

Comportamiento físico mecánico de la tapia por pandeo y conexión de esquina. Caso Teatro Imperial de Pasto

Mechanical behavior of Tapia and Corner connections. Case Imperial Theater of Pasto

DOI: <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.08>

Artículo de investigación. Fecha de recepción: 3/06/2018. Fecha de aceptación: 5/12/2018

William A. Castillo Valencia 
Universidad de Nariño. Pasto (Colombia)
wcastillo2007@gmail.com

Gilberto Areiza Palma 
Universidad del Valle. Cali (Colombia)
gilberto.areiza@correounivalle.edu.co

Hugo Coral Moncayo 
Universidad del Valle. Cali (Colombia)
ingesuelos1@gmail.com

Para citar este artículo

W. Castillo Valencia, G. Areiza Palma y H. Coral Moncayo, "Comportamiento físico mecánico de la tapia por pandeo y conexión de esquina. Caso Teatro Imperial de Pasto," *INGE CUC*, vol. 14, no. 2, pp. 81-96, 2018. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.08>

Resumen

Introducción– La tapia, es un muro ancestral fabricado artesanalmente en tierra apisonada, con la que se construyeron edificaciones patrimoniales en la ciudad de Pasto, (zona de amenaza sísmica alta), entre ellas el teatro Imperial el cual es considerado como un patrimonio invaluable (1922) conocido como el "Decano de los Teatros del Sur" [1] declarado como de uno de los bienes inmuebles de interés cultural de la nación y protegido por las leyes que regula el Ministerio de Cultura.

Metodología– La investigación se desarrolla a partir de evaluación patológica causada por antecedentes sísmicos en el comportamiento estructural por pandeo y conexión de esquina de las edificaciones en tierra, para ello se evalúa el comportamiento físico mecánico de la tapia a partir de procesos convencionales como el módulo de rotura, evaluación de resistencia admisible a la compresión de la tapia, como una respuesta al pandeo y la valoración dinámica para caracterizar la razón de amortiguamiento y frecuencia de resonancia con base en la evaluación de vibraciones libres. Como metodología la investigación propone un nuevo ensayo a partir de una probeta que permita establecer los esfuerzos que se desarrollan en la conexión de esquina y el refuerzo que contrarreste dicha vulnerabilidad.

Resultados– El muro en tapia se caracteriza como un sólido deformable altamente frágil, sujeto a pandeo y fisuramiento, valorado como un medio continuo, con base en el cálculo de elasticidad (72 Mpa), esfuerzo cortante (28 Mpa), relación de deformación vertical y horizontal (0,33) y resistencia a la compresión (0,59 Mpa), caracterizado como un suelo consolidado de consistencia media dura, con un módulo de rotura (0,14Mpa).

Conclusiones– El desprendimiento de las esquinas de los muros en tapia se presenta por la alta concentración de esfuerzos, los cuales se resuelven mediante la instalación de conectores o clavos. El ensayo de vibraciones libres permite obtener los modos de vibración longitudinal, transversal y torsional para determinar la capacidad de amortiguamiento de la acción dinámica causada por un sismo. El módulo de rotura permite interpretar la capacidad de respuesta frente a la flexión y pandeo que se causa en un muro en tapia.

Palabras clave– Patología estructural, amenaza sísmica, patrimonio histórico, rehabilitación de edificaciones, caracterización físico mecánica de materiales.

Abstract

Introduction– The Tapia, is an ancestral wall material made by hand in packed earth, which heritage buildings were built with in Pasto City, (area of high seismic threat) including the Imperial Theater (1922), known as the "Dean of the Southern Theaters" [1] declared it as one of the real estate of cultural interest of the nation, protected by the Ministry of culture's laws.

Methodology– The investigation is developed from pathological evaluation caused by seismic antecedents in the structural behavior by buckling and corner connection of buildings on land, for this the physical mechanical behavior of the wall is evaluated from conventional processes such as the breaking module, evaluation of admissible resistance to the compression of the wall, as a response to buckling and dynamic assessment to characterize the damping ratio and resonance frequency based on the evaluation of free vibrations. As a methodology, the research proposes a new test from a piece that allows establishing the efforts that are developed in the corner connection and the reinforcement that counteracts this vulnerability.

Results– The Tapia wall is characterized as a deformable solid highly fragile, subject to buckling and cracking which was assessed as a continuous medium based on the calculation of elasticity (72 Mpa), shear (28Mpa), ratio of vertical and horizontal deformation (0.33) and compressive strength (0.59 Mpa) characterized as a consolidated soil of medium hard consistency, with a modulus of rupture (0.14Mpa).

Conclusions– It is possible to improve the behavior of buildings on land subjected to bending stress, applying a reinforced cloth with cement floor and reinforcing mesh. The detachment of the corners of the walls is presented by the high concentration of efforts, which are resolved by the installation of connectors or nails. The free vibration test allows to obtain the longitudinal, transversal and torsional vibration modes to determine the damping capacity of the dynamic action caused by an earthquake. The breaking module allows to interpret the capacity of response in front of the bending and buckling that is caused in a wall in the wall.

Keywords– Structural pathology, seismic threat, historical heritage, rehabilitation of buildings, physical-mechanical characterization of materials.

I. INTRODUCCIÓN

En San Juan de Pasto, Nariño - Colombia, la construcción ha incursionado por diferentes etapas y tecnologías a la vanguardia de la época; así se levantó edificaciones de relevancia histórica en tapia pisada, madera y adobe, consideradas como una de las más tradicionales y declaradas como bien de interés cultural de la Nación, propio del año 1667 [2], es así como Valladares plantea que [3]: “La arquitectura religiosa en San Juan de Pasto es bastante particular, si bien la ciudad y su centro histórico están caracterizados por los magníficos templos y catedrales, no se habían consolidado procesos de caracterización y valoración de sus patrimonios culturales”.

Para la evaluación crítica de este sistema constructivo, dado el valor y estado de conservación, se aprecia de manera clara el proceso de construcción y los materiales usados en la época como una mezcla de suelos finos granulares, cohesivos, clara de huevo, sangre de res, estiércol de vaca, caballo, leche con el propósito de lograr resistencia, durabilidad, manejabilidad, absorción de esfuerzos, retracción, fraguado, manejabilidad e impermeabilidad (Fig. 1).

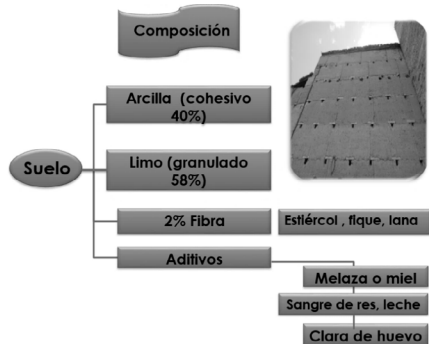


Fig. 1. La tapia y su composición.
Fuente: Autores

Según [4] “se estima que entre un 40% y un 80% de la construcción en el mundo está hecha a base de tierra cruda”, dentro las cuales se han destacado en Pasto el Museo de Taminango (1632), Conjunto La Milagrosa (1886), Teatro Imperial (1922) [5] y Templo de San Juan (1669) [2], construidas en tierra, mampostería con argamasa de cal o calicanto. Algunas edificaciones con valor histórico han sido demolidas por acción antrópica, abandono premeditado de los propietarios, falta de normatividad de tipo estructural, ausencia de investigación, abandono y acción de tipo dinámica como el sismo de 1906 de los más catastróficos en Nariño [6]. Incrementado el grado de vulnerabilidad para que la inclemencia del clima, el tiempo, efectos naturales, las derribe amenazando la integridad humana y desapareciendo bienes con historia y memoria.

El Ministerio de Cultura de Colombia, regula la valoración y protección histórica de los bienes inmuebles los cuales son amparados por ley 1185 [7]; sin embargo, la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente Colombiana; NSR-10, no contempla en su articulado medidas de evaluación de vulnerabilidad e intervención para la consolidación de estructuras en tierra, por falta de investigación, tal como plantean Angulo et al. [8]: “dada la aparente simplicidad que guarda esta tecnología constructiva, se hace necesario en virtud de ofrecer soluciones de intervención más apropiadas para los bienes inmuebles de interés cultural que poseen este tipo de material”.

Para salvaguardar el patrimonio en Pasto, se desarrolló la evaluación estática y dinámica de los materiales al determinar el comportamiento de las edificaciones históricas en tierra por pandeo y conexión de esquina frente a la acción sísmica, valorados a partir de ensayos básicos y avanzados, junto con la aplicación de los modelos matemáticos y propuestas numéricas, como autoría de esta investigación y a partir de este estudio, brindar respuestas ante la amenaza sísmica mediante alternativas de consolidación estructural.

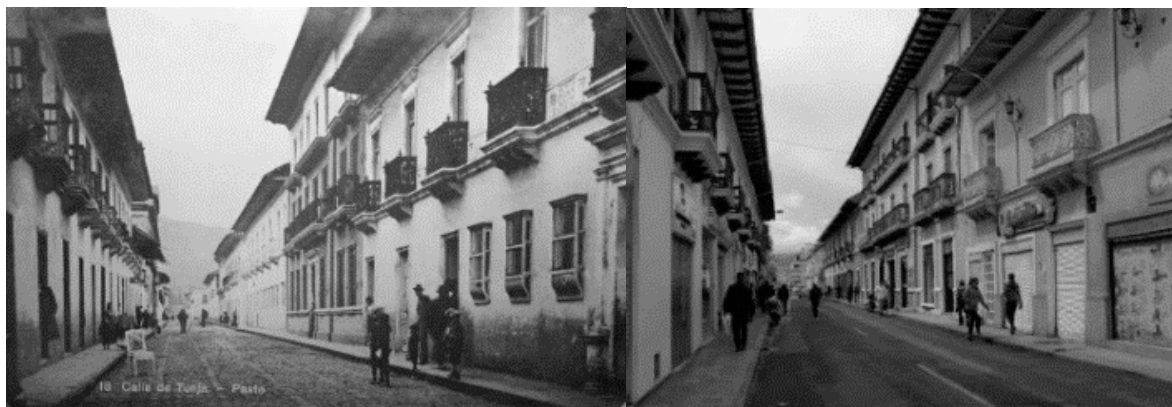


Fig. 2. Pasto a través de la Figura Anónima. Calle 19 (Pasto-Nariño, 2016).
Fuente: Autores.



Fig. 3. Maqueta virtual de la fachada del Teatro Imperial de Pasto.
Fuente: Autores.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

La Norma Colombiana; NSR-10, no reglamenta la evaluación de vulnerabilidad e intervención para la consolidación de estructuras en tierra, a diferencia de otros países como Perú, los cuales regulan las edificaciones en tierra desde el punto de vista sísmico.

El sistema existente, en tierra apisonada, madera y mampostería (adobe), en relación al grado de vulnerabilidad sísmica, es propenso al biodeterioro a la fatiga, el creep y presenta una baja y limitada capacidad de absorción de esfuerzos, debido a la acción de tensión, cortante, torsión, compresión, flexo torsión y flexo compresión, con un grado de respuesta muy restringido frente a las diferentes sollicitaciones de carga; además, no existe investigaciones que ofrezcan un análisis físico mecánico de los materiales en la región.

La Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente Colombiana, NSR-98; fue la primera que dedicó un artículo a las edificaciones patrimoniales la cual reglamentó “A.10.1.3.5 - Edificaciones declaradas como patrimonio histórico – donde existan restricciones severas para lograr un nivel de seguridad equivalente al que el reglamento exigiría a una edificación nueva” [9]. Esto pudo implicar demolición de algunos inmuebles patrimoniales; sin embargo, el Ministerio de Cultura prohibió su ejecución con base en los lineamientos legales de protección patrimonial. Por lo anterior, se observa una contraposición entre los entes jurídicos que regulan en el país.

La Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente Colombiana, NSR-10 [10], contempla estudios de vulnerabilidad estructural para analizar edificaciones existentes enfocadas exclusivamente al concreto, acero, mampostería, desligándose de los sistemas tradicionales de edificaciones en tierra como en tapia por falta de investigación [11].

Por su parte, Viñuelas argumenta que [12]: “Lo más común es que cuando una estructura de tierra se deteriora, los arquitectos acostumbrados a hierros, hormigones, cales y cementos decidan que la solución está en incorporar este tipo de materiales para darle solidez”. Esta solución tiende a ser equivocada por falta de conocimiento, ya que la tierra no es compatible con el concreto. Aunque la tapia no ofrezca los niveles máximos exigidos, la norma NSR10 no contempla una consolidación estructural para mejorar la respuesta sísmica, pero si permite que la edificación que se proyecta conservar tenga un nivel menor de seguridad sísmica, respaldado por un memorial entre el ingeniero diseñador y el propietario. Por lo anterior, ante la ausencia de normatización se acude a las recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio [13].

Una de las principales enseñanzas estructurales con relación al patrimonio, correspondió al sismo de Popayán que devastó el Centro Histórico, en el año de 1983 (marzo 31), con una magnitud de 5.5 en escala de Richter. Este sismo, hizo que fallaran (colapsaran) varias edificaciones con los muros tapiales por desprendimiento de esquina, pandeo lateral, [14]: “como un fenómeno de inestabilidad que puede darse en elementos comprimidos esbeltos”, unido a la falta de arriostramiento o apoyos laterales y fisuramiento.

A partir de los planteamientos anteriormente formulados el Objetivo General del presente estudio consiste en *determinar mediante una formulación matemática la vulnerabilidad sísmica y consolidación por pandeo y conexión de esquina de las edificaciones en tapia, declaradas como bien de interés cultural de Colombia, con el Estudio de Caso del Teatro Imperial.*

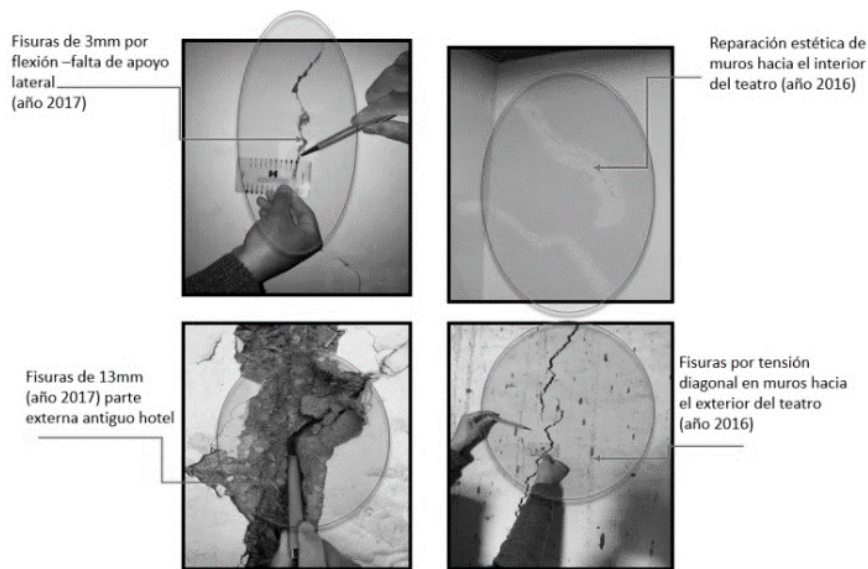


Fig. 4. Grietas en la parte interna y externa del Teatro – maquillaje interno de grietas.
Fuente: Autores.

III. METODOLOGÍA

La aproximación metodológica de la investigación corresponde a un Estudio de Caso, orientado a evaluar la patología del Teatro Imperial, con sus antecedentes sísmicos. A su vez, se determina el grado de vulnerabilidad y comportamiento estructural por pandeo y conexión de esquina de las edificaciones en tierra, tal como corresponde al caso del presente estudio, es entendido [15]: “como un fenómeno de inestabilidad que puede darse en elementos comprimidos esbeltos”.

Se caracteriza y obtiene los parámetros estáticos y dinámicos de la tapia, a partir de los ensayos convencionales y de vibración libre tomando como caso de estudio el Teatro Imperial.

Se evalúa la falla al pandeo de la tapia a partir del módulo de rotura, adaptando los métodos convencionales y formulando modelos numéricos para conocer la distancia límite a flexión de la tapia con base en la aceleración espectral, peso específico, geometría y masa.

Como propuesta de esta investigación, se plantea un nuevo ensayo de laboratorio, para estimar el comportamiento por desprendimiento de las esquinas como una patología de los muros en tapia.

Se propone un modelo matemático para resolver las conexiones de esquina en la tapia, mediante la instalación de clavos o barretas como mecanismo de refuerzo [16]: “... Proceso mediante el cual, se emplean elementos portantes de sistemas constructivos nuevos, pero compatibles con los sistemas tradicionales”, tomando como estudio de caso, el análisis derivado de los antecedentes sísmicos del Teatro Imperial.

A. Patología del Teatro Imperial. Pandeo por flexión y desprendimiento de esquina

El Teatro Imperial fundado por Rafael Villota en 1922 [17], a la fecha, presenta serias patologías que involucran la estabilidad de la estructura por causa de la demolición colindante; esto hizo que el teatro pierda el confinamiento lateral; por esta razón, el sistema estructural presenta pandeo lateral, y deflexión de la tapia colindante generando un alto grado de vulnerabilidad sísmica [4]: “Las fisuras pueden provocarse por asentamiento del suelo, humedad, estructuras deficientes, sobrecargas o algún movimiento dispar de los elementos que componen la edificación”.

La universidad de Nariño, en cabeza de William Castillo, uno de los autores de esta investigación, realizó un seguimiento del estado de fisuramiento con estudiantes de ingeniería y arquitectura entre el período 2008 hasta 2017. Con evidencia de fisuras por flexión, tensiones diagonales originando esfuerzos cortantes con orientación cruzada.

En la intersección de las esquinas de los muros longitudinales con los transversales se presentan fisuras (entre 1 y 3mm) por desprendimiento y falta de “trabe” entre “los muros tapiados”; esto, las hace altamente vulnerables ante los efectos sísmicos, con probabilidad de presentar un colapso característico de este tipo de edificaciones [12]: “Cuando hayan producido agrietamientos en el alma o encuentros esquineros, las intervenciones tomaran un cariz más dificultoso”.

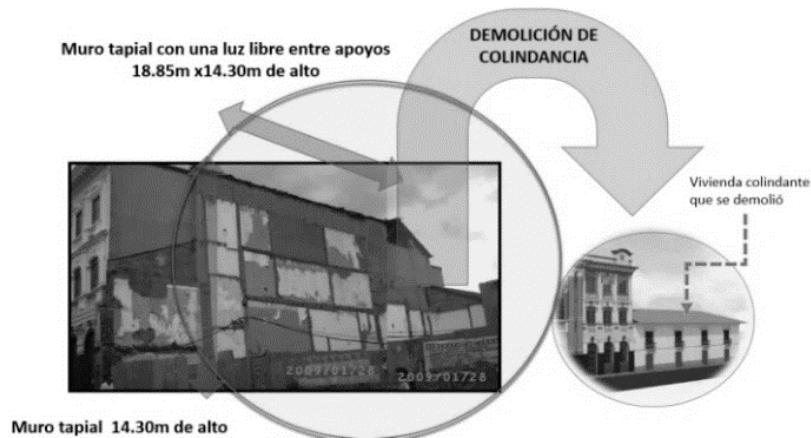


Fig. 5. Pérdida de confinamiento lateral del Teatro Imperial por causa de las demoliciones vecinas. Fuente: Autores.

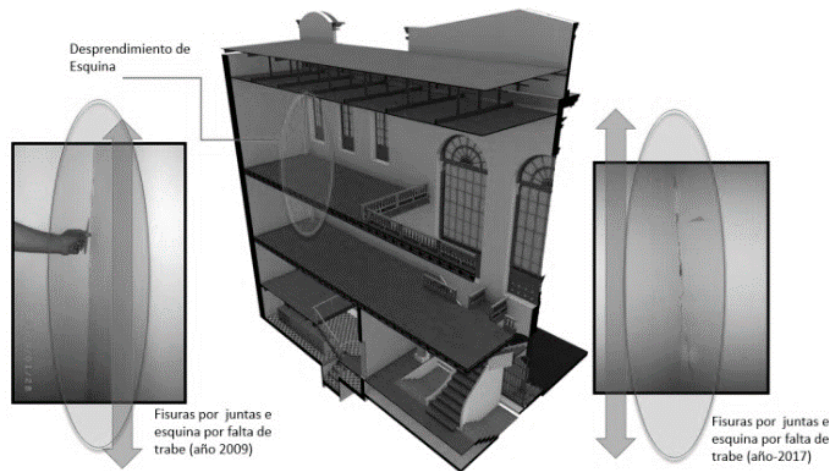


Fig. 6. Desprendimiento de esquina – fisuras verticales de junta de 1 a 3 mm, Fuente: Autores.

B. Propiedades estáticas y dinámicas de la tapia

Para efecto de llevar a cabo la evaluación estática y dinámica de la tapia, se somete a ensayos estandarizados que se ajustan a esta tipología de construcción o en su defecto se adaptan las normas convencionales para ensayo de suelos y rocas. Las probetas de la tapia obtenidas “in situ”, se sometieron a ensayos estáticos, tales como, compresión inconfiada, corte directo, relación de *Poisson*; así mismo, con ensayos dinámicos con distintas excitaciones como vibraciones libres.

1) Clasificación de suelos como material integral de la tapia

Siguiendo el lineamiento de la norma INVIAS correspondientes a la clasificación de suelos, se de-

termina la granulometría por tamizado e hidrómetro, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Según la clasificación basada en la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials); se obtuvo un suelo de características limosas con una clasificación general de tipo A-4, de acuerdo a la clasificación basada en el S.U.C.S. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos); se determinó un suelo de partículas finas, con símbolo de grupo ML, dando como resultado un limo de baja plasticidad arenoso. A partir de los límites de Atterberg se obtiene el grado de consistencia de cada espécimen analizado, caracterizado con una consistencia media dura, sólida.

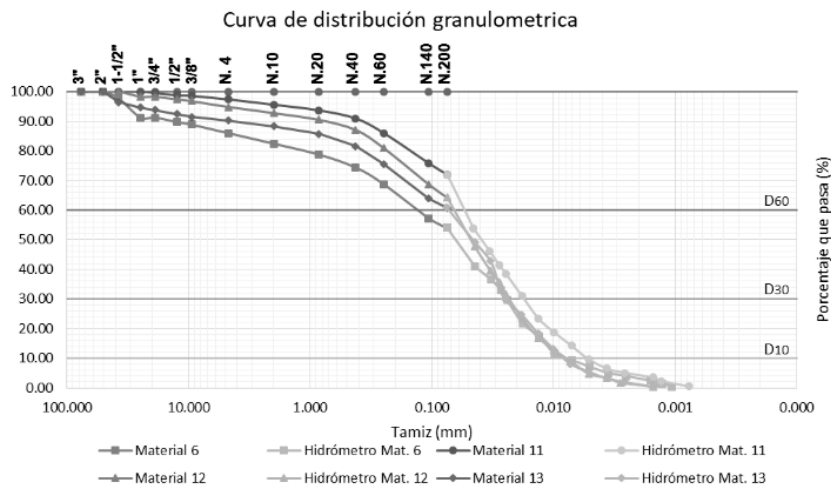


Fig. 7. Curva de distribución granulométrica
Fuente: Autores,

TABLA 1. LÍMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO

Límites de consistencia						
Material	Límite líquido, LL (%)	Límite plástico, LP (%)	Índice de plasticidad, IP (%)	Contenido de humedad, Wn (%)	Grado de consistencia Kw	Grado de consistencia
Promedio	33.75	27.64	6.11	3.79	4.96	Media Dura, solida

Fuente: Autores.

TABLA 2. DATOS DEL ANÁLISIS DE PROBETAS.

Resistencia Máxima a Compresión, Modulo de Young, Relación de Poisson, Módulo de esfuerzo cortante de la tapia caso Teatro Imperial				
Probeta	Resistencia (t/m ²)	E (Mpa)	μ	G (Mpa)
Promedio	59	72.5	0.33	27.7

Fuente: Autores.

2) Propiedades estáticas

Mediante este ensayo estático se obtiene compresión inconfiada [8]: “Es la resultante de las presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección”. se determina el módulo elástico tangente y relación de Poisson estático y módulo de esfuerzo cortante de la tapia.

3) Propiedades dinámicas de la tapia

Para [18]: “La dinámica de suelos, es un área que tiene una relevancia importante en la ingeniería civil,

debido al riesgo que conlleva realizar construcciones en regiones vulnerables a fenómenos sísmicos”. Aún, si una edificación construida con un sistema en suelo consolidado, es determinante relacionar los modelos dinámicos con el análisis no lineal del diseño estructural.

Cuando una estructura de suelo, se ve afecta por cargas cíclicas o sollicitaciones dinámicas, se presentan diferentes comportamientos en el suelo, tales como, pérdida de su resistencia o capacidad portante, cambios de volumen (pérdida de densidad), inestabilidad o en la amplificación dinámica debido a la resonancia entre el estrato de suelo y la fuente de excitación [21].

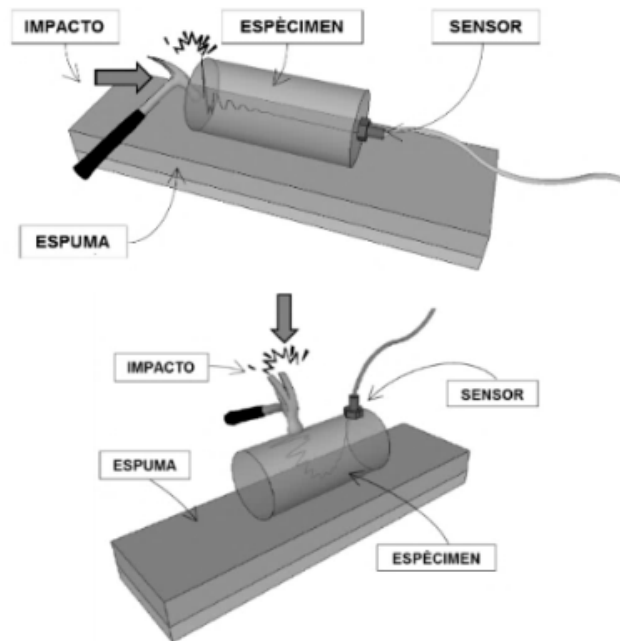


Fig. 8. Gráfica del ensayo para modo de vibración longitudinal y transversal.
Fuente: Autores.



Fig. 9 Sistema para medición de vibraciones libres de un espécimen de la muestra, tapia.
Fuente: Autores.

C. Vibraciones libres: razón de amortiguamiento y resonancia de frecuencia fundamental

En referencia con las vibraciones libres, Brazan, Gonzales y Ortíz plantean que:

Los problemas que estudia y analiza la dinámica de suelos son más complejos que los que estudia la mecánica de suelos clásica, esto se debe

al comportamiento no lineal y no uniforme que presenta el suelo bajo cargas de tipo dinámico que varían en función del tiempo. Dichas cargas dinámicas generan una respuesta de igual modo variable con el tiempo en el suelo, algo que no ocurre con las cargas estáticas, estudiadas en la mecánica de suelos clásica [20].

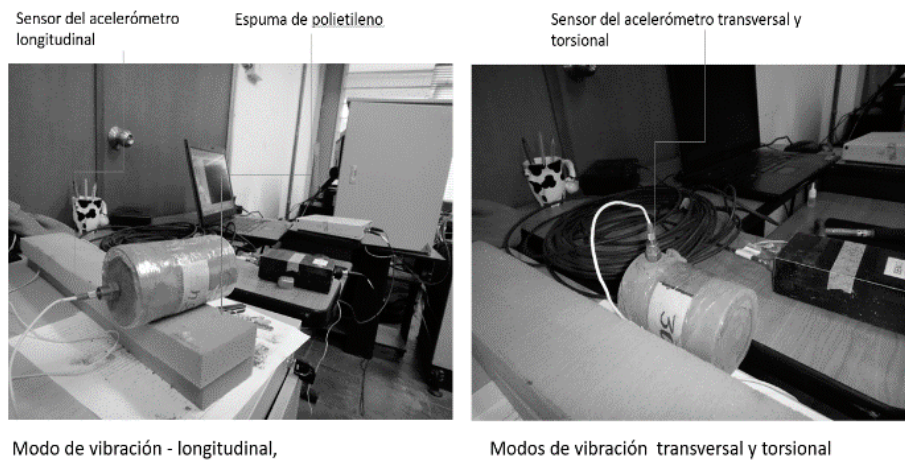


Fig. 10. Sistema para medición de vibraciones libres longitudinal y transversal. Fuente Autores.

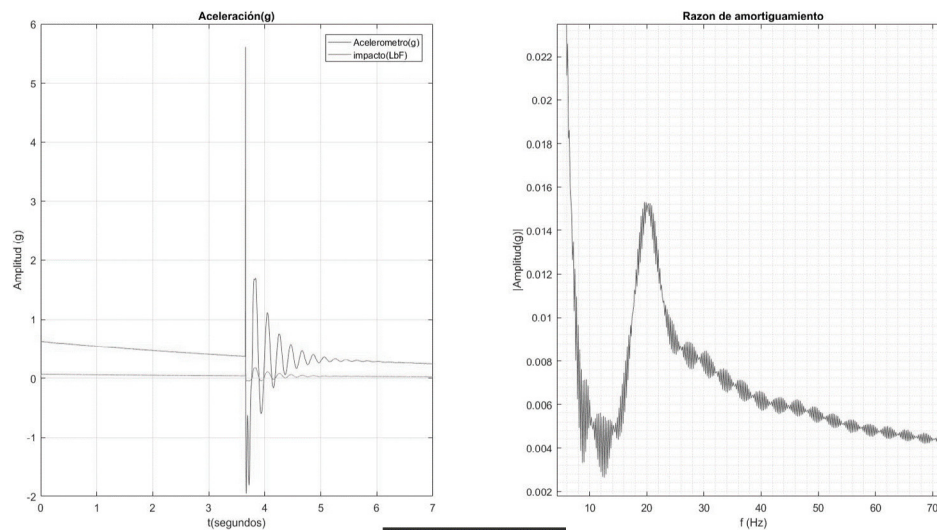


Fig. 11. Expresión gráfica de los procesos numéricos; MATLAB: Transformada Rápida de Fourier para probetas con medición de la razón de amortiguamiento longitudinal, Fuente: Autores.

El amortiguamiento, es una propiedad que permite interpretar la capacidad de disipación de energía de un espécimen; por lo tanto, la razón de amortiguamiento de un suelo, en este caso de la tapia (ϵ), es una variable significativa para descifrar la respuesta del sistema como un material, sometido a cargas dinámicas causadas por un sismo. Cada material presenta una frecuencia fundamental de respuesta para los tres modos de vibración (longitudinal, transversal y torsional), la cual se registra por un proceso de impacto que genera señales de ondas cuantificadas mediante un acelerómetro adherido a la probeta. Conocida la razón de amortiguamiento (ϵ), con base en la frecuencia y amplitud de onda se puede obtener el módulo de elasticidad dinámico (E), módulo dinámico de rigidez (G) y relación dinámica de Poisson (μ).

El ensayo de vibraciones libres permite valorar las vibraciones longitudinales, transversales y torsionales (ver Fig. 9). Para determinar la frecuencia fundamental de vibración, se realiza un proceso de señales digitales a partir del registro de ondas, las cuales se consiguen mediante un acelerómetro en función de la posición del punto de impacto.

1) Cálculos y resultados

Los datos derivados de los registros de aceleración (g) en función del tiempo (s) a partir del impacto, se procesan a través del software de procesos numéricos; MATLAB, con base en la aplicación de la función Transformada Rápida de Fourier, para obtener en el dominio de frecuencia la expresión gráfica frecuencia vs amplitud y así, la frecuencia fundamental de

TABLA 3. EVALUACIÓN DE VIBRACIONES LIBRES DE LA TAPIA.

Probeta	Amortiguamiento longitudinal	Módulo de elasticidad dinámico	μ	G	Amortiguamiento	Módulo de elasticidad dinámico	G
				Longitudinal	Transversal		Transversal
		Longitudinal Ed (Mpa)				Transversal Ed (Mpa)	
				Mpa			Mpa
Promedio	7.78	340.2	0.38	123.0	3.32	40.4	12.0

Fuente: Autores.



Fig. 12. Grafica de del ensayo para obtener el módulo de rotura con probeta de tapia simple.
Fuente: Autores.

vibración, además de la razón de amortiguamiento. El proceso fue apropiado para el ensayo longitudinal y transversal, en cambio para modo de vibración torsional, se lo descartó porque las mediciones se desbordan de la lógica de los datos (45 datos dispersos) la dificultad de aplicar el impacto de manera tangencial hace que se desfase uno a otro; aún así, otras investigaciones, del grupo G7 de la Escuela de Ingeniería y Geomática lo definieron como [19]: “la maleabilidad del material de la muestra no permitió que se percibieran los modos torsionales y transversales, ya que en el ensayo se obtuvieron valores de frecuencia muy similares entre los tres modos, finalmente se decidió obviar esos registros y tomar únicamente los resultados del modo longitudinal”.

2) Comportamiento por pandeo horizontal de la tapia

El comportamiento de la tapia sometida a flexión causado por la acción dinámica que produce un

sismo, ha generado incertidumbre por la rigidez del material y la fragilidad del mismo; como respuesta se realiza la evaluación del pandeo horizontal de la tapia, como principio físico que se produce por la acción simultánea de esfuerzos de tensión y compresión en las fibras opuestas de un elemento estructural conocido como flexión y así determinar la distancia entre muros perpendiculares apropiada que ofrezcan un apoyo lateral al plano de volcamiento, teniendo en cuenta la evaluación de flexibilidad y así esperar un comportamiento adecuado; para ello se realizó un modelo numérico con base en el módulo de rotura a partir de las probetas tomadas “in situ”.

Se realizaron tres estudios de caso: en el primero la tapia se encuentra en estado original sin refuerzo, es decir la tapia simple; para el segundo caso se evaluó una probeta reforzada con pañete de suelo cemento (1:10) de (3 cms.) de espesor a cada lado, con fibra de polipropileno (0.5%) malla con vena; finalmente el tercer estudio, fue similar al segundo y solamente para este tercer estudio, se reemplazó la malla de vena por una malla electro soldada.

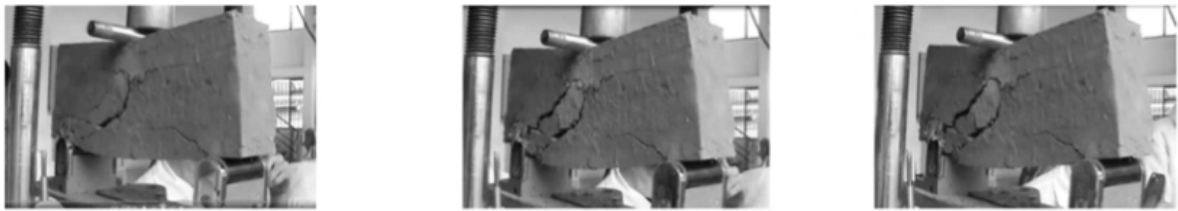


Fig. 13 Módulo de rotura para probetas con pañete reforzado, Fuente: Autores.

TABLA 4. EVALUACIÓN DE MÓDULO ROTURA DE LA TAPIA.

Probeta	Módulo de rotura	Unidades
Tapia simple	0.14	Mpa
Tapia reforzada con pañete de suelo cemento, fibra y malla de vena	0.74	Mpa
Tapia reforzada con pañete de suelo cemento, fibra y malla electro soldada	1.01	Mpa

Fuente: Autores, auxiliares de laboratorio Javier Solarte, Santiago Montenegro.

D. Modelo numérico

Es una ecuación para determinar la distancia de los muros de apoyo en la tapia. Se plantea el proceso numérico con base en la consideración: los muros perpendiculares sirven de apoyo en el plano horizontal cuando actúan las cargas dinámicas.

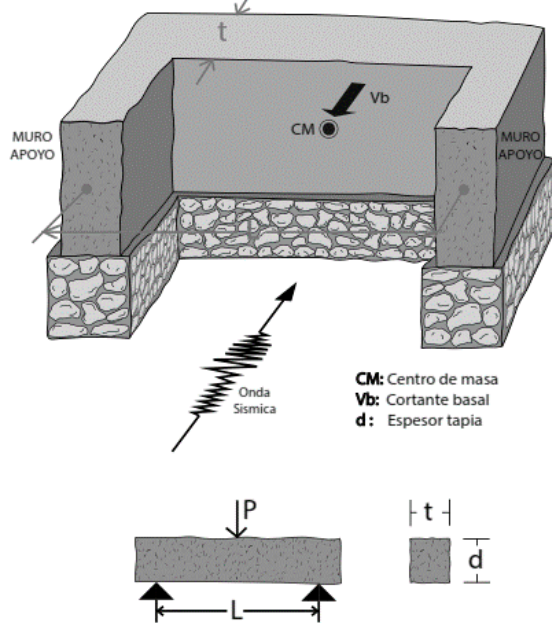


Fig. 14. Distancia entre muros de apoyo para evaluar un comportamiento de una tapia excitada por acción sísmica, Fuente: Autores.

Por lo tanto, la ecuación de autoría en esta investigación, adopta como principio físico la segunda ley de Newton en la que se establece; fuerza inercial es

producto de la masa por la aceleración causada por el sismo. Como respuesta se evalúa la longitud "l" para contrarrestar esta fuerza en función de la separación de muros tapias de apoyo y así controlar el pandeo lateral de la tapia.

$$l = \sqrt{\frac{Rc * 2 * t}{3 * \gamma * Sa}} \tag{1}$$

- l*: luz entre apoyos de estabilidad de la tapia.
- t*: espesor de la tapia (Espesor de la tapia para el Teatro Imperial. Promedio 0.90m)
- R*: Módulo de rotura de la tapia
- Rc*: Módulo de rotura calculado factor de seguridad $Fs = 2, Rc = R/Fs$
- Sa*: aceleración espectral (Teatro Imperial - periodo corto $Sa = 0.8125\%g$)
- γ : peso específico del elemento (Teatro Imperial = $1.5t/m3$).

Para la tapia del teatro Imperial, la distancia máxima entre muros perpendiculares, como elementos de apoyo para ofrecer una respuesta ante cargas laterales (acción sísmica) es de:

- Distancia de muros de apoyo en la tapia sin pañete de refuerzo = 1.9 m.
- Distancia de muros de apoyo en la tapia con pañete de refuerzo (suelo cemento, malla de vena y fibra) = 4.3 m.
- Distancia de muros de apoyo en la tapia con pañete de refuerzo (suelo cemento, malla de electro soldada y fibra) = 5.0 m.

Cuando no existen los muros perpendiculares, para mejorar el comportamiento, se puede reemplazar la distancia requerida con elementos de apoyo como vigas de madera o metálicas entre tapias a nivel de cielos raso generando un apoyo intermedio.

Sismo de marzo 30 de 1983 Popayán fuente Asociación de Ingeniería Sísmica.



Modelo en elementos finitos evaluación de esquina y vacíos fuente Esta investigación William Castillo.

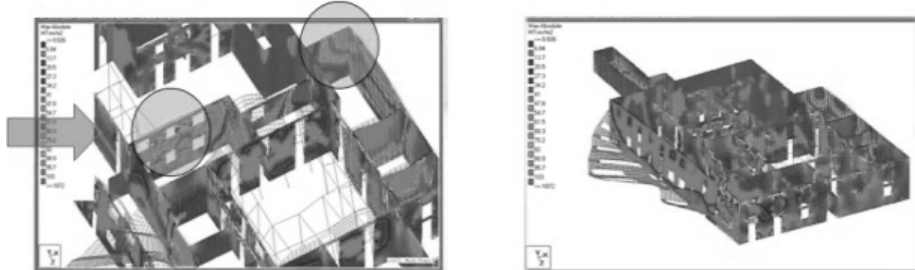


Fig. 15. Esfuerzos en la estructura (FEA) – zona de esquinas y vacíos.
Fuente: Autores.

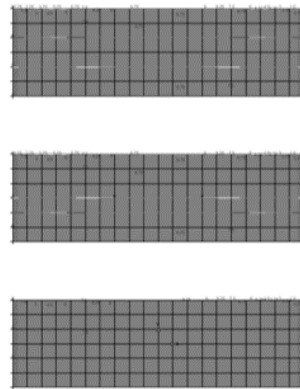
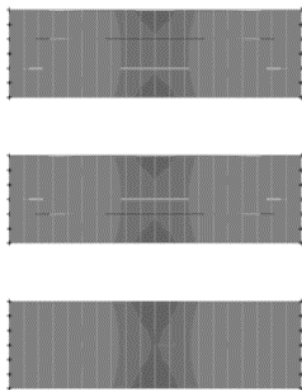
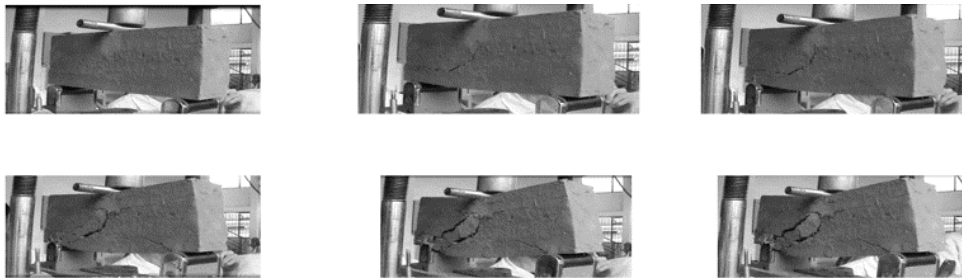


Fig. 16. Correlación experimental y modelos numéricos por simulación pañete reforzado.
Fuente: Autores.

1) Calibración del modelo

Para validar el trabajo de laboratorio se modeló las probetas mediante el método de elementos finitos, utilizando como herramienta Etabs, teniendo en cuenta el método numérico que resuelve ecuaciones diferenciales, relacionando los modelos de cuerpo con geometría sometido a acciones físicas, a partir de una división de dominio en elementos finitos y así obtener el módulo de elasticidad de una sección compuesta, de las probetas con pañete reforzado siguiendo un proceso iterativo, al modificar el módulo de elasticidad y comparando con los datos experimentales del laboratorio con los teóricos del modelo.

De esta forma se obtuvo los módulos de elasticidad así:

Módulo de elasticidad de la tapia simple:

$$E_{ts} = 73 \text{ MPa}$$

Módulo de elasticidad de la tapia simple reforzada con pañete en suelo cemento, fibra y malla de vena:

$$E_{mv} = 225 \text{ MPa}$$

Módulo de elasticidad de la tapia simple reforzada con pañete en suelo cemento, fibra y malla electro soldada $E_{me} = 760 \text{ MPa}$

2) Evaluación del comportamiento de esquina

La sismicidad histórica nos enseña que las edificaciones en tierra son altamente vulnerables en las zonas de esquina y vacíos [21] tal es el caso del sismo de Popayán (marzo 31 de 1983). Dichas esquinas se desprenden del muro en el plano perpendicular, por falta de conexión o de “trabe”, lo cual se hace evidente en el modelo de esfuerzos por el método de elementos finitos.

III. DISCUSIÓN

Es deber de la ingeniería como ciencia responder a los valores y necesidades sociales con responsabilidad civil, ética y moral, salvo guardando las vidas humanas, la integridad y el patrimonio como bien de interés cultural de la nación.

Las estructuras históricas construidas en tierra, calificadas como bien inmueble de interés cultural de la nación, son una responsabilidad de la ingeniería colombiana de proponer métodos y modelos de consolidación para mejorar el comportamiento frente a la acción sísmica a que están expuestas.

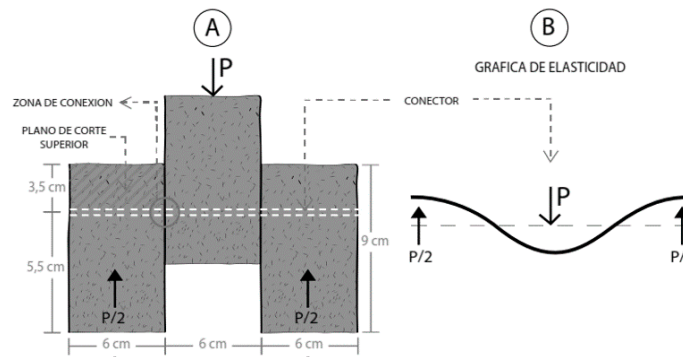


Fig. 17. Esfuerzos en la estructura (FEA) – zona de esquinas y vacíos. Fuente: Autores.

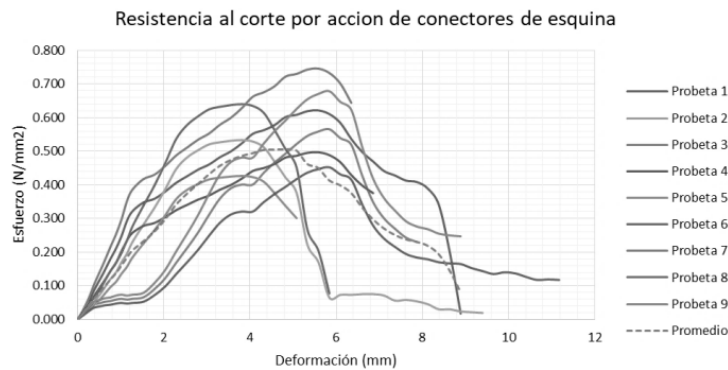


Fig. 18. Esquema grafico del modelo de probeta en el análisis de conectores de esquina de tapia, resistencia de materiales (acción y reacción),

Fuente: Autores.

Tabla 5. EVALUACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE PROMEDIO POR CONECTOR.

Resistencia al corte por acción de conectores de esquina					
Probeta	Carga máxima		Deformación alcanzada		Esfuerzo máximo (Ton/m ²)
	(N)	(Ton)	(mm)	(m)	
Promedio	1174.33	0.117	5.08	0.0051	57.333

Fuente: Autores.

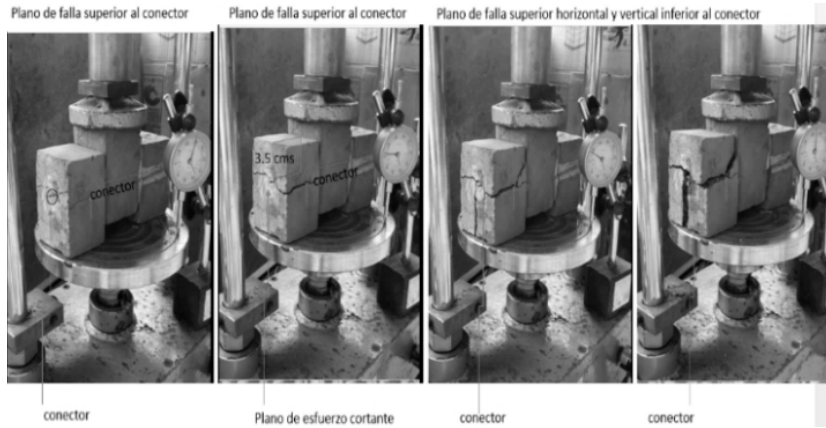


Fig. 19. Ensayo de la probeta de tapia, zona de esquinas.

Fuente: Autores.

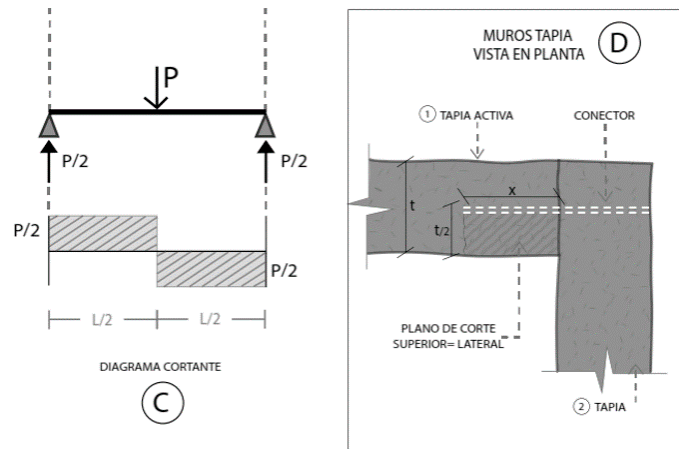


Fig. 20. Esquema gráfico del modelo de probeta en el análisis de conectores de esquina de tapia, resistencia de materiales (acción y reacción).

Fuente: Autores.

Para el análisis de vulnerabilidad sísmica de las estructuras en tierra se propone un metodología de ensayo mediante una probeta en tapia tomadas “in situ”, y así modelar la acción de cargas como principio físico que genera un plano cortante de esquina; de esta manera, la investigación plantea un prototipo de espécimen y la ecuación que permite establecer la posición del “tope” de los muros tapiados conectados por una varilla y epóxico (Fig. 17) (lechada suelo cemento). Se plantean dos probetas de apoyo (6 x 6 x 9 cm.) unidas a una central a través

de un conector (varilla de 4 mm. corrugada) fundido con una lechada de agua cemento (a 3.5 cm. bajo la cara superior del apoyo uno y tres). Se aplica una carga a la unidad central, la cual se transfiere a los apoyos, (por la simetría la mitad de carga.)

El resultado de los ensayos (Fig. 18) se presenta un plano de corte por el efecto de acción y reacción del conector en promedio se obtuvo un valor (τ_t) del plano de corte superior de 0.57 Mpa (Fig. 18), como parámetro para el cálculo del modelo matemático.

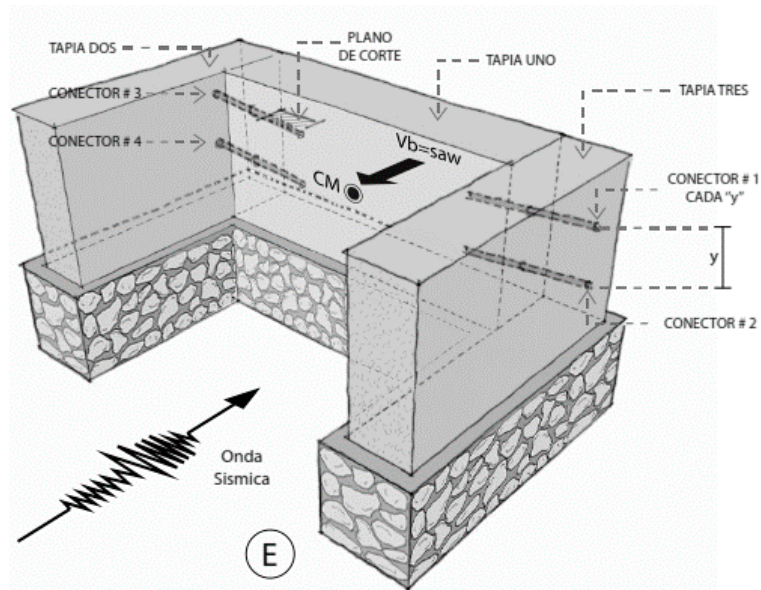


Fig. 21 Modelo de colocación de clavos de refuerzo ante la acción dinámica, en el análisis de conectores de esquina de tapia, resistencia de materiales (acción y reacción)
Fuente: Autores.

Aplicado el análisis numérico a la tapia (Fig. 20), sobre ella actúa la carga “P” directamente, equivalente a la carga lateral de la reacción dinámica como resultante y así se obtiene el modelo numérico para calcular la longitud del conector o clavo de esquina por cada metro de análisis que puede oscilar entre 7/8” 1” a 1,5” justificado en la ecuación numérica como autoría de esta investigación:

$$X = \frac{Sa * \gamma * V}{\tau t * t/2} \quad (2)$$

De donde:

- X: Longitud del conector en la tapia activa por cada 1 m., de separación (Y = 1m.)
- Sa: Aceleración espectral (%g)
- FS: factor de seguridad = 2.0
- τt : esfuerzo cortante de la tapia : $\tau t = \tau t/FS$.
- V: geometría del volumen del elemento
- γ : peso específico del elemento
- t: espesor de la tapia

Aplicada la fórmula al Teatro Imperial se necesita (1.60m) de penetración por cada metro lineal y en los dos extremos (Fig. 21) ó si se prefiere, colocar un conector o clavo de (0.80m) cada (0.50m) cada lado en ambos extremos, la cual es la opción constructiva más adecuada.

IV. CONCLUSIONES

La tapia, se considera como un suelo duro, consolidado, con propiedades físico mecánicas de una roca

blanda en cuanto a dureza y resistencia. El amortiguamiento longitudinal (7,78) y transversal (3,32), es una propiedad que permite interpretar la capacidad de disipación de energía y descifrar el comportamiento dinámico frente a la acción sísmica de una estructura en tapia.

Es posible cuantificar el comportamiento a flexión de la tapia, con base en la separación de los muros divisorios perpendiculares sin refuerzo a (1.90 m.), con pañete reforzado aumenta de 2.3 a 2.6 veces su capacidad.

Una manera de responder a la flexibilidad de edificaciones en tapia con muros que carecen de aquellos divisorios perpendiculares, es la estrategia de remplazarlos por unas vigas de madera o acero sometidas a flexo compresión, ubicadas a nivel de cielo raso conectadas entre muros tapias paralelos ubicados para tapias sin refuerzo cada 2 metros.

Se puede mejorar el comportamiento de las edificaciones en tierra sometido a esfuerzos de flexión, aplicando un pañete reforzado con suelo cemento (1:10) a cada lado de la tapia (mínimo de 3 cm.) con fibra (0.5%).

Las edificaciones en tapia en la ciudad de Pasto, se fabricaron con las esquinas conectadas mediante *juntas a tope*, lo que las hace altamente vulnerables, frente a la acción sísmica con probabilidad de colapso.

Para contrarrestar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en tapia, se puede mejorar el comportamiento de los muros entre las tapias que se cruzan en la esquina, colocando unos clavos conectores (con lechada agua cemento) de diámetro que oscila entre 7/8” a 1,5” de los cuales el más eficiente es de 1”

El módulo de elasticidad de la tapia de la sección compuesta, que está recubierta con un pañete reforzado, con malla electro soldada, suelo cemento y fibra, se incrementa en 10 veces comparado con la que no tiene pañete, sin embargo, se comporta frágil, porque la falla es súbita.

El módulo de elasticidad de la tapia de la sección compuesta recubierta con un pañete reforzado con malla de vena, suelo cemento y fibra se incrementa en 3 veces comparado con la que no tiene pañete, sin embargo, se comporta dúctil debido a los esfuerzos residuales con las que continúa absorbiendo carga.

Para la tapia del teatro Imperial, la distancia máxima entre muros perpendiculares o apoyos de estabilidad (vigas de corona en madera o metálicas), como elementos de apoyo para ofrecer una respuesta ante cargas laterales, (acción sísmica) es 2.6 veces más estable si se encuentra pañetado suelo cemento, malla de electro soldada y fibra comparado con la tapia simple, 2.3 veces más estable si se encuentra pañetado suelo cemento, malla de vena y fibra comparado con la tapia simple.

Con la aplicación de la ecuación de los conectores de esquina autoría de esta investigación, la opción más eficiente es en los dos extremos de la tapia, con clavos de 1" y lechada agua cemento, lo que garantiza más estabilidad ante la excitación dinámica, aplicado al Teatro Imperial se necesita un conector de 1" con longitud de (1.60m) de penetración por cada metro lineal en cada lado.

La demolición de edificaciones en tierra, en el centro histórico de la ciudad de Pasto, hace que se desconfinen y presenten patologías por pandeo lateral, flexión y discontinuidad de esquina.

V. FINANCIAMIENTO

El proyecto de investigación lo desarrolló con el financiamiento de la comisión de estudios de William Castillo Valencia en calidad de profesor tiempo completo financiado por la Universidad de Nariño como maestrante del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7), de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, con el tema de investigación "Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de la Tapia En Pasto Caso Teatro Imperial", desarrollado entre el 30 noviembre de 2016 y 7 de septiembre del 2018

VI. AGRADECIMIENTOS

Universidad de Nariño, Universidad del Valle, Arq. Ph.D. William Pasuy A., Arq. Ana Matilde Vicuña, Arq. Martha Enríquez, Ing. Esp. Carlos Rosero, Ing. M.Sc. Carlos Bucheli e Ing. Ph.D. Manolo Galván, Ing Héctor Collazos, Ing Javier Solarte, Jair Revelo Muñoz, Daniel Pabón.

REFERENCIAS

- [1] H. Bolaños, *Los nombres sin olvido*, San Juan de Pasto, 1979, p. 20.
- [2] M. Enríquez, O. Mesías y R. Ortega, *Estudio histórico y gráfico de la Arquitectura Republicana en San Juan de Pasto*, San Juan de Pasto, Colombia: Imprelibros, 2005.
- [3] R. Valladares, *Diálogos entre ciudad, medio ambiente y patrimonio*, México DF, México: Universidad de Colima, 2014.
- [4] C. D. Tecnológico, "Manual del Terreno - Evaluación de daños y soluciones para construcción en Tierra Cruda", R. F. Ltda, Ed., Santiago de Chile, 2012, p. 15.
- [5] W. Pasuy, "Teatro Imperial de Pasto un Patrimonio Vivo," en *Experiencias y Metodos de Restauración en Colombia*, Vol. I, Roma, Aracne editrice Roma, 2011.
- [6] H. Coral, *Reseña Histórica de los Terremotos en Nariño*, San Juan de Pasto, Colombia: Universidad de Nariño, 2004.
- [7] Ministerio de Cultura, *Ley 1188* de 2008, "Legislación y normas generales para la gestión, protección y salvaguardia del patrimonio cultural en Colombia", Bogotá, D.C. Colombia.
- [8] P. Ángulo, G. Balza, L. Gonzáles, M. Labrador y C. Quintero, "Bloque de adobe como sistema de cerramiento vertical de viviendas en el páramo Venezolano", I.U.P. Santiago Mariño. Ing. Civil, Mérida, Venezuela 2016, p. 18.
- [9] Congreso de Colombia, *Ley 400 de 1997*, "Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente". NSR - 98. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá DC, Colombia, 1997
- [10] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. NSR - 10, Bogotá DC, Colombia, 2012.
- [11] W. Castillo y G. Sánchez, "Informe final de análisis de vulnerabilidad sísmica mediante recolección visual de datos estadísticos de los predio comprendidos entre las calles 16 a 21 y las carreras 22 a 27, implementado en planos de mapas y riesgo," San Juan de Pasto, Colombia, 2013.
- [12] G. M. Viñuelas, *Restauración de Arquitectura de Tierras*, Buenos Aires, Argentina, 2009, p. 48.
- [13] Iscarsah, *Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico*, Barcelona, España, 2004.
- [14] E. Carnevale , B. Rakotomamonjy, E. Sevillano y M. Abad, "Orientaciones para la Conservación de Inmuebles Patrimoniales de Tierra en Cuenca", I. N. d. P. Cultural, Ed., Cuenca, Ecuador, 2015, p. 61.
- [15] A. G. Lozano, *Fichas técnicas de soluciones constructivas para la rehabilitación del patrimonio arquitectónico rural*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Oviedo, Barcelona, España: Universidad de Oviedo, 2011.
- [16] Gobierno del Estado de Puebla. Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Puebla, UNAM, *Guía para Proyectos de Restauración*, Puebla, México: Secretaría de Cultura de Puebla, 2015.
- [17] A. L. Muller, Ed."El Teatro Imperial," *Ilustración Nariñense*, no. 57, 13 - 14 Junio 1935.
- [18] D. Tovar y J. Vergara, "Determinación de los módulos dinámicos para un suelo lacustre de Bogotá mediante ensayo triaxial cíclico", Universidad de La Salle, Bogotá D.C., Colombia, 2016.
- [19] P. Reyes y J. Rosales, "Ensayos para la obtención de Propiedades Dinámicas de un Suelo mh estabilizado con Caucho Triturado," Cali, Colombia, 2017.
- [20] J. Brazan, R. Gonzales y H. Ortiz, "Métodos de ensayos para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el Salvador," Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2009.
- [21] L. F. Velasco, "Apuntes de intervención en edificaciones en tierra. Apuntes y notas de intervención de patrimonio," Popayán, 1999.

William Castillo Valencia nació en Pasto (Nariño), se graduó como ingeniero civil en la Universidad de Nariño, además obtuvo su título como especialista en estructuras, y en la actualidad está postulado como maestrante en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Civil con orientación a estructuras de la universidad del Valle. Pertenece al grupo de investigación G7 en Ingeniería sísmica eólica y estructuras, ha sido ponente internacional en países como Cuba, México, Guatemala, Perú, EU y Argentina; actualmente es profesor de tiempo completo en la Universidad de Nariño, profesor internacional invitado de la Universidad de Michoacán San Nicolás de Hidalgo-Morelia (México), investigador del observatorio de culturas urbanas y OCUR de la Universidad de Nariño. Ha recibido premios de reconocimiento por representaciones internacionales de la rectoría de la Universidad de Nariño y se desempeña como consultor en estructuras, miembro activo de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. <https://orcid.org/0000-0002-5739-6494>

Gilberto Areiza Palma es Ingeniero civil de la Universidad del Valle, master en Ingeniería estructural de Lehigh University, Bethlehem, PA (EU). Profesor tiempo completo de pregrado y postgrado en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle. Profesor de posgrado en las facultades de Ingeniería de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en Bucaramanga y de la Universidad del Quindío en Armenia. Miembro del grupo de investigación G7 de la Universidad del Valle, dinámica eólica y estructuras. Miembro fundador y primer Presidente del Instituto Colombiano de la Construcción en Acero – ICCA. Autor de publicaciones bibliográficas, seminarios y conferencista en varias oportunidades. Investigador del desempeño sísmico de edificaciones de muros estructurales delgados en concreto reforzado, Consultor de la firma GAP. INGENIERIA SAS, miembro activo de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica–AIS, del Instituto Colombiano de la Construcción en Acero–ICCA y del American Institute of Steel Construction–AISC. <https://orcid.org/0000-0002-8028-5573>

Hugo Coral Moncayo es Ingeniero civil de la Universidad del Cauca, doctor en Ingeniería sísmica y dinámica estructural de la Universidad Politécnica de Cataluña, magister en geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, profesor del postgrado de la maestría en Ingeniería con énfasis en ingeniería civil orientación geotecnia, mención de felicitaciones en reconocimiento a la labor académica realizada en ACOFI y ECAES. Consultor en geotecnia de la firma Ingeniería de Suelos y Cimentaciones, se desempeñó como profesor tiempo completo de la Universidad de Nariño en pregrado y postgrados, investigador del grupo G7 de la universidad del Valle y miembro activo de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. <https://orcid.org/0000-0002-7019-9479>