

## **DISPOSITIVO DE PENETRACIÓN PARA DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE MUROS DE TAPIA PISADA**

**Santiago Rivero B. ; Oscar H. Medina A.**  
TERRARIUM CREATIVE  
Calle 11 N° 9 -39. San gil/ Colombia  
+0057 (310 325 04 81/ 314 608 6359 / +7 7247347)  
terrariumcreative@gmail.com

**Palabras clave:** estructuración, cohesión, densidad, compactación, compresión, penetración.

### **RESUMEN**

Este documento expone la concepción, diseño, elaboración y aplicación de un dispositivo que ofrece una magnitud para determinar al menos de manera indirecta la resistencia a compresión de los muros de tapia pisada a partir de la correlación con su densidad. Este dispositivo además, busca fortalecer la apropiación y el reconocimiento de los conocimientos ancestrales y empíricos procurando establecer diálogos y conexiones con la precisión científica de la ciencia de materiales apoyándose sobre conceptos de seguridad estructural y apropiación de la técnica, aportando elementos de juicio para la ejecución de obras..

Parte de la validación de la arquitectura de tierra dentro del contexto actual radica en el desarrollo de ensayos específicos que permitan un diagnóstico coherente con cada sistema constructivo asociado a la tierra cruda como material e incluso lleguen a considerar la dinámica de los muros en el tiempo. Este ensayo de perforación como ensayo no destructivo para muros de tapia pisada tiene aplicación en edificaciones ya construidas que podrían ser patrimoniales y el seguimiento a la calidad estructural de una obra en proceso.

En este documento se expone el sistema de funcionamiento, el modo de uso y el proceso de patronamiento que incluye el estudio del material con que se fabricaron las probetas, buscando en esta fase enfocar las variables que intervienen en la mecánica de la tapia pisada y la correlación con la lectura del funcionamiento del dispositivo.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de los procesos constructivos está vinculado a distintas dinámicas históricas, sociales, políticas y económicas. La arquitectura es testigo de los procesos humanos y su conservación o destrucción corresponden también a estas dinámicas sobre las cuales la academia ha poseído un papel en el que percibe e influye en el modo de generar hábitat. De tal manera se concibieron modelos de análisis y diseño de estructuras para materiales cuyo desempeño se produce dentro de rangos de elasticidad o plasticidad específicos. La tierra cruda como material de construcción posee unas características físico-mecánicas que en nada difieren con el planteamiento teórico de materiales como el del concreto o el del acero pudiéndose incluso ser estudiada mediante elementos finitos, pero por no haber sido considerada dentro de los materiales que corresponden con un sistema de producción, su desarrollo teórico fue reducido. Ahora que la tierra como material despierta el interés no solo de patrimonialistas sino también se perfila como el material con mayores posibilidades dentro de la arquitectura bioclimática y también la de bajo costo es necesario dentro de su evolución y por seguridad despertar el interés de la academia y de los centros de investigación

Barichara como ejemplo de la nueva dinámica en la que bien se inserta la arquitectura de tierra comienza a dejar entrever las deficiencias que produce el encuentro fácil de la cultura constructiva ancestral con la modernidad, encuentro mediado por variables de mercado y con no pequeños vacíos al no existir el puente entre la tradición y la técnica.

A fin tender ese puente, la Fundación Tierra Viva ha iniciado una serie de acciones que pretenden conocer los rangos de desempeño de la tierra como material desde el grupo de Materiales, Sistemas y Estructuras adscrito al Centro de la Tierra. También se han iniciado labores en los temas de control de obra, diseño de herramientas y equipos y el desarrollo de

nuevos usos de la tierra como material. La nueva arquitectura y la preservación del patrimonio ofrecen opciones diferentes de reflexión alrededor de la arquitectura de tierra. Pese a ello hay un común denominador dentro de las posibilidades de desempeño: el conocimiento específico del material tierra para determinar su respuesta estructura ante las exigencias de carga en los distintos sistemas constructivos en que la tierra cruda trabaja.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El conocimiento que se tiene del desempeño estructural de la tapia pisada, es una amalgama de la percepción empírica de los tapieros y el ejercicio investigativo de los últimos 35 años en Europa, África y parte de América Latina, por lo tanto se requiere generar, desde y para el contexto latinoamericano, todo un conjunto de conocimientos adecuados para la escala y necesidades estructurales propias de nuestro territorio y cultura. En este campo caben los sistemas de control que permiten la obtención de datos específicos de las condiciones de recepción y transmisión de carga para utilizarlos en proyectos de intervención patrimonial y en obras nuevas. Estas herramientas de control deben ser de fácil manejo, bajo costo y de fácil transporte ya que muchas de las obras en proceso y las ya construidas se encuentran en el sector rural o en poblaciones apartadas,

La técnica constructiva ancestral de la tapia pisada se ha mantenido vigente, por lo tanto las reflexiones teóricas parten del reconocimiento del oficio, de esta manera los ensayos al sistema y los materiales proveen criterios medibles para el análisis. Los resultados están relacionados con energía y modo de la compactación, humedad natural, humedad de compactación y humedad de hidratación de los componentes de la matriz de tierra. Por las características del sistema constructivo de la tapia pisada, la resistencia a esfuerzos cortante y torsión, se chequean en función de las características geométricas de los muros y por ende de su inercia que están relacionadas también con la densidad a partir de condiciones de compactación óptimas (ensayo de Proctor modificado) y conocimiento de los componentes geotécnicos del material (plasticidad y granulometría).

La compleja estructura molecular de las arcillas está determinada por el tamaño de las placas o láminas que por su forma puede determinar la composición y la capacidad de enlace iónico y por consiguiente la mayor o menor capacidad de asociar a la estructura átomos de hidrógeno provenientes del agua. La rigidez a su vez es función de esta composición, determinando la friabilidad de las moléculas y en consecuencia mayor o menor plasticidad. La granulometría de los materiales, especialmente el contenido de finos es un índice de compresibilidad de los materiales dependiendo del tipo de roca parental. En el caso de arcillolitas más cohesivas e inertes, en el caso de las limolitas, dentro de las soluciones en obra está la necesidad de utilizar estabilizantes a fin de aumentar la densidad en los muros directamente relacionada con la resistencia a compresión. Estas dos condiciones pueden ser obtenidas directamente con el dispositivo de penetración para tapia pisada.

## **3. PRINCIPIO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO Y SU PATRONAMIENTO**

El dispositivo penetración evalúa la densidad para muros de tapia pisada, a partir de un ensayo no destructivo. Determina el estado del muro a nivel de densidad al correlacionar la penetración con resistencia a compresión por medio de la lectura en una tabla de análisis a partir de la longitud de perforación que provoca la acción de un punzón lanzado por un resorte. Difiere del esclerómetro para hormigón en la medida que no arroja un “índice esclerométrico” o “índice de rebote”, sino directamente se relacionan las características buscadas.

El dispositivo funciona de acuerdo con un principio ancestral de control de calidad utilizado por la tradición constructiva santandereana mediante la cual el maestro tapiero con un puntillón marcado a una longitud determinada perforaba el muro de tapia con una fuerza que resultaba siendo variable y al observar la longitud de penetración y con base en años de

experiencia en el oficio determinaba el estado de la compactación en el muro. La reinterpretación en el dispositivo planteado involucra reproducir este efecto mediante un sistema mecánico que actúe de la misma manera imprimiendo una carga uniforme por medio de un resorte y que esté patronado con las variables que permiten en ingeniería describir un material. El principio ancestral aunque acertado estaba sujeto demasiasdas variables subjetivas por parte del maestro tapiero. Estado de ánimo, fatiga, etc. La aplicación uniforme de la fuerza ajusta el proceso se ajusta al correlacionarlo con la densidad del muro que depende de clasificación geomecánica del material, la humedad y la energía de compactación..

El sistema mecánico para generar el mismo efecto de impulsar el puntillón se realiza con un resorte que al ser comprimido y suelto súbitamente imprime una fuerza de reacción constante, producto de la rigidez del resorte al interior del muro. El sistema está confinado dentro de una armadura metálica garantizando la perpendicularidad de la línea de acción del resorte con el eje vertical del muro.

En la figura 1, se muestra el esquema general del dispositivo. Planta y corte lateral del dispositivo incluyendo el medio de disparar el puntillón y de ajustarlo al ser disparado. En la gráfica el resorte está comprimido. El concepto como se mencionó arriba proviene de la cultura constructiva en tapia pisada y fue desarrollado por el equipo de Fundación Tierra Viva: el maestro tapiero Oliverio Roa quien expuso la idea ancestral,. El diseño estuvo a cargo el Ing. Oscar Medina con el apoyo del diseñador industrial Nicolás Melo y la coordinación y dirección del Ing. Santiago Rivero. La fuerza de diseño del resorte fue  $24 \text{ kg/cm}^2$  se basó en valores sugeridos de resistencia a compresión de la tapia pisada en las pruebas europeas<sup>1</sup>.

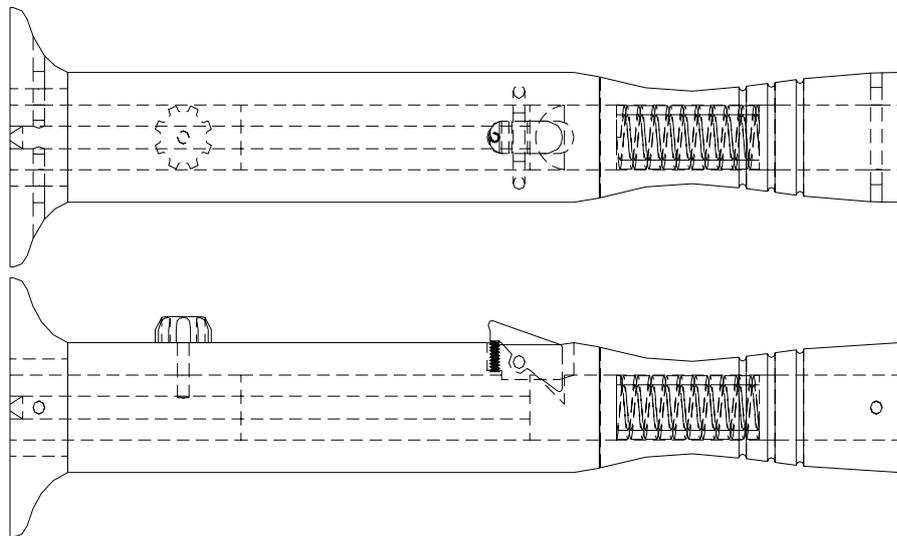


Figura 1. Esquema general del dispositivo de penetración para tapia pisada

[<sup>1</sup>] Doat, P. Hays, A. Houben, H. Matuk, S. Vitoux, F. Construir con tierra. Bogotá: Fondo Rotatorio Editorial. Traducción: ANGEL O., Clara. SANCHEZ, Clara E.1990. Tomo II. 48 p.

### 3.1 ENSAYOS

Para correlacionar la penetración con la resistencia es necesario generar curvas de longitud de penetración con densidad y luego con esfuerzo a compresión utilizando probetas de densidad y resistencia conocidas en laboratorio. Para este proceso se elaboraron diversas probetas con el material tierra caracterizada. El material disponible fue sometido a los siguientes ensayos para su caracterización:

#### 3.1.1 Granulometría.

La figura 2 representa la curva convencional de granulometría en la que se ha estudiado el tamaño de los finos mediante el método del hidrómetro, de acuerdo a la curva la proporción de *gravillas* es cercana a los 12.9%, La proporción de *arenas* es cercana al 40.1%, La proporciones de *limo* cercana al 36.3%,

La proporción de arcillas cercana al 10.7%. representa la necesidad de equilibrarle mejorando la cohesión, más que desear la disminución de arenas o limos.

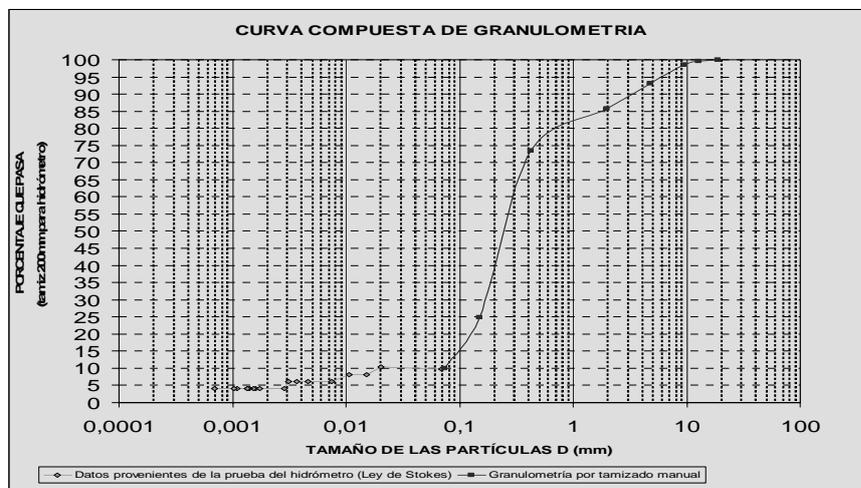


Figura 2. Curva granulométrica. Material para los ensayos

#### 3.1.2 Límites de Atterberg

Estas pruebas permiten definir las características plásticas del material disponible y su reacción ante el contenido de agua.

<b>Límite Líquido (LL)</b>	<b>28,90%</b>	<b>Clasificación del Suelo CL</b>
<b>Límite Plástico (LP)</b>	<b>21,81%</b>	
<b>Índice de Plasticidad (IP)</b>	<b>7,09</b>	

Tabla 1. Límites de Atterberg para El material utilizado en las probetas

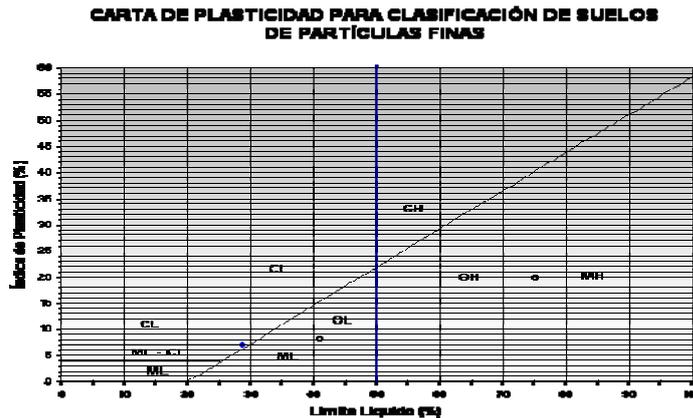


Figura 3. Carta de plasticidad para clasificación de suelos con partículas finas. Fuente: ingeniero Santiago Rivero B. Fundación Tierra Viva.

Según la Figura 3 y la tabla 1 para identificación de características de cohesión y plasticidad, el material está en el rango de las arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres, según el sistema unificado de clasificación de suelos, esto involucra tener que mejorar la cohesión para lo cual se optó por estabilizar el material con 4% en peso de cemento siguiendo la metodología de CRATerre<sup>2</sup>, contenido de agua óptimo – CAO<sup>3</sup>

### 3.1.3 Ensayo proctor modificado

Número del ensayo	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (lb/pie <sup>3</sup> )	Densidad seca máxima (Kg/m <sup>3</sup> )	Evaluación (según CRATerre) <sup>4</sup>
1	13.5	119.5	1914.2	Muy bueno
2	14.0	114.5	1834.1	Muy bueno
3	12.7	116.8	1871.0	Muy bueno
4	13.5	123.0	1970.3	Muy bueno
5	13.5	120.0	1922.2	Muy bueno

Tabla 2. Resultados y evaluación del ensayo Proctor modificado para el material de probetas

Según los gráficos y la tabla 2 que resume la relación entre Humedad y Densidad se observa que el contenido de agua al compactar para el cual *la densidad es máxima es 13.5%*, dato que se toma como de mayor relevancia dado que la densidad es una medida indirecta que en el caso de la tapia pisada depende de el factor humano, de la constancia y la energía.

<sup>2</sup> DOAT P. HAYS A. HOUBEN H. MATUK S. VITOUX F. Construir en tierra. Por CRATerre. 1990. Tomo II. Tomo II. 35 p.

<sup>3</sup>] DOAT P. HAYS A. HOUBEN H. MATUK S. VITOUX F. Construir en tierra. Por CRATerre. 1990. Tomo II. Tomo II. 35 p.

<sup>4</sup> DOAT P. HAYS A. HOUBEN H. MATUK S. VITOUX F. Construir en tierra. Por CRATerre. 1990. Tomo II. 35 p.

### 3.1.4 Estabilización

La estabilización utilizada desde hace mucho tiempo ofrece un amplio campo de aplicaciones en la ingeniería civil y responde a tres objetivos: Reducir los volúmenes de vacíos entre las partículas sólidas (porosidad), rellenar los vacíos que no se pueden suprimir (permeabilidad), unir o mejorar los enlaces existentes entre las partículas (resistencia mecánica, cohesión). Las recomendaciones de dosificación para estabilizante según CRAterre oscilan de acuerdo al tipo de material entre 5 y 10%.

Estos datos deben estar afectados por el criterio y la experiencia en la construcción con tierra. Por un lado estas propuestas surgieron para el medio europeo donde es más fácil o económico invertir en una cantidad determinada en cal, cemento o asfalto u otro estabilizante. Sin embargo las pruebas de resistencia *no indican una ganancia en resistencia y cohesión mas allá de la frontera del 4% de estabilizante*, por otro lado estas proporciones llegan a resultar muy costosas para el contexto latinoamericano.

### 3.2 Construcción de probetas

El objeto de la construcción de las probetas de tapia pisada es servir como superficie de prueba y estandarización para el dispositivo de penetración para la tapia pisada, como base de medición para la densidad de la tapia pisada y para hacer un seguimiento a la compactación en términos de energía de compactación.

Las dimensiones de los muros obedece en su largo y alto (1m \* 1m) a la experiencia<sup>5</sup> en Francia y las dimensiones comúnmente utilizadas en ensayos de muretes de mampostería donde se utiliza esta medida en los ensayos que se realizan a modelos de prueba, se consultaron las normas NTC 4017 para unidades de mampostería y NTC 673 para ensayos de resistencia a compresión de cilindros normales de concreto y dadas las diferencias en los materiales no fue posible hacer una equivalencia con las normas ICONTEC vigentes.



Figura 4. Muro con estabilizante a 15 días de terminado, el acabado de estos es mas liso.

---

<sup>5</sup> Ing. Santiago Rivero. Msc. Arquitectura de Tierra. CRAterre (Francia). 2004

### Probetas para el ensayo de compresión.

Se diseñaron y construyeron las probetas, figuras 5 y 6, con un área de apoyo de  $625 \text{ cm}^2$  ( $b=25 \text{ cm}$ ,  $l=25 \text{ cm}$ ) lo cual facilitó la observación del tipo de falla, el diseño de la platina de carga se hizo considerando los parámetros de la segunda actualización de la norma NTC 673 (5.2.2).



Figura 5. Proceso de carga de la probeta PSE -1 y mecanismo de falla



Fig 6. Probeta fallada

### 3.2.1 Ensayo de densidad

Debido a la relación directa que existe entre densidad como producto de la compactación, un material que por acción mecánica resulta más denso que otro ha sido compactado con mayor energía o con mayor carga. Esta relación se quiere analizar previamente a partir del ensayo Proctor y la densidad medida en los muros a partir del densímetro nuclear como se observa en la figura 7, con el fin de chequear la correspondencia de la hipótesis.



Figura 7. Ensayo de densidad en los muretes de tapia pisada, mediante densímetro nuclear

### 3.2.2 Ensayo de penetración

En las figuras 8 y 9, se observa el ensayo de penetración, se observa una regata de 3cm de profundidad y de 10 \*10 cm con el fin de encontrar el núcleo del muro y no perforar una superficie que se supone ablandada por la deshidratación y la acción del intemperismo.



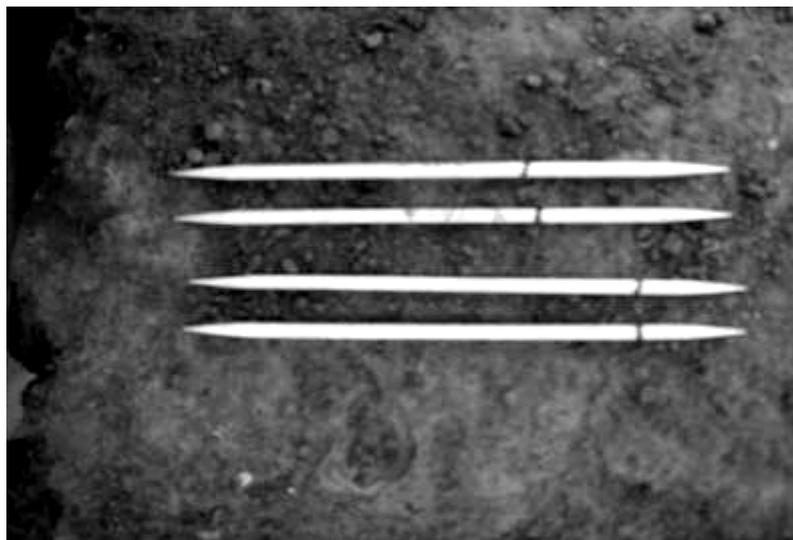
Figuras 8 y 9. Ensayo de penetración con el dispositivo

Las medidas obtenidas con el dispositivo se hicieron a través de un calibrador – o pie de rey - que permitía tener un dato para la medición de la profundidad de la penetración. Adicional a esto se sustentó la medida con la toma de testigos de madera que permitieran hacer una correlación estadística de la lectura de penetración con las variables consideradas. La toma de la penetración se hizo por ambas caras de los muros con cuatro lecturas por superficie.

La superficie de muro que es probada corresponde a un bloque de 2 m \* 1 m, que es la dimensión de una “armada” con un tapial tradicional en ejes que vertical y horizontalmente es el cruce final del primer y segundo tercio del modulo.



Figura 10. Lectura de la penetración y toma de testigos



Figuras 11 y 12. Toma de testigos en una de las superficies de los muros, se resalta la coherencia en las líneas correspondientes a la penetración en las dos regatas superiores y las dos inferiores, lo cual indica que un muro está pisado de la misma manera por capas.

## 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Ensayo de compresión

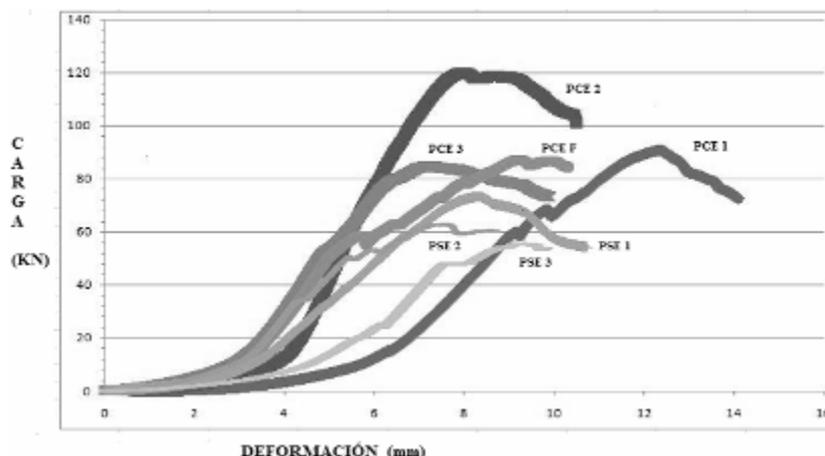


Fig. 13. Curvas carga – deformación, ensayo de compresión

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.				
PROB.	EST.	ESFUERZO MÁXIMO	MODULO ELASTICO	MAXIMA CARGA
		kg/cm2	kg/cm2	KN
PCE-1	Si	144,93	1252,59	90,5013
PCE-2	Si	191,975	1566,25	119,9884
PCE-3	Si	135,42	1809,36	84,6375
(PCE -F)	Si	133,784	1817,3	86,9594
PSE-1	No	110,855	1674,6	73,0344
PSE-2	No	100,58	1905,33	62,8625
PSE-3	No	89,15	1215,12	55,7188

Tabla 3. Resumen de resultados ensayo a compresión

La figura 13 y la tabla 3 representan los resultados del ensayo a compresión, que demuestra la diferencia respecto a la resistencia de los muros estabilizados y por otro lado la deformación de las probetas antes de llegar a la falla final, se destaca la resistencia de la probeta pce-f, que a pesar de haber perdido cerca del 20% del volumen durante una caída en el transporte ha resistido dentro del promedio.

### 4.2 Ensayo de densidad

	Muro 1		Muro 2		Muro 3		Muro 4		Muro 5		Muro 6	
	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
Promedio Densidad superficial	1574	1761	1513	1717	1435	1629	1582	1783	1628	1817	1576	1757
Promedio Densidad A 25 cm	1474	1657	1570	1771	1414	1607	1660	1862	1574	1766	n. a	n. a

Tabla 4. Ensayo de densidad. Resultados del densímetro nuclear

La tabla 4 muestra los resultados del ensayo de densidad utilizando un densímetro nuclear, dentro de los resultados se ve la diferencia entre el resultado tomado superficialmente (S) y a una profundidad (H), en todos los casos la densidad del núcleo es mayor y corresponde con la superficie expuesta a deshidratación, a la variable humana y la diferencia de humedad del material durante el proceso constructivo.

### 4.3 Energía de compactación

ENSAYO DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN			
		Energía de compactación	
		kg-m/m3	N-m/m3
w= Peso del pisón compactador	8 kg		
h= altura de caída libre del pisón	0,60 m		
N= Numero de capas compactadas por molde material sin estabilizar	4	16486,12946	1648,61295
N= Numero de capas compactadas por molde material estabilizado	5	20607,66182	2060,76618
N= Numero de golpes por capa	650 golpes		
V= volumen de suelo compactado	0,757 m3		
$E_c = \frac{W * h * N * n}{V}$			

Tabla 5. Energía de compactación

La tabla 5 representa la energía de compactación. Debido a que la variación en la energía de compactación se considera mínima, no es posible generar una gráfica coherente en las gráficas de cruce de densidad, compresión, penetración la energía de compactación se considera constante.

### 4.4 Ensayo de penetración

El ensayo de penetración se realizó haciendo 4 perforaciones a cada módulo de 1 m \* 1m en el cruce de los ejes horizontal y vertical a 1/3 y 2/3 del ancho y el alto del muro por ambas caras, el resultado de estas perforaciones se ha promediado, tal como lo muestra la tabla 7.

Muro 1. Estabilizado	2.2 cm
Muro 3. Estabilizado	2.32cm
Muro 4. Sin estabilizar	2.45cm
Muro 5. Sin estabilizar	2.60cm
Muro 6. Sin estabilizar	2.79cm

Tabla 6. Resultados ensayo de penetración

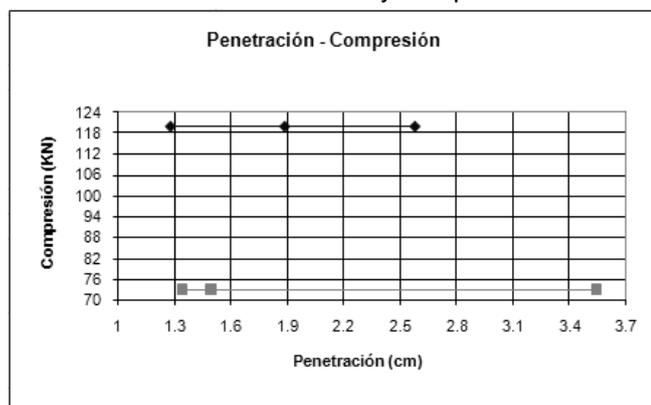


Fig. 14. Gráfica penetración Vs Resistencia a compresión.

#### 4.4.1 Gráfico de penetración vs. densidad

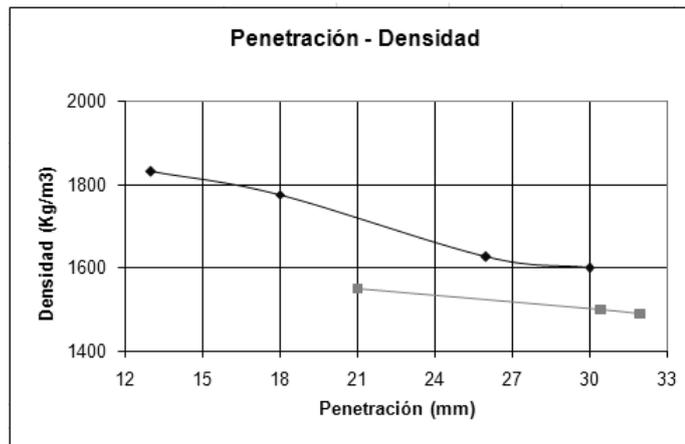


Fig. 15. Rango de trabajo de la tapia pisada, de la resistencia a compresión en función de la penetración medida con el dispositivo.

#### 4.4.2 Gráficos de resistencia a compresión vs. densidad

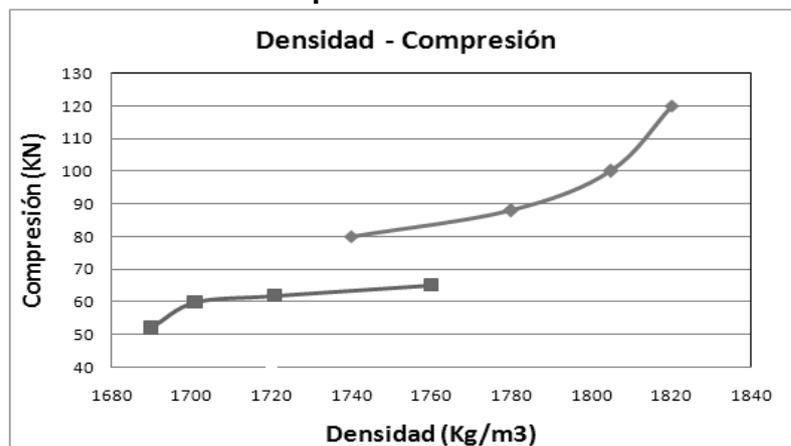


Fig. 16. Rango de trabajo de la tapia pisada, densidad en función de la penetración medida con el dispositivo

En las figuras 14, 15 y 16, se muestra la síntesis de los resultados de los ensayos de penetración y la relación con las dos variables fundamentales en muros de tapia pisada, por un lado, la densidad que es proporcional con la resistencia a compresión e inversamente proporcional con la penetración y la resistencia a compresión que guarda la misma relación, además de demostrar la hipótesis se plantean con datos específicos los rangos de medición de las dos variables relacionadas con el ensayo no destructivo del dispositivo de penetración. En las gráficas la curva inferior representa los datos debajo de los cuales el dato de entrada presenta problemas estructurales, el rango central representa un bloque de trabajo sobre el cual, considerando el tipo de material mostrado se presenta un comportamiento aceptable a bueno. Datos sobre la curva superior presentan comportamientos excelentes. Se considera que para mezclas estabilizadas, para obras contemporáneas, las características de granulometría, límites de Atterberg y compactación Proctor deben ser estudiados y el ensayo con el dispositivo complementa el estudio y seguimiento estructural. En obras patrimoniales la lectura de entrada de penetración arroja un dato muy aproximado para el análisis y modelamiento estructural.

El dispositivo tiene un método de resultados paramétrico, es decir que la evaluación se debate entre los rangos de los resultados, las variables como la energía de compactación que no hayan sido constantes durante la ejecución serán detectadas durante el ensayo de penetración:

Dato de penetración (mm)	Forma de impacto del puntillón	Evaluación cualitativa
10 a 25	1. El puntillón entra en el muro forzado y presenta dificultad el retiro del puntillón dentro del muro.	1. Si el puntillón sale luego del impacto fácilmente, indica BUENA COMPACTACIÓN.
	Queda material adherido al puntillón.	2. Podría estar bien compactado de acuerdo a la huella, pero de acuerdo a la cantidad de material adherido podría haber existido durante la construcción un exceso de humedad al pisar el muro (para muros pisados entre 1 semana y 1 mes).
	3. Se descascara el material luego del impacto, alrededor de la perforación. 4. Variación en las medidas para un modulo de tapia de 2m*1m de acuerdo a la longitud de penetración.	3. Una perforación poco profunda y un pequeño descascaramiento, con rastro seco en la superficie descascada es índice de que el muro fue MUY BIEN PISADO, es muy denso. 4. Baja variación en los resultados de penetración, para un mismo módulo de tapia. Rango entre 5 mm y 10 mm. Muy bien pisado. Variación entre 10 mm y 35 mm es necesario hacer más pruebas (mas de cuatro por módulo). El resultado es regular. Variación de más de 35 mm es necesario hacer más pruebas y evaluar de acuerdo al resultado de las pruebas 1, 2 y 3. El resultado debe ser corroborado inspeccionando acabados y plomada de presentar inconvenientes, es mas repetir el módulo.
25 a 50	1. El puntillón entra en el muro forzado y presenta dificultad el retiro del puntillón dentro del muro.	1. Es necesario evaluar el muro, pero en general el dato de penetración es desalentador. Se deben hacer mas ensayos en la zona de transición de la capas del módulo, de acuerdo a la variación, decidir si el muro presenta baja densidad y resistencia.
	Queda material adherido al puntillón.	2. El muro podría estar muy húmedo o muy reciente. La prueba debe repetirse luego de mayor tiempo de deshidratación.
	3. Se descascara el material luego del impacto, alrededor de la perforación.	3. El muro luego de haberse deshidratado y estando ya seco tiene baja densidad. Revisar el material al hacer la regata para la prueba, lo cual podría indicar baja cohesión. Material orgánico o lavado de finos, limo arenoso, evaluar fisuras estructurales y por deshidratación progresiva.
	4. Variación en las medidas para un modulo de tapia de 2m*1m de acuerdo a la longitud de penetración.	4. Si las variaciones en un módulo de 2*1 m en promedio son mayores a 30 mm, el muro presenta grave estado estructural.
Mas de 50	En general es una medida no deseada, salvo que el muro lleve menos de 3 días de pisado, evaluar evolución. Si no es mejor repetir.	No es un índice de buen estado estructural del módulo.

Tabla 7. Evaluación de los muros de acuerdo a la relación entre penetración, densidad y resistencia compresión

La tabla 7 de análisis se propone, para evaluar módulos de tapia pisada cuyas dimensiones sean similares a 2 \* 1m (largo \* ancho) como las que se encuentran en el tapial usado tradicionalmente, el análisis debe hacerse para el módulo identificado y para cada módulo por separado, debido a las particularidades de el trabajo de pisado de cada modulo de tapia; la idea es llegar a un índice lo más regular posible por muro a través de la identificación y ensayo de los módulos, en general el cuadro resume la evaluación fragmentada de acuerdo a las curvas y a la observación del ensayo mismo en muros de tapia pisada, que correspondan con la media del método constructivo tradicional y con las hipótesis sobre las que se basaron las pruebas realizadas.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 5.1** Se relacionaron variables que son de uso común como la resistencia a compresión, densidad, energía de compactación (que fue constante) con una variable inédita en la medida que es el uso de la penetración como acercamiento al montaje de ensayos no destructivos para la construcción con tierra.
- 5.2** El principio con el que funciona el dispositivo es *sencillo* en la medida que está basado en un sistema mecánico de fácil uso, esto lo hace práctico al no requerir una fuente de energía externa al brazo humano y es de fácil apropiación, Dándole paso al criterio ingenieril en la interpretación de los datos con que está relacionado el principio del dispositivo. Es *leve* en la medida que es transportable fácil de mantener, mejorar o reparar. Es *elemental* ya que el principio físico se basa en un resorte de compresión confinado que facilitando unas garantías de perpendicularidad, ofrece un dato fácil de tomar centrado en la interpretación cuantitativa y cualitativa en la relación con datos teóricos y de laboratorio para el análisis y modelamiento estructural. La forma como se comprime el resorte lo hace seguro y ergonómico para la toma de datos en cualquier proyecto. Es *simple* la inspiración y la reinterpretación del conocimiento, valorándolo y poniéndolo al servicio de proyectos más seguros.

## 6. PERSPECTIVA

Son necesarios mayor número de ensayos sobre muros con parámetros definidos para mejorar el rango de interpretación de las curvas. Existen otras variables a analizar que se encuentran en otro nivel que en detalle no alteran la lectura de la penetración pero que tienen influencia como la granulometría y el coeficiente de fricción entre el puntillón y el muro.

## 7. REFERENCIAS

- Houben, Hugo. GUILLAUD, Hubert. Earth construction technologies appropriate to developing countries. Edición previa. Bruselas. 1984. 1215p.
- Doat, P. Hays, A. Houben, H. Matuk, S. Vitoux, F. Construir con tierra. Bogotá: Fondo Rotatorio Editorial. Traducción: ANGEL O., Clara. SANCHEZ, Clara E. 1990. Tomos I y II. 209 y 248 p.
- Corporación La Candelaria. Cartilla para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Primera edición. Santafé de Bogotá: ed. Tangrama. 2003. 60 p.
- RIVERO B, Santiago. PRADA D. William A. Comportamiento estructural de muros en tierra apisonada reforzados verticalmente con cañas sometidos a cargas horizontales. Bucaramanga, 1999. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander.
- CUSPOCA R. Fabián A. GALINDO M. Ricardo J. Generalidades del adobe. Tunja, 2002. 247 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- RODRIGUEZ S, Angel E. FONSECA L, Luís R. Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación en edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria. 2003. Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería Civil, sísmica y estructuras). Universidad de los Andes.

**Santiago Rivero Bolaños:** Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander - Bucaramanga. Msc. Arquitectura de Tierra. CRATerre – EAG. Trabajó por cuatro años con Fundación Tierra Viva como Director del Centro de la Tierra y responsable del Grupo de Materiales, Sistemas constructivos y estructuras. Desde el 2008 conforma la firma Terrarium Creative la cual dirige y desde la cual se brinda asesoría a arquitectos y equipos de diseño en todo lo referido a la parte técnica de la arquitectura de tierra. En el 2009, en asocio con otros profesionales crea Tierra a la Vista, planta de producción de materiales a base de tierra cruda. Dirigió el desarrollo del proyecto de investigación para el *Diseño y construcción de un dispositivo de penetración para tapia pisada*.

**Oscar Humberto Medina Acero:** Ingeniero Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Tunja. Trabajó por dos años con Fundación Tierra Viva, grupo de materiales, sistemas y estructuras del Centro de la Tierra. Diseño de material tierra, capacitación y formación de comunidades en construcción de tierra. Ingeniero responsable en campo del proyecto Casa Viva: construcción de 104 viviendas en BTC con aporte de la comunidad. Actualmente trabaja en la firma Terrarium Creative y es jefe de planta de Tierra a la Vista. Planta de materiales. Desarrolló el proyecto de investigación para el *Diseño y construcción de un dispositivo de penetración para tapia pisada*.