el protocolo de carga propuesto (*Figura 75 y Figura 76*) a diferencia de los muros C y D (con inclusión de caña brava) los cuales fallaron durante el ensayo (*Figura 77 y Figura 78*).

El aumento de carga en el 1.0 % de deriva de la gráfica de histéresis del muro C y D una vez fallados (*Figura 77 y Figura 78*), se presenta debido a que el muro de tapia pisada con inclusión de caña brava sufrió una falla a cortante que dividió la sección en 2 y permitió que la sección superior trabajara como un muro independiente que se deslizaba y volcaba ante la carga lateral ejercida. Por tanto, se decidió no contar con estos datos para el análisis de resultados y dar por terminado el ensayo para los muros C y D.

Las cargas soportadas por los muros C y D, hasta el ciclo de 0.80% de deriva, donde fallaron, demuestran similitud con respecto a las de los muros A y B. De esto se puede concluir que la caña brava incluida en los muros no muestra ningún porcentaje de mejora en la capacidad de soporte frente a cargas laterales cíclicas en comparación con las estructuras de tapia pisada convencional.

Todas las gráficas histeréticas demuestran la tendencia a soportar mayores cargas en el desplazamiento del pull, lo cual indica que el material una vez realizado el movimiento de push y regresado a la posición inicial conserva una deformación plástica residual la cual debe intentar recuperar el actuador hidráulico antes de realizar el movimiento del pull.

Las gráficas de disipación de energía permiten comprender cual elemento requirió más trabajo para ser desplazado y por tanto cual elemento se comporta de forma más rígida. Los muros C y D como se muestran en la *Figura 86* demuestran una capacidad de disipación de energía 70% menor que los muros A y B. Por medio de esta gráfica y los patrones de falla demostrados en la *Figura 92* se puede concluir que la caña brava inflige planos de falla horizontales que perjudican las estructuras de tapia pisada y las debilitan. De igual forma como se puede mostrar en la *Figura 87* los muros antes de fallar por el plano de falla generado por la caña brava, demostraban un comportamiento similar a los muros de tapia pisada convencional por lo que se puede asumir que la inclusión de caña brava como se había mencionado anteriormente no presenta ninguna mejora a la capacidad de soporte y disipación de energía de las estructuras de tapia pisada.

Las diferencias de energía disipada entre la misma tipología de muro se basan únicamente en la calidad de construcción de cada uno. Los análisis de resultados demuestran que los muros que tuvieron un mejor desempeño estructural fueron aquellos que contaban con un porcentaje de humedad más cercano al óptimo (Muro A y Muro B). Lo que indica la importancia de llevar un control de calidad durante el proceso constructivo.

Como se puede observar en la *Figura 89* los Muros C y D demuestran una curva de degradación de rigidez similar a la de los muros A y B esto indica nuevamente que la inclusión de caña brava en disposición horizontal no aporta rigidez a los muros C y D, por lo tanto, no se puede considerar un refuerzo estructural a estos.

Las fallas encontradas en los muros A y B por volteo demuestran el comportamiento monolítico del elemento al ser sometido a una carga, por otra parte, los muros C y D muestran una falla por cortante a la altura de 40 cm donde se encontraba dispuesta la caña brava. Esto permite llegar a la conclusión de que la caña brava como una inclusión horizontal a los muros de tapia pisada genera planos de falla que perjudican el comportamiento monolítico de estos elementos, estos planos de falla se generan debido a que las partículas de suelo alrededor de la inclusión no presentan cohesión lo que genera un punto de vulnerabilidad en la estructura.

Como producto final de la investigación no se recomienda el uso de inclusiones horizontales de caña brava en muros tapia pisada con el fin de mejorar su comportamiento ante cargas laterales debido a que crea vulnerabilidad en el elemento, no aumenta la capacidad de soporte ni aporta mayor rigidez a la estructura. Por lo que no aporta ningún tipo de beneficio estructural al elemento y si perjudica de manera considerable el desempeño de este.

De igual forma no se recomienda el uso de ningún tipo de material como inclusión horizontal a los muros en tapia pisada ya que se puede presentar el mismo tipo de falla en una estructura, sin embargo, se puede tomar en consideración la inclusión de elementos de refuerzo vertical que representen una oposición a cargas laterales generadas por los sismos.

Se recomienda la construcción de más especímenes, ya que durante el análisis de datos es notoria la necesidad de tener un tercer valor por cada tipología de muro que ayude a corroborar los resultados obtenidos, es decir, que si existe una diferencia amplia entre los resultados de los dos primeros especímenes un tercero daría la pauta final de cuál es el resultado más aproximado a la realidad debido a que con solo dos valores se corre el riesgo de obtener una desviación muy amplia y que generar un valor de incertidumbre sobre la veracidad de los mismos.

Se recomienda la aplicación de una capa de aceite, en el molde donde se compacte el elemento a trabajar, con el fin de crear un aislamiento entre el muro y el molde ya que durante la construcción de los especímenes los muros quedaron afectados superficialmente por el desprendimiento del material adherido al molde utilizado.

Como se advirtió en la construcción de los muros C y D, el correcto aplome del molde donde se llevará a cabo la compactación juega un papel importante, ya que al no tener control sobre esto se presentan irregularidades en los muros que pueden perjudicar el desarrollo de los ensayos o incluso generar complicaciones mayores que impliquen la demolición y reconstrucción del elemento.

Se debe tomar en cuenta que, aunque esta investigación de una pauta para conocer el comportamiento estructural de la tapia pisada con inclusión de caña brava, hace falta más estudios locales que permitan comprender el desempeño global de estas estructuras aun construidas en el país.

Aunque el experimento dio a conocer características importantes del comportamiento estructural del elemento no se pudo llevar a cabo el protocolo de carga inicial por limitantes en la instrumentación, por lo que se recomienda para futuras investigaciones realizar un protocolo de carga por deformaciones con mayores porcentajes de deriva para conocer cómo se desempeña el elemento ante mayor deformación.

REFERENCIAS

- Afanador Garcia, N., Carrascal Delgado, M., & Bayona Chinchilla, M. J. (2013). Experimentacion, comportamiento y modelacion de la tapia pisada. *Revista Facultad De Ingenieria, UPTC*, 47-59.
- B. Bui, Q., Hans, S., C. Morel, J., & P. Do, A. (2011). First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings. *Engineering Structures*, 3690-3695.
- Bautista Garcia, G. (2014). *Geotecnia Vial*. Bucaramanga.
- BORGES RAMOS, J. (2010). *CONSTRUCCION CON TIERRA* . Merida.
- Cardona Naranjo, F., Calderón Arias, A., & Martínez Figueroa, Y. (08 de Agosto de 2015). *Herbario Universidad de Antioquia*. Medellin: Universidad de Antioquia.
- Cementos del caribe. (1994). *Cementos del Caribe: 50 años de historia 1944-1944 / Cementos del Caribe*. Bogota: Tercer Mundo.
- Collins, R. (1991). *La conquista arabe 710-794*. Basil Blackwell, Oxford: Editorial Critica.
- Davila Corzo, S. P., & Puentes Puentes, J. E. (2004). *Determinación y análisis de la caracterización de los diferentes tipos de tierra utilizados en el proceso constructivo con tapia pisada por medio de ensayos geomecánicos y mineralógicos*. Bucaramanga: Tesis De Grado, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Emin Arslan, M., Emiroglu, M., & Yalama, A. (2017). Structural behavior of rammed earth walls under lteral cyclic loading: A comparative experimental study. *Construction and Building Materials*, 433-442.
- Emiroğlu, M., Yalama, A., & Erdoğan, Y. (2015). Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios. *Applied Clay Science*, 221-229.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. (Junio 2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*. Washington, D.C.: Department of Homeland Security (DHS).
- Font, F., & Hidalgo, P. (2011). La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. *Informes de la Construcción*, 21-34.
- Galvis, N. M. (2016). *PROTOTIPO DE VIVIENDA PRODUCTIVA DE INTERÉS SOCIAL RURAL PARA EL MUNICIPIO DE SOATÁ DEPARTAMENTO DE BOYACA*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- Gama Sanchez, C. E. (2007). La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas. *APUNTES, Universidad Nacional De Colombia*, 20(2), 242-255.
- Garcia-Reyes, & Anzellini, M. (2016). *TÉCNICAS VERNÁCULAS*. Colombia: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

- Gernot, M. (11 de Febrero de 2001). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Kassel, Alemania: Forschungslabor für Experimentelles Bauen.
- Gómez M., J. E. (2010). Vivienda efímera urbana: ¿arquitectura vernácula? *dearq 07*, 136-143.
- GRAMLICH, A. N. (2013). *A CONCISE HISTORY OF THE USE OF THE RAMMED EARTH BUILDING TECHNIQUE INCLUDING INFORMATION ON METHODS OF PRESERVATION, REPAIR, AND MAINTENANCE*. Oregon: University of Oregon Graduate School.
- Hall, M., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (2012). *Modern Earth Buildings*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- HERNANDEZ QUINTERO, J. N., & JEREZ SEPULVEDA, W. A. (2006). *ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE LAS ZONAS DE FUTURO DESARROLLO SECTOR B DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA POR MEDIO DEL PROGRAMA SLOPE/W*. BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.
- Instituto Nacional De Vías . (2012). *MANUAL DE NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS*. MINISTERIO DE TRANSPORTE.
- Liu, K., Wang, M., & Wang, Y. (2015). Seismic retrofitting of rural rammed earth buildings using externally bonded fibers. *Construction and Building Materials*, 91-101.
- Lopez Perez, C. (2015). *Rastros y rostros de las construcciones en tierra cruda*.
- Maldonado Ramos, L., Castilla Pascual, F. J., & Vela Cossio, F. (1997). La tecnica del tapial en la comunidad autonoma de Madrid. Aplicacion de nuevos materiales para la consolidacion de muros en tapia. *Informes de la construccion*, 49(452), 27-37.
- Mayorga Vela, C. A. (2011). *Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostamiento de pando restringido. Parte 2*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Miccoli, L., Drougkas, A., & Müller, U. (2016). In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling. *Construction and Building Materials*, 144-152.
- Miccoli, L., Urs, M., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction And Building Materials*, 327-339.
- Moreno Galvis, N. (2016). *PROTOTIPO DE VIVIENDA PRODUCTIVA DE INTERES SOCIAL RURAL PARA EL MUNICIPIO DE SOATA, DEPARTAMENTO DE BOYACA*. Bogota: Universidad Pontificia Javeriana.
- Nabouch, R., Bui, Q., Perrotin, P., Poinard, C., Goldin, T., & Plassiard, J. (2016). *Seismic assessment of rammed earth walls using pushover tests*. Chamberry, France: University Savoie Mont Blane.

- NSR-10. (2010). *Codigo Colombiano de Construcción sismo Resistente*. Bogota: COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN.
- Prada Diaz, W. A., & Rivero Bolaños, S. (2000). *Comportamiento estructural de muros en tierra apisonada, reforzados verticalmente con caña, sometidos a cargas horizontales*. Bucaramanga: Trabajo de grado (UIS).
- Rivero Bolaños, S. (2007). El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia. *APUNTES*, 354-363.
- SENA. (2012). *CONSTRUCCION DE MURO EN TAPIA PISADA Y BAHAREQUE*. Manizales: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES.
- T. Bui, T., B. Bui, Q., Limam, A., & Maximilien, S. (2014). Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications. *Construction and Building Materials*, 295-302.
- Yamin Lacouture, L. E., Bernal, C. P., Reyes Ortiz, J. C., & Valencia, D. R. (2007). Estudios de vulnerabilidad sismica, rehabilitacion y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes, Universidad De Los Andes*, 20(2), 286-303.