

**AUXILIAR EN INVESTIGACIÓN PARA EL FONDO DE CONSTRUCCIONES EN  
EL TEMA: “EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA TAPIA  
EN PASTO. CASO TEATRO IMPERIAL”.**



JAVIER ALEJANDRO SOLARTE HIDALGO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2017

**AUXILIAR EN INVESTIGACIÓN PARA EL FONDO DE CONSTRUCCIONES EN  
EL TEMA: “EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA TAPIA  
EN PASTO. CASO TEATRO IMPERIAL”.**



**JAVIER ALEJANDRO SOLARTE HIDALGO**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil.

**ASESOR**

**ING. ESP. WILLIAM CASTILLO VALENCIA**  
Profesor titular de la Universidad de Nariño  
Especialista en Estructuras

**COASESOR**

**ING. MSC. CARLOS ARMANDO BUCHELI NARVÁEZ**  
Director Fondo de Construcciones

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2017**

## NOTA DE RESPONSABILIDAD

*“Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor”*

Artículo 1° del acuerdo 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

*“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”*

Artículo 13, Acuerdo No. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo.

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

## **COMENTARIOS**

---

ING. ESP. WILLIAM CASTILLO VALENCIA  
Especialista en Estructuras  
Asesor trabajo de grado

---

ING. MSC. CARLOS ARMANDO BUCHELI NARVÁEZ  
Director Fondo de Construcciones  
Co-asesor trabajo de grado

---

ING. ESP. VICENTE PARRA SANTACRUZ  
Especialista en estructuras  
Especialista en docencia universitaria  
Jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por su bendición y por ser el forjador de mi camino.

Al Ing. Esp. William Castillo Valencia, por el aprendizaje, orientación y sobre todo por inculcar en mí, la pasión y el amor por el patrimonio.

A la Universidad de Nariño y su personal docente, por brindarme una formación integral e instruirme en los campos de la ingeniería.

#### **DEDICADO A:**

Mi madre por su esfuerzo, dedicación y perseverancia; por inculcar en mí las bases de responsabilidad y deseos de superación. Por ser la inspiración y la motivación más grande para concluir con éxito este trabajo.

A Jaqueline y a mi hijo, por ser mi guía en todo camino y el mayor impulso para alcanzar las metas propuestas.

A mi familia y demás familiares, por su incondicional apoyo.

## RESUMEN

La pasantía se desarrolló en el tema de investigación de edificaciones en tierra, las cuales constituyen un valor fundamental del patrimonio de la humanidad; el 80% de las edificaciones históricas en Colombia, son de este tipo. La tapia, es un muro fabricado en tierra apisonada, con la que se construyó en San Juan de Pasto la estructura portante de uno de los bienes inmuebles de interés nacional más importantes como es el Teatro Imperial (1922), construido principalmente en tapia, además en mampostería de ladrillo cocido con argamasa de *cal* (fachada) y madera (entrepiso y pilares).

El Ministerio de Cultura regula la protección de este tipo de edificaciones patrimoniales, sin embargo, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10; no reglamenta la evaluación y recuperación estructural de estos sistemas constructivos por falta de investigación.

Una respuesta a ello, es la evaluación de la mecánica de la fractura y la deflexión (*Priestley M. y Paulay T. 1992*) aplicado a la tapia, donde se estudian cuatro casos representativos: Caso 1: *antes de agrietarse*, Caso 2: *el semi agrietado*, Caso 3: cuando la grieta alcanza los *tres cuartos de profundidad*, Caso 4: *el colapso final*.

Con base en este tipo de análisis y los resultados de laboratorio, se plantea un modelo matemático que permita obtener las curvas de capacidad de cada muro, las curvas de vulnerabilidad, espectros de capacidad, relación media de daño y así poder plantear varias alternativas de rehabilitación y consolidación.

## ABSTRACT

The internship in the topic of research in buildings on land, which constitute a fundamental value of the heritage of humanity; 80% of historical buildings in Colombia are of this type. The “Tapia”, is a wall made in rammed earth, with which it was built in San Juan de Pasto; area of high seismic threat, the supporting structure of one of the most important real estate of national interest, such as the Imperial Theater (1922), built mainly on the “tapia”, in addition to brick masonry with lime mortar (facade) and wood (mezzanine and pillars).

The Ministry of Culture regulates the protection of this type of heritage buildings; however, the Colombian Seismic Resistance Construction Regulation, NSR-10; doesn't regulate the evaluation and structural recovery of these building systems due to lack of research.

One response to this is the evaluation of fracture mechanics and deflection (Priestley M. and Paulay T. 1992) applied to the “tapia”, where four representative cases are studied: Case 1: before cracking, Case 2: the semi cracked, Case 3: when the crack reaches three quarters deep, Case 4: the final collapse.

Based on this type of analysis and laboratory results, a mathematical model is proposed to obtain the capacity curves of each wall, the vulnerability curves, the capacity spectra, the average damage ratio; and thus, be able to propose several alternatives for rehabilitation and consolidation.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. FASE I: DIAGNOSTICO.....	17
2. FASE II: METODOLOGÍA .....	20
2.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS (TAPIA).....	21
2.2. PROPIEDADES ESTÁTICAS .....	23
2.2.1. Compresión inconfínada de la tapia, E y $\mu$ . .....	23
2.2.2. Compresión inconfínada de la mampostería, E y $\mu$ . .....	25
2.3. PROPIEDADES DINÁMICAS .....	27
2.3.1. Velocidades ultrasónicas de la tapia.....	27
2.3.2. Velocidades ultrasónicas de la mampostería.....	30
2.3.3. Vibraciones libres de la tapia .....	32
2.4. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LA TAPIA.....	36
2.4.1. Alternativa de consolidación; pañete reforzado (Análisis experimental) ...	40
2.4.2. Ecuación para determinar la distancia de muros de apoyo en la tapia.....	47
2.4.3. Ecuación para proyectar los resultados de laboratorio al modelo real.....	49
2.4.4. Calibración del modelo. ....	53
2.5. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	54
2.6. ESFUERZOS DE ESQUINA Y VACÍOS .....	56
2.6.1. Evaluación físico-mecánica del comportamiento de esquina.....	57
2.6.2. Ecuación para determinar la cantidad de conectores de esquina.....	59
2.6.3. Determinación de los conectores de esquina para el Teatro Imperial. ....	60
2.7. MODELO FÍSICO-MECÁNICO DEL COMPORTAMIENTO MURARIO ....	62
2.8. COMPORTAMIENTO Y CAPACIDAD DE RESPUESTA EN MUROS.....	64
2.9. HIPÓTESIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO HASTA LA FALLA...68	
2.10. MÉTODOS DE REHABILITACIÓN Y CONSOLIDACIÓN .....	69
2.11. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONSOLIDACIÓN.....	72
2.12. EFICIENCIA DE LAS ALTERNATIVAS DE CONSOLIDACIÓN.....	73
2.13. CÁLCULO DE PRESUPUESTO .....	75
CONCLUSIONES .....	77
RECOMENDACIONES .....	78
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	79
ANEXOS .....	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelo. ....	22
Tabla 2. Límites de consistencia del suelo. ....	22
Tabla 3. Especificaciones de probetas de tapia 6" .....	23
Tabla 4. Datos del análisis de probetas de la tapia.....	25
Tabla 5. Especificaciones de probetas de mampostería.....	26
Tabla 6. Datos del análisis de probetas de mampostería. ....	27
Tabla 7. Especificaciones de probetas de tapia 3" .....	28
Tabla 8. Resultado de los ensayos dinámicos de las probetas de tapia.....	30
Tabla 9. Resultado de los ensayos dinámicos de las probetas de mampostería.....	31
Tabla 10. Rangos típicos de velocidades de onda a compresión $V_p$ .....	31
Tabla 11. Rangos típicos de velocidades de onda a cortante $V_s$ .....	31
Tabla 12. Valores típicos de $E$ y $\mu$ en suelos .....	32
Tabla 13. Evaluación de vibraciones libres de la tapia. ....	36
Tabla 14. Resultado de los ensayos de flexión de la tapia tipo vigas simples .....	39
Tabla 15. Resultado de los ensayos de compresión del material de pañete. ....	41
Tabla 16. Ensayo de flexión de probetas (prototipo 1).....	46
Tabla 17. Ensayo de flexión de probetas (prototipo 2).....	46
Tabla 18. Evaluación de esfuerzos de la tapia simple. ....	56
Tabla 19. Resistencia de corte por acción de conectores de esquina en la tapia. .	59
Tabla 20. Evaluación grado de vulnerabilidad en función del periodo de retorno ..	68
Tabla 21. Análisis del presupuesto, malla de vena. ....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Panorámica interna del sistema estructural del Teatro Imperial .....	14
Figura 2.	Verificación de testigos .....	15
Figura 3.	Cicatrices de demoliciones vecinas al teatro. ....	17
Figura 4.	Fisuras en la parte interna y externa del teatro.....	17
Figura 5.	Presencia de humedad causada por falla de cubierta. ....	18
Figura 6.	Colapso gravitacional de piso en madera, parte exterior del teatro .....	18
Figura 7.	Madera en deterioro por la acción de xilófagos .....	19
Figura 8.	Hundimiento del suelo y empozamientos de agua .....	19
Figura 9.	Extracción y preparación de probetas en tapia.....	20
Figura 10.	Curva de distribución granulométrica.....	21
Figura 11.	Clasificación gráfica para la fracción limosa-arcillosa (AASHTO).....	21
Figura 12.	Abaco de Casagrande. ....	22
Figura 13.	Equipo de ensayo de compresión simple (inconfiada) U. de Nariño...23	
Figura 14.	Ensayo de compresión simple curva de fuerza vs deformación. ....	24
Figura 15.	Equipo de ensayo de relación de Poisson .....	25
Figura 16.	Extracción y ensayo probetas de mampostería U. de Nariño .....	26
Figura 17.	Equipo de medición de velocidades ultrasónicas, U. del Valle. ....	28
Figura 18.	Grafica a menor escala para cuantificar el recorrido de ondas S. ....	29
Figura 19.	Sistema para medición de vibraciones libres de la Tapia. ....	33
Figura 20.	Esquemas del ensayo de vibración: .....	34
Figura 21.	Programación del software de procesos numéricos; MATLAB. ....	35
Figura 22.	Expresión gráfica de los procesos numéricos en MATLAB .....	35
Figura 23.	Secuencia de falla de la viga de tapia simple. ....	37
Figura 24.	Curvas fuerza vs desplazamiento de las probetas tipo viga simple.....	38
Figura 25.	Curvas fuerza- desplazamiento de probetas prototipo 1 viga simple....	38
Figura 26.	Curvas fuerza- desplazamiento de probetas prototipo 2 viga simple....	39
Figura 27.	Diagrama de cortante y momento de la probeta tipo viga simple .....	39
Figura 28.	Diseño de la mezcla de suelo cemento para el pañete reforzado. ....	40
Figura 29.	Viga con pañete reforzado con m. de vena y m. electrosoldada .....	40
Figura 30.	Proceso constructivo de refuerzo con pañete de la viga en tapia.....	41
Figura 31.	Proceso constructivo de asentamiento de malla electrosoldada. ....	42
Figura 32.	Secuencia de falla de la probeta de la viga con pañete reforzado.....	42
Figura 33.	Diagrama de cortante y momento de la probeta con pañete reforzado	42
Figura 34.	Superposición curvas fuerza-desplazamiento de probetas reforzadas.	43
Figura 35.	Superposición curvas fuerza-desplazamiento de probetas reforzadas.	43
Figura 36.	Curvas fuerza-desplazamiento de vigas simples-reforzadas (mv).....	44
Figura 37.	Curvas fuerza-desplazamiento de vigas simples-reforzadas (me) .....	45
Figura 38.	Curvas esfuerzo-deformación de vigas simples y vigas reforzadas .....	46
Figura 39.	Distancia entre muros de apoyo .....	47
Figura 40.	Correlación experimental y modelos numéricos por simulación .....	53
Figura 41.	Correlación experimental-modelos numéricos por simulación.....	54
Figura 42.	Modelo de la estructura en elementos finitos (FEA) – Teatro Imperial.	55

Figura 43. Esfuerzos en la estructura (FEA) – Teatro Imperial.....	55
Figura 44. Esfuerzos en la estructura (FEA), zona de esquinas y vacíos.....	56
Figura 45. Ensayo para evaluación de cortante- zona de esquina y vacíos.....	57
Figura 46. Ensayo de la probeta de tapia, zona de esquinas.....	57
Figura 47. Esquema del modelo para el análisis de conectores de esquina.....	58
Figura 48. Curvas esfuerzo-deformación para conectores de esquina.....	58
Figura 49. Modelo de colocación de clavos de refuerzo.....	60
Figura 50. Detalle de conectores de corona y esquina.....	61
Figura 51. Cargas de inercia de respuesta fuera del plano del muro tapial.....	62
Figura 52. Esquema de momentos y curvatura, mecánica de fractura.....	63
Figura 53. Secuencia de fractura en vigas simples de tapia, ensayo de flexión....	64
Figura 54. Convención de nomenclatura para los muros en el plano.....	64
Figura 55. Convención de nomenclatura para las gráficas de los muros.....	65
Figura 56. Curvas de capacidad de los muros en el plano de falla.....	65
Figura 57. Curvas de capacidad general de los muros en el plano de falla.....	66
Figura 58. Curvas de capacidad acción sísmica sentido de muros en “x”.....	66
Figura 59. Curvas para espectro de capacidad – Teatro Imperial.....	67
Figura 60. Hipótesis de colapso por niveles durante la acción sísmica.....	68
Figura 61. Hipótesis de falla del Teatro Imperial, probabilidad de colapso.....	69
Figura 62. Métodos de rehabilitación y consolidación del sistema murario.....	69
Figura 63. Grafica de diagramas de barras: Eficiencia estática, dinámica,.....	73
Figura 64. Eficiencia-costos de consolidación, m. de vena y combinaciones.....	74
Figura 65. Eficiencia-costos consolidación-m electrosoldada y combinaciones....	74

## INTRODUCCIÓN

El trabajo se adelantó como auxiliar de investigación en el tema “EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA TAPIA EN PASTO. CASO TEATRO IMPERIAL”; dirigido por el investigador William Castillo, el cual consistió en prestar apoyo en la ejecución de pruebas de laboratorio especializado, asistir en el análisis estructural mediante modelos numéricos, curvas de capacidad, curvas de desempeño, ayudar a plantear alternativas de rehabilitación, asistir en la realización de presupuestos de intervención y especificaciones técnicas.

Para la evaluación crítica de este sistema constructivo, dado el valor y estado de conservación, se aprecia el proceso constructivo y los materiales usados en la época, entre ellos edificaciones históricas, patrimonio nacional, como el Museo Taminango (1632), Conjunto La Milagrosa (1886), Teatro Imperial (1922), o bienes de interés cultural del municipio como Templo de San Juan (data de 1669) (*Enríquez, Mesías, R.O. y Ortega, E.R. 2005*), los cuales se han construido en tierra, mampostería con argamasa de cal o calicanto. Edificaciones con valor histórico de la ciudad, han sido demolidas por acción antrópica, abandono premeditado de los propietarios, falta de normatividad de tipo estructural, ausencia de investigación y abandono, todo esto ha 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 (*MINISTERIO DE CULTURA-LEY 1185 2008*), sin embargo, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente; 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.

Ante la ausencia de un documento local, es posible acudir a las recomendaciones de instrumentos universales como aquel del Comité Científico Internacional, para el análisis y restauración de estructuras históricas: ISCARSAH de ICOMOS (*ISCARSAH, 2004*) como documento metodológico para abordar casos de estudio.

Para salvaguardar el patrimonio en Pasto, dado su valor histórico y arquitectónico, es importante determinar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en tapia declaradas como bien de interés cultural de la Nación, para el caso de estudio el Teatro Imperial. Una manera, es la evaluación estática y dinámica de los materiales a partir de ensayos básicos y avanzados, para la aplicación de los modelos matemáticos y propuestas numéricas, para dar respuesta a la amenaza sísmica mediante alternativas de consolidación estructural.

## JUSTIFICACIÓN

Atendiendo a la investigación del ingeniero William Castillo y la regulación del Ministerio de Cultura, se establece la valoración histórica de los bienes inmuebles, con base en los criterios de antigüedad, autoría, autenticidad y estado de conservación para declarar bienes de interés cultural, es así, como la ciudad San Juan de Pasto, denominada como *ciudad teológica de Colombia*<sup>1</sup>, cuenta con un sinnúmero de edificaciones declaradas como bienes de interés cultural de la nación o el departamento, las cuales no se pueden intervenir sin el consentimiento del Ministerio de Cultura o el Comité Técnico del Consejo Departamental de Patrimonio.

En Pasto, comienza una desmedida acción de demolición con edificaciones en uno de los puntos céntricos de la ciudad, tales como aquellas del año de 1580, alrededor, en aquel entonces de la “Plaza Real de Carlos V” (Enriquez, Mesias, R.O. y Ortega, E.R. 2005). Una de las casas más antiguas construidas en la ciudad por el sistema de tapia pisada, es la Casa de los Portales, con elementos estructurales (pilares) en madera y, entresijos y vigas dintel en el mismo material. Edificaciones de este tipo se consideraron como ruinas y amenaza de su estabilidad, todo esto por falta de conocimiento e investigación respecto a los materiales, las cuales se pueden recuperar mediante un proceso de consolidación “*Pueden considerarte viejo y vetusto... y sin embargo, ser eternamente joven porque el tiempo y las buenas acciones garantizan tu permanencia en el espacio y la memoria de los demás*” (Pasuy 2006).”

La tapia, ha sido tradicionalmente el método más empleado para la elaboración de la vivienda rural y urbana, debido a la economía, sostenibilidad, agilidad constructiva y a las excelentes características de aislamiento térmico. Este tipo de vivienda, se encuentra en vía de desaparición y tiene el carácter de vestigio de una tradición que imperó hasta hace algunas décadas como memoria del legado histórico.



Figura 1. Panorámica interna del sistema estructural del Teatro Imperial  
Fuente: Leonardo Castro, 2003

<sup>1</sup> <http://www.sinic.gov.co/SINIC/ColombiaCultural/ColCulturalBusca.aspx?AREID=3&SECID=8&IdDep=52&COLTEM=213>  
[23/11/2016]

Edificaciones de interés patrimonial, merecen atención inmediata y se encuentran afectadas por rezagos de tipo sísmico, patologías de colindancia, consecuencias de efectos dinámicos y asentamientos diferenciales con problemas anómalos de estabilidad. Tal es el caso del teatro Imperial de Pasto (figura 1), declarado bien de Interés Cultural Nacional (1998) por el Ministerio de Cultura y recuperado parcialmente por la Universidad de Nariño (2003), el cual, a la fecha presenta serias fracturas causadas por las demoliciones periféricas, con probabilidad de desplome de algunos muros (figura 2). *“El colapso de un muro solamente se producirá cuando el arriostramiento es insuficiente para modificar y atenuar la respuesta dinámica, degradando el material por fisuración, lo que resta posibilidad de estabilidad y se produce el colapso”* (Morán M, Crespo A y Ormazá X 2004).



Figura 2. Verificación de testigos

Fuente: Investigador Ing. Esp. William Castillo, Auxiliar de investigación Javier Solarte.

El Ministerio de Cultura regula la protección de este tipo de edificaciones patrimoniales, sin embargo, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente; NSR-10, no reglamenta la evaluación y recuperación estructural de este tipo de sistema constructivos, que determine las condiciones de desempeño, cuando los materiales se encuentran fatigados, no obstante, dado el estado de peligro y vulnerabilidad de la edificación requiere de un análisis de las propiedades de los materiales, para determinar la capacidad de absorción de esfuerzos, la vulnerabilidad por efecto de carga vertical y sísmica, con base en el comportamiento frágil del material como la tapia.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General:**

Prestar apoyo, como auxiliar en la investigación dirigida por el ingeniero William Castillo, para determinar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en tapia declaradas como bien de interés cultural de la nación, caso de estudio Teatro Imperial.

### **Objetivos Específicos:**

- Apoyar en el diagnóstico del estado actual de las edificaciones históricas. Caso de estudio Teatro Imperial.
- Asistir en la caracterización del material y la obtención de parámetros estáticos y dinámicos de la tapia, a partir de ensayos de laboratorio especializados. Caso de estudio Teatro Imperial.
- Brindar apoyo en la determinación del grado de vulnerabilidad de las edificaciones declaradas como bien de interés cultural de la nación. Caso de estudio Teatro Imperial.
- Asistir en el planteamiento de métodos de rehabilitación y consolidación. Caso de estudio Teatro Imperial.
- Prestar apoyo en la realización de presupuesto de intervención y especificaciones técnicas.

## 1. FASE I: DIAGNOSTICO

Para esta fase se realizó una visita de campo tanto al interior como al exterior del Teatro Imperial, en compañía del ingeniero William Castillo, con el fin realizar una evaluación patológica de la estructura, así:

### Fracturas

A principio del año 2001, se deshabitó la vivienda vecina ubicada con el lindero lateral derecho del teatro, lo cual hizo que el teatro pierda el confinamiento lateral, por esta razón, el sistema estructural del teatro, presenta manifestaciones patológicas en zonas vulnerables, con presencia de fisuras que oscilan entre 1 hasta 4 mm, como el caso del muro tapial posterior al palco, el cual carece de muros rigidizantes en una luz libre de 18.85 m, indicado en la figura 3.



Figura 3. Cicatrices de demoliciones vecinas al teatro.



Figura 4. Fisuras en la parte interna y externa del teatro

En la figura 4, se evidencia la presencia de fisuras por tensiones diagonales, originando esfuerzos cortantes con orientación cruzada. Así mismo, en la intersección de los muros longitudinales con los transversales se presenta una fisura

por desprendimiento de esquina, por falta de “trabe” entre “las tareas de los tapias”, con fisuras que oscilan entre 1 y 3 mm; las esquinas en la conexión de los tapias se encuentran fisuradas con discontinuidades.

## Humedad y vegetación

La inclemencia del clima genera deterioro de algunas zonas, donde la humedad se propaga con un efecto de hinchazón y desprendimiento de los pañetes por causa de goteras de la cubierta; lo que ha hecho que proliferen la vegetación en algunas zonas de la cubierta, tal como se ilustra en la figura 5.

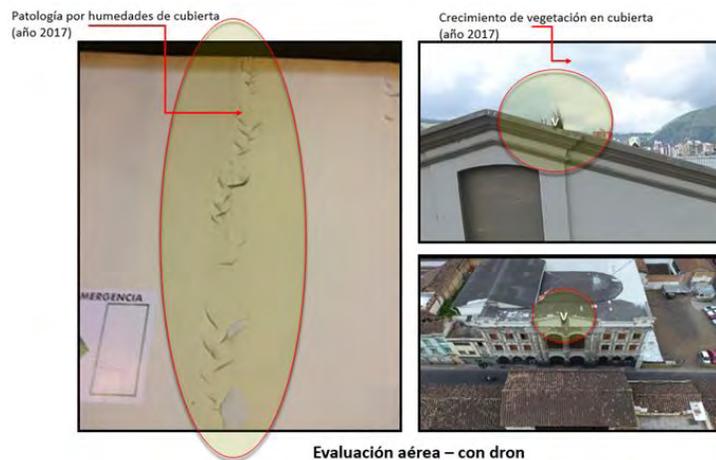


Figura 5. Presencia de humedad causada por falla de cubierta.

## Colapso gravitacional

Una de las patologías más críticas presente en la parte posterior al teatro, es el colapso gravitacional del pasillo donde se evidencia el riesgo de los ocupantes, provocado por la deflexión excesiva y la exposición a la lluvia (lateral) a las que han sido sometidas las viguetas en madera.



Figura 6. Colapso gravitacional de piso en madera, parte exterior del teatro

## Microorganismos xilófagos

La madera en algunas zonas, presenta deterioro y ataque de xilófagos, afectación de microorganismos, hongos, pudrición que afecta la resistencia y propiedades físico-mecánicas, indicado en la figura 7.

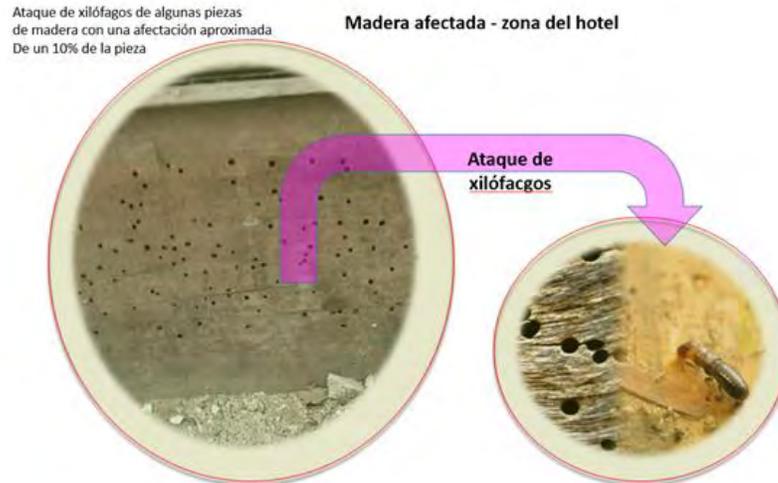


Figura 7. Madera en deterioro por la acción de xilófagos

## Deflexiones excesivas

La deflexión del entrepiso por falla de la madera, se refleja en los cuartos posteriores, formando flechas en las losas y empozamientos de agua.



Figura 8. Hundimiento del suelo y empozamientos de agua

## 2. FASE II: METODOLOGÍA

Para evaluar las condiciones físico-mecánicas de los materiales del sistema portante del Teatro Imperial, se participó en calidad de auxiliar en los “Laboratorios de suelos”, pertenecientes a la Universidad de Nariño, en ensayos tales como: compresión inconfiada, módulo de elasticidad, relación de Poisson, caracterización del material propio de la tapia y del material de refuerzo. Así mismo, se brindó apoyo en ensayos como propuestas de consolidación (ensayo de la viga simple, viga de tapia reforzada y ensayos de conectores de esquina).

### Propiedades estáticas y dinámicas de la tapia.

La tapia, definida como una unidad de muro fabricado en tierra apisonada, se considera como un suelo consolidado con el que se construyó la estructura portante de las edificaciones patrimoniales en la ciudad de Pasto, *“La tierra, el principal material para la construcción en tapia y adobe, por lo general se encuentra compuesta por grava, arcilla, arena, limo, agua, aire y materia orgánica. Cada componente cumple un papel importante para la conformación del suelo, la arcilla, es un aglomerante, mientras que la grava, la arena y el limo aportan estructura y estabilidad al sistema. Por otra parte, el agua permite el movimiento de las partículas sólidas de la mezcla al transportar a las más pequeñas entre las de mayor tamaño y activa las propiedades adhesivas de la arcilla”* (Guerrero, 2000), por lo tanto, para la evaluación estática y dinámica (físico-mecánica) de este tipo de suelo mezclado y consolidado, se realizan ensayos estandarizados que se ajustan a esta tipología de construcción o en su defecto se hace una adaptación de las normas de ensayo.

En campo, en coordinación con el técnico de laboratorio y el Ing. William, se obtuvo en total 43 probetas de 6” pulgadas y 3” pulgadas de diámetro con alturas de 30 y 15 cm respectivamente, obtenidas con un taladro extractor (Pinzuar modelo jg-230).



Extracción de probeta con taladro



Muestras de 6"x30cms (#33) y 3"x15cms (#10)



Preparación de muestras, perfilado y alineado



Probetas perfiladas y capinadas para ensayos

Figura 9. Extracción y preparación de probetas en tapia.

## 2.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS (TAPIA)

Seguendo los lineamientos de las normas INVIAS correspondientes a la clasificación de suelos (INV-E-123, INV-E-124, INV-E-125 e INV-E-126), se determina la granulometría por tamizado e hidrómetro, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para cuatro (4) especímenes.

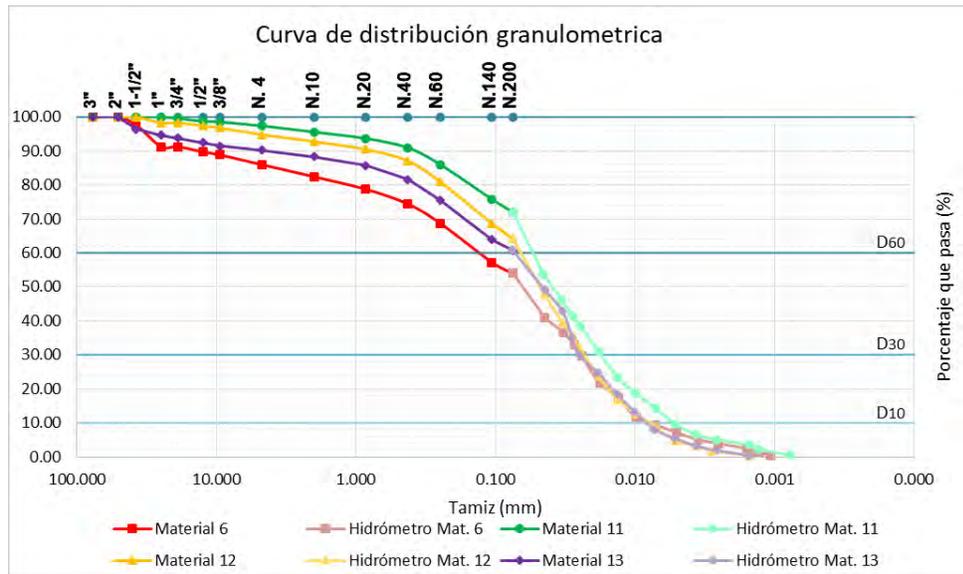


Figura 10. Curva de distribución granulométrica.

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*.

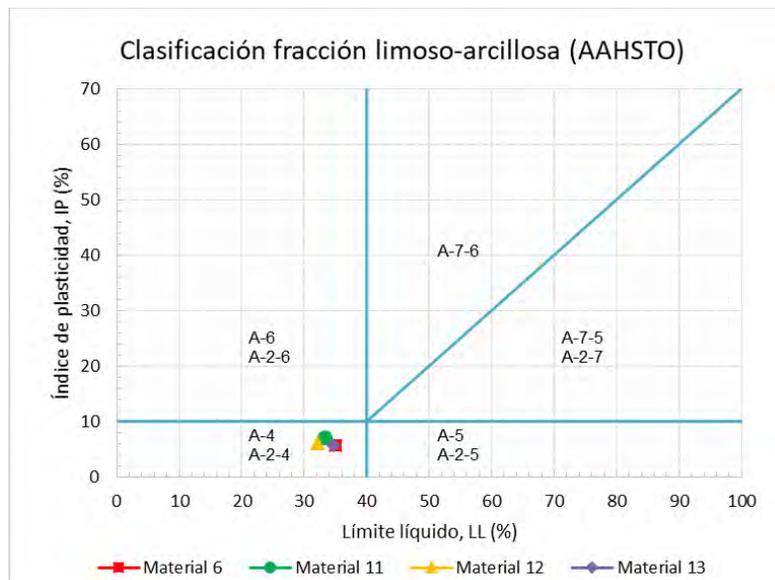


Figura 11. Clasificación gráfica para la fracción limoso-arcillosa (AASHTO).

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 a un *limo de baja plasticidad arenoso*.

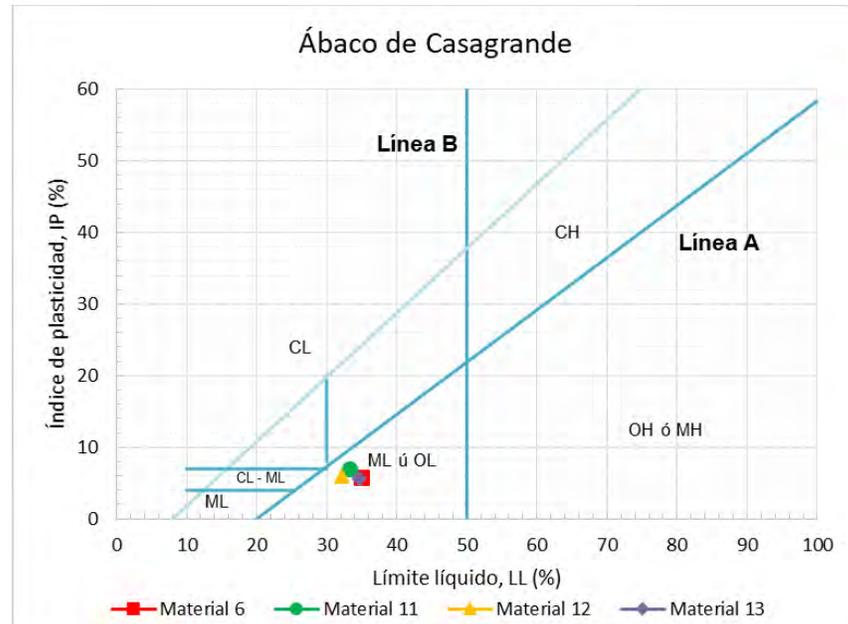


Figura 12. Abaco de Casagrande.

Tabla 1. Clasificación de suelo.

Clasificación de suelo		
Material	AAHSTO	S.U.C.S.
Material 6	A-4(2) Suelo limoso (Mediano a pobre como subgrado)	Limo baja plasticidad arenoso ML
Material 11	A-4(4) Suelo limoso (Mediano a pobre como subgrado)	Limo baja plasticidad con arena ML
Material 12	A-4(3) Suelo limoso (Mediano a pobre como subgrado)	Limo baja plasticidad arenoso ML
Material 13	A-4(2) Suelo limoso (Mediano a pobre como subgrado)	Limo baja plasticidad arenoso ML

A partir de los límites de Atterberg, se obtiene el grado de consistencia de cada espécimen analizado, dando como resultado una consistencia *media dura, sólida*.

Tabla 2. 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
Material 6	34.96	29.25	5.71	3.98	5.43	Media Dura, Sólida
Material 11	33.18	26.12	7.06	5.14	3.97	Media Dura, Sólida
Material 12	32.20	26.20	6.00	5.43	4.46	Media Dura, Sólida
Material 13	34.65	28.98	5.67	0.62	6.00	Media Dura, Sólida
Promedio	33.75	27.64	6.11	3.79	4.96	Media Dura, Sólida

## 2.2. PROPIEDADES ESTÁTICAS

### 2.2.1. Compresión inconfiada de la tapia, $E$ y $\mu$ .

La evaluación de la resistencia a la compresión no confinada, mediante la aplicación de carga en forma vectorial sometida a fuerzas opuestas, permite determinar el comportamiento estático en cuanto a la calidad de la tapia como material de fabricación del sistema portante, caracterizado por disponer una mezcla de suelos cohesivos (mayor dosificación) y granulares (menor dosificación).

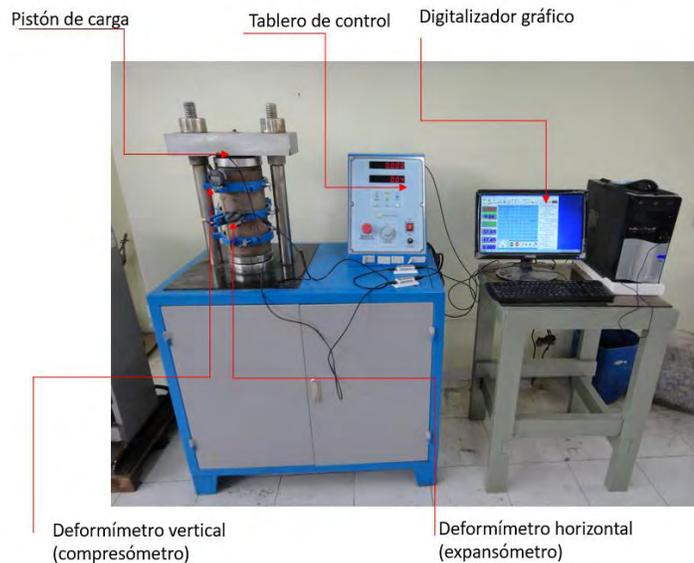


Figura 13. Equipo de ensayo de compresión simple (inconfiada) U. de Nariño.

### Preparación del espécimen.

Las probetas (10 unidades) para el ensayo a compresión inconfiada, constan de un diámetro aproximado de 15.86 cm y una altura de 30.38 cm.

Tabla 3. Especificaciones de probetas de tapia 6".

Datos de probetas TAPIA								
PROBETA #	PESO	DIAMETRO				D. promed	ALTURA	DENSIDAD
Numero	kg.	cm				cms	cms.	t/m3
1	9.17	15.90	15.98	15.82	15.90	15.90	30.40	1.52
2	8.63	15.80	15.88	15.72	15.80	15.80	30.50	1.44
3	8.96	15.86	15.94	15.78	15.86	15.86	30.40	1.49
4	8.88	15.82	15.90	15.74	15.82	15.82	30.25	1.49
5	8.57	15.86	15.94	15.78	15.86	15.86	30.30	1.43
6	8.90	15.90	15.98	15.82	15.90	15.90	30.45	1.47
7	8.80	15.94	16.02	15.86	15.94	15.94	30.45	1.45
8	8.73	15.87	15.95	15.79	15.87	15.87	30.28	1.46
9	8.62	15.45	15.53	15.37	15.45	15.45	29.61	1.44
10	9.06	16.24	16.33	16.16	16.24	16.24	31.13	1.51
Promedio								1.47

## Equipo

El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio MERO de la Universidad del Valle y en los laboratorios de materiales de la Universidad de Nariño, con un equipo Pinzuar pc 107D serie 118, el cual consta de una prensa hidráulica de velocidad controlada mecánicamente para llegar a una carga de rotura.

## Normas de referencia

Compresión inconfiada en muestras de suelos I.N.V-E 152-07.

## Cálculos y resultados

Mediante este ensayo se obtiene un valor en laboratorio de la resistencia de la tapia en términos de esfuerzos totales, se evalúa el comportamiento elástico del material en función de la relación carga vs deformación; a su vez se determina la proporción entre la expansión y la compresión conocida como la relación de Poisson.

Para calcular el módulo de esfuerzo cortante, estará en función del módulo de elasticidad  $E$  y la relación de Poisson  $\mu$ :

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad [1]$$

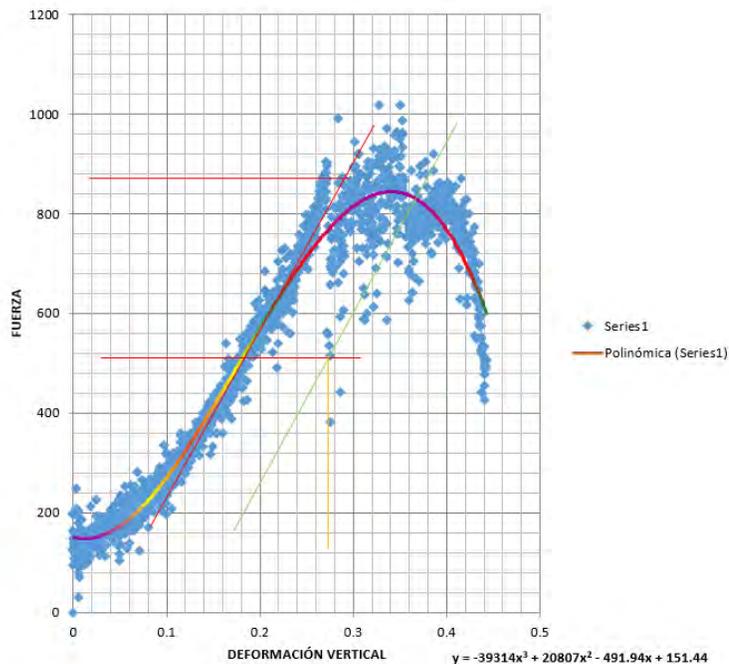


Figura 14. Ensayo de compresión simple curva de fuerza vs deformación.

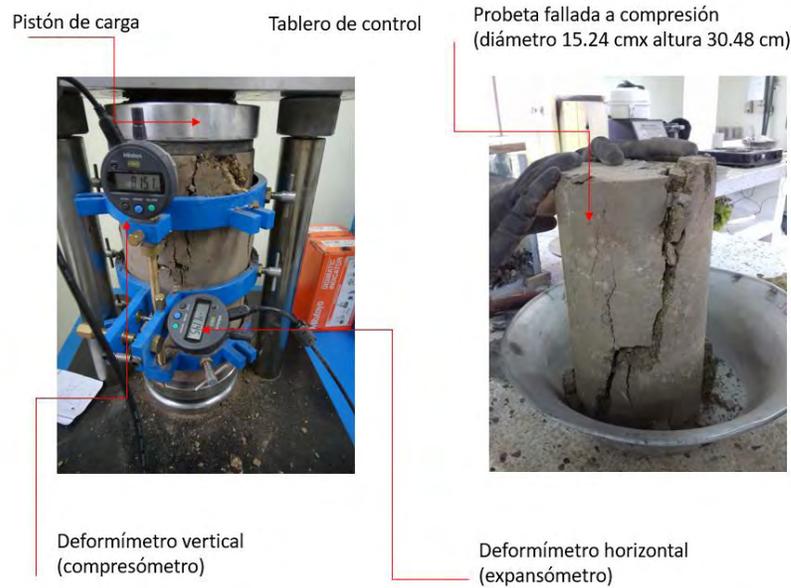


Figura 15. Equipo de ensayo de relación de Poisson

En la tabla 4, se presenta los resultados para las probetas en tapia.

Tabla 4. Datos del análisis de probetas de la tapia.

<b>Resistencia Máxima a Compresión, Modulo de Young, Relación de Poisson, Módulo de esfuerzo cortante</b>				
<b>PROBETA</b>	<b>Resistencia (t/m<sup>2</sup>)</b>	<b>E (t/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>G(t/m<sup>2</sup>)</b>
1	64	7897	0.28	3080
2	45	5571	0.50	1857
3	48	5960	0.37	2169
4	66	8075	0.28	3164
5	100	12313	0.18	5213
6	47	5827	0.38	2107
7	48	5912	0.38	2147
8	58	7159	0.31	2730
9	60	7360	0.30	2825
10	52	6400	0.35	2374
<b>Promedio</b>	<b>59</b>	<b>7247</b>	<b>0.33</b>	<b>2767</b>

### 2.2.2. Compresión inconfiada de la mampostería, E y $\mu$ .

Se realizó, además, la evaluación de la resistencia a la compresión no confinada de la mampostería de la fachada, constituida por ladrillo cocido y argamasa de cal, construida en el año 1932, mediante la aplicación de carga en forma vectorial sometida a fuerzas opuestas, para determinar la caracterización físico-mecánica y así modelar la estructura con los valores reales obtenidos en laboratorio.



Figura 16. Extracción y ensayo probetas de mampostería U. de Nariño

### Preparación del espécimen

Las probetas (9 unidades) para el ensayo a compresión inconfiada, constan de un diámetro aproximado de 7.84 cm y altura de 15.70 cm.

Tabla 5. Especificaciones de probetas de mampostería.

Datos de probetas FACHADA (LADRILLO+CALICANTO)								
PROBETA #	PESO	DIAMETRO				D. promed	ALTURA	DENSIDAD
Numero	gr.	cms				cms	cms.	t/m3
1	1278.00	7.72	7.80	7.71	7.74	7.74	17.93	1.51
2	1276.00	8.33	8.31	8.35	8.33	8.33	16.23	1.44
3	1195.00	7.68	7.76	7.72	7.72	7.72	16.20	1.58
4	1179.00	7.80	7.78	7.76	7.78	7.78	16.00	1.46
5	1198.00	7.76	7.74	7.81	7.77	7.77	16.69	1.51
6	1004.00	7.81	7.75	7.75	7.77	7.77	13.61	1.55
7	993.00	7.71	7.79	7.82	7.77	7.77	13.24	1.58
8	986.36	6.66	6.67	6.67	6.66	6.66	13.35	1.29
9	1334.49	9.00	9.02	9.02	9.02	9.02	18.06	1.75
Promedio								1.52

### Equipo

Se llevó a cabo en los laboratorios de materiales de la Universidad de Nariño, con un equipo FHT 56Z, el cual consta de una prensa hidráulica de velocidad controlada mecánicamente hasta llegar a la carga de rotura.

### Normas de referencia

Compresión inconfiada en muestras de suelos I.N.V-E 152-07

## Cálculos y resultados

Mediante este ensayo se obtiene un valor en laboratorio de la resistencia de la mampostería, en términos de esfuerzos totales, se evalúa el comportamiento elástico del material en función de la relación carga vs deformación, a su vez se determina la proporción entre la expansión y la compresión conocida como la relación de Poisson.

Tabla 6. Datos del análisis de probetas de mampostería.

Probeta	Carga Máxima		Deformación alcanzada		Esfuerzo máximo		Modulo de Young		Relación de Poisson
	(N)	(Ton)	(mm)	(m)	(Mpa)	(Ton/m2)	(Mpa)	(Ton/m2)	
Probeta 1	17935.23	1.79	2.79	0.0028	3.81	381.18	364.11	36411.25	0.10
Probeta 2	23544.44	2.35	3.30	0.0033	4.32	432.02	358.82	35882.26	0.12
Probeta 3	27641.25	2.76	3.56	0.0036	5.91	590.52	447.30	44730.07	0.13
Probeta 4	20528.54	2.05	4.06	0.0041	4.32	431.83	363.04	36303.75	0.12
Probeta 5	15204.02	1.52	5.08	0.0051	3.21	320.65	202.93	20292.56	0.16
Probeta 6	13349.11	1.33	2.29	0.0023	2.82	281.53	235.17	23516.87	0.12
Probeta 7	26751.60	2.68	3.81	0.0038	5.64	564.18	335.02	33501.91	0.17
Probeta 8	16566.19	1.66	2.84	0.0028	3.43	343.08	263.59	26358.70	0.13
Probeta 9	24849.29	2.48	4.27	0.0043	5.15	514.61	395.38	39538.06	0.13
Promedio	20707.74	2.07	3.56	0.0036	4.29	428.84	329.48	32948.38	0.13

### 2.3. PROPIEDADES DINÁMICAS

Los ensayos especializados correspondientes a las propiedades dinámicas de la tapia los realizó el ingeniero William Castillo en las instalaciones de la Universidad del Valle (laboratorio LINSE y MERO) como desarrollo de su tesis de maestría, y en calidad de asistencia se participó en la ejecución numérica y la interpretación de valores, tanto para el ensayo de velocidades ultrasónicas y vibraciones libres.

*“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.”* (Tovar Daniel 2016, 14). Aún, si una edificación está 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 afectada 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 (Reyes P 2017).

#### 2.3.1. Velocidades ultrasónicas de la tapia

El análisis de la velocidad de propagación en un espécimen, permite la transmisión de los impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas por unidad de tiempo,

mediante un transductor electro acústico, produciendo vibraciones longitudinales en el área de contacto que se convierten en una señal eléctrica y así se permite medir en un segundo transductor el tiempo de propagación. Con los resultados de este ensayo, se obtienen los parámetros mecánicos estáticos del material, como el módulo de elasticidad (E), módulo de esfuerzo cortante (G), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), y los parámetros de Lamé ( $\lambda$ ) Constante de Bulk (K).

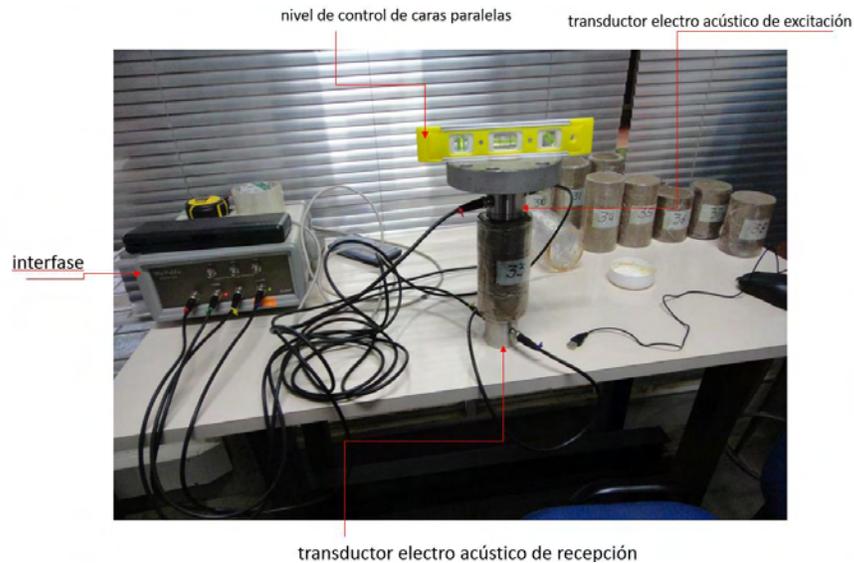


Figura 17. Equipo de medición de velocidades ultrasónicas, U. del Valle.

Los ensayos dinámicos están asociados a la medición de las ondas de compresión y corte, a través de una interfase para la cual se empleó el Sistema WAVEME P and S con base en el software respectivo, se realiza la configuración de los parámetros de control de señales y así se obtienen resultados durante el ensayo.

### Preparación del espécimen

Las probetas (10 unidades) para el ensayo dinámico de velocidades ultrasónicas, constan de un diámetro aproximado de 7.82 cm y altura de 11.49 cm.

Tabla 7. Especificaciones de probetas de tapia 3".

Datos de probetas TAPIA								
PROBETA #	PESO	DIAMETRO				D. promed	ALTURA	DENSIDAD
Numero	gr.	cms				cms	cms.	t/m3
30	858.80	7.80	7.89	8.03	7.90	7.91	11.70	1.50
31	945.80	7.80	7.81	7.82	7.79	7.81	13.59	1.45
32	960.50	7.82	7.81	7.79	7.82	7.81	13.80	1.45
33	921.20	7.79	7.81	7.78	7.79	7.79	13.30	1.45
34	947.00	7.75	7.80	7.86	7.83	7.81	13.71	1.44
35	869.10	7.78	7.91	7.80	7.81	7.83	12.38	1.46
36	604.00	7.77	7.81	7.80	7.81	7.80	8.95	1.41
37	720.80	7.79	7.81	7.81	7.80	7.80	10.05	1.50
38	669.60	7.82	7.79	7.83	7.80	7.81	10.29	1.36
39	541.90	7.78	7.81	7.83	7.81	7.81	7.10	1.59
Promedio								1.46

## Equipo

El ensayo de velocidades ultrasónicas se llevó a cabo en el laboratorio MERO de la Universidad del Valle, con el siguiente equipo.

- Un sistema generador de impulsos eléctricos y amplificador.
- Transductores o sensores de tipo P y S (emisor y receptor), los cuales convierten los impulsos eléctricos en impulsos mecánicos, dependiendo del tipo de onda a caracterizar.
- Dispositivo para la medición del intervalo de tiempo entre el inicio del impulso y la recepción
- Calibrador tipo pie de rey, para medir las dimensiones de la probeta.
- Balanza, requerida para cuantificar el peso del espécimen de la tapia.

## Normas de referencia

UNE-EN-14579, Determinación de la velocidad de propagación del sonido.

## Cálculos y resultados

Para la determinación del tiempo de viaje del pulso obtenido para los especímenes de las muestras, se emplea el criterio “corte con cero” para la gráfica de tiempo vs magnitud de onda.

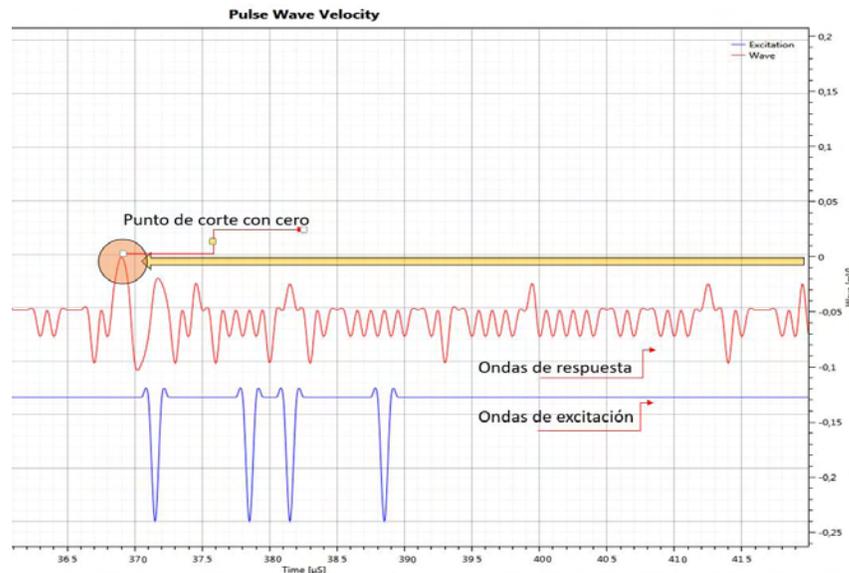


Figura 18. Gráfica a menor escala para cuantificar el recorrido de ondas S.

Se evalúa el tiempo de viaje del pulso para la onda P ( $T_p$ ) y S ( $T_s$ ) medido para el espécimen, cuando la onda ultrasónica corta el punto cero, por consiguiente, se cuantifica la velocidad de onda P o velocidad de propagación de onda primaria ( $V_p$ ) y la velocidad de onda S o velocidad de propagación de onda secundaria ( $V_s$ ) para

la muestra de la tapia, considerando una altura de la probeta  $L_p$ ; longitud de recorrido entre los transductores para obtener la velocidad de onda  $V_p$  y  $V_s$ .

Analizando las probetas, 10 en total, se tiene un consolidado de resultados.

Tabla 8. Resultado de los ensayos dinámicos de las probetas de tapia.

parámetros físico mecánicos - dinámicos de la tapia						
vel comp	vel corte	módulo elasticidad dinámico	módulo cortante	Relación de Poisson( $\mu$ )	stante de Lamé	Módulo Bulk (K)
$V_p = \frac{L_p}{T_p}$	$V_s = \frac{L_s}{T_s}$	$E = \frac{\rho \cdot V_s^2 \cdot (3 \cdot V_p^2 - 4 \cdot V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$	$G = \rho \cdot V_s^2$	$\mu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$	$\lambda = \rho \cdot (V_p^2 - 2 \cdot V_s^2)$	$K = \rho \cdot \frac{(3 \cdot V_p^2 - 4 \cdot V_s^2)}{3}$
vel comp	vel corte	módulo elasticidad dinámico	Modulo cortante	Relación de Poisson( $\mu$ )	stante de Lamé	Módulo Bulk (K)
$\frac{m}{s}$	$\frac{m}{s}$	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
790.54	285.37	34.58	12.13	0.43	68.84	76.93
727.96	338.50	46.50	17.07	0.36	44.81	56.19
707.69	282.21	33.35	11.87	0.41	50.88	58.79
910.96	317.42	42.96	15.01	0.43	93.61	103.62
920.83	368.82	56.92	20.27	0.40	85.79	99.30
606.86	329.26	41.71	16.15	0.29	22.57	33.33
630.28	285.94	33.39	12.18	0.37	34.82	42.94
738.97	273.10	31.58	11.11	0.42	59.13	66.54
664.52	324.92	42.24	15.73	0.34	34.33	44.82
533.84	234.32	22.59	8.18	0.38	26.10	31.55
723.24	303.99	38.35	13.77	0.39	50.39	59.57
promedio	promedio	promedio	promedio	promedio	promedio	promedio
723.24	303.99	38.56	13.95	0.38	51.93	61.23

Siguiendo los lineamientos de la clasificación de perfiles de suelo del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR 10, y comparando las probetas con las condiciones dinámicas de las velocidades de compresión y corte, se concluye, que el suelo se clasifica como un perfil tipo D, ya que, el promedio de  $V_s=303$  m/s, ocupa el rango  $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$ ; "es un perfil de suelo rígido, que cumple con los criterios de velocidad de la onda de corte" (NSR-10, p.A-22).

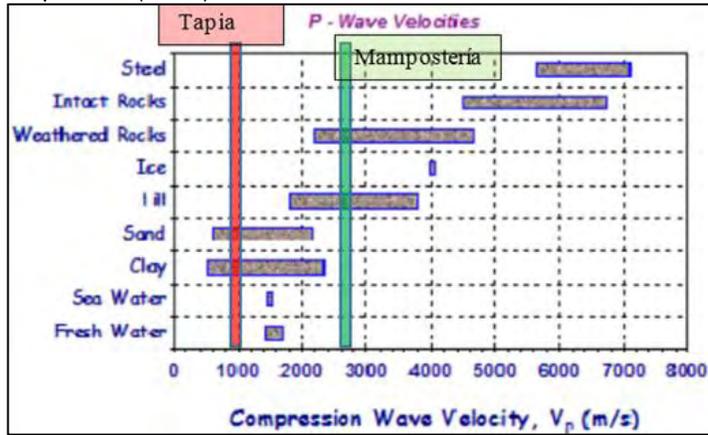
### 2.3.2. Velocidades ultrasónicas de la mampostería.

De la misma manera, se evaluó las muestras para determinar las características dinámicas de la fachada construida (1932) en mampostería (ladrillo cocido con argamasa de cal), como elemento secundario del modelo de análisis, y así poder estudiar la estructura acorde a los materiales y sus propiedades físico-mecánicas.

Tabla 9. Resultado de los ensayos dinámicos de las probetas de mampostería

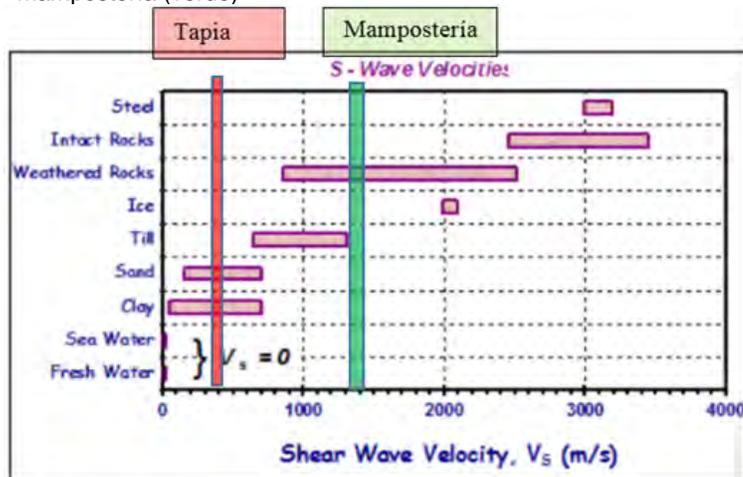
Parámetros físico mecánicos - dinámicos de la FACHADA (ladrillo cocido mas calicanto)							
vel comp	vel corte	módulo elasticidad dinámico	Modulo cortante G	Relación de Poisson( $\mu$ )	Constante de Lamé ( $\lambda$ )	Módulo Bulk (K)	Probeta #
vel comp	vel corte	Módulo elasticidad dinámico Mpa	Modulo cortante G Mpa	Relación de Poisson( $\mu$ ) Mpa	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) Mpa	Módulo Bulk (K) Mpa	número
2114.6	1035.3	446.31	144.3	0.342	313.3	409.48	1
2467.3	1308.5	692.74	230.4	0.304	358.4	512.06	2
2813.6	1337.3	751.21	240.7	0.354	584.1	744.52	3
2251.6	1168.4	557.19	183.7	0.316	314.8	437.34	4
2425.5	1207.0	603.52	196.1	0.335	399.6	530.35	5
3207.9	1562.0	1017.62	328.4	0.345	728.3	947.20	6
3168.1	1656.6	1116.82	369.4	0.312	612.2	858.41	7
2635.5	1325.0	740.77	241.9	0.3	473.0	634.19	promedio

Tabla 10. Rangos típicos de velocidades de onda a compresión  $V_p$  para varios materiales. Localización del material en tapia (rojo) y mampostería (verde)



Fuente: Pands User Manual, 2012.

Tabla 11. Rangos típicos de velocidades de onda a cortante  $V_s$  para varios materiales. Localización del material en tapia (rojo) y mampostería (verde)



Fuente: Pands User Manual, 2012.

Tabla 12. Valores típicos de E y  $\mu$  en suelos

Type of soil	E (N/mm <sup>2</sup> )	Type of soil	$\mu$
Clay		Clay (saturated)	0.4 - 0.5
Very soft	2-15	Clay (unsaturated)	0.1 - 0.3
Soft	5-25	Course (void ratio = 0.4 - 0.7)	0.15
Medium	15-50	Fine grained (void ratio = 0.4 - 0.7)	0.25
Hard	50-100	Rock	0.1 - 0.4 (depends on type of rock)
Sandy	25-250	Loess	0.1 - 0.3
Glacial till		Sandy clay	0.2 - 0.3
Loose	10-153	Sand (dense)	0.2 - 0.4
Dense	144-720	Ice	0.36
Very dense	478-1440	Silt	0.3 - 0.35
Loess	14-57	Concrete	0.15
Sand			
Silty	7-21		
Loose	10-24		
Dense	48-81		
Sand and gravel			
Loose	48-148		
Dense	96-192		
Shale	144-14400		
Silt	2-20		

Fuente: Engineering and Design SETTLEMENT ANALYSIS, USACE 2013.

### 2.3.3. Vibraciones libres de la tapia

#### *Razón de amortiguamiento y resonancia de frecuencia fundamental.*

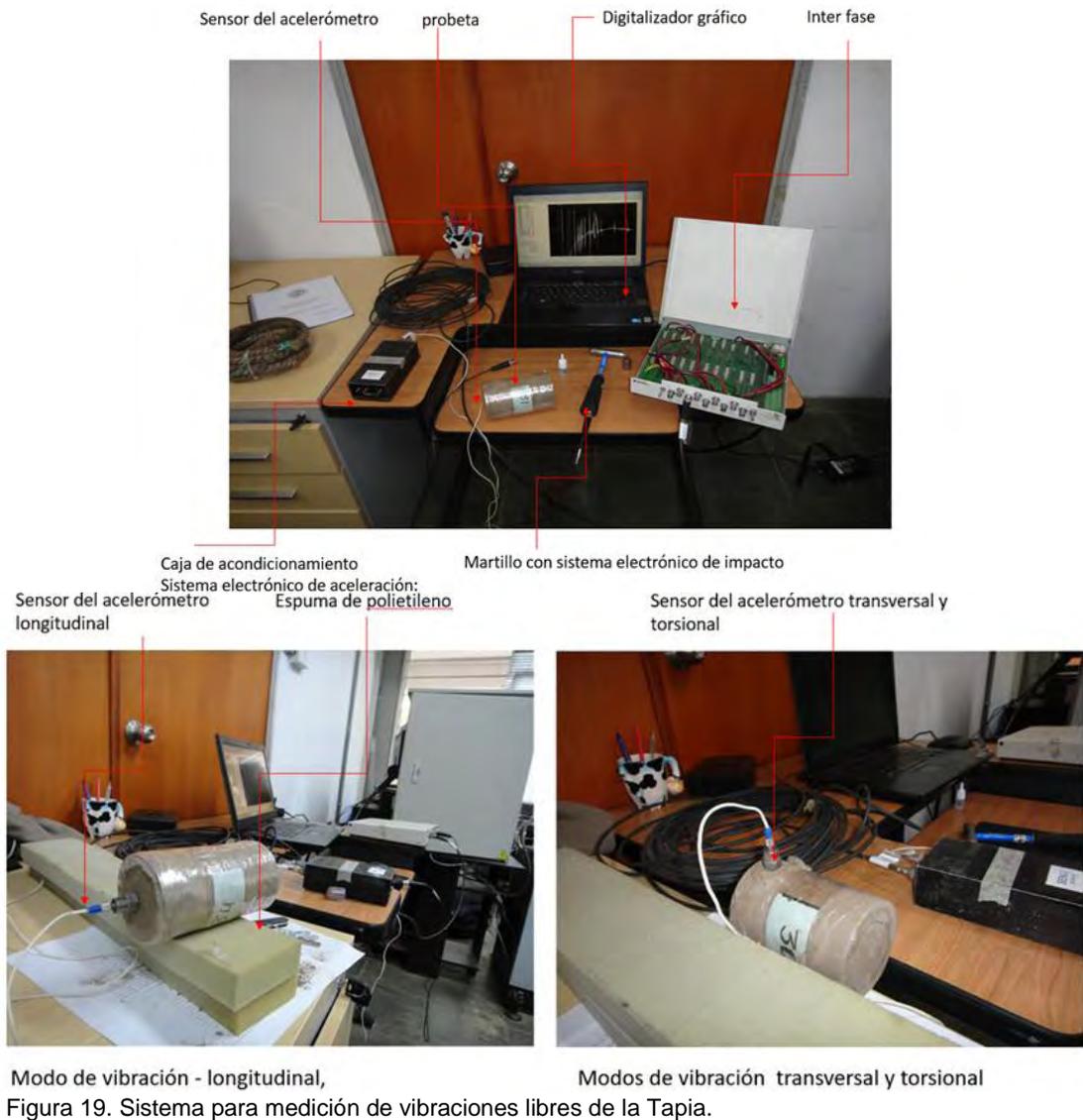
El amortiguamiento es una propiedad que permite interpretar la capacidad de disipación de energía de un espécimen; por lo tanto, la razón de amortiguamiento de un suelo, en este caso de la tapia ( $\epsilon$ ), es una variable significativa para descifrar la respuesta del sistema como un material, sometido 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 ( $\epsilon$ ) con base en la frecuencia y amplitud de onda, se pueden obtener parámetros como el módulo de elasticidad dinámico (E), módulo dinámico de rigidez (G) y relación dinámica de Poisson ( $\mu$ ).

#### *Equipo*

Se llevó a cabo en el laboratorio LINSE de la Universidad del Valle, con el siguiente equipo.

- Martillo con sistema electrónico de impacto, caracterizado por producir un tiempo corto para obtener una frecuencia de resonancia mayor.
- Acelerómetro con frecuencia de resonancia al menos 2 veces la frecuencia máxima de operación. Caracterizado por una masa inferior a 30 gr y con intervalo de frecuencia entre 100 a 10000 Hz.
- Espuma de polietileno como material de apoyo del espécimen, para permitir que la probeta vibre libremente, garantizando que su frecuencia de resonancia este por fuera del rango de uso (100 a 10 000 Hz).

- Mecanismo para análisis de frecuencia de onda digital o un contador de frecuencia para análisis de la señal de recepción emitida por el acelerómetro.



Para obtener la frecuencia natural mediante la aplicación de impacto con un martillo electrónico, se evalúa la respuesta dinámica del sistema a través de un acelerómetro adherido en la probeta de tapia, para una correcta medición, se debe golpear la muestra apoyada sobre un material que permita la vibración libre sin atenuarla; para el caso se empleó una espuma de polietileno.

El ensayo de vibraciones libres permite valorar las vibraciones longitudinales, transversales y torsionales con base en los esquemas presentados a continuación:

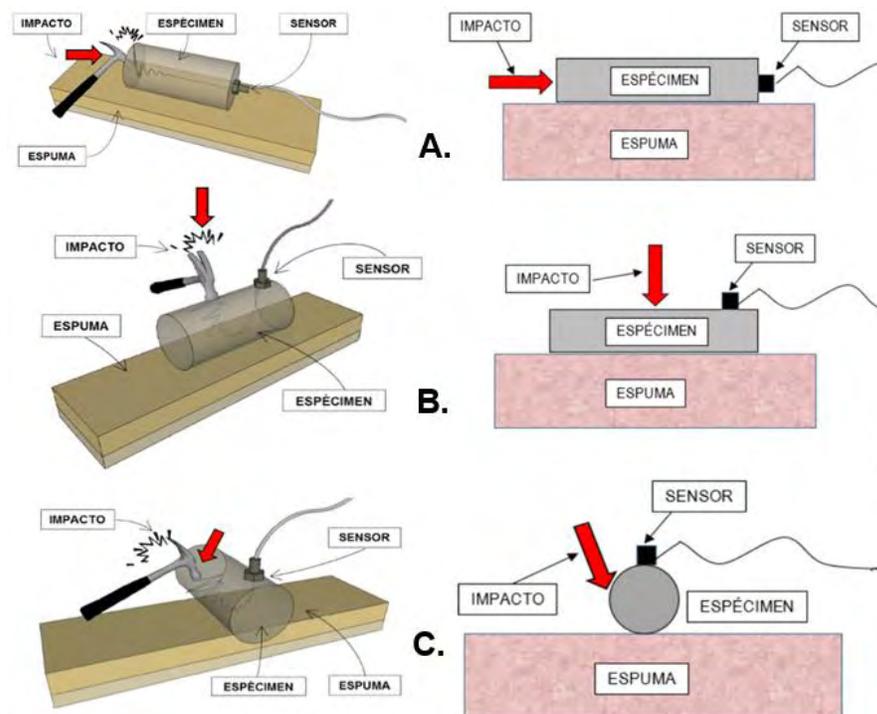


Figura 20. Esquemas del ensayo de vibración: A. Longitudinal, B. Transversal, C. Torsional.

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.

### Cálculos y resultados

Los datos de 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 vibración, además de la razón de amortiguamiento.

El proceso fue apropiado para el ensayo longitudinal y transversal, en cambio para el modo de vibración torsional, se 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; aun así, otras investigaciones, del grupo G7 de la escuela de ingeniería y geomática definieron *“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”* (Reyes P 2017).

Para efectos de la solución del sistema de desarrolló el siguiente algoritmo:

```

clear all;close all;clc;

%%% CARGAMOS DATOS %%%%
datos=daqread('P37 my4 LON 2.daq');

%%% FRECUENCIA DE MUESTREO %%%%%%%%%
Fs=4098;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T=1/Fs;
L=length(datos);
t=(1:L)/Fs;

% acelerometro=955.3mv/V
% caja acondicionamiento 100V/g;
acel=datos(:,1).*0.955; %% factor acelerometro
mart=datos(:,2).*0.1017;%% factor martillo

subplot(1,2,1),plot(t,acel,t,mart);grid on;legend('Acelerometro(g)', 'impacto(LbF)');title('Aceler
xlabel('t(segundos)');ylabel('Amplitud (g)');

%%% transformada rapida fft de Fourier %%%%
Y = fft(acel);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L;
subplot(1,2,2),plot(f,P1),grid minor;hold on;
title('Razon de amortiguamiento')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('Amplitud(g)')

```

Figura 21. Programación del software de procesos numéricos; MATLAB. Transformada Rápida de Fourier.

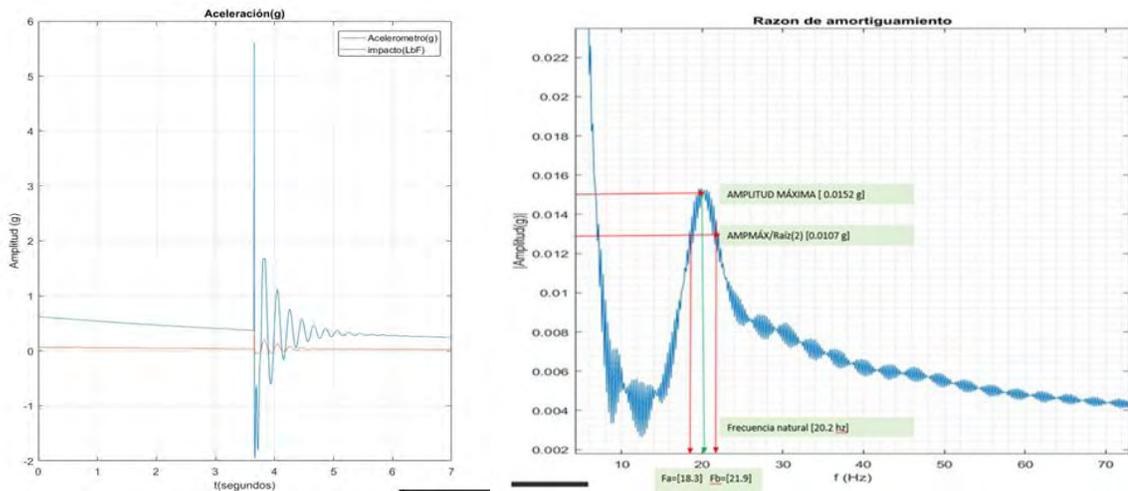


Figura 22. Expresión gráfica de los procesos numéricos en MATLAB para la medición de la razón de amortiguamiento longitudinal.

De la figura 22, se evalúa el valor para la frecuencia natural longitudinal de 20.2 Hz. En correspondencia, se procede a cuantificar el valor del Amortiguamiento Longitudinal, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{Fb - Fa}{2Fn} = \frac{21.9 \text{ Hz} - 18.3 \text{ Hz}}{2 * 20.2 \text{ Hz}} = 8.9\% \quad [2]$$

Tabla 13. Evaluación de vibraciones libres de la tapia.

Probeta	amortiguamiento long $\varepsilon = \frac{Fb - Fa}{2 * Fn}$	Módulo de elasticidad dinámico longitudinal Ed (Mpa)	$\mu$	$G$ longitudinal $G = \frac{Edin}{2(\mu_{din} + 1)}$ Mpa	amortiguamiento transversal	Módulo de elasticidad dinámico transversal Ed (Mpa)	$G$ transversal $G = \frac{Edin}{2(\mu_{din} + 1)}$ Mpa
P1	8.90	38.9	0.383	14.064	4.450	3.890	1.609
P2	8.01	35.0	0.383	12.657	3.605	3.851	1.303
P3	8.72	38.1	0.383	13.782	3.838	4.575	1.387
P4	7.57	33.1	0.383	11.954	3.253	4.298	1.176
P5	7.12	31.1	0.383	11.251	2.990	4.357	1.081
P6	6.68	29.2	0.383	10.548	2.737	4.376	0.989
P7	7.12	31.1	0.383	11.251	2.848	4.046	1.030
P8	8.37	36.6	0.383	13.220	3.263	4.022	1.180
P9	7.57	33.1	0.383	11.954	2.875	2.976	1.039
promedio	7.78	34.02	0.38	12.30	3.32	4.04	1.20

Con base en los resultados de vibraciones libres (E=34 MPa y G=12.30 MPa) comparados con velocidades ultra sónicas (E=39 MPa y G=14 MPa), la diferencia es de 13% para el módulo de elasticidad dinámico y un 12% para el módulo de esfuerzo cortante.

## 2.4. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LA TAPIA

*“La resistencia a tracción de los suelos es prácticamente nula. Solamente en los casos especiales de suelos cementados (que constituyen un caso de transición hacia el comportamiento de las rocas)”*, (Grupo Geotecnia Universidad Cantabria 2017). Para evaluar el comportamiento de la tapia con relación a la resistencia a tracción, se considera la tapia como un suelo cementado con propiedades especiales, ya que está conformado como un suelo compactado con aditivos orgánicos y minerales que hacen de él un material *“rocoso”*; por lo tanto, se evalúa la absorción de tracción, sometido a flexión como la acción simultánea de tensión y compresión en las fibras opuestas del elemento estructural, sometido a desplazamiento por acción inercial causado por una carga dinámica.

### *Preparación del espécimen.*

El espécimen a ensayar geoméricamente tiene una dimensión de 200x60x60 mm aproximadamente; para evaluar el comportamiento de la tapia con relación en la resistencia a tracción. De cada probeta del muestreo, se ensayó una probeta idéntica con pañete doble (3 cm superior e inferior) reforzada con malla de vena (prototipo 1) y malla electrosoldada (prototipo 2), adicionalmente una pasta de suelo cemento al 10%(dosificado por peso) y adición de fibra sintética (0.5% del peso).

### *Equipo*

El equipo es una máquina universal con sistema de soporte con dos apoyos fijos y una cabeza de aplicación de carga, registrado a través de un tablero electrónico digital sensotec, el cual funciona con un motor tipo fth 56z de ¼ hp.

### Normas de referencia

Se desarrolla con base en la norma I.N.V-E 415–07 que regula el ensayo resistencia a la flexión del concreto de la viga simple, cargada en el punto central. Normas de referencia AASHTO T 177– 03, ASTM C 293–00.

### Cálculos y resultados

El módulo de rotura se calcula con base en la siguiente relación:

$$R = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad [3]$$

Donde:

- ✓  $R$  = módulo de rotura, MPa (psi),
- ✓  $P$  = máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo, N (lbf),
- ✓  $l$  = longitud de la luz, mm (pulg),
- ✓  $b$  = ancho promedio del espécimen en el punto de fractura, mm (pulg),
- ✓  $d$  = altura promedio del espécimen, en el punto de fractura mm (pulg).



Figura 23. Secuencia de falla de la viga de tapia simple.

El ensayo de módulo de rotura se realiza con probetas obtenidas *in situ*, en las cuales la fractura que se genera en la viga por las tensiones de la fibra inferior, es vertical buscando la configuración de la matriz de agregados gruesos, y la manifestación en el 17% es súbita después de alcanzar la máxima resistencia.

El resultado de los ensayos a flexión, para las probetas tipo viga simple sin pañete de refuerzo, se describen para cada carga máxima, la deformación respectiva, además del cortante, momento flector y el módulo de rotura.

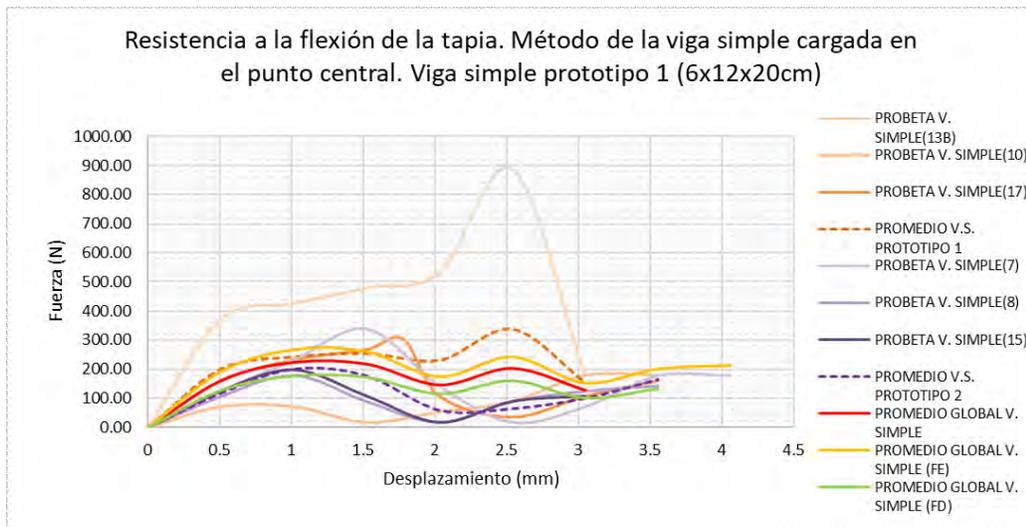


Figura 24. Curvas fuerza vs desplazamiento de las probetas tipo viga simple.

Las probetas de las vigas simples (sin pañete de refuerzo) se obtuvieron en dos prototipos o grupos, teniendo en cuenta su equivalente reforzado con malla de vena y malla electrosoldada, para obtener mayor fidelidad en el resultado de la investigación.

*Vigas simples (sin refuerzo) prototipo 1*

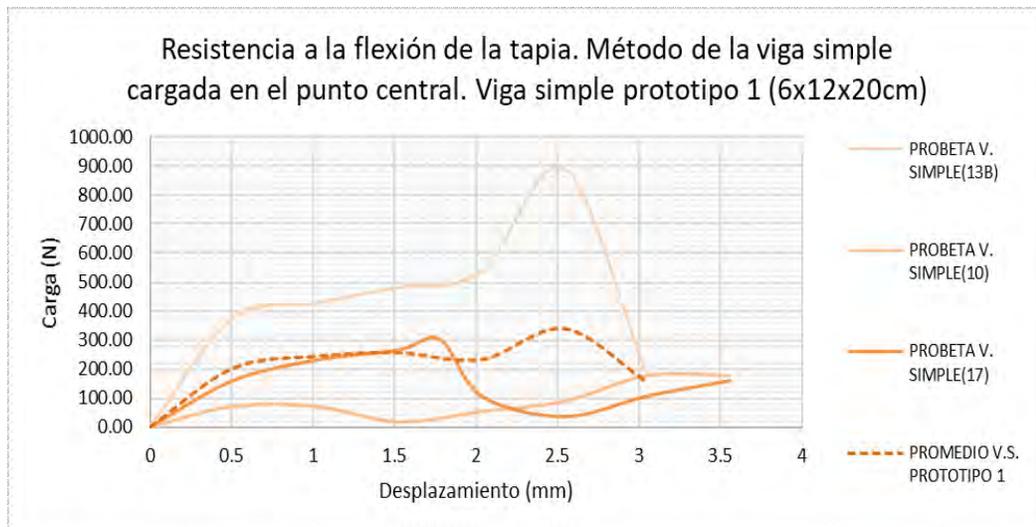


Figura 25. Curvas fuerza- desplazamiento de probetas prototipo 1 viga simple.

## Vigas simples (sin refuerzo) prototipo 2

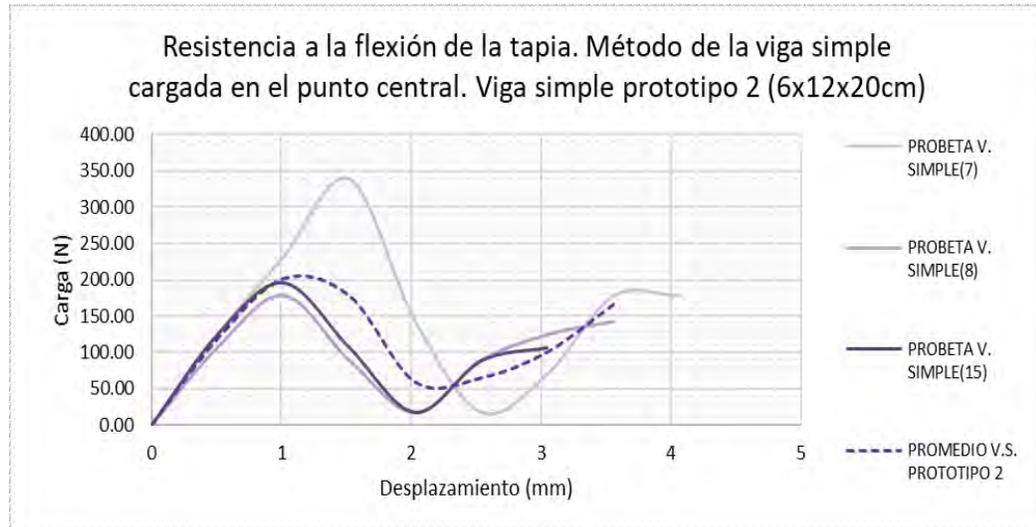


Figura 26. Curvas fuerza- desplazamiento de probetas prototipo 2 viga simple.

Tabla 14. Resultado de los ensayos de flexión de la tapia tipo vigas simples

VIGA SIN PAÑETE REFORZADO										
Probeta	Carga Máxima		Deformación alcanzada		Cortante máximo		Momento máximo		Modulo de Rotura	
	(N)	(Ton)	(mm)	(m)	(N)	(Ton)	(N.mm)	(Ton.m)	Mpa	Ton/m <sup>2</sup>
Probeta 1	889.64	0.089	2.54	0.0025	444.82	0.044	40033.99	0.0040	0.27	27.34
Probeta 2	177.93	0.018	3.56	0.0036	88.96	0.009	8807.48	0.0009	0.07	6.67
Probeta 3	302.48	0.030	1.78	0.0018	151.24	0.015	14670.23	0.0015	0.10	9.57
Probeta 4	456.68	0.046	2.62	0.0026	228.34	0.023	21170.57	0.0021	0.15	14.53
Probeta 5	338.06	0.034	1.52	0.0015	169.03	0.017	21382.60	0.0021	0.17	16.51
Probeta 6	177.93	0.018	1.02	0.0010	88.96	0.009	11609.86	0.0012	0.09	8.72
Probeta 7	195.72	0.020	1.02	0.0010	97.86	0.010	12819.77	0.0013	0.11	10.52
Probeta 8	237.24	0.024	1.19	0.0012	118.62	0.012	15270.74	0.0015	0.12	11.91
Probeta 9	346.96	0.035	1.91	0.0019	173.48	0.017	18220.66	0.0018	0.13	13.22
Probeta 10	416.35	0.042	2.29	0.0023	208.18	0.021	21864.79	0.0022	0.16	15.86
Probeta 11	277.57	0.028	1.52	0.0015	138.78	0.014	14576.53	0.0015	0.11	10.58
Promedio	346.96	0.035	1.91	0.0019	173.48	0.017	18220.66	0.0018	0.13	13.22

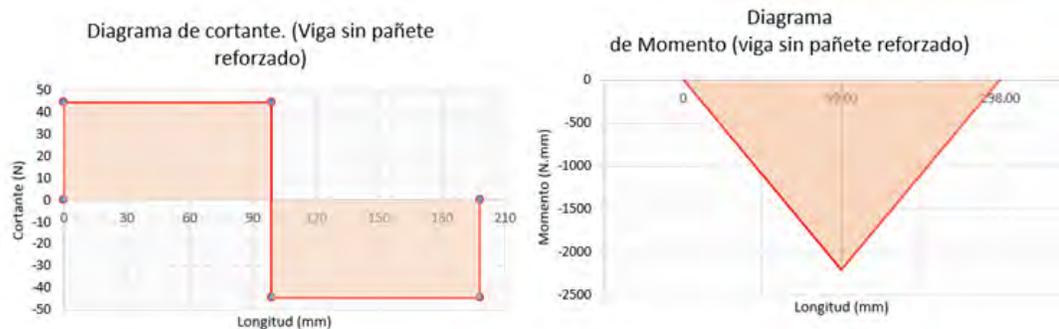


Figura 27. Diagrama de cortante y momento de la probeta tipo viga simple

Con base en los resultados de laboratorio por cada ensayo se evalúa la acción cortante y flectora, teniendo en cuenta que la tapia ofrece una respuesta a la flexión, la cual se permite graficar bajo la acción de esfuerzo cortante y momento flector.

#### 2.4.1. Alternativa de consolidación; pañete reforzado (Análisis experimental)

Paralelo a la probeta de viga simple se realizó un análisis de una probeta idéntica, con un pañete de 3 cm a cada cara y con un refuerzo en malla de vena y otras con malla electrosoldada; para el pañete se utilizó un suelo cemento al 10% y fibra sintética al 0.5% en peso. La fibra, cumple una función importante para manejar la variación de la composición del material, absorber esfuerzos reológicos por cambios de temperatura evitando fisuración y ofreciendo un buen aspecto estético.

El pañete se diseñó con base en valoración físico-mecánica por medio de cubos, permitiendo obtener parámetros de resistencia a la compresión de dicha pasta, ensayados a los siete (7), catorce (14) y veintiocho (28) días.



Figura 28. Diseño de la mezcla de suelo cemento para el pañete reforzado.

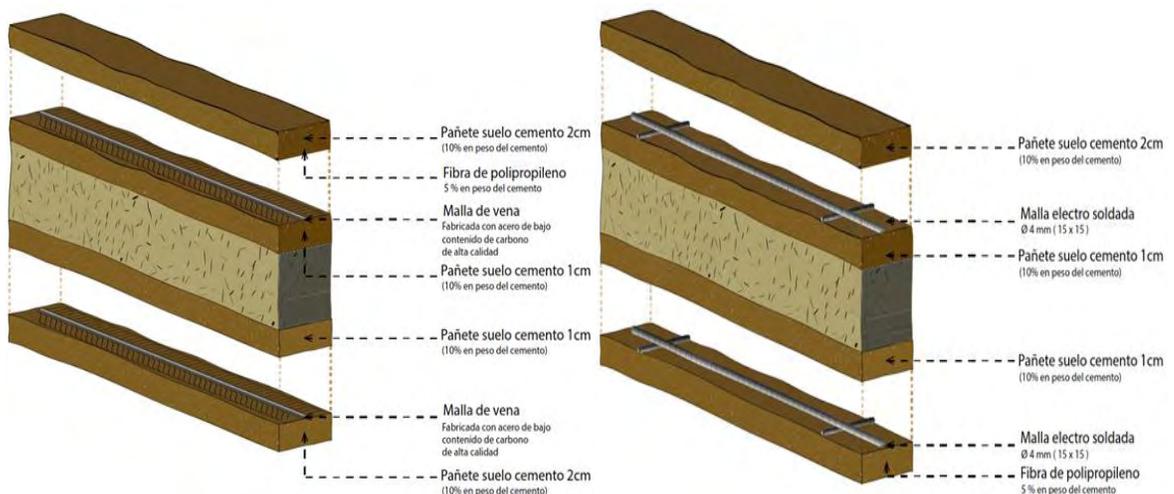


Figura 29. Viga con pañete reforzado con m. de vena y m. electrosoldada

El pañete de suelo cemento fibroreforzado que se aplicó por capas compactadas en ambos casos, en promedio tuvo una resistencia de 2.22 MPa.

Tabla 15. Resultado de los ensayos de compresión del material de pañete.

Resistencia a la compresion (Mpa)	
Probeta 1	1.66
Probeta 2	2.01
Probeta 3	2.00
Probeta 4	2.63
Probeta 5	2.76
Probeta 6	2.22
Probeta 7	1.89
Probeta 8	2.54
Probeta 9	2.27
Probeta 10	1.51
Probeta 11	3.05
Probeta 12	2.03
Promedio	2.22

*Proceso constructivo de pañete de suelo cemento fibroreforzado.*

- Se perfora la probeta con taladro.
- Se instalan los conectores con una pasta de cemento (tiempo de fraguado tres días de la pasta de conexión).
- Se aplica una lechada de agua cemento en la cara de contacto.
- Se aplica un centímetro de pañete.



Probeta de 20x6x6 cm



Perforación con taladro



Orificio para conectores



Conectores de caras  
En probeta de ensayo



Fibra sintética



Pañete compactado



Malla de vena sobre 1 cm  
Del pañete



Tensionamiento de conectores



Probeta fundida con doble  
pañete

Figura 30. Proceso constructivo de refuerzo con pañete de la viga en tapia.

- Se asienta la malla de vena o la malla electrosoldada.
- Se sujetan las mallas mediante conectores que cruzan la probeta.
- Se aplica dos centímetros de pañete.



Una vez se aplica el pañete por ambas caras se ensayan las probetas a los 28 días de fraguado el suelo cemento fibroreforzado.



Figura 32. Secuencia de falla de la probeta de la viga con pañete reforzado.

Aún se tiende a depreciar el trabajo a tensión de la tapia, pues la baja capacidad de respuesta a flexión de la misma, se mejora con la aplicación del pañete para disipar las tensiones actuantes.

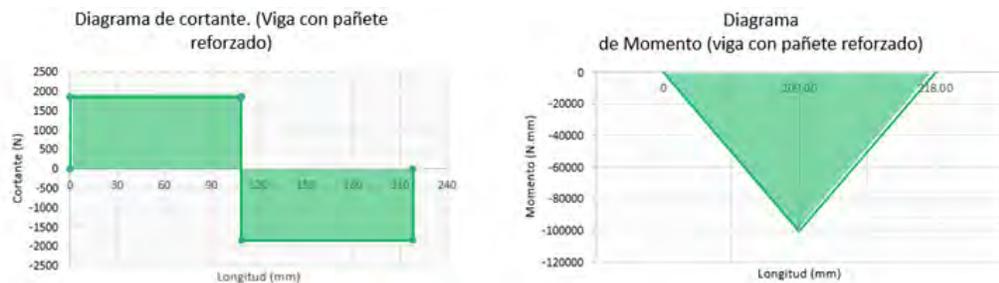


Figura 33. Diagrama de cortante y momento de la probeta con pañete reforzado

La probeta con base en la aplicación de “**pañete-reforzado**”, se comporta, en primera instancia con tendencia elástica y flexible en la absorción de esfuerzos, los cuales los regula de manera gradual manifestándose en la deformación y descartando la falla súbita en la mecánica de la fractura. En el proceso de aplicación de cargas, en el primer instante el pañete de suelo cemento reforzado con malla de vena y malla electrosoldada (en forma de sándwich) asume los esfuerzos en la posición externa de la probeta aunado a las fibras en polipropileno, absorbiendo así

las tensiones iniciales en las diferentes direcciones, cuya composición relaja y disipa hasta transmitir los esfuerzos al núcleo de tapia.

Es importante destacar la función del material de soldadura entre la matriz de la tapia y el pañete, para el caso una lechada de agua cemento, la que permitió una adecuada conexión, de tal manera que la fisura del pañete cruza en dirección de la matriz. Normalmente, esta fisura ocurre cuando la carga aplicada en promedio es de 11.34 kg; lo cual, con la adición de las fibras al pañete, se consigue disminuir por la acción de retracción plástica, con esto se logró evidenciar que el 83% de las probetas presentó un esfuerzo residual después de alcanzar la máxima carga.

Se destaca el aporte de los tensores que conectan las mallas de refuerzo de los pañetes, que hacen que el trabajo tienda a ser monolítico. Comparativamente, se realiza una superposición de las curvas de las probetas con pañete reforzado, (con malla de vena y una pasta de suelo cemento y malla electrosoldada con la misma pasta), para visualizar el estado de respuesta en la curva de esfuerzo-deformación y así obtener un promedio del comportamiento (línea punteada).

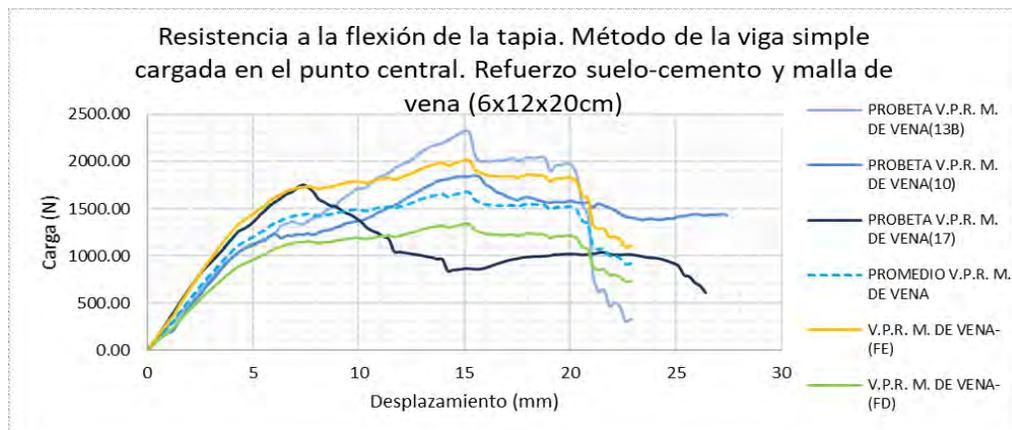


Figura 34. Superposición curvas fuerza-desplazamiento de probetas reforzadas con pañete reforzado con malla de vena.

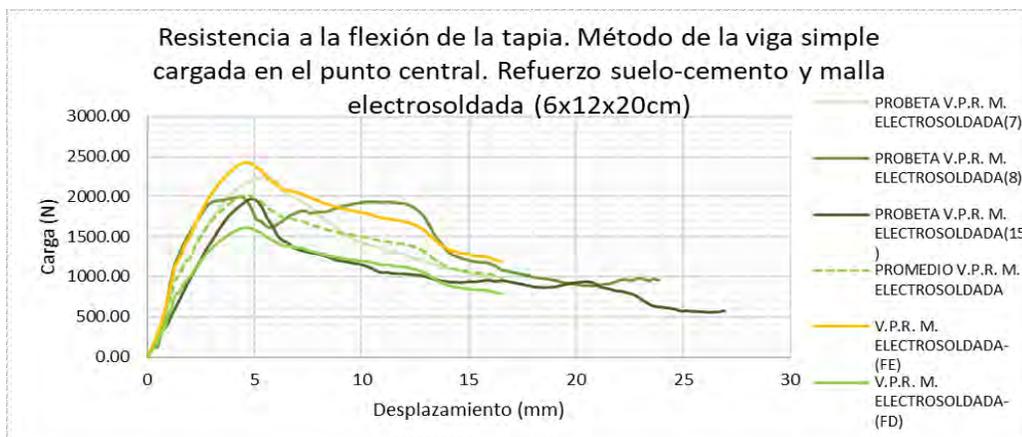


Figura 35. Superposición curvas fuerza-desplazamiento de probetas reforzadas con pañete reforzado con malla electrosoldada.

### Confrontación de resultados en las probetas con y sin refuerzo

Para cotejar los resultados de los ensayos en las vigas de tapia en igualdad de condiciones geométricas, se procede a:

- Calcular el módulo de rotura para la viga simple (sin refuerzo): ensayo - geometría "P6" 60x60x200 mm
- Se calcula la carga soportada para la viga simple "P12" 60x120x200 mm equivalente a la geometría de la viga reforzada, a partir de la viga simple sin refuerzo: ensayo - geometría 60x60x200 mm
- Se obtiene un factor de escala como la relación de cargas entre las probetas de ensayo y calculada

$$F_{sc} = \frac{P_{12}}{P_6} \quad [4]$$

- Con base en el factor de escala se amplifica la curva de la "P6" para obtener los resultados y curvas comparativas en iguales condiciones de la "P12" reforzada para obtener un estado comparativo.

Se obtuvo los promedios de las curvas como resultado de las probetas simples y reforzadas (prototipo 1: con malla de vena y prototipo 2: con malla electrosoldada). De manera comparativa con igual geometría y carga se observa que en promedio la capacidad de respuesta de las curvas evaluadas, se mejora en cuanto a la capacidad de carga en 4.9 veces (malla de vena) y 10 veces (malla electrosoldada), junto con su comportamiento elástico en cuanto a la deformación, que mejora en 7 veces (malla de vena) y 3 veces (malla electrosoldada).

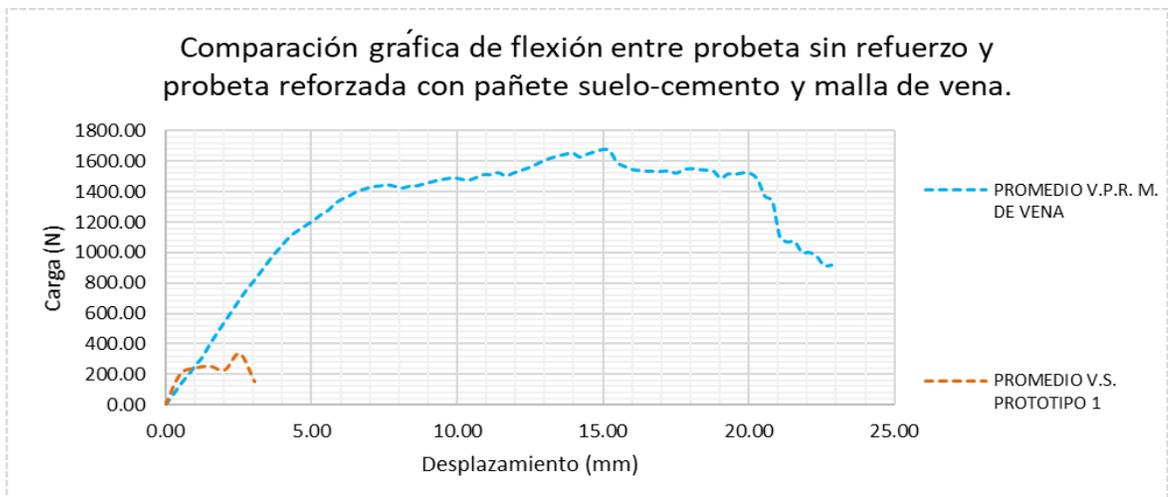


Figura 36. Curvas fuerza-desplazamiento de vigas simples-reforzadas (mv) con pañete reforzado con malla de vena. (Prototipo 1)

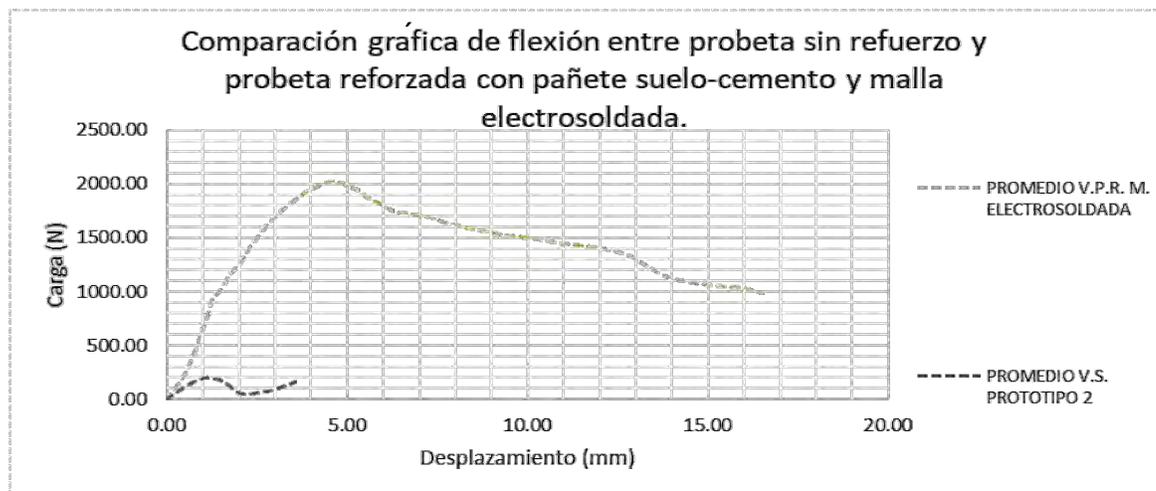


Figura 37. Curvas fuerza-desplazamiento de vigas simples-reforzadas (*me*) con pañete reforzado con malla electrosoldada. (Prototipo 2)

Para ilustrar el comportamiento de la curva se obtiene la ecuación de tendencia, *autoría de la investigación*, para la malla de vena y la malla electrosoldada:

$$F = -0.002\delta^5 + 0.0598\delta^4 + 0.2556\delta^3 - 28.568\delta^2 + 379.13\delta - 66.845 \quad [5]$$

(Malla de vena)

$$F = 0.008\delta^6 - 0.397\delta^5 + 6.8793\delta^4 - 47.658\delta^3 + 45.601\delta^2 + 730.47\delta - 79.961 \quad [6]$$

(Malla electrosoldada)

Se conjugan, además, las curvas de las probetas con pañete reforzado con malla de vena, malla electrosoldada y las curvas de la viga simple; con el propósito de interpretar la acción elástica y los esfuerzos residuales, así:

- Para las probetas consolidadas con pañete reforzado con malla electrosoldada, comparada con la malla de vena la capacidad de respuesta mejora un 20%
- El comportamiento de las probetas consolidadas con pañete reforzado con malla electrosoldada, comparada con la malla de vena ofrece una menor deformación con cargas mayores
- Las probetas consolidadas con pañete reforzado con malla electrosoldada, comparada con la malla de vena, se comportan más rígidas.
- Las probetas consolidadas con pañete reforzado con malla de vena comparada con aquella reforzada con electrosoldada, es más dúctil y ofrece mejores esfuerzos residuales.

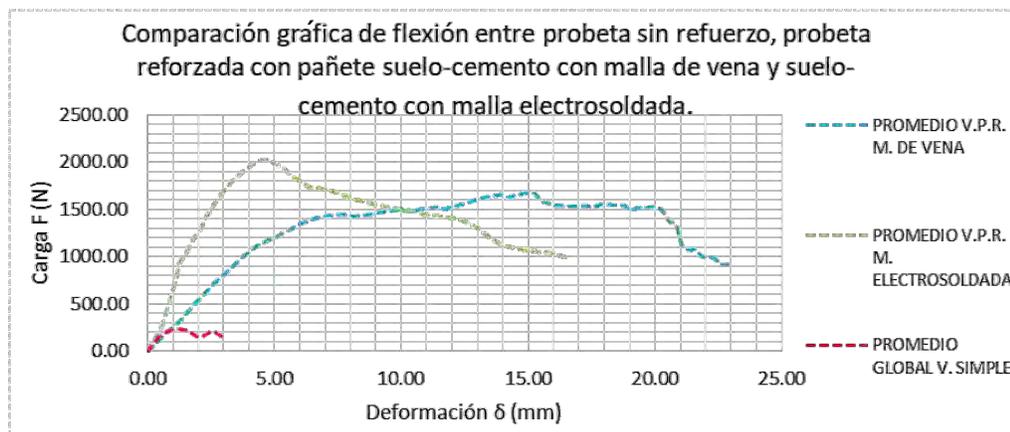


Figura 38. Curvas esfuerzo-deformación de vigas simples y vigas reforzadas con pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada.

Para las probetas con pañete reforzado prototipo 1 (suelo cemento, malla de vena y fibra de polipropileno) y prototipo 2 (suelo cemento, malla electrosoldada y fibra de polipropileno) para los ensayos a flexión, se describen la carga máxima, la deformación respectiva, el esfuerzo cortante, momento flector y el módulo de rotura, así:

Tabla 16. Ensayo de flexión de probetas (prototipo 1)

VIGA CON PANETE REFORZADO SUELO-CEMENTO Y MALLA DE VENA										
Probeta	Carga Máxima		Deformación alcanzada		Cortante máximo		Momento máximo		Modulo de Rotura	
	(N)	(Ton)	(mm)	(m)	(N)	(Ton)	(N.mm)	(Ton.m)	Mpa	Ton/m2
Probeta 1	2326.42	0.233	14.99	0.0150	2326.42	0.233	104688.90	0.0105	0.76	76.34
Probeta 2	1850.46	0.185	15.49	0.0155	1850.46	0.185	100850.08	0.0101	0.71	70.66
Probeta 3	1757.05	0.176	7.37	0.0074	1757.05	0.176	90048.69	0.0090	0.75	75.42
Probeta 4	1977.98	0.198	12.62	0.0126	1977.98	0.198	98529.22	0.0099	0.74	74.14
Probeta 5	2373.57	0.237	15.14	0.0151	2373.57	0.237	118235.07	0.0118	0.89	88.97
Probeta 6	1582.38	0.158	10.09	0.0101	1582.38	0.158	78823.38	0.0079	0.59	59.31
Promedio	1977.98	0.198	12.62	0.0126	1977.98	0.198	98529.22	0.0099	0.74	74.14

Tabla 17. Ensayo de flexión de probetas (prototipo 2)

VIGA CON PANETE REFORZADO SUELO-CEMENTO Y MALLA ELECTROSOLDADA										
Probeta	Carga Máxima		Deformación alcanzada		Cortante máximo		Momento máximo		Modulo de Rotura	
	(N)	(Ton)	(mm)	(m)	(N)	(Ton)	(N.mm)	(Ton.m)	Mpa	Ton/m2
Probeta 1	2246.35	0.225	5.33	0.0053	2246.35	0.225	135904.29	0.0136	1.03	103.34
Probeta 2	1992.80	0.199	4.32	0.0043	1992.80	0.199	129532.21	0.0130	1.08	107.98
Probeta 3	1975.01	0.198	4.83	0.0048	1975.01	0.198	124425.66	0.0124	0.92	91.92
Probeta 4	2071.39	0.207	4.83	0.0048	2071.39	0.207	129954.05	0.0130	1.01	101.08
Probeta 5	2485.67	0.249	5.79	0.0058	2485.67	0.249	155944.86	0.0156	1.21	121.30
Probeta 6	1657.11	0.166	3.86	0.0039	1657.11	0.166	103963.24	0.0104	0.81	80.86
Promedio	2071.39	0.207	4.83	0.0048	2071.39	0.207	129954.05	0.0130	1.01	101.08

De los ensayos realizados se obtiene un módulo de rotura en promedio igual a 0.74 MPa para las probetas con pañete reforzado con malla de vena, 1.01 MPa para aquellas reforzadas con malla electrosoldada y 0.14 MPa para probetas simples (sin pañete reforzado). Con base en esta información, es posible determinar la distancia

de los muros de apoyo que requiere una tapia sometida a carga dinámica por acción sísmica, y evaluar el comportamiento adecuado antes de la falla en el pandeo del plano lateral.

2.4.2. Ecuación para determinar la distancia de muros de apoyo en la tapia.  
(Modelo numérico)

Como respuesta en el plano horizontal, ante la acción dinámica se realiza la evaluación del pandeo local de la tapia, para ello se plantea el proceso numérico *autoría de la investigación* con base en la siguiente consideración: los muros perpendiculares sirven de apoyo en el plano horizontal cuando actúan las cargas dinámicas.

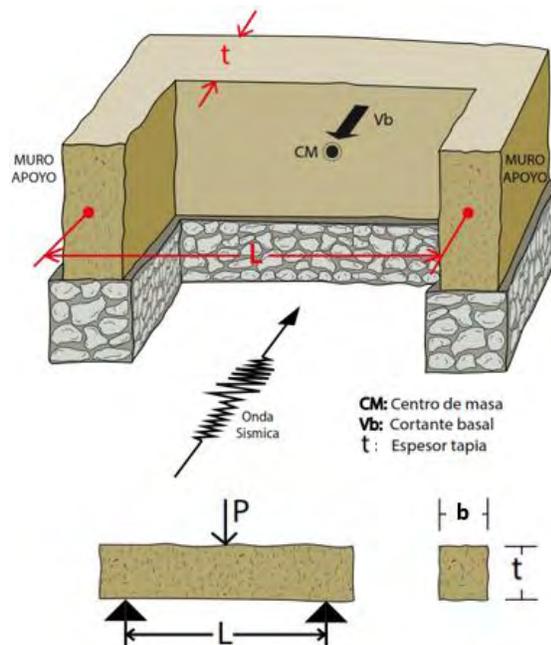


Figura 39. Distancia entre muros de apoyo para una tapia excitada por acción sísmica

- ✓  $b$ : base del elemento
- ✓  $t$ : altura del elemento
- ✓  $P$ : carga puntual
- ✓  $V_b$ : cortante basal
- ✓  $l$ : luz entre apoyos
- ✓  $R_c$ : módulo de rotura calculado del elemento en donde el factor de seguridad

$$F_s = 2 \quad R_c = \frac{R}{F_s} \quad [7]$$

- ✓  $R$ : módulo de rotura sin factor de seguridad
- ✓  $W$ : peso del elemento
- ✓  $V$ : volumen del elemento
- ✓  $S_a$ : aceleración espectral
- ✓  $\rho$ : densidad del elemento

$$R = \frac{3Pl}{2bt^2} \quad [8]$$

$$Vb = W * Sa \quad [9]$$

Se reemplaza [9] en [8] tomando el cortante basal como el vector resultante aplicado en el centro de masa del muro tapial, donde:

$$R = \frac{3 * Vb * l}{2bt^2} = \frac{3 * W * Sa * l}{2bt^2} \quad [10]$$

$$V = b * t * l \quad [11]$$

$$W = b * t * l * \rho \quad [12]$$

Se reemplaza [12] en [10]:

$$R = \frac{3 * (b * t * l * \rho) * Sa * l}{2 * b * t * l^2} \quad [13]$$

$$R = \frac{3 * \rho * Sa * l^2}{2t} \quad [14]$$

Se despeja la longitud "l" como la separación entre apoyos

$$l^2 = \frac{2 * R * t}{3 * \rho * Sa} \quad [15]$$

Por lo tanto, la ecuación para evaluar la longitud de separación entre muros tapiales de apoyo para un comportamiento aceptable por pandeo lateral de la tapia, es:

$$l = \sqrt{\frac{2 * Rc * t}{3 * \rho * Sa}} \quad [16]$$

Aplicación de la fórmula a la evaluación de las tapias del teatro imperial:

- ✓ *t*: altura o espesor de la tapia = 0.90 m
- ✓ *Rc*: módulo de rotura calculado, factor de seguridad

$$F_s = 2, \quad R_c = \frac{R}{F_s} = \frac{13.22}{2} = 6.61 \frac{T}{m^2} \cong 7 \frac{T}{m^2}$$

- ✓ *Sa*: aceleración espectral para un periodo corto = 0.8125%g (NSR-10\_numeral A.2.6)
- ✓ *ρ*: densidad del elemento = 1.46 T/m<sup>3</sup>

*Distancia máxima entre muros perpendiculares, tapia sin refuerzo.*

Para la tapia sin refuerzo la distancia máxima entre muros perpendiculares como elementos de apoyo para ofrecer una respuesta adecuada es de:

$$l = \sqrt{\frac{2 * \frac{14}{2} * 0.90}{3 * 1.46 * 0.8125}} = \mathbf{1.88m}$$

*(Ecuación de operación numérica # 1, Autoría de la investigación)*

*Distancia máxima entre muros perpendiculares, tapia con pañete reforzado con malla de vena.*

$$l = \sqrt{\frac{2 * \frac{74}{2} * 0.90}{3 * 1.46 * 0.8125}} = \mathbf{4.32m}$$

*(Ecuación de operación numérica # 2, Autoría de la investigación)*

*Distancia máxima entre muros perpendiculares, tapia con pañete reforzado con malla electrosoldada.*

$$l = \sqrt{\frac{2 * \frac{101}{2} * 0.90}{3 * 1.46 * 0.8125}} = \mathbf{5.05m}$$

*(Ecuación de operación numérica # 3, Autoría de la investigación)*

#### *2.4.3. Ecuación para proyectar los resultados de laboratorio al modelo real de la tapia (Modelo numérico)*

Con base en los resultados de laboratorio a partir de los ensayos, se hace una proyección para estimar la resistencia del muro en tapia con un promedio de 0.90m de espesor por un metro de longitud.

- a.)** Se analiza la probeta tipo (1) con medidas:  $b \times t \times l = 6 \times 6 \times 20$  cm, tomadas “*In situ*”. La fórmula para obtener el módulo de rotura  $R$  de tapia se calcula con base en la siguiente expresión:

$$R = \frac{3Pl}{2bt^2} \quad [17]$$

Donde:

- ✓ *b*: base del elemento
- ✓ *t*: altura del elemento
- ✓ *P*: carga puntual
- ✓ *V<sub>b</sub>*: cortante basal
- ✓ *l*: luz entre apoyos
- ✓ *R<sub>c</sub>*: módulo de rotura calculado del elemento en donde el factor de seguridad

$$F_s = 2, \quad R_c = \frac{R}{F_s}$$

- ✓ *R*: módulo de rotura sin factor de seguridad
- ✓ *E*: módulo de elasticidad del elemento
- ✓ *I*: momento de inercia
- ✓ *V*: volumen del elemento
- ✓ *ρ*: densidad del elemento

A continuación, se despeja la carga puntual aplicada *P*:

$$P = \frac{2bt^2R}{3l} \quad [18]$$

Se evalúa la probeta (*tipo 1*) equivalente *b x t x l* = 100x90x100 cm en partes (*b* = 100/6 = 16.7 veces) x (*t* = 90/6 = 15 veces) x (*l* = 100/20 = 5 veces). De la probeta ensayada.

$$R = \frac{3P(5l)}{2(16.7b)(15t)^2} \quad [19]$$

$$R = \frac{1}{750} * \frac{3Pl}{2bt^2} \quad [20]$$

De donde:

$$750R = \frac{3Pl}{2bt^2} \quad [21]$$

Esto significa que el módulo de rotura equivalente para un metro de longitud de tapia es 750 veces el de la probeta.

$$R(\text{tapia}) = 750R(\text{probeta})$$

El momento final para la probeta en calidad de viga simplemente apoyada, es:

$$M_f = \frac{Pl}{4EI} \quad [22]$$

Se reemplaza la igualdad [18] en [22]:

$$M_f = \frac{2bt^2R}{3l} * \frac{l}{4EI} \quad [23]$$

$$Mf = \frac{\left(\frac{2 * b * t^2 * R}{3 * t}\right) t}{4E\left(\frac{1}{12} * b * t^3\right)} \quad [24]$$

$$Mf = \frac{2R(tapia)}{E * t} \quad [25]$$

Ahora para obtener el momento final de la tapia o probeta equivalente  $b \times t \times l = 100 \times 90 \times 100 \text{ cm}$ .

La ecuación para obtener el momento que puede absorber la tapia sin pañete de refuerzo por metro de longitud es:

$$Mf = \frac{2 * (750 * R(probete))}{E * t} \quad [26]$$

Teniendo en cuenta el factor de seguridad la fórmula se aplica en función del módulo de rotura calculado.

✓  $R_c$ : módulo de rotura calculado del elemento, donde factor de seguridad  $F_s=2$

$$R_c = \frac{R(probete)}{F_s}$$

La ecuación queda así:

$$Mf = \frac{(750 * R(probete))}{E * t} \quad [27]$$

Aplicación de la fórmula para la proyección de resultados de laboratorio al modelo real de la tapia.

*El momento capaz de absorber una tapia de 0.90 m para una probeta sin pañete reforzado con un módulo de rotura de 13.22 t/m<sup>2</sup>*

$$Mf = \frac{750 * \frac{13.22 \text{ t}}{\text{m}^2}}{7247 \text{ t/m}^2 * 0.90 \text{ m}} = 1.52 \text{ t} - \text{m}$$

**b.)** Se analiza la probeta tipo (2) con medidas:  $b \times t \times l = 6 \times 12 \times 20 \text{ cm}$ , tomadas "In situ". La fórmula para obtener el módulo de rotura R de tapia, se calcula con base a la siguiente expresión [18]

$$R = \frac{3Pl}{2bt^2}$$

Se evalúa la probeta (*tipo 2*) equivalente  $b \times t \times l = 100 \times 90 \times 100$  cm en partes ( $b = 100/6 = 16.7$  veces)  $\times$  ( $t = 90/12 = 7.5$  veces)  $\times$  ( $l = 100/20 = 5$  veces). De la probeta ensayada.

$$R = \frac{3P(5l)}{2(16.7b)(7.5t)^2} \quad [28]$$

$$R = \frac{1}{187.5} * \frac{3Pl}{2bt^2} \quad [29]$$

De donde:

$$187.5R = \frac{3Pl}{2bt^2} \quad [30]$$

Esto significa que el módulo de rotura equivalente para un metro de longitud de tapia es 187.5 veces el de la probeta.

$$R(\text{tapia}) = 187.5R(\text{probeta})$$

Se sabe por la ecuación [25] que:

$$Mf = \frac{2R(\text{tapia})}{E * t}$$

$$Mf(mv) = \frac{2 * (187.5 * R(\text{probeta}))}{E * t} \quad [31]$$

Teniendo en cuenta el factor de seguridad la fórmula se aplica en función del módulo de rotura calculado.

- ✓  $R_c$ : módulo de rotura calculado del elemento en donde el factor de seguridad  $F_s = 2$

$$R_c = \frac{R(\text{probeta})}{F_s}$$

La ecuación queda así:

$$Mf(mv) = \frac{(187.5 * R(\text{probeta}))}{E * t} \quad [32]$$

*El momento capaz de absorber una tapia de 0.90 m para una probeta con pañete reforzado con malla de vena que brinda un módulo de rotura de 74.14 t/m<sup>2</sup>*

$$Mf(mv) = \frac{187.5 * \frac{74.14 \text{ t}}{\text{m}^2}}{7247 \text{ t/m}^2 * 0.90 \text{ m}} = 2.14 \text{ t} - \text{m}$$

El momento capaz de absorber una tapia de 0.90 m para una probeta con pañete reforzado con malla electrosoldada que brinda un módulo de rotura de 101.08 t/m<sup>2</sup>.

$$Mf(mv) = \frac{187.5 * \frac{101.08 t}{m^2}}{7247 t/m^2 * 0.90m} = 2.91 t - m$$

#### 2.4.4. Calibración del modelo.

Para validar el trabajo de laboratorio se modela las probetas, para el caso de la tapia simple (sin refuerzo), para confrontar los resultados, en cuanto a momentos, cortante y flechas como resultado de las deflexiones y la diferencia fue de un 1.7% en cuanto a los procesos experimentales y teóricos.

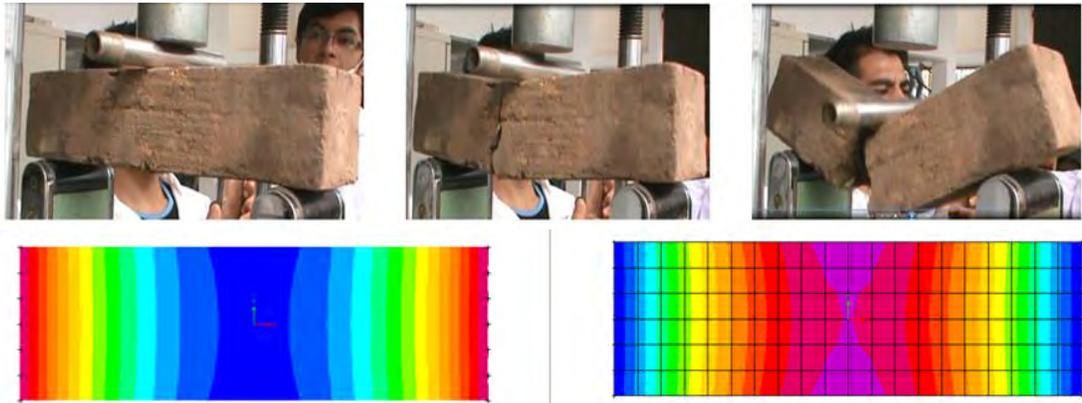


Figura 40. Correlación experimental y modelos numéricos por simulación probeta de tapia simple (sin refuerzo).

En cuanto al pañete reforzado se realizó un proceso iterativo, para obtener el módulo de elasticidad de una sección compuesta incluido el acero de refuerzo, de la siguiente manera:

- Se inicia el modelo de manera iterativa, con parámetros físico mecánicos como el módulo de elasticidad de la tapia simple (sin refuerzo) entre otros y se calcula las fuerzas, esfuerzos y desplazamiento; estos, se comparan con los datos experimentales del laboratorio (probetas fabricadas con pañete reforzado).
- De no cumplir con la condición anterior se incrementa los datos y se compara con los del modelo desarrollado por elementos finitos (fuerzas, esfuerzos y desplazamiento), si estos son muy similares se los define como parámetros de la sección compuesta y se procede a utilizarlos en el modelo del edificio (teatro).

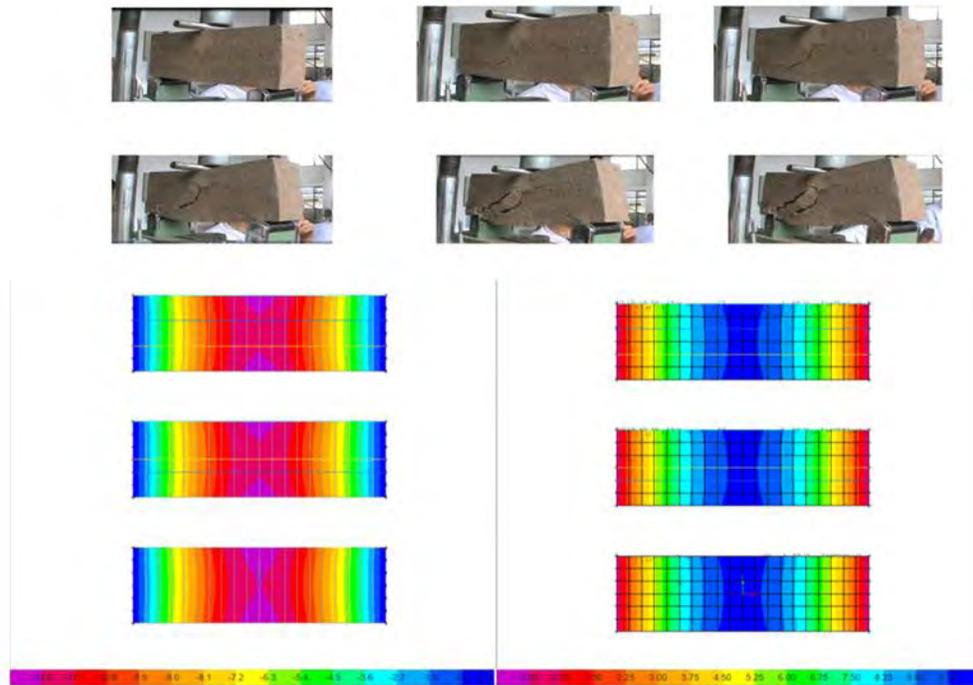


Figura 41. Correlación experimental-modelos numéricos por simulación probeta con pañete reforzado.

- ✓ Módulo de elasticidad de la tapia simple (Ets):

*Ets: 73 MPa*

- ✓ Módulo de elasticidad de la tapia simple reforzada con pañete en malla de vena (Emv):

*Emv: 225 MPa*

- ✓ Módulo de elasticidad de la tapia simple reforzada con pañete en malla electro soldada (Eme):

*Eme: 760 MPa*

## 2.5. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Es un 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 que genera una malla de aberturas cada vez más pequeñas para aproximarse a la realidad. La ingeniería computacional ha desarrollado diferentes softwares, para la solución de este tipo de modelos numéricos, que permiten la simulación e interacción de variables como la eficiencia en procesos experimentales que involucren la estática y la dinámica tanto en mallas como en sólidos; considerándose como una herramienta valiosa que se aproxima a la respuesta real del sistema estructural en tierra.

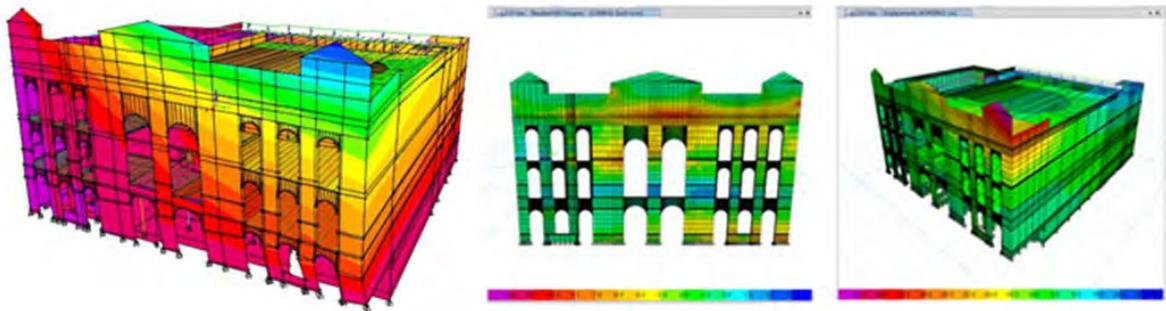


Figura 42. Modelo de la estructura en elementos finitos (FEA) – Teatro Imperial.

El análisis de una estructura en tapia se puede realizar en el rango lineal y no lineal, es decir, que el sistema estructural puede trabajar en el rango elástico e inelástico; esto significa que se puede llevar a cabo el análisis no lineal, cuando no cumple con la ley de Hooke, ya que las cargas causan relajación de la rigidez y al suspenderlas no se recupera al estado inicial de equilibrio. A la luz de la tecnología aplicada, el análisis no lineal a los muros en tapia implica definir como fallará la estructura, por esta razón, se realizó el análisis de la capacidad de los muros en tapia hasta llegar al colapso; entendiendo los cuatro casos de mecánica de la fractura (aparición de la fisura, la fisura alcanza la mitad del muro, la fisura afecta las tres cuartas partes y el colapso final).

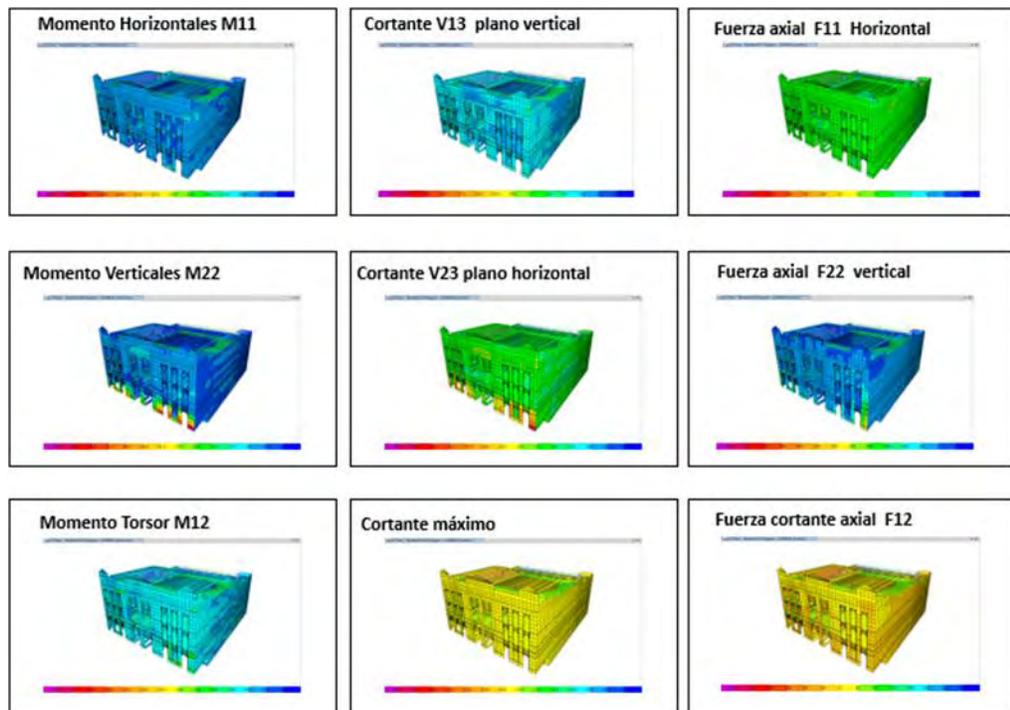


Figura 43. Esfuerzos en la estructura (FEA) – Teatro Imperial.

## Relación de la absorción de momento.

Tabla 18. Evaluación de esfuerzos de la tapia simple.

0-EVALUACIÓN DE ESFUERZOS EN LA TAPIA - SIMPLE SIN REFUERZO (CARGA ESTÁTICA)							
ESFUERZOS	M11(t-m/m)	M22(t-m/m)	M12(t-m/m)	V13 (t/m)	V23(t/m)	F11(t)	F22(t)
	Momento directo por unidad de longitud horizontal	Momento directo por unidad de longitud vertical	Momento directo por unidad de longitud torsor	Cortante fuera del plano por unidad de longitud hzt	Cortante fuera del plano por unidad de longitud vert	Fuerza directa por unidad de longitud	Fuerza directa por unidad de longitud
ACTUANTE	1.14	2.25	1.20	2.40	5.54	59.90	43.09
PERMISIBLE SIMPLE	1.88	1.87	0.20	32.13	3.38	59.00	59.00
INDICE DE SOBRESFUERZOS	0.61	1.20	6.06	0.07	1.64	1.02	0.73
ESTADO	61%	120%	606%	7%	164%	102%	73%
OBSERVACIÓN	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	CUMPLE
EFICIENCIA	43			INDICE DE SOBRESFUERZO GENERAL			161.8

## 2.6. ESFUERZOS DE ESQUINA Y VACÍOS

La sismicidad histórica enseña que las edificaciones en tierra son altamente vulnerables en las zonas de esquina y vacíos, tal es el caso del sismo que se presentó en Popayán (marzo 30 de 1983), con una magnitud de 5.5 en escala de Richter. 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.

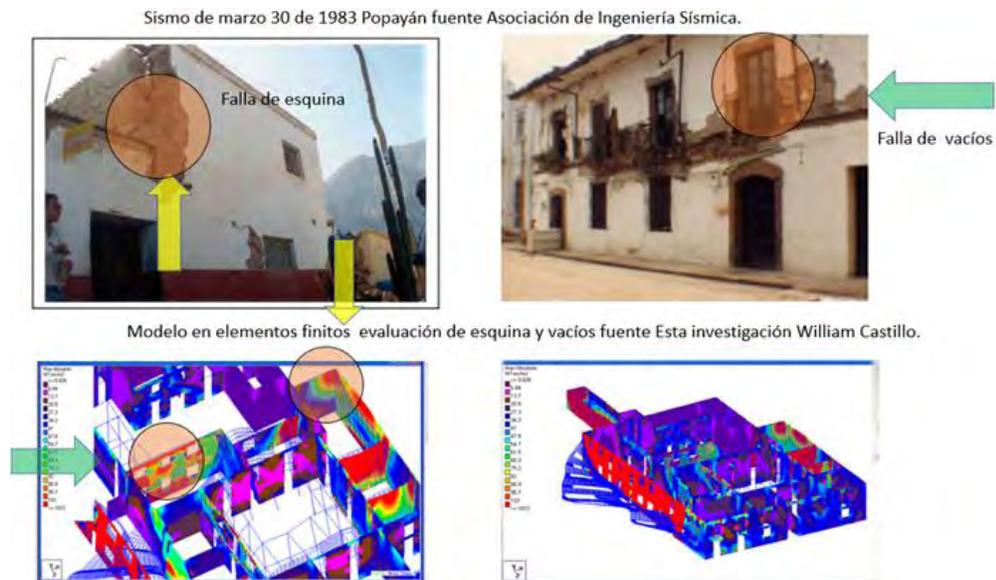


Figura 44. Esfuerzos en la estructura (FEA), zona de esquinas y vacíos.

### 2.6.1. Evaluación físico-mecánica del comportamiento de esquina.

Para el análisis, se proyecta unas probetas en tapia tomadas “in situ” para modelar la acción de cargas que generen un plano cortante de esquina, así, la investigación propone un modelo del espécimen que simule la posición del “tope” de muros tapiales conectados por una varilla y epóxico (lechada de suelo-cemento) con base en la siguiente geometría:



Figura 45. Ensayo para evaluación de cortante- zona de esquina y vacíos.

Se proyecta dos probetas de apoyo de 6x6x9 cm unidas a una central a través de un conector (varilla de 4mm corrugada), fundido con una lechada de agua cemento (a 3.5 cm bajo la cara superior de los apoyos uno y tres). Se aplica una carga a la unidad central, la cual se transfiere a los apoyos, dada la simetría como la mitad de carga.



Figura 46. Ensayo de la probeta de tapia, zona de esquinas.

Al generar la carga “ $P$ ”, en la probeta, a la unidad central, ésta actúa en el conector a través de la tapia traducida como bulbo de presión, y descompuesta como “ $P/2$ ” la cual, por efecto de acción y reacción genera una elástica ascendente, produciendo un plano de falla o corte superior al conector en los apoyos (ver figura 47- A. zona sombreada).

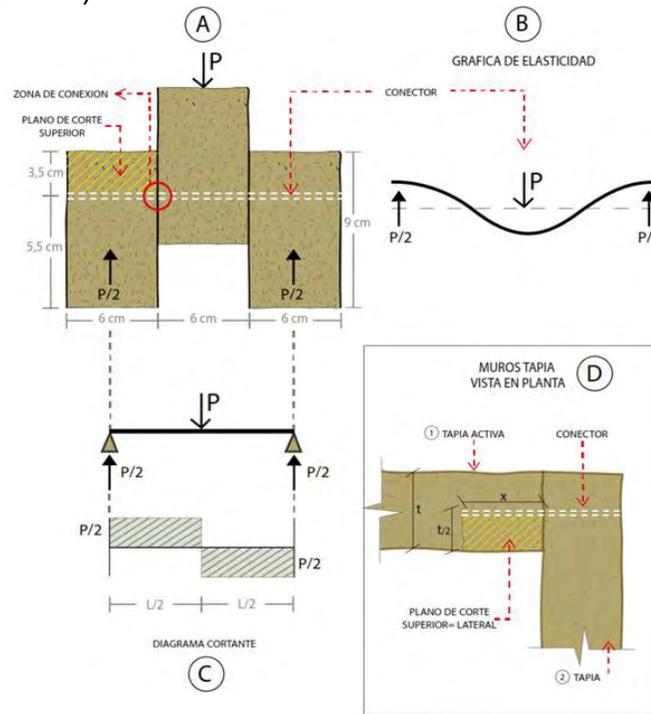


Figura 47. Esquema del modelo para el análisis de conectores de esquina de tapia, (acción – reacción)

Como resultado de los ensayos de las probetas en relación a la resistencia al corte por acción de conectores de esquina, se obtiene un esfuerzo promedio de 0.57Mpa, ilustrado de manera gráfica y numérica, así:

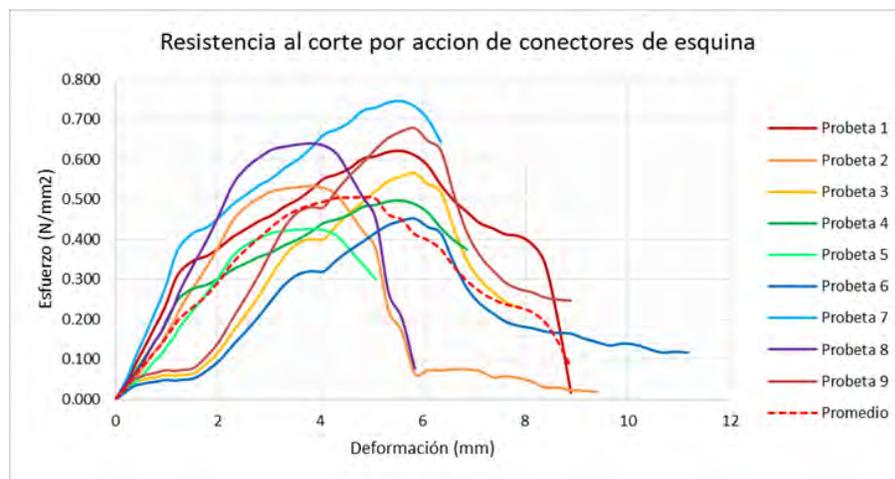


Figura 48. Curvas esfuerzo-deformación para conectores de esquina

Tabla 19. Resistencia de corte por acción de conectores de esquina en la tapia.

Resistencia al corte por acción de conectores de esquina						
Probeta	Carga Máxima		Deformación alcanzada		Esfuerzo máximo	
	(N)	(Ton)	(mm)	(m)	(Mpa)	(Ton/m2)
Probeta 1	1272.19	0.127	5.59	0.0056	0.62	62.134
Probeta 2	1103.16	0.110	3.81	0.0038	0.53	53.331
Probeta 3	1147.64	0.115	5.84	0.0058	0.57	56.534
Probeta 4	1526.63	0.153	6.71	0.0067	0.75	74.561
Probeta 5	1323.79	0.132	4.57	0.0046	0.64	63.998
Probeta 6	1377.17	0.138	7.01	0.0070	0.68	67.841
Probeta 7	1017.75	0.102	4.47	0.0045	0.50	49.707
Probeta 8	882.53	0.088	3.05	0.0030	0.43	42.665
Probeta 9	918.11	0.092	4.67	0.0047	0.45	45.227
Promedio	1174.33	0.117	5.08	0.0051	0.57	57.333

### 2.6.2. Ecuación para determinar la cantidad de conectores de esquina para soportar un muro tapial (Modelo numérico)

Para determinar la fuerza que ejerce el cortante en la probeta se traduce en un elemento simplemente apoyado sometido a una carga "P" y los apoyos con un cortante "P/2", para ello se deduce la ecuación como *autoría de la investigación*.

$$\tau(\text{probeta}) = \frac{F}{A} = \frac{P}{2 * t * b} \quad [33]$$

De donde:

- ✓  $\tau$ : esfuerzo cortante
- ✓ P: carga puntual
- ✓ t: espesor de la tapia
- ✓ b: lado de la probeta
- ✓ Vb: cortante basal
- ✓ Sa: aceleración espectral
- ✓ W: peso
- ✓ FS: factor de seguridad = 2.0
- ✓  $\tau_t$ : cortante de la tapia
- ✓ X: longitud de penetración del conector en la tapia activa cada, 1m
- ✓ V: volumen del elemento
- ✓  $\rho$ : densidad del elemento

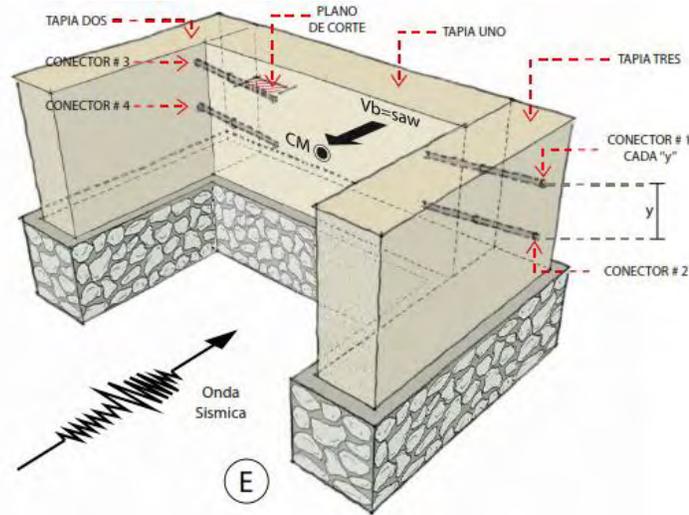


Figura 49. Modelo de colocación de clavos de refuerzo ante la acción dinámica.

Cuando se realiza el análisis numérico sobre la tapia sobre esta actúa la carga “P” directamente, equivalente a la carga lateral como reacción de la carga dinámica como resultante “Vb”, así:

$$\tau t = \frac{Vb}{X * \frac{t}{2}} \quad [34]$$

$$\tau t = \frac{Sa * W}{X * \frac{t}{2}} = \frac{Sa * (\rho * V)}{X * \frac{t}{2}} \quad [35]$$

$$X = \frac{Sa * (\rho * V)}{\tau t * \frac{t}{2}} = \frac{Sa * (\rho * b * \epsilon * h)}{\tau t * \frac{\epsilon}{2}} \quad [36]$$

$$X = \frac{2Sa * (\rho * b * h)}{\tau t} \quad [37]$$

### 2.6.3. Determinación de los conectores de esquina para el Teatro Imperial.

Para consolidar las esquinas del Teatro, se toma la tapia vulnerable “X1” mediante la instalación de conectores de esquina de 1” con base en las siguientes características:

- ✓ Longitud de la tapia entre ejes 18.85 m
- ✓ Altura de la tapia entre ejes 14.30 m
- ✓ Espesor de la tapia entre ejes 0.65 m
- ✓  $\rho$ : densidad del elemento = 1.46 t/m<sup>3</sup>
- ✓ Sa: aceleración espectral = 0.8125 %g (ver NSR-10\_A.2.6)
- ✓ P: promedio de carga máxima de falla por cortante de las probetas

Analizando las probetas propuestas en laboratorio se calcula el cortante de la tapia, mediante la ecuación [33].

$$\tau t = \frac{P}{2 * t * b} = \frac{P}{FS}$$

$$\tau t = \frac{117.43kg}{2 * 3.5cm * 6cm} = \frac{1.4kg}{cm^2} = 14 \frac{t}{m^2}$$

El esfuerzo cortante como resultado de los ensayos es de 14 t/m<sup>2</sup>

Para conocer la profundidad del conector o “clavo”, se hace uso de la ecuación [37]:

$$X = \frac{2 * 0.8125 * 1.46 * (18.85 * 1.0)}{14} = 3.19m$$

Por cada metro, se necesita 3.19 m de conectores que soporten por acción cortante de esquina la carga de la tapia, sin embargo, si se proyecta en las dos esquinas se tiene:

$$X = \frac{3.19}{2 \text{ lados}} = 1.60m$$

Entonces, se necesita 1.60 m de penetración en la tapia para estabilizar cada lado.

O si se prefiere se debe colocar un conector o clavo de 0.80m cada 0.50m cada lado, la cual es la opción constructiva más adecuada.

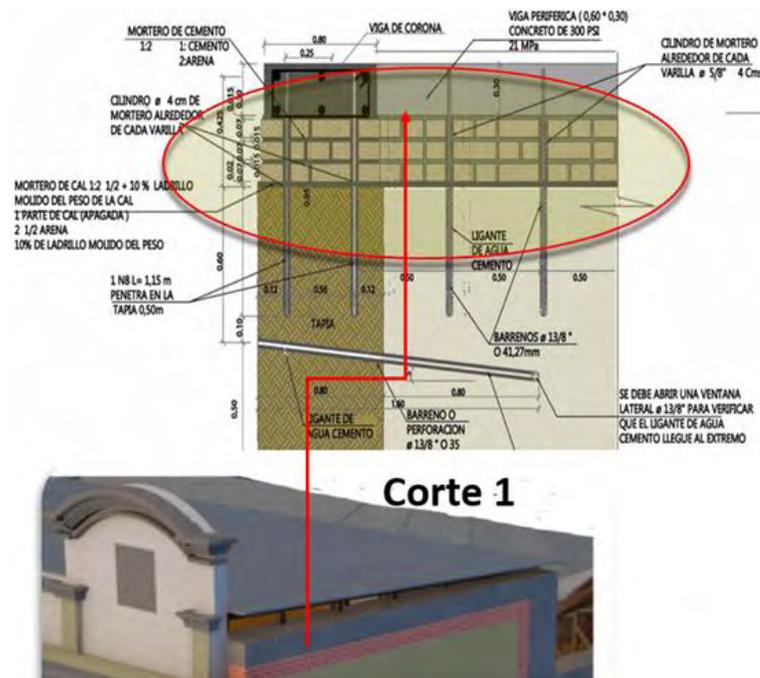


Figura 50. Detalle de conectores de corona y esquina

## 2.7. MODELO FÍSICO-MECÁNICO DEL COMPORTAMIENTO MURARIO

Se adopta la metodología, en la evaluación de las estructuras de mampuestos sin refuerzo, de Priestley M. y Paulay T. (1992) para una estructura en tapia, muros en mampostería en calicanto y sin refuerzo. Se considera como caso crítico la evaluación de las aceleraciones de respuesta a la excitación sísmica fuera del plano (figura 51), éstas dependen de la altura, rigidez del muro y de la masa que contribuye.

La respuesta inercial es excitada por las aceleraciones, las cuales varían de un piso a otro ya que la aceleración de réplica oscila con la altura del muro, “*se toma aquella máxima a la mitad de la altura y mínimo en los niveles*”. (Priestley M. y Paulay T. 1992). La magnitud de la aceleración depende de la relación entre la frecuencia natural de la respuesta de los muros en tierra y la frecuencia de excitación del suelo; el periodo natural de vibración se amplía cuando la tapia inicia a oscilar y, en el instante en que se agrieta, cambia la amplificación de respuesta respecto a la de entrada

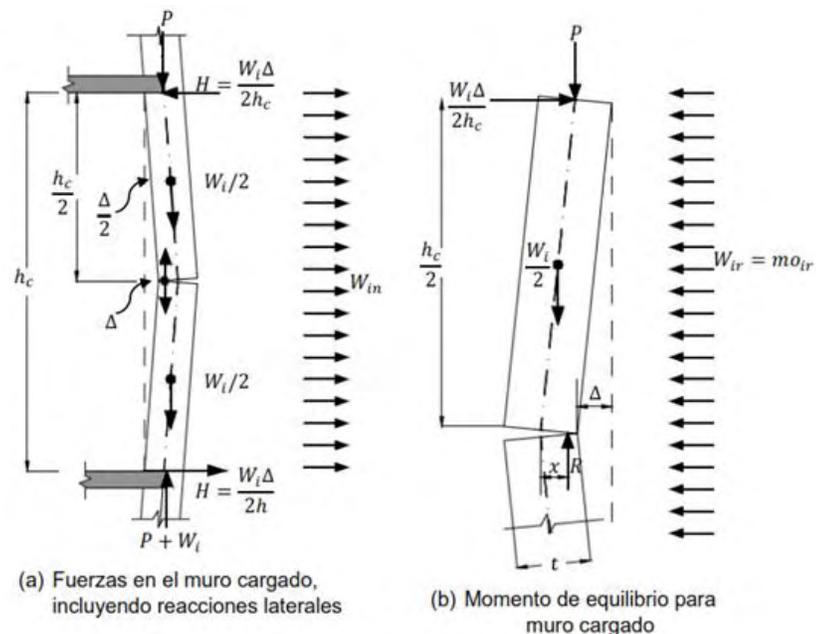
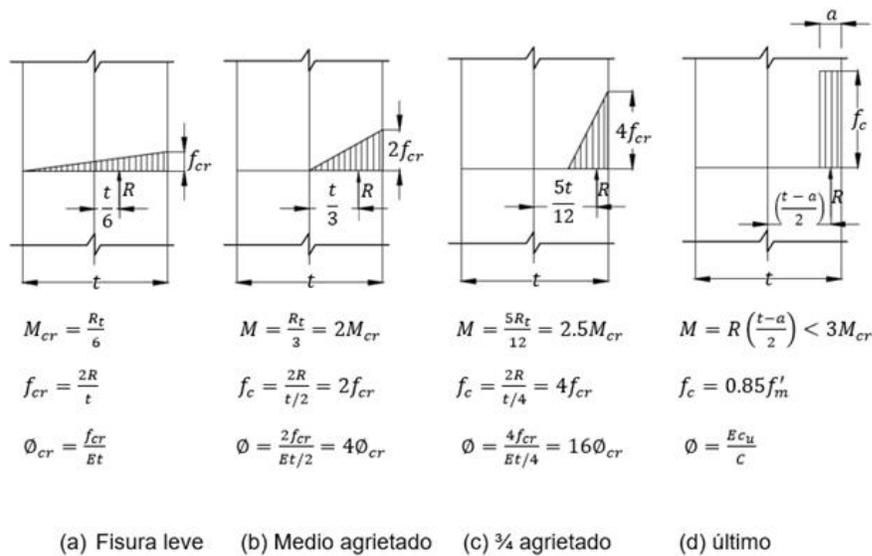


Figura 51. Cargas de inercia de respuesta fuera del plano del muro tapial.  
Fuente: Priestley M. y Paulay T., 1992

### Comportamiento de la tapia – Mecánica de la fractura y la deflexión

Para el análisis de los tapiales se evalúa el estado de falla con relación a la deflexión, tomando como respuesta el comportamiento en función del tamaño de la falla; para ello se estudian cuatro casos representativos de la mecánica de la fractura de Priestley M. y Paulay T.; así:



Momentos y curvatura en el muro en función de la mecánica de la fractura

Figura 52. Esquema de momentos y curvatura, mecánica de fractura  
Fuente: Priestley M. y Paulay T., 1992

**Caso 1:** el caso antes de agrietarse (figura 52–a) la respuesta del esfuerzo por compresión es lineal y se presenta máximo en la sección central del muro, así se evalúa el Momento crítico “ $M_{cr}$ ” que causan las fuerzas, la máxima aceleración, desplazamiento y la curvatura en la sección.

**Caso 2:** el semi agrietado (figura 52–b) evalúa la distribución de tensiones cuando la grieta se ha propagado al centroide del muro, se puede asumir de manera conservadora que el desplazamiento  $\delta$  aumenta en proporción con la curvatura central, por lo tanto, para las condiciones de esfuerzo se puede obtener con una estimación más exacta de la deflexión ( $\Delta$ ), mediante la integración de la distribución de curvatura.

**Caso 3:** el 75% de la grieta (figura 52–c) los cálculos se desarrollan cuando la grieta se ha propagado hasta los tres cuartos de la profundidad de la sección, cruzando el centroide del muro (50%) y sobrepasándolo en un 25%, para una fractura del 75%.

**Caso 4:** condiciones últimas con un colapso final (figura 52–d) la relación momento-curvatura se puede convertir en una relación momento-desplazamiento equivalente, de tal manera que la inestabilidad se produce antes de la tensión última, limitando el momento último a la expresión  $M_i \leq 3M_{cr}$ . (Priestley M. y Paulay T. 1992) donde “ $M_{cr}$ .” es el momento crítico o de craqueo, siendo el límite superior para cargas axiales (R) muy pequeñas cuando la profundidad del bloque de compresión “ $a$ ” es cercana a cero. Al calcular la respuesta, se debe tomar en cuenta la aceleración vertical, ya que esto reduce la aceleración equivalente necesaria para inducir el fallo.

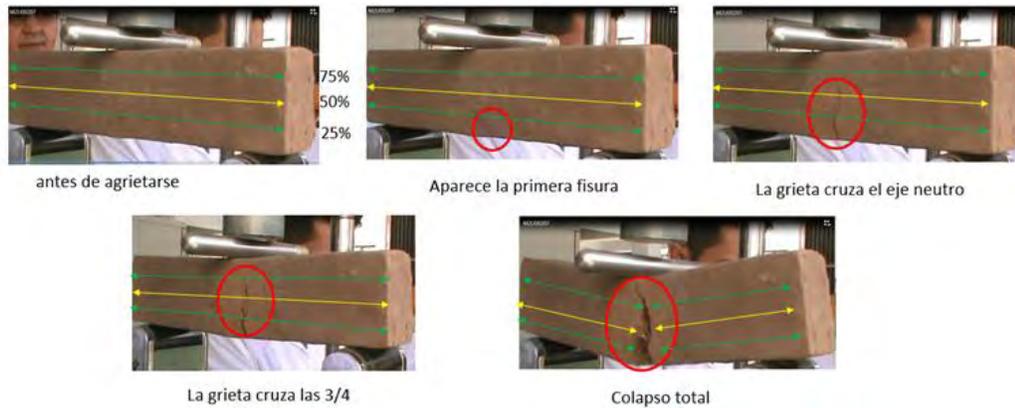


Figura 53. Secuencia de fractura en vigas simples de tapia, ensayo de flexión

## 2.8. COMPORTAMIENTO Y CAPACIDAD DE RESPUESTA EN MUROS. (TAPIA Y MAMPOSTERÍA CON ARGAMASA DE CAL)

Como auxiliar de la investigación, se participó en el modelo matemático para la evaluación del sistema estructural en el contexto no lineal, capacidad de respuesta de la tapia, espectros de capacidad, relación media de daño; hasta llegar al colapso.

En el desarrollo del modelo matemático se despliegan las curvas de capacidad para cada muro, de las cuales se grafica el comportamiento en tres zonas, la primera inicia con la mecánica de la fractura antes de la fisura, hasta terminar el primer tramo cuando la fisura alcanza la mitad del muro, en el siguiente tramo, la fisura alcanza las tres cuartas partes del mismo y, en el último tramo, el muro falla hasta el colapso.

Para ilustrar los muros del teatro Imperial, por convención, se denomina con la nomenclatura paralelos a la fachada "Y" y los perpendiculares "X".

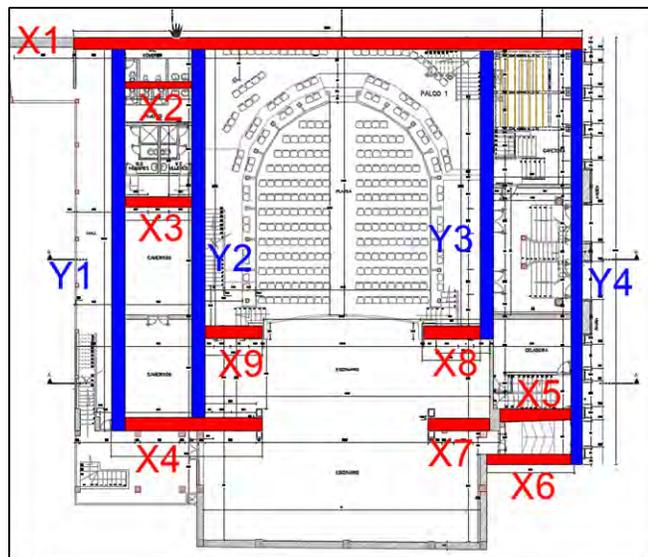


Figura 54. Convención de nomenclatura para los muros en el plano Metodología de Rosero, Dorado, Bonnet, Serna 2016)

La segunda convención es para interpretar cada una de las gráficas, éstas se seccionan en tres tramos, de los cuales se subdividen en cuatro zonas; la primera, de color verde, se define como agrietado (aparece la grieta), la segunda zona de color amarillo, indica medio agrietado (la grieta alcanza la mitad del espesor del muro en tapia), la tercera zona de color naranja, indica que la grieta alcanza las tres cuartas partes del espesor del muro en tapia; y la cuarta, de color rojo, indica el colapso.

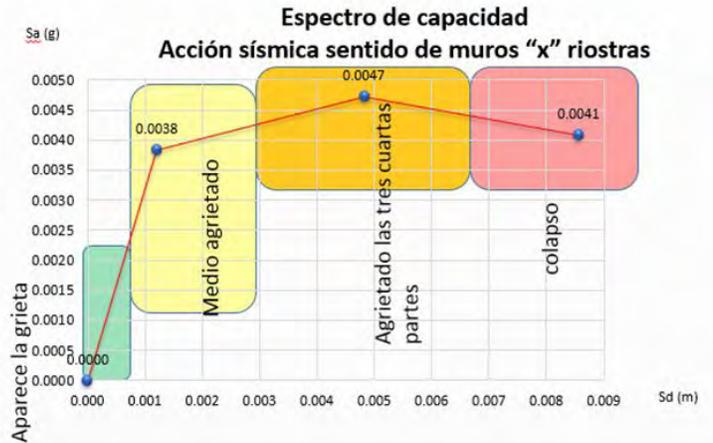


Figura 55. Convención de nomenclatura para las gráficas de los muros

### Curvas de capacidad de muros (Acción sísmica sentido X, Y)

En la figura 56, se muestra un grupo de curvas, "bajas" y "altas"; las primeras, construidas en tierra o tapia se comportan con grandes deformaciones para un esfuerzo cortante bajo y, las segundas como aquellos muros de fachada construidos en mampostería con unidades en ladrillo cocido y pegados con argamasa de calicanto (arena más cal apagada), presentando deformaciones moderadas para un esfuerzo cortante relativamente alto.

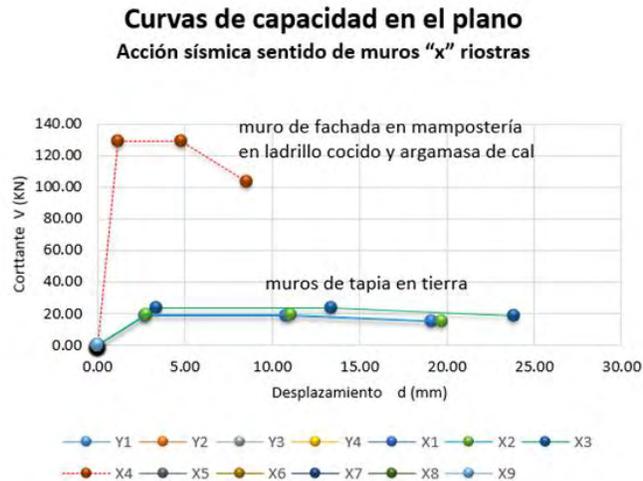


Figura 56. Curvas de capacidad de los muros en el plano de falla

Una vez evaluada la respuesta individual de cada uno de los muros en las direcciones principales, se conjuga el comportamiento global de la edificación en donde interactúan los muros en su totalidad.

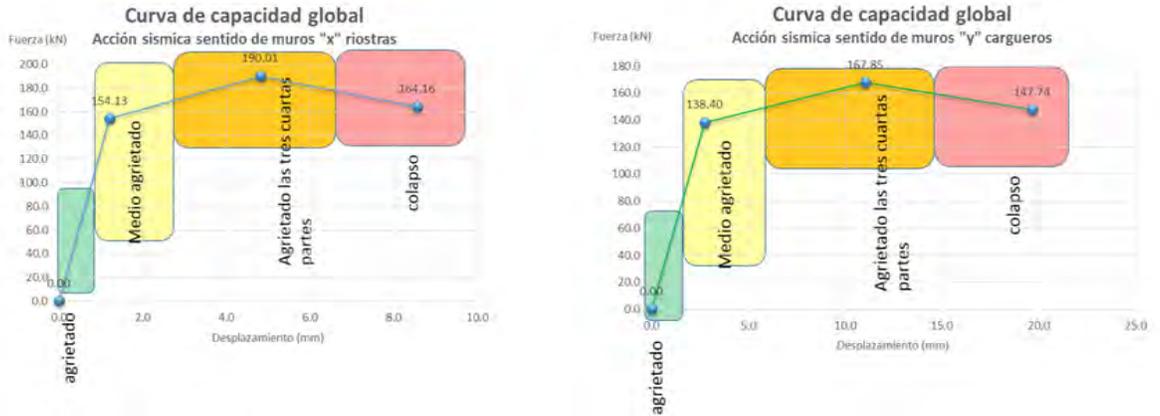


Figura 57. Curvas de capacidad general de los muros en el plano de falla

Con base en las curvas de capacidad en el plano, se obtiene la curva general del edificio para un grado de libertad, por lo tanto, se calcula el factor de participación modal para múltiples grados de libertad, tal como ilustra el ejemplo para el comportamiento de los muros y por cada uno de los pisos del Teatro Imperial.

En la figura 57, se muestra la curva fuerza vs desplazamiento, la gráfica registra tres tramos; hasta la mitad del primero localiza los muros que muestran levemente la aparición de la fisura, hasta la mitad del segundo ubica los muros que se fracturan cruzando la mitad del ancho  $t$  del muro, hasta la mitad del tercero los que se fracturan las tres cuartas partes y finalmente colapsan a medida que el desplazamiento es mayor.

### *Espectro de capacidad*

Para el análisis de los daños de la estructura en tapia se resuelve la curva del espectro de desplazamiento, asociando la aceleración espectral en porcentaje de la gravedad con el desplazamiento así:



Figura 58. Curvas de capacidad acción sísmica sentido de muros en "x"

Para obtener el desempeño sísmico se conjugan el espectro de demanda con el inelástico (en función de la disminución de ductilidad) con base en la suposición de desplazamientos iguales (Bonnet, Serna, Dorado, Rosero 2016).

Para definir los estados del comportamiento de la edificación, se asocia a la Relación Media de Daño (RMD), la cual clasifica como nulo cuando no hay daño, es decir la  $RMD=0$ . Una relación media de daño es moderada cuando la  $RMD=0.5$ , y el estado de falla mediante colapso es  $RMD=1$  (Dorado, Bonnet, Serna, Rosero 2016).

Otra variable que interactúa para definir la curva de vulnerabilidad, es el espectro de capacidad en función de la interacción del desplazamiento de los muros causada por las fuerzas aplicadas a los mismos. Un análisis coherente se debe hacer con tiempos de retorno de 43, 225, 475, 1000 y 2500 años (Bonnet y Serna 2014). Luego, sobre el espectro de capacidad de los muros del edificio, en el análisis se hace una proyección del primer tramo de la línea de periodos cortos y se conjuga con los espectros de 43, 225, 475, 1000 y 2500, la cual se proyecta hasta la intersección y, por cada punto proyecta las lecturas al eje "X", para describir los desplazamientos con base en un tiempo de retorno de sismicidad y su colapso efectivo en función de la vulnerabilidad.

*Curva de vulnerabilidad en función de los espectros de capacidad*

La Relación Media de Daño, RMD, se conjuga con el desplazamiento espectral en función del desempeño, para ello se calibra la distribución probable con un valor numérico que se ajuste a los datos acorde con la incertidumbre con base en la desviación estándar.

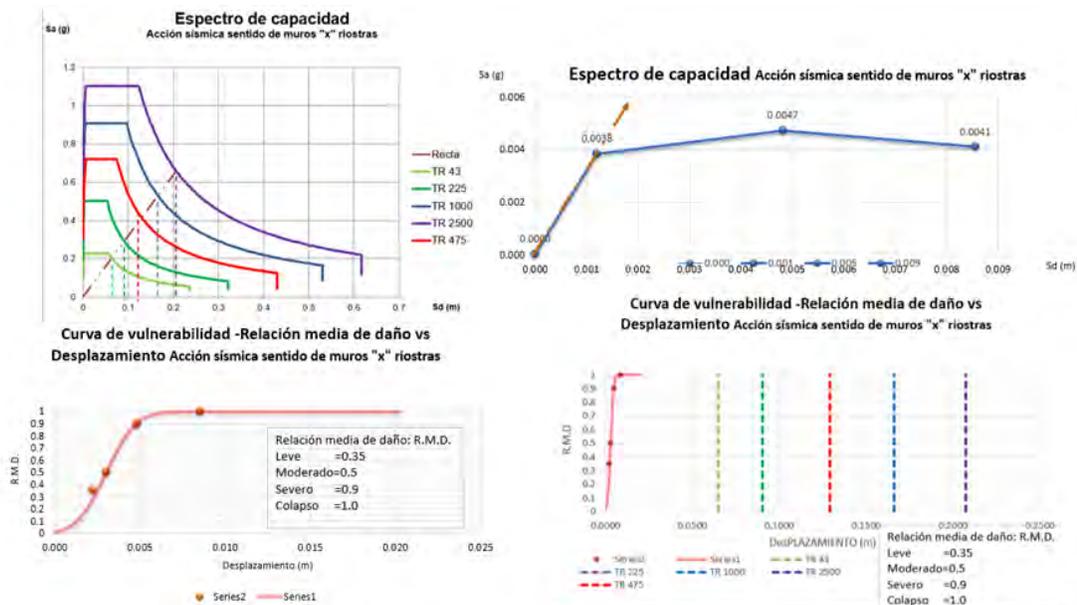


Figura 59. Curvas para espectro de capacidad – Teatro Imperial.

Con base en el desplazamiento proyectado por cada periodo de retorno (43, 225, 475, 1000, 2500 años) considerado como límite en el grado de comportamiento, se lo traslada a las curvas de vulnerabilidad, teniendo como parámetro de control la Relación Media de Daño, mediante lo cual se observa que el Teatro Imperial, es altamente vulnerable, con base en que acción sísmica sentido de muros "Y" carguero el desplazamiento Sd es de 19.7 mm.

Tabla 20. Evaluación grado de vulnerabilidad en función del periodo de retorno

PERIODO DE RETORNO (TR) sentido "Y"					
TR	TR 43	TR 225	TR 475	TR 1000	TR 2500
Sd (m)	0.107	0.155	0.191	0.279	0.345
Sd (cm)	10.729	15.468	19.127	27.893	34.527
Relación media de daño;RMD	1	1	1	1	1
Aparece la fisura	0.355	0.355	0.355	0.355	0.355
Semifisurado Sd (cm)	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920
La fisura alcanza las Tres cuartas partes Sd (cm)	1.580	1.580	1.580	1.580	1.580
Colapso Sd (cm)	1.970	1.970	1.970	1.970	1.970

## 2.9. HIPÓTESIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO HASTA LA FALLA.

El teatro presenta muros colindantes con alto grado de vulnerabilidad (14.30 m de alto por 18.85 m de longitud, espesor 0.65m y peso específico 1.46t/m<sup>3</sup>), con un peso aproximado de 255 toneladas para una aceleración espectral de 0.8125%g, el cual, en caso de sismo experimentarán un empuje horizontal de 208 toneladas, aunado a la reciente demolición de la casa vecina, lo que hace que pierda sus muros de estabilidad (*contra fuertes*), y así, se ve afectado por la falta de rigidez, con presencia de fisuras actuales; lo que significa que potencialmente está expuesto, con probabilidades de desprendimiento y colapso.

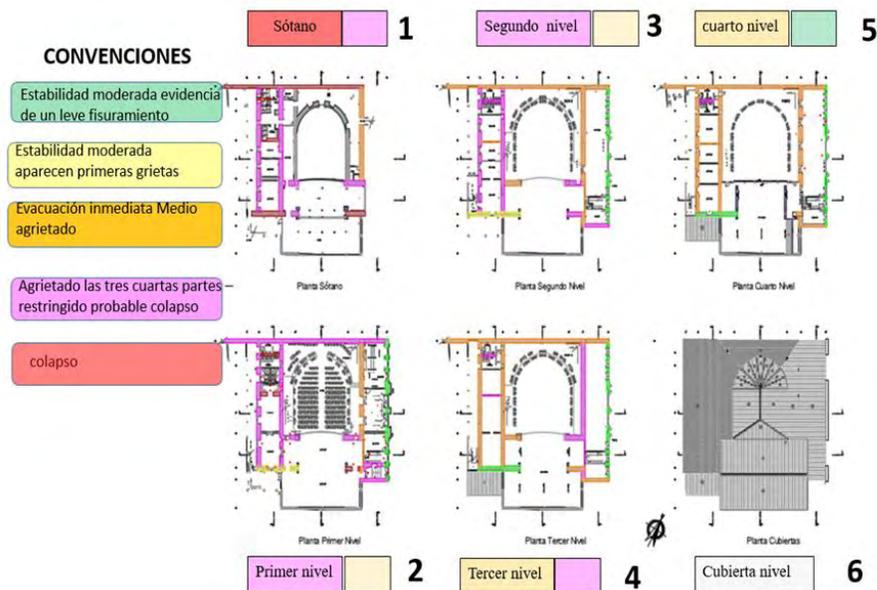


Figura 60. Hipótesis de colapso por niveles durante la acción sísmica.

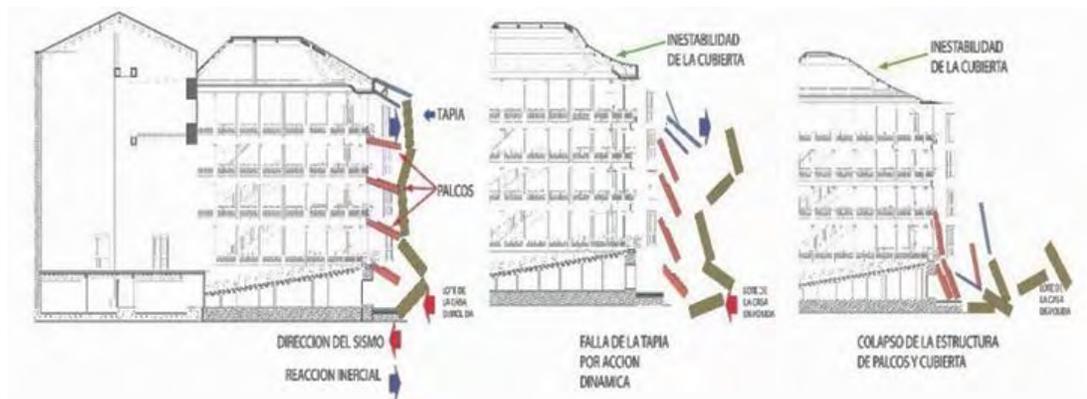


Figura 61. Hipótesis de falla del Teatro Imperial, probabilidad de colapso

## 2.10. MÉTODOS DE REHABILITACIÓN Y CONSOLIDACIÓN

Se plantean 17 métodos de consolidación a partir de 5 métodos primarios: pañete reforzado con malla de vena, malla electrosoldada, refuerzo de corona y esquina, matriz de madera con tensores, y estabilidad con estructura de acero tipo exoesqueleto.

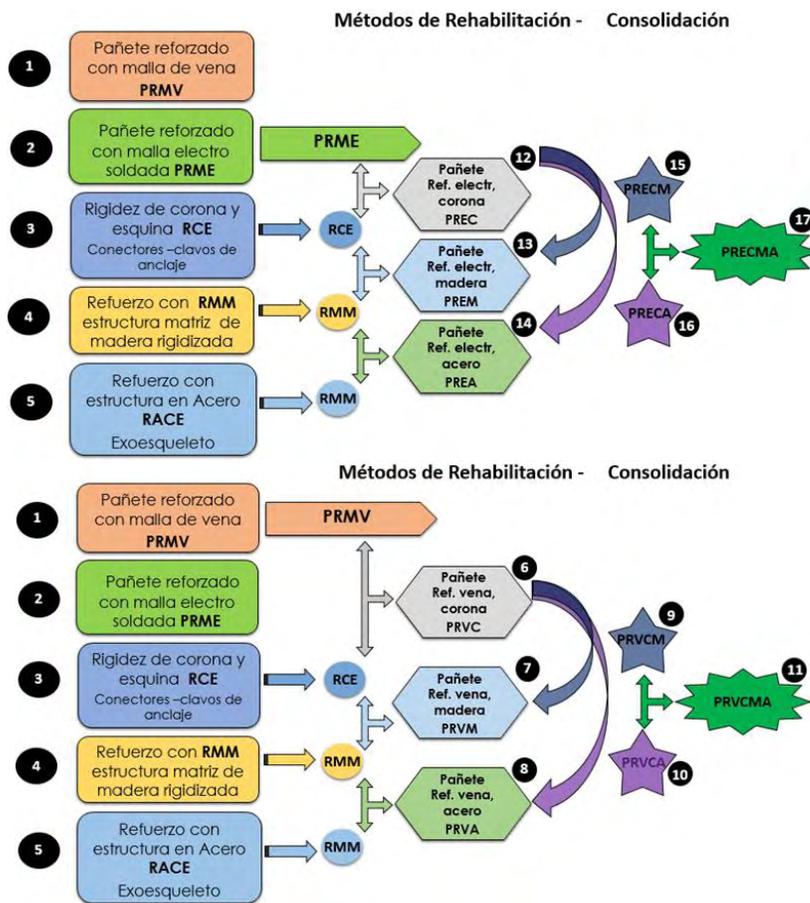


Figura 62. Métodos de rehabilitación y consolidación del sistema murario.

*Métodos de rehabilitación y consolidación de primer nivel.*

**Código 1: PRMV:** pañete reforzado con malla de vena

*Descripción:* se aplica un pañete reforzado con malla de vena calibre 19 en las dos caras de la tapia y de manera simultánea con una pasta de suelo cemento (1:10), caracterizado por de esta investigación, se le añade fibra sintética de polipropileno al 0.5% en peso del cemento.

**Código 2: PRME:** pañete reforzado con malla electrosoldada.

*Descripción:* se aplica un pañete reforzado con malla electrosoldada de 4mm referencia comercial M084 Ø4 mm 15x15, en las dos caras de la tapia y de manera simultánea con una pasta de suelo cemento (1:10), caracterizado por esta investigación, se añade fibra sintética de polipropileno al 0.5% en peso del cemento.

**Código 3: RCE:** refuerzo con rigidez de corona y esquina

*Descripción:* con el propósito de confinar los muros tapias (mediante ensayos de laboratorio), se calculó los conectores de diámetro Ø=1", separados cada 0.50m, con una profundidad de penetración de 0.80m, los cuales se anclan de una viga superior de corona en concreto reforzado (21 MPa.) de sección 0.60mx0.30m, la cual se apoya a su vez, sobre tres hiladas de ladrillo cocido como elemento de transición entre el concreto y la tapia. (VELASCO 1999).

**Código 4: RMM:** refuerzo con estructura matriz de madera rigidizada con diagonales en varillas de acero.

*Descripción:* consiste en el refuerzo de la tapia, mediante el uso de una estructura matriz de madera, (0.20x0.07) en forma de retícula en ambas caras de la tapia conectadas con un perno de ½" en cada nudo y este a su vez, sobre una platina de 1/8" en los nudos y en cada lado, la estructura de madera va rigidizada con diagonales en varillas de acero en los extremos verticales y en las franjas superior, media e inferior. Una vez se instale el sistema de la retícula en madera se cubre con un pañete de acabado estético.

**Código 5: RACE:** refuerzo con estructura en acero sistema exoesqueleto.

*Descripción:* debido a la alta vulnerabilidad de la tapia lateral derecha se proyecta, como una quinta alternativa, un sistema aporticado y arriostrado con diagonales concéntricas en "K invertida", en perfiles metálicos "cimentado sobre caisson (1m de profundidad por 1m de diámetro), caracterizado por columnas HE300A, vigas HE240A, con diagonales HE260A o 152.4mmx 8mm, a su vez el pórtico se conecta con las columnas internas existentes en acero tipo tubo rectangular de 400x500x40mm ubicadas en la boca del escenario a través de una cercha en tubo

estructural con especificaciones de cuerda superior e inferior diámetro 273.1mmx12mm, las diagonales y montantes 152.4mmx 8mm con conexiones soldadas, las conexiones entre viga y columna se realiza con conexiones end plate.

### **Combinación de los métodos de rehabilitación**

Con base en los métodos anteriores se realiza una combinación de los sistemas primarios, para proponer nuevos métodos de consolidación de segundo, tercer y cuarto nivel, así:

*Métodos de rehabilitación y consolidación de segundo nivel.*

**Código 6 y 12: PRVC y PREC:** pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, con rigidez de corona y esquina

*Descripción:* se combina el método de pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, simultáneamente cada método se rigidiza con una viga periférica de corona en concreto reforzado y las esquinas se rigidizan con conectores de 1", tal como se ilustra en el método individual relacionado anteriormente.

**Código 7 y 13: PRVM y PREM:** pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, con refuerzo con matriz de madera

*Descripción:* se combina el método de pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, simultáneamente cada método se refuerza en las dos caras de la tapia con una retícula de madera, tal como se ilustra en el método individual relacionado anteriormente.

**Código 8 y 14: PRVA y PREA:** pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, con refuerzo con exoesqueleto en acero

*Descripción:* se combina el método de pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, simultáneamente cada método se refuerza en las dos caras de la tapia con una retícula de madera, tal como se ilustra en el método individual relacionado anteriormente.

*Métodos de rehabilitación y consolidación de tercer nivel.*

**Código 9 y 15: PRVCM y PRECM:** pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, con rigidez de corona-esquina y refuerzo con matriz de madera.

*Descripción:* se combina el método de pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, así mismo, cada método se rigidiza con una viga periférica de corona y las esquinas se rigidizan con conectores de 1", simultáneamente se refuerza las dos caras de la tapia con una retícula de madera.

**Código 10 y 16: PRVCA y PRECA:** pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, rigidez de corona-esquina y refuerzo con exoesqueleto de acero.

*Descripción:* se combina el método de pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, así mismo, cada método se rigidiza con una viga periférica de corona y las esquinas se rigidizan con conectores de 1", simultáneamente se refuerza con un marco metálico tipo exoesqueleto.

*Métodos de rehabilitación y consolidación de cuarto nivel.*

**Código 11 y 17: PRVCMA y PRECMA:** pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, rigidez de corona-esquina, refuerzo con matriz de madera y refuerzo con exoesqueleto de acero.

*Descripción:* se combina el método de pañete reforzado con malla de vena y malla electrosoldada respectivamente, así mismo, cada método se refuerza con una viga periférica de corona y esquina, y se refuerza simultáneamente con un marco metálico tipo exoesqueleto y retícula de madera.

## **2.11. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONSOLIDACIÓN.**

Para realizar un análisis de la eficiencia general de cada método, se evalúa los resultados de momentos en las dos direcciones, el momento torsor, la acción cortante y la fuerza axial en dos direcciones, se toma como premisa el índice de sobreesfuerzos como resultado de la relación de esfuerzo actuante entre el resistido, así mismo, la acción de control de chequeo respecto a la fuerza actuante respecto a la permitida, la disminución del índice de sobreesfuerzos comparando el método analizado respecto al índice presente sin la intervención. El proceso se realiza por cada método de consolidación para carga estática y dinámica para obtener el siguiente resultado numérico y gráfico así:

## Eficiencia de los Métodos de Rehabilitación - Consolidación

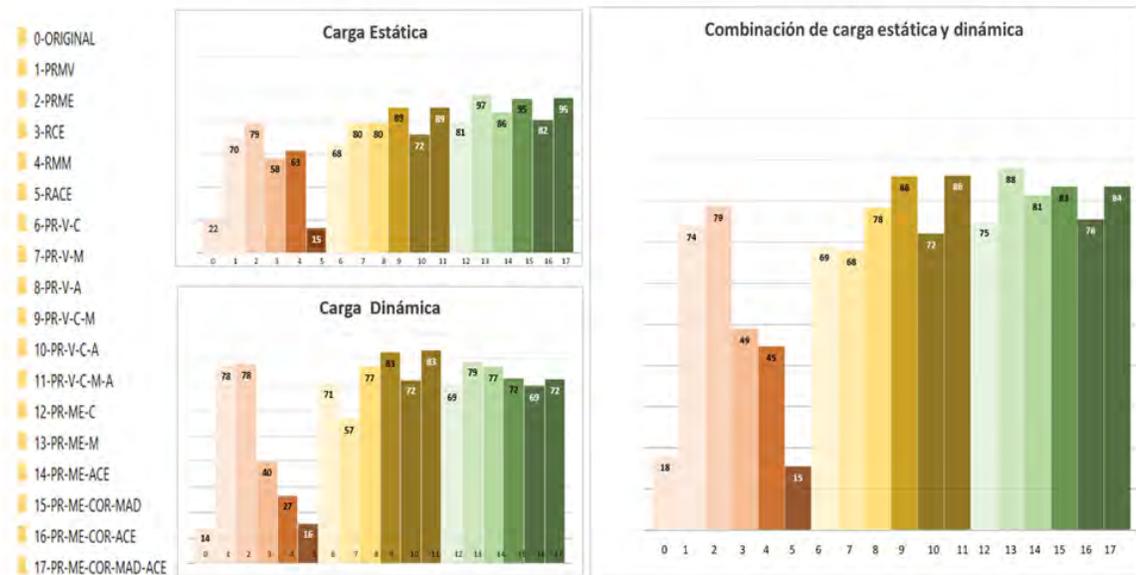


Figura 63. Gráfica de diagramas de barras: Eficiencia estática, dinámica, estática y dinámica.

## 2.12. EFICIENCIA DE LAS ALTERNATIVAS DE CONSOLIDACIÓN

### *Pañete reforzado con malla de vena y sus combinaciones*

La eficiencia mayor con un 86%, se consigue con el método de consolidación con *código 9*, donde se combina el método de pañete reforzado con malla de vena, se rigidiza con una viga periférica de corona y las esquinas se rigidizan con conectores de 1", simultáneamente se refuerzan las dos caras de la tapia con una retícula de madera. De la misma manera, se consigue una eficiencia de 86% con el método con *código 11*, al combinar el método de pañete reforzado con malla de vena, viga periférica de corona y esquina, y se refuerza simultáneamente con un marco metálico tipo exoesqueleto y retícula de madera.

### *Pañete reforzado con malla electrosoldada y sus combinaciones*

La eficiencia mayor con un 84%, se consigue con el método de consolidación con *código 13*, al combinar el método de pañete reforzado con malla electrosoldada, y se refuerza simultáneamente con una retícula de madera. El segundo mayor resultado de eficiencia (84%), se logra con el método de consolidación con *código 17*, donde se combina el método de pañete reforzado, se rigidiza con una viga periférica de corona y esquina, y se refuerza simultáneamente con un marco metálico tipo exoesqueleto y retícula de madera.

Para ilustrar el proceso matricial se cruza la información costo-eficiencia, se tiene los siguientes resultados:

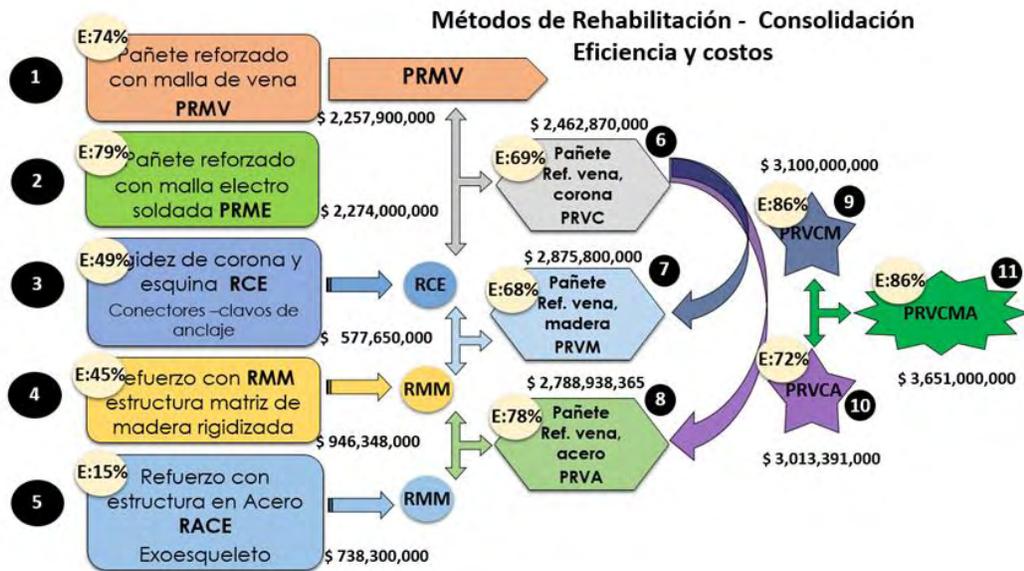


Figura 64. Eficiencia-costos de consolidación, m. de vena y combinaciones

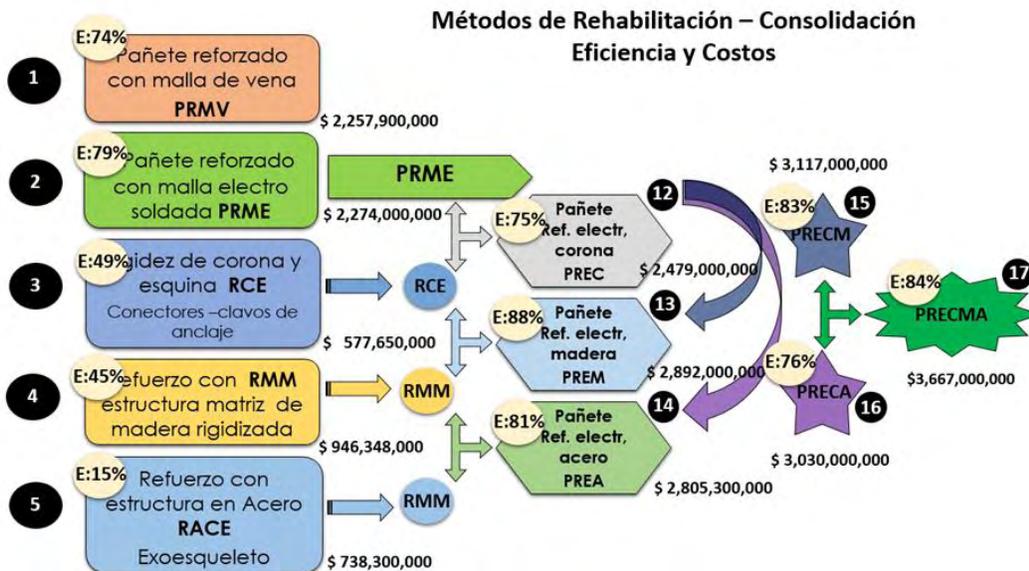


Figura 65. Eficiencia-costos consolidación-m electrosoldada y combinaciones

Entre la figura 64 y 65 se observa la relación entre la mayor eficiencia y costo favorable, como proceso matricial donde se cruza la información costo y eficiencia. Así pues, la mayor eficiencia con un 88%, y un costo de \$2.892.000.000 se consigue con el método de consolidación con código 13, pero se lo descarta por el análisis de ductilidad y fragilidad planteado en los ensayos de resistencia a la flexión; así el método de consolidación siguiente, será el código 9, con una eficiencia del 86%, y

un costo favorable de \$3.100.000.000; donde se combina el método de pañete reforzado con malla de vena, se rigidiza con una viga periférica de corona y esquina y simultáneamente se refuerza las dos caras de la tapia con una retícula de madera.

## 2.13. CÁLCULO DE PRESUPUESTO

Se cálculo el presupuesto de cada método contemplando los ítems de la ejecución, para el caso se proyecta uno de los casos consolidación con pañete de refuerzo y malla de vena así:

Tabla 21. Análisis del presupuesto, malla de vena.

Obra:	EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SISMICA DE LA TAPIA EN PASTO MÉTODO PAÑETE REFORZADO CON MALLA DE VENA	FECHA:	13-nov-17
		CASO GENERAL	

ITEM	DESCRIPCION	UND	CANT.	VR. UNIT	VR.TOTAL
<b>1</b>	<b>PRELIMINARES Y OBRAS PRIMARIAS</b>				<b>105,013,214.00</b>
	CAMPAMENTO TABLA 18 M2	UND	1	1,941,235	1,941,235
	CERRAMIENTO LAMINA GALVANIZADA	M2	70	23,011	1,610,770
	DESCAPOTE MANUAL MAS RETIRO H= 0.20 MTS	M2	0	3,662	-
	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON.	M2	0	3,224	-
	PUERTA TABLA Y GUADUA	UND	2	302,460	604,920
	EXCAVACION TIERRA CONGLOMERADO	M3	0	15,026	-
	PROTECCION DE TALUDES (Tablestaca)	M2	0	33,015	-
	DESM. CUBIERTA ASBESTO CEMENTO	M2	1073	4,082	4,379,986
	ENTRAMADO TEJA ASBESTO REPARACIÓN	M2	322	28,964	9,326,408
	REPOSICION PIEZA MADERA ROLL. 4"	ML	505	17,912	9,045,560
	TEJA ZINC	M2	1073	18,900	20,279,700
	ENTRAMADO TEJA ZINC	M2	1073	28,464	30,541,872
	INSTALACION TEJA ASBESTO CEMENTO	M2	1073	10,128	10,867,344
	DESM. CUBIERTA TEJA BARRO	M2	202	9,384	1,895,568
	ENTRAMADO TEJA BARRO LISTON 2X2 C-50/60C	M2	202	18,408	3,718,416
	INSTALACION TEJA BARRO	M2	202	10,221	2,064,642
	DEMOL. REPELLO	M2	2373	2,100	4,983,300
	REGATAS SOBRE MUROS TAPIA PARA MADERA	ML	0	6,058	-
	DEMOL. MURO TAPIA	M2	0.00	5,120	-
	MURO LAD. TIZON DOBLE BASE VIGA	M2	0	113,636	-
	REPELLO MURO 1:4	M2	0	17,530	-
	RETIRO ESCOMBROS MANUAL-VOLQUETA <=10KM.	M3	213.6	17,575	3,753,493
	<b>SUBTOTAL PRELIMINARES Y OBRAS PRIMARIAS</b>				<b>105,013,214.00</b>

<b>2 ESTRUCTURAS Y CONSOLIDACION</b>					<b>1,501,267,944.00</b>
	CAISSON 3000 PSI	M3	0	533,015	-
	ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa	KLS	0	3,286	-
	ACERO ESTRUCTURAL A.S.T.M,A-36	KLS	0	8,460	-
	CONECTOR ESQUINA Y CORONA	UN	0	79,432	-
	VIGA DE CORONA CONCRETO AEREA 3000 PSI	M3	0	732,048	-
	TUBO ESTRUCTURAL 100x100x6.3MM	ML	0	84,517	-
	PAÑETE REFORZADO SUELO CEMENTO 1:10+FIBRA	M2	4747	19,871	94,327,637
	CONECTOR ALAMBRE 4HILOS PAÑETE REFORZADO	UND	67200	18,114	1,217,260,800
	APLICACION LECHADA POR CADA LADO	M2	4747	12,059	57,244,073
	MALLA ELECTROSOLDADA REFUERZO DE PAÑETE	KLS	0	7,544	-
	MALLA VENADA REFUERZO DE PAÑETE	M2	10033	8,882	89,113,106
	ANILLO CAISSON E=10 CM	M3	0	485,955	-
	REPELLO MURO 1:3 FACHADA	M2	1641	17,991	29,523,231
	PLATINA CONEXIÓN DE MADERA NUDO 20X20X1/8	UND	0	19,509	-
	RETICULA (VIGA-COLUMNA) MADERA CHANUL 20X7 CM CEPILL-CANT.	ML	0	66,298	-
	TENSOR ESTR.VARILLA DIAMETRO 3/8"	ML	0	5,673	-
	TORNILLO PASANTE 3/8	UND	0	7,543	-
	REPELLO MURO 1:3 MUROS MAMPOSTERIA LADR	M2	767	17,991	13,799,097
<b>SUBTOTAL ESTRUCTURAS Y CONSOLIDACION</b>					<b>1,501,267,944.00</b>

<b>3 ACABADOS</b>					<b>32,467,672.00</b>
	VINILO TIPO 1 [3M]	M2	4744	6,663	31,609,272
	LIMPIEZA-BARRIDO-ASEO	M2	1073	800	858,400
<b>SUBTOTAL ACABADOS</b>					<b>32,467,672.00</b>

<b>VALOR COSTOS DIRECTOS</b>	<b>1,638,748,830</b>
------------------------------	----------------------

<b>COSTOS INDIRECTOS</b>		
	<b>VALOR COSTOS DIRECTOS</b>	<b>1,638,748,830</b>
	ADMINISTRACION 18.50%	303,168,534
	IMPREVISTOS 10.00%	163,874,883
	UTILIDAD 8.00%	131,099,906
	<b>TOTAL AIU 36.50%</b>	<b>598,143,323</b>
	IVA SOBRE LA UTILIDAD 16.00%	20,975,985
<b>VALOR TOTAL PRESUPUESTO</b>		<b>2,257,868,138</b>

## CONCLUSIONES

El apoyo como asistente, fue considerado favorable; por formar parte de un semillero de investigadores, por ser partícipe de la disciplina en la investigación patrimonial, por apropiarse del valor e identidad de las edificaciones históricas, por el aprendizaje en la logística y solución de nuevos temas que no figuran en las normas de legislación nacional (NSR-10) a la luz de la ingeniería regional; lo cual contribuye a su formación académica, investigativa y personal.

En el tema específico para edificaciones en tierra, el sistema estructural del Teatro Imperial, presenta serias manifestaciones patológicas; entre las más evidentes están: fracturas, desplome de muros, colapsos parciales de losas, asentamientos diferenciales, fracturas por flexión, colapsos por gravedad, deterioro por la humedad, entre otras, lo cual afecta su estabilidad y probabilidad de colapso ante un evento sísmico.

Los suelos que constituye la tapia, son característicos con predominancia granulares finos; tal es el caso del Teatro Imperial, un limo arenoso de baja plasticidad. Con base en los límites, el grado de consistencia de la tapia es media dura, sólida.

Con base en el comportamiento dinámico de la tapia y, en general de las estructuras históricas en este sistema constructivo, no alcanzan a disipar esfuerzos y ofrecer una respuesta a un período de retorno de 43 años como un ciclo corto, para el caso de Teatro Imperial hipotéticamente existe probabilidad de colapso para una relación media de daño (RMD) de 1 en un período a menos de 50 años.

Hipotéticamente con base en el análisis no lineal, el teatro Imperial en caso de sismo fallará inicialmente por el sótano con el muro de colindancia al parqueadero, lado derecho desestabilizando la estructura hacia arriba, con desprendimiento del entepiso de madera y desplome por efecto dominó.

De los 17 métodos de consolidación estudiados en la investigación dirigida por el ingeniero William Castillo, el método de consolidación más eficiente, para el Teatro Imperial, es pañete reforzado con malla de vena, consolidación de corona-esquina y madera; **PRVCM**; debido a la capacidad de esfuerzos residuales, ofreciendo ductilidad con un 86% de eficiencia.

El costo de consolidación para el método de pañete reforzado con malla de vena, consolidación de corona-esquina y madera, **PRVCM** es de \$3.100.000.000. Si se analiza la eficiencia (comportamiento físico-mecánico), los costos y el método ideal de consolidación, se llega como resultado final a este método de consolidación.

## **RECOMENDACIONES**

Desarrollar casos de consolidación para estructuras en tierra con distintos métodos de rehabilitación, debido al alto índice de edificaciones históricas institucionales y residenciales que se encuentran contruidos en este material; a partir de la compatibilidad del sistema, la capacidad máxima de carga y respuesta ante las deformaciones.

Aprender los procesos jurídicos en el desarrollo de memorial de responsabilidad entre el diseñador estructural y el propietario, donde se acepta un grado menor de respuesta dinámica de la estructura no convencional, atendiendo las especificaciones de la norma NSR10, en cada uno de los proyectos de intervención para edificaciones en tierra.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA. (1998). *Normas colombianas de diseño y construccion sismo resistente. NSR - 98*. Santafe de Bogota.
- ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA. (2012). *Reglamento colombiano de construccion sismo resistente. NSR - 10*. Santafe de Bogota D.C.
- Enriquez, G., Mesias, R.O., & Ortega, E.R. (2005). *Pasto Republicano*. San Juan de Pasto: Imprelibros. S.A.
- ISCARSAH. (2004). *Recomendaciones para el analisis, conservacion y restauracion estructural del patrimonio arquitectonico*. Barcelona: Icomos.
- Morán M, Crespo A, & Ormazá X. (2004). *Reforzamiento estructural en las edificaciones patrimoniales*. Quito: Fonsal.
- Pasuy, A. (2006). *Apuntes de clase sobre proteccion de edificaciones patrimoniales*. San Juan de Pasto.
- Reyes P, R. J. (2017). *Ensayos Para La Obtención De Propiedades Dinámicas De Un Suelomh Estabilizado Con Caucho Triturado*. Cali Valle del Cauca: Universidad del Valle.
- Tovar Daniel, V. J. (2016). *Determinación de los módulos dinámicos para un suelo lacustre de Bogotá mediante ensayo triaxial cíclico*. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle.
- Bran Sanchez, Jose Guillermo, Rafael Antonio Gonzalez Cruz, y H. A. Ortiz Landaverde. *Métodos de Ensayo para la Determinación de las Principales Propiedades Dinámicas de. El Salvador. : Universidad de El Salvador. , 2009.*
- Castillo, V. W., y Sanchez, G. «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.» Convenio inter admisnitrativo celebrado entre el cuerpo de bomberos voluntarios de Pasto y la Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, 2013.
- MINISTERIO DE CULTURA - LEY 1185. *Legislacion y normas generales para la gestion, proteccion y salvaguardia del patrimonio cultural en Colombia*. Bogota D.C., 2008.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO. «Fichas para la reparacion de viviendas en adobe.» 2014.
- Revista Ilustración Nariñense . «El Teatro Imperial.» Editado por Alfonso L. Muller. *Revista Ilustracion Nariñense*, nº 57 (Junio 1935): 13-14.
- Ojeda, G. Max. *Analisis de la estabilidad de muros en tierra y su comportamiento ante un sismo*. Bogota D.C.: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2009.

## **ANEXOS**

- Anexo A. Planos arquitectónicos de calificación Teatro Imperial.
- Anexo B. Fichas de evaluación patológica.
- Anexo C. Procesos constructivos de métodos de consolidación.
- Anexo D. Acción de fuerzas y esfuerzos; métodos de consolidación.
- Anexo E. Índices de resistencia; métodos de consolidación.
- Anexo F. Presupuesto de intervención; métodos de consolidación.
- Anexo G. Especificaciones técnicas.