

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



Implementación de ensayo de laboratorio y correlación de  
respuestas mecánicas en unidades de tapial

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería  
Civil que presenta:

*Jesús Daniel Carpio Nolasco*

Asesor:

*Mag. Wilson Edgar Silva Berríos*


Lima, 2024

## Informe de Similitud

Yo, Wilson Edgar Silva Berríos, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CORRELACIÓN DE RESPUESTAS MECÁNICAS EN UNIDADES DE TAPIAL, del autor Jesús Daniel Carpio Nolasco, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 2/12/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.
- Lugar y fecha:

Lima, 2 de diciembre de 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Silva Berríos Wilson Edgar</u>	
DNI: 10147201	Firma 
ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1832-3591">https://orcid.org/0000-0002-1832-3591</a>	

## RESUMEN

En el Perú el porcentaje de hogares que habitan en viviendas construidas con adobe y tapial sigue siendo importante. De acuerdo al último censo oficial, representan el 28 % del total de viviendas habitadas, y de estas, 7 de cada 10 se encuentran en áreas rurales.

Con el propósito de conocer con mayor amplitud el desempeño mecánico de las unidades de tapial, y reflejar los futuros hallazgos en la mejora de la normativa vigente, se propone obtener una correlación entre ensayos mecánicos que permitan conocer sus propiedades mecánicas a bajo costo.

Alternando entre dos composiciones de suelo y tres humedades de mezcla, se elaboraron muretes y probetas cilíndricas que fueron sometidos a ensayos de compresión diagonal y de tracción indirecta, respectivamente.

Con los resultados obtenidos se verifica una correlación de resistencias máximas en tracción para el rango elástico ( $r=0.8$  y  $r_s=0.82$ ). Sin embargo, en el caso de otras propiedades mecánicas, aunque existe una alta correlación, la dispersión aún es bastante notoria, por lo que se sugiere la realización de más ensayos que corroboren o modifiquen las conclusiones del presente estudio.

Se propone añadir estos hallazgos en la norma E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada y se propone como investigación futura estandarizar ensayos que permitan el monitoreo y control de la calidad del tapial en obra, lo que podría servir ante una eventual industrialización de su uso, como en el caso de programas de vivienda masiva, en zonas donde sea aplicable.

**Palabras clave:** *tapial, correlación, propiedades mecánicas, E.080, tierra apisonada, compresión diagonal, tracción indirecta, ensayo brasileño*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dios por la oportunidad de realizar el presente estudio.

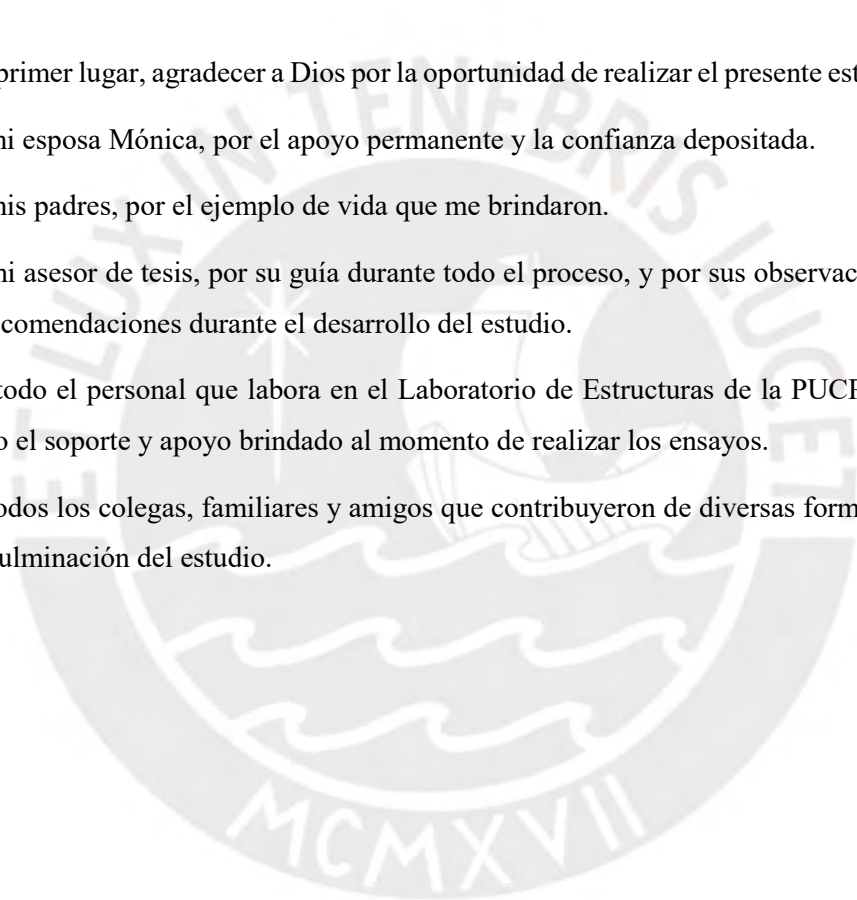
A mi esposa Mónica, por el apoyo permanente y la confianza depositada.

A mis padres, por el ejemplo de vida que me brindaron.

A mi asesor de tesis, por su guía durante todo el proceso, y por sus observaciones y recomendaciones durante el desarrollo del estudio.

Al todo el personal que labora en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, por todo el soporte y apoyo brindado al momento de realizar los ensayos.

A todos los colegas, familiares y amigos que contribuyeron de diversas formas en la culminación del estudio.



## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ÍNDICE.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS .....	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ALCANCES .....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.5 ORGANIZACIÓN .....	4
CAPÍTULO 2. NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL .....	6
2.1 NORMATIVA NACIONAL.....	6
2.1.1 Norma Técnica de Edificaciones E.080 .....	6
2.2 NORMATIVA INTERNACIONAL .....	7
2.2.1 Guías Nacionales .....	7
2.2.2 Códigos de diseño y construcción .....	9
2.3 COMPARACIÓN DE NORMATIVA EN TAPIAL .....	12
CAPÍTULO 3. MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	17
3.1 INTRODUCCIÓN .....	17
3.2 ENSAYO DE CONTROL DE FISURACIÓN .....	17
3.3 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO .....	19
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL: SUELO ARCILLOSO Y ARENA GRUESA.....	22
3.4.1 Ensayo de Mecánica de Suelos.....	22
CAPÍTULO 4. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES ..25	
4.1 INTRODUCCIÓN .....	25
4.2 CONSTRUCCIÓN DE MURETES .....	25
4.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES.....	28

4.3.1 Interpretación de los ensayos.....	28
4.3.2 Análisis por elementos finitos .....	31
4.3.3 Ensayos de compresión diagonal en muretes.....	35
4.3.4 Evaluación de resultados del ensayo de compresión diagonal.....	45
CAPÍTULO 5. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL O DE TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CILÍNDRICAS .....	46
5.1 INTRODUCCIÓN .....	46
5.2 CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.....	48
5.3 COMPRESIÓN DIAGONAL O TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CILÍNDRICAS.....	49
5.3.1 Interpretación de los ensayos.....	49
5.3.2 Análisis por elementos finitos .....	51
5.3.3 Ensayos de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas .....	54
5.3.4 Evaluación de resultados del ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas .....	60
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS COMPARATIVO Y CORRELACIÓN DE ENSAYOS .....	61
6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO.....	61
6.2 CORRELACIÓN DE ENSAYOS .....	64
6.2.1 Prueba de Normalidad .....	64
6.2.2 Coeficiente de correlación lineal de Pearson .....	65
6.2.3 Coeficiente de correlación de Spearman .....	68
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS .....	78
ANEXO A. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA Y CARACTERIZACIÓN SUCS .....	85
ANEXO B. DATOS TOMADOS PREVIO A ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL.....	88
ANEXO C. DATOS TOMADOS PREVIO A ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA O ENSAYO BRASILEÑO .....	95
ANEXO D. PROPIEDADES MECÁNICAS MSS Y MSA .....	102
ANEXO E. PROPIEDADES MECÁNICAS PSS Y PSA .....	105

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Contenido temático en normativa nacional e internacional en tapial. Guías (X) y Normas (O) .....	13
<b>Tabla 2</b> Comparativo normativa nacional e internacional – Resistencia a la compresión (MPa).....	14
<b>Tabla 3</b> Comparativo normativa nacional e internacional. Resistencia a tracción y al corte (MPa) .....	16
<b>Tabla 4</b> Proporciones en peso Suelo - Arena Gruesa para control de fisuración (Norma E.080, Anexo 4).....	18
<b>Tabla 5</b> Proporción en peso Suelo - Arena Gruesa usada.....	20
<b>Tabla 6</b> Clasificación SUCS y límites de plasticidad del suelo arcilloso y la arena gruesa .....	22
<b>Tabla 7</b> Valores normalizados de esfuerzos en el centro del murete, según teoría y análisis numéricos ( $\alpha P/A$ ) .....	32
<b>Tabla 8</b> Valores normalizados de esfuerzos en el centro del murete ( $\alpha P/A$ ), según teoría y análisis numéricos comparando isotropía y ortotropía.....	33
<b>Tabla 9</b> Muretes sometidos a ensayo de compresión diagonal. Composición: Suelo Solo (MSS). Humedad de mezcla: 09, 12 o 15 %. Espécimen: 1 al 5.....	36
<b>Tabla 10</b> Muretes sometidos a ensayo de compresión diagonal. Composición: Suelo Arena (MSA). Humedad de mezcla: 09, 12 o 15 %. Espécimen: 1 al 5 ....	37
<b>Tabla 11</b> Resistencia última a tracción, compresión y corte tras ensayos de compresión diagonal.....	39
<b>Tabla 12</b> Propiedades mecánicas del tapial para suelo solo (MSS) y suelo con arena (MSA) .....	41
<b>Tabla 13</b> Valores normalizados de esfuerzos en el centro de la probeta cilíndrica, según teoría y análisis numéricos en función de la carga aplicada y área diagonal de la muestra ( $\alpha P/A_{diag}$ ) .....	52
<b>Tabla 14</b> Probetas cilíndricas PSS sometidas a ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta indicando tipo de falla.....	56
<b>Tabla 15</b> Probetas cilíndricas PSA sometidas a ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta indicando tipo de falla.....	57
<b>Tabla 16</b> Resultados de ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas .....	58
<b>Tabla 17</b> Propiedades mecánicas del tapial para PSS y PSA .....	60
<b>Tabla 18</b> Comparativo de propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de compresión diagonal en unidades de tapial con lo hallado por diversos autores.....	63

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de distribución de viviendas ocupadas con paredes de adobe o tapial en Perú (INEI, 2018).....	1
<b>Figura 2.</b> Proporciones de suelo arcilloso y arena gruesa previa a la mezcla .....	20
<b>Figura 3.</b> Procedimiento de elaboración de muestras .....	21
<b>Figura 4.</b> Resultado final del ensayo de Control de Fisuración. Proporción Suelo: Arena gruesa .....	21
<b>Figura 5.</b> Plasticidad del suelo arcilloso empleado en la elaboración de muestras. Imagen adaptada de web .....	23
<b>Figura 6.</b> Curva granulométrica de suelo arcilloso con arena gruesa 1:1 comparado con límites recomendados por CRATERre .....	24
<b>Figura 7.</b> Encofrado de madera empleado, mezcladora vertical y resultado del vaciado .....	27
<b>Figura 8.</b> Murete fresco con elementos incrustados para posterior ensayo de compresión diagonal y registro de deformaciones.....	27
<b>Figura 9.</b> Interpretación de la prueba de compresión diagonal según ASTM y RILEM con base en el círculo de Mohr (Adaptado de Brignola <i>et al</i> , 2008).....	28
<b>Figura 10.</b> Respuesta elástica normalizada a esfuerzo principal $\sigma_1$ y cortante $\sigma_{xy}$ (Adaptado de Brignola <i>et al</i> , 2008).....	30
<b>Figura 11.</b> Mallas empleadas en el análisis de elementos finitos. Izquierda (Tipo A) con apoyo casi puntual, y a la derecha (Tipo B) con apoyo similar al empleado en el laboratorio PUCP.....	31
<b>Figura 12.</b> Esfuerzos principales normalizados tras modelamiento de apoyos empleado en ensayos de laboratorio .....	34
<b>Figura 13.</b> Aplicación manual de carga, distribución de LVDTs y falla típica esperada tras ensayo.....	35
<b>Figura 14.</b> Resistencia última a tracción tras ensayo de compresión diagonal en muretes .....	40
<b>Figura 15.</b> Resistencia última a compresión tras ensayo de compresión diagonal en muretes .....	40
<b>Figura 16.</b> Resistencia última a corte tras ensayo de compresión diagonal en muretes. 40	
<b>Figura 17.</b> Esfuerzo y módulo de corte en muretes para mezclas de suelo solo (MSS) y suelo arena (MSA) .....	42
<b>Figura 18.</b> Diagramas Esfuerzo-Deformación unitaria para distintas humedades de mezcla en muretes MSS .....	43
<b>Figura 19.</b> Diagramas Esfuerzo-Deformación unitaria para distintas humedades de mezcla en muretes MSA .....	44
<b>Figura 20.</b> Distribución teórica de tensiones sobre el plano diametral y vertical para ensayo de tracción indirecta (Modelo adaptado de Frocht, por Garrote, 2006) .....	46

<b>Figura 21.</b> Elaboración de probetas cilíndricas de tierra apisonada en molde estándar de 6"x 12" [150 mm x 300 mm] .....	49
<b>Figura 22.</b> Mallas empleadas en el análisis de elementos finitos para una probeta cilíndrica .....	52
<b>Figura 23.</b> Esfuerzos principales normalizados tras modelamiento del ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas .....	53
<b>Figura 24.</b> Primer intento de calibración del ensayo con anillo de carga acondicionado .....	54
<b>Figura 25.</b> Instrumentación y modo de falla típico en probeta cilíndrica tras calibración de carga y deformímetros acondicionados para valores esperados .....	55
<b>Figura 26.</b> Resistencia a tracción tras ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas.....	59
<b>Figura 27.</b> Resistencia a compresión tras ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas.....	59
<b>Figura 28.</b> Correlación de resistencia última a tracción y último a corte para ensayos de compresión diagonal en muretes o en probetas cilíndricas según modelo numérico .....	67
<b>Figura 29.</b> Correlación de límite elástico en compresión obtenido a partir de ensayos de compresión diagonal en muretes (600x600x200mm) y en probetas cilíndricas (150x300mm) .....	68
<b>Figura 30.</b> Correlación de esfuerzos últimos en tracción y en compresión obtenido de ensayos de compresión diagonal en muretes y probetas cilíndricas, según modelo (arriba) o norma (abajo) .....	70
<b>Figura 31.</b> Correlación de módulo de elasticidad obtenido a partir de ensayos de compresión diagonal en muretes y en probetas cilíndricas .....	71
<b>Figura 32.</b> Correlación de módulo de corte y coeficiente de Poisson obtenido a partir de ensayos de compresión diagonal en muretes y en probetas cilíndricas .....	72

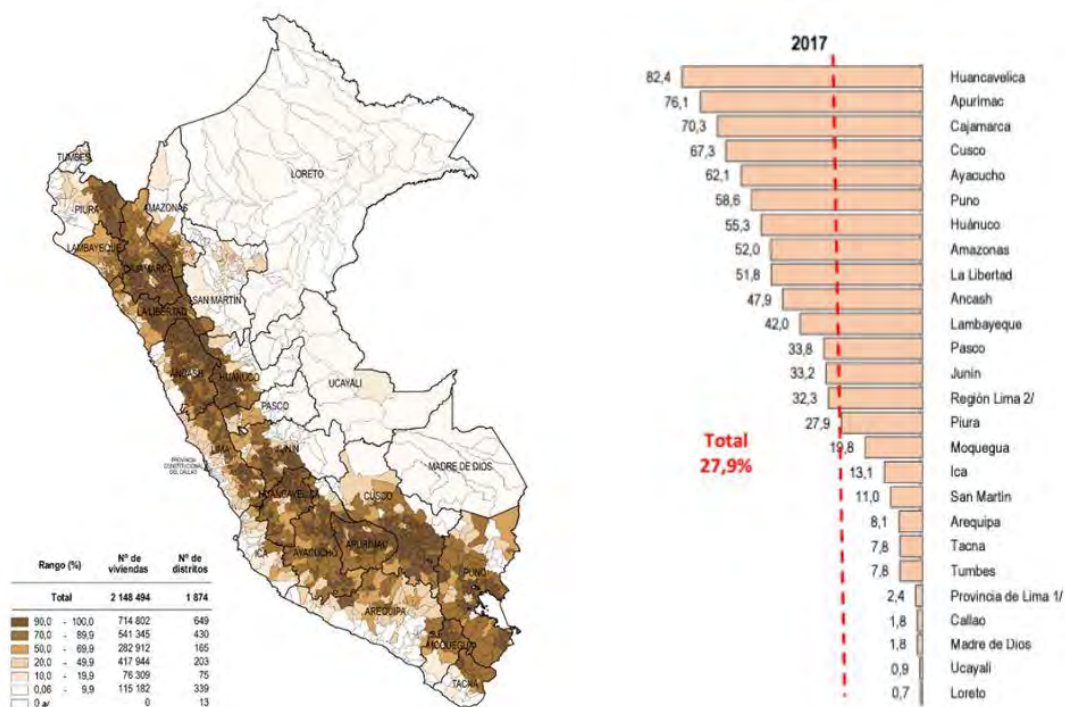
## LISTA DE ABREVIATURAS

<i>ASTM</i>	= <i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>BTC</i>	= Bloque de Tierra Comprimido
<i>INDECOPI</i>	= Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual
<i>INEI</i>	= Instituto Nacional de Estadística e Informática
<i>ININVI</i>	= Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda
<i>LEDI</i>	= Laboratorio de Estructuras Antisísmicas “Cristóbal de Losada y Puga” del Departamento de Ingeniería
<i>MVCS</i>	= Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento
<i>NMAC</i>	= <i>New Mexico Administrative Code.</i>
<i>NTE</i>	= Norma Técnica de Edificación
<i>NTP</i>	= Norma Técnica Peruana
<i>RILEM</i>	= <i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
<i>SENCICO</i>	= Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción
<i>UNE</i>	= Asociación Española de Normalización
<i>UBC</i>	= <i>Uniform Building Code</i>
<i>ARSO</i>	= <i>African Organisation for Standardisation</i>

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 MOTIVACIÓN

En el Perú, de acuerdo al último censo realizado en 2017, cerca del 28% de viviendas ocupadas fueron construidas con paredes de adobe o tapial, de las cuales cerca de un 70% están ubicadas en zonas rurales del país. La **figura 1** muestra la distribución porcentual de viviendas de adobe o tapial a nivel distrital y regional (INEI, 2018).



**Figura 1.** Mapa de distribución de viviendas ocupadas con paredes de adobe o tapial en Perú (INEI, 2018)

A partir de entonces hasta la más reciente publicada el 2021 (cuadro 4.2, INEI, 2021) existe un ligero decrecimiento relativo del orden del 5% en viviendas existentes de adobe y tapial (4% en áreas urbanas y 1% en áreas rurales). Sin embargo, no existen datos sobre el ocupamiento de las mismas debido a la ausencia de un censo nacional que lo corrobore.

Las propiedades higrotérmicas, acústicas, el bajo costo, la accesibilidad del material, así como la capacidad de reciclaje del mismo se encuentran entre las principales razones por las que se elige su uso (Gatti, 2012). Por el contrario, la vulnerabilidad de las edificaciones construidas en tierra frente a posibles movimientos sísmicos hace necesario encontrar medidas que aseguren un adecuado desempeño durante su vida útil.

El tapial es un sistema de muros estructurales construido a partir de la compactación de delgadas capas de suelo, arena y eventualmente grava, dentro de un encofrado o forma que se desplaza hacia arriba según avance de la construcción (Jurina, 2011). Además, en comparación con el adobe, el tapial posee diversas ventajas como el menor costo (espacio y recursos) así como una mayor rapidez constructiva (Tejada *et al*, 2016). Esta ventaja frente al adobe es posible porque reduce considerablemente el porcentaje de vacíos presente en el muro lo que reduce su vulnerabilidad frente al impacto del agua y proporciona una mayor uniformidad entre sus componentes.

Conscientes de la diversidad de las propiedades intrínsecas del material, y con el fin de alcanzar el mejor desempeño posible, es importante encontrar un método sencillo de dosificación de mezcla, a partir de aspectos como la granulometría y humedad de mezcla, de manera similar a lo realizado con mezclas de concreto simple.

Recientemente, la norma E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada (MVCS, 2017), incluye una resistencia mínima a obtener a partir del ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño. Sin embargo, con las humedades indicadas (entre 10% y 15%) la resistencia obtenida puede variar sustancialmente, por lo que se requiere de algún método que brinde una mayor precisión al momento de la ejecución y control.

En el presente estudio se investiga la posibilidad de ampliar el conocimiento de las respuestas mecánicas del tapial a partir de la realización de un ensayo mecánico alterno más económico y de menor tiempo de ejecución. También se revisan algunos procedimientos y valores

indicados en la actual norma, así como la implementación de una posible medida de control en obra.

## 1.2 OBJETIVOS

Esta investigación tiene como objetivo general el contribuir al estudio del conocimiento de las propiedades mecánicas del tapial.

Como objetivos específicos se cuentan los siguientes:

- Revisar y comparar normativa internacional relacionada al diseño y la construcción con tierra cruda, en particular las que incluyan la tecnología del tapial.
- Implementar un ensayo de laboratorio que permita conocer las propiedades mecánicas del tapial a bajo costo.
- Obtener una correlación numérica en tapial entre ensayos de compresión diagonal en muretes y tracción indirecta en probetas cilíndricas.
- Proponer recomendaciones para la Norma E.080 en cuanto a diseño y control de calidad con base en los resultados encontrados.

## 1.3 ALCANCES

Se evalúa una única muestra de suelo arcilloso obtenido de las periferias de la ciudad de Lima y una muestra de arena gruesa. A partir de ambas muestras se conformarán unidades de tapial empleando para la mitad de muestras únicamente el suelo solo y para la otra mitad de muestras el suelo combinado con arena gruesa en función del resultado obtenido del ensayo de control de fisuración.

En el estudio se emplean tres humedades de mezcla relativas en peso: 9%, 12% y 15%. Se evalúan cinco muestras de cada tipo, tanto para muretes de 60 cm x 60 cm x 20 cm como para las probetas cilíndricas estándar de 6 pulg de diámetro y 1 pie de alto.

Para efectos de modelamiento numérico y cálculo de las máximas resistencias se considera un estado plano de esfuerzos, y para efectos de revisión de la correlación esperada en esfuerzos

y deformaciones se trabaja con un modelo de elementos finitos para cada tipo de ensayo con ayuda del software SolidWorks®.

## 1.4 HIPÓTESIS

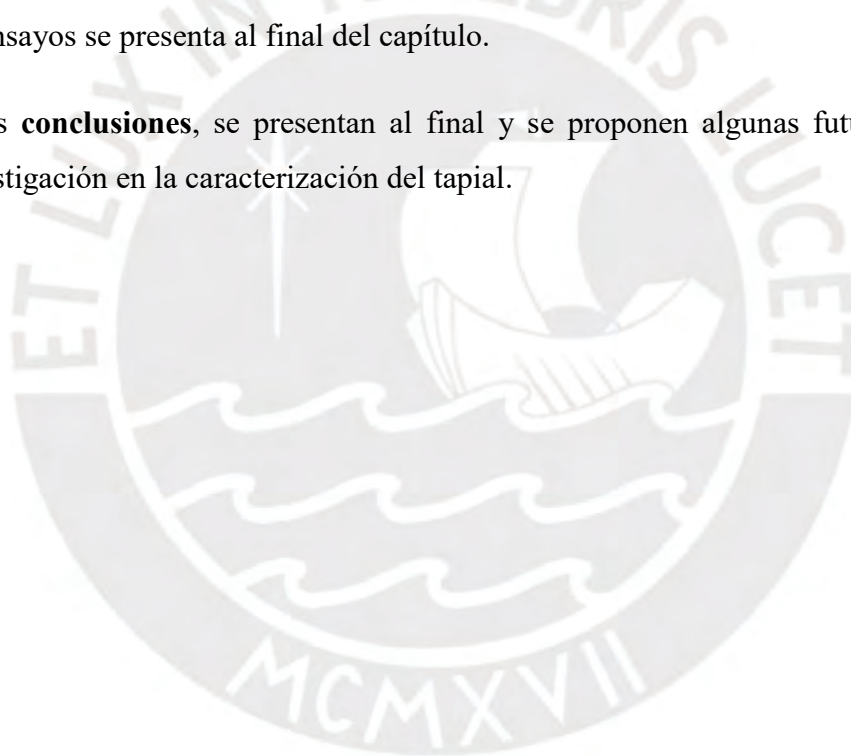
- Las principales variables que controlan la resistencia a tracción del Tapial endurecido son la humedad de mezcla y la granulometría del suelo empleado siempre que se garantice la máxima densidad y aplicación de energía de compactación mínima por capa.
- Existe una correlación entre resistencias máximas a tracción obtenidas en unidades de tapial para los ensayos de compresión diagonal en muretes y tracción indirecta en probetas cilíndricas.
- Existe un comportamiento isotrópico de las unidades de tapial en el rango elástico, tanto en los ensayos de compresión diagonal en muretes, como en los ensayos de tracción indirecta en las probetas cilíndricas.

## 1.5 ORGANIZACIÓN

La presente tesis de investigación contiene siete capítulos, conteniendo lo siguiente:

- El **capítulo 1** presenta la motivación para el desarrollo de la investigación, el alcance, los objetivos, las hipótesis y la organización de la tesis.
- El **capítulo 2** presenta una comparación de la actual normativa nacional e internacional para el diseño y construcción empleando tierra cruda.
- El **capítulo 3** presenta las propiedades de los materiales empleados en el estudio: suelo arcilloso y arena gruesa. Además, se detalla el procedimiento del ensayo de control de fisuración con el cual se decide la proporción óptima de los materiales para la construcción de los especímenes.
- El **capítulo 4** presenta fundamento teórico y modelamiento por elementos finitos, el procedimiento constructivo seguido en la elaboración de muretes, el ensayo de compresión diagonal y una descripción de los resultados obtenidos.

- El **capítulo 5** presenta fundamento teórico y modelamiento por elementos finitos, el procedimiento constructivo seguido en la elaboración de las probetas cilíndricas, ensayo de tracción indirecta y descripción de los resultados obtenidos.
- El **capítulo 6** desarrolla el análisis comparativo a partir de los modelos teóricos y los resultados obtenidos de los ensayos en muretes y probetas cilíndricas. La correlación de ensayos se presenta al final del capítulo.
- Las **conclusiones**, se presentan al final y se proponen algunas futuras líneas de investigación en la caracterización del tapial.



## **CAPÍTULO 2.   NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL**

### **2.1 NORMATIVA NACIONAL**

#### **2.1.1 Norma Técnica de Edificaciones E.080**

La primera norma que incluye al tapial es la norma peruana *NTE E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada* publicada el 2017, procede de una versión anterior publicada el 2006 donde sólo se especificaba al adobe, y esta a su vez procede de una elaborada en 1977, del entonces ININVI, que fue absorbido por el organismo público SENCICO, donde permanentemente se encuentra en revisión y ampliación.

La norma vigente consta de cinco capítulos y seis anexos. El primer capítulo detalla disposiciones generales como el alcance, el objetivo y algunas definiciones. El segundo capítulo trata sobre requisitos de diseño y consideraciones básicas referentes al desempeño esperado para las construcciones de tierra, con énfasis en el adobe. El tercer capítulo desarrolla condiciones de construcción de edificaciones de tapial. El capítulo cuarto desarrolla condiciones de construcción de edificaciones de adobe. El quinto y último capítulo menciona lo referente a consideraciones de intervención en edificaciones patrimoniales.

En los anexos de la actual norma se muestran detalles sobre pruebas de control y selección del material: presencia de arcilla, contenido de humedad, control de fisuración, una recomendación para juntas de avance en tapial y en el último anexo una especificación del nudo empleado en la técnica de refuerzo que utiliza drizas o sogas.

De forma complementaria existen las normas técnicas peruanas NTP emitidas por el sistema Peruano de Normalización INDECOPI:

NTP 331.201. Elementos de suelo sin cocer: adobe estabilizado con asfalto para muros: Requisitos.

NTP 331.202. Elementos de suelos sin cocer: adobe estabilizado con asfalto para muros: Métodos de ensayo.

NTP 331.203. Elementos de suelos sin cocer: adobe estabilizado con asfalto para muros: Muestra y recepción.

## **2.2 NORMATIVA INTERNACIONAL**

Las construcciones con tierra tienen una historia larga y continua en diversas regiones de cada continente del planeta. En diversos momentos, muchos países desarrollados y en vías de desarrollo han producido códigos o leyes nacionales además de documentos de referencia para la construcción en tierra (Maniatidis y Walker, 2003).

Entre los países que cuentan con normativa o con guías nacionales referentes a la construcción en tierra cruda, sin considerar de manera específica la técnica del tapial, se encuentran: Francia, Italia, India, Tanzania, Mozambique, Marruecos, Túnez, Kenia, Costa de Marfil, Turquía, Sri Lanka, México, Brasil, Guatemala y Costa Rica. En el caso de la India y Brasil si bien consideran la técnica del tapial lo hacen empleando mezclas de suelo cemento.

Particularmente, los países con guías nacionales o manuales de construcción que incluyen propiamente la técnica del tapial son: Alemania, Australia y España. Adicionalmente, los países con normativa vigente para la construcción con tapial son: Colombia, EE. UU. (Nuevo México), Nueva Zelanda y Zimbabwe.

### **2.2.1 Guías Nacionales**

#### **2.2.1.1 Alemania**

Alemania Occidental fue uno de los primeros países del mundo en elaborar normas de construcción con tierra. Así, entre 1947 y 1956 se publicaron documentos normativos que incluían al tapial o tierra apisonada. Sin embargo, estos documentos fueron retirados en 1970 (Maniatidis y Walker, 2003).

El *Lehmbau Regeln* (Reglas de construcción de la tierra) se publicó en 1999 y la más reciente versión es la tercera edición revisada y publicada el 2009. Aunque carece del estatus de una norma nacional, proporciona un documento de referencia para la regulación y control de

construcción en tierra a nivel nacional. Ha sido introducido oficialmente en 11 de los 16 estados federales (Dachverband Lehm e.V.)

El capítulo uno establece los requisitos generales de la construcción con tierra (*Allgemeines*), mientras que el capítulo dos especifica los tipos de suelo adecuado para la construcción con tierra (*Baulehm*). El tercer capítulo se concentra en describir los diversos métodos de construcción de muros de tierra (*Lehmbaumstoffe*), y el cuarto capítulo detalla los procedimientos de diseño para cada uno de estos métodos, incluyendo el diseño de bóvedas y muros no portantes (*Lehmbaumteile*). El capítulo cinco presenta las propiedades de la tierra como densidad, aislamiento térmico, permeabilidad y absorción acústica (*Baumstoff- und Baumteilwerte*). El capítulo seis trata términos de contratación de servicios (*Vertragsbedingungen für Lehmbaumleistungen*). El capítulo siete presenta las normas asociadas (*Normen*) y un apéndice con los términos utilizados en el documento (*Sachwortverzeichnis*).

Adicionalmente, se ha actualizado las normas DIN, desde 2013 de manera vinculante (bloques de tierra hechos en fábrica, mortero para construcción de muros de tierra y al mortero de revoque de tierra) y desde 2018 de manera ampliada (DIN18942, DIN18945, DIN18946, DIN18947 y DIN 18948).

#### 2.2.1.2 Australia

Australia fue uno de los primeros países en desarrollar un documento para diseño y construcción con adobe, bloques prensados y tierra apisonada o tapial. Sin embargo, no constituyen de modo expreso un código o norma sino manuales con recomendaciones a tomar en cuenta.

El *Australian Earth Building Handbook* (Walker, 2002) consta de seis capítulos. El capítulo uno expone una breve historia de la construcción con tierra señalando las ventajas y desventajas de los métodos de construcción utilizados. El capítulo dos detalla los materiales y técnicas disponibles para la construcción con tierra. El capítulo tres incorpora consejos sobre el detalle, construcción y mantenimiento de las estructuras de tierra. El capítulo cuatro establece los requisitos de desempeño para el diseño de los muros con respecto a la durabilidad y la integridad estructural, además proporciona directrices para la eficacia del diseño de muros con y sin refuerzo. El capítulo cinco detalla el diseño de bases para construcciones de tierra,

mientras que el sexto capítulo trata sobre control de calidad, formación, y mecanización del proceso. En los apéndices se incluye información detallada sobre las pruebas de control de materiales tanto de laboratorio como en campo.

### **2.2.1.3 España**

En 1992, el Ministerio de Transportes y Obras Públicas de España publicó una *guía para el diseño y construcción de estructuras de tierra*. Dicho documento, aunque no es normativo como el UNE-41410 publicado el 2008 para Bloques de tierra comprimida, sirve como referencia para la construcción con tapial, tiene cinco secciones y el tema principal es la tierra apisonada o tapial, aunque las referencias y comparaciones con las técnicas de adobe también se brindan.

La primera sección del documento es un relato histórico general del tapial y del adobe. La segunda sección detalla los principios de diseño para muros de tierra, principalmente por compresión, tracción y pandeo. La tercera sección examina los métodos de construcción para tapias, donde el encofrado utilizado se detalla, los métodos de apisonamiento y se explica la secuencia de construcción hasta finalmente obtener los muros de tierra. La cuarta y última sección proporciona orientación sobre las medidas de control de calidad para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de diseño en la construcción de muros de tierra.

La guía incluye información sobre ensayos de materiales, aditivos, refuerzos, encofrados y tolerancias generales de construcción.

## **2.2.2 Códigos de diseño y construcción**

### **2.2.2.1 Colombia**

A partir del 2017 se incluye dentro de la normativa colombiana a la tierra como material de construcción, tanto en la técnica del adobe como el tapial, a través de la norma *Evaluación e Intervención de Edificaciones Patrimoniales de Uno y Dos Pisos de Adobe y Tapia pisada* (AIS 610-EP-17). Sin embargo, esta norma solo permite la intervención o reforzamiento de edificaciones existentes, excluyendo a edificaciones nuevas. La norma inicia con una

introducción en la que se da contexto a la misma para luego desarrollar nueve capítulos y dos apéndices. El primer capítulo precisa los alcances y requisitos generales, así como las excepciones. En el segundo capítulo se desarrolla un glosario de notaciones y definiciones. En el tercer capítulo se indican los estudios e investigaciones mínimas requeridas con la finalidad de intervención en una edificación patrimonial. En el cuarto capítulo se precisa la evaluación y características de los materiales existentes y de refuerzo. En el quinto capítulo se describen los criterios de evaluación e intervención. En el sexto capítulo se explican los criterios de evaluación de la estructura existente. En el séptimo capítulo se desarrollan diversas alternativas de reforzamiento estructural. En el octavo capítulo se especifica las consideraciones de análisis y diseño de los elementos estructurales. En el noveno capítulo se establecen criterios para llevar a cabo la reparación y restauración previo al reforzamiento. Finalmente, en los apéndices uno y dos se precisan los niveles de protección y niveles de intervención en edificios patrimoniales, así como el tipo de obra permitidas.

#### **2.2.2.2 Estados Unidos de Norteamérica (Nuevo México)**

El estado de Nuevo México, en EE. UU., cuenta con su propio código de construcción para adobe y tapial *New Mexico Earthen Building Materials Code* emitido por la *Construction Industries Division of the Regulation and Licensing Department*. Este código de construcción proporciona una guía sobre la aptitud del suelo y el contenido de humedad, y establece los requisitos para los encofrados, los métodos de construcción, ensayo y curado de tierra apisonada. El código debe leerse junto con todas las demás normas de construcción aplicables, como el *Uniform Building Code* (UBC). La versión más reciente es la elaborada el 2015 y publicada el 2016.

En particular la norma inicia con un glosario o descripción de los términos usados, seguido de una descripción de los materiales adecuados para cada técnica de construcción con tierra; seguidamente desarrolla las consideraciones de construcción para el adobe, el tapial y los bloques de tierra comprimida. Incluye en estos detalles como las dimensiones de los elementos y la forma de interconexión con vigas y dinteles. Entre otros conceptos se mencionan la resistencia al clima, la presencia necesaria de revoques, y la adecuada colocación de instalaciones eléctricas y sanitarias. Finalmente, se muestran gráficos explicativos.

### 2.2.2.3 Nueva Zelanda

Por contenido, el documento más amplio y completo es el código neozelandés pues comprende desde requisitos de materiales y construcción a cuestiones de diseño estructural y de durabilidad de las edificaciones de tierra, tanto para adobe como para bloques de tierra comprimida (BTC) así como para el tapial o tierra apisonada.

En Nueva Zelanda, el diseño de materiales de construcción de muros de tierra cruda (adobe, adobe prensado, tierra vertida y tierra apisonada), con o sin estabilización química, es regido por tres códigos separados publicados inicialmente en 1998 y actualizados el 2020 por Standards New Zealand (Walker & Morris, 2021):

NZS 4297: 2020 Diseño de ingeniería de edificios de tierra. Establece métodos de diseño estructural para muros de tierra reforzados con altura máxima de 6.5 m. y 3.3 m. para aplicaciones restringidas en muros no reforzados. El espesor mínimo de muro será de 250 mm.

NZS 4298: 2020 Materiales y construcción para edificios de tierra. Define requisitos de materiales y mano de obra para la construcción de muros de tierra diseñados de acuerdo a la NZS 4297 y NZS 4299, y especifica pruebas simples y de bajo costo para determinar la resistencia, durabilidad y requerimientos constructivos.

NZS 4299: 2020 Edificios de tierra que no requieren diseño específico. Equivalente a la norma NZS 3604:2011 Edificios con entramado de madera y NZS 4229: 2013 albañilería de concreto, que no requieren diseño de ingeniería. Si se encuentra en Zona sísmica con  $Z > 0.45$  (Probabilidad de excedencia TR 1/500 años) estará fuera del alcance de la norma y requiere de diseño específico.

### 2.2.2.4 Zimbabwe-ARSO

Se publicó el SADC ZW HS 983:2014: *Rammed earth structures. Code of Practice*. Esta norma brinda orientación sobre el diseño, construcción y métodos de prueba para estructuras de tierra apisonada. Norma regional estándar que reemplaza a ZWS 724: 2000 *Standard Code of Practice* de Zimbabwe para estructuras de tapial, que ahora se retira (ARSO, 2015).

El estándar consta de seis secciones más apéndices: la primera sección detalla los materiales y sus especificaciones; la sección dos los requisitos de encofrado; la sección tres las disposiciones de diseño de cimentación; la cuarta sección detalla el diseño de la superestructura con enfoque en la resistencia a la compresión, absorción de agua y la erosión del clima de las paredes de tierra, incluyendo detalles para la inspección visual; la quinta sección se concentra en la estabilidad estructural de las paredes; la sexta y última sección da orientación sobre los detalles y acabados de los elementos de barro. Finalmente, los apéndices incluyen información detallada sobre ensayos aplicables a los materiales.

### 2.3 COMPARACIÓN DE NORMATIVA EN TAPIAL

De lo expuesto anteriormente se encuentra que además de la norma peruana existen al menos siete documentos que incluyen formalmente al tapial, tres de los cuales son guías o manuales con recomendaciones de diseño y construcción (Alemania, España y Australia), y los otros cuatro tienen rango de ley al ser códigos de construcción (Colombia, EEUU-Nuevo México, Nueva Zelanda y Zimbabwe). En la **Tabla 1** se compara el contenido de la normativa nacional e internacional de acuerdo al alcance de cada una incluyendo las guías nacionales mencionadas a modo de referencia.

Entre los principales aspectos de verificación de calidad se encuentra la resistencia a la compresión. La resistencia de los muros de tierra construidos no debe ser inferior a la resistencia a compresión especificada en el diseño (Maniatidis y Walker, 2003). En ese sentido, la norma peruana reconoce una resistencia mínima por compresión a carga última de 1.0 MPa ensayado en un cubo de 0.10 m de arista, donde se espera que al menos cuatro de seis muestras superen el mínimo (artículo 8.1 E.080). Se precisa, también, una resistencia última a compresión de 0.6 MPa en caso se ensayen pilas con una esbeltez equivalente a 3.

Al respecto de lo mencionado anteriormente, la norma colombiana propone una resistencia a la compresión de 0.5 MPa, obtenido de ensayos en muretes de 1.5 a 5 de esbeltez (AIS 610-EP-17 Tabla 6.3.1-1). Similarmente, la norma neozelandesa propone una resistencia a compresión de 0.5 MPa para muestras con densidad entre 1400 kg/m<sup>3</sup> [13.73 kN/m<sup>3</sup>] a 2200 kg/m<sup>3</sup> [21.57 kN/m<sup>3</sup>] y de solo 0.35 MPa para muestras entre 800 kg/m<sup>3</sup> [7.85 kN/m<sup>3</sup>] y 1400 kg/m<sup>3</sup> [13.7 kN/m<sup>3</sup>] (Walker & Morris, 2021), ensayado en probetas cilíndricas que tendrán una relación altura ancho de 2 a 1 (Apéndice A.5 NZS 4298). Mientras tanto, la norma








norteamericana propone usar la ASTM D1633-00 y una resistencia mínima de 2.0 MPa (unos 300 *psi*), sin importar si se trata o no de suelos estabilizados con cemento (14.7.4.14 NMAC). Adicionalmente, la norma africana precisa una resistencia de 1.5 MPa, en muros de hasta 3 m de altura y 40 mm de espesor, y de 2.0 MPa para muros de 3m a 6m de altura (dos niveles), ensayado en muros con siete días de secado y sin mostrar depresión tras ensayo de compresión por aplastamiento.

**Tabla 1** Contenido temático en normativa nacional e internacional en tapial. Guías (X) y Normas (O)

Contenido		Perú	Australia	Alemania	Colombia	España	E.E.UU.	Nuevo México	Nueva Zelanda	Zimbawe (ARSO)
<b>Aspectos Generales</b>	Historia de la construcción con tierra		X			X				
	Obras históricas o Patrimoniales	O			O	X	O			
	Glosario de términos y definiciones	O	X	X	O		O	O	O	
<b>Evaluación del Material</b>	Tipos de materiales adecuados (suelos, y aditamentos)	O	X	X	O	X	O	O	O	
	Pruebas de control aplicado a los materiales a usar	O	X	X	O	X	O	O	O	
<b>Técnica de construcción</b>	Técnica de construcción de tapial - Proceso Constructivo	O	X	X		X	O	O	O	
	Diseño de cimentación	O	X		O	X	O	O	O	
<b>Consideraciones de Diseño</b>	Diseño considerando restricciones por resistencia - con o sin refuerzo	O	X	X	O	X	O	O	O	
	Diseño considerando restricciones por resistencia al fuego		X	X	O	X		O		
	Diseño considerando restricciones de durabilidad (clima, intemperie, fuego)	O	X	X	O	X	O	O	O	
	Diseño considerando propiedades del producto (Densidad, permeabilidad, acústica)		X	X		X	O	O	O	
	Diseño considerando restricciones de construcción (instalaciones sanitarias y eléctricas)	O	X					O	O	O
<b>Detalles y Acabados</b>	Detalles Constructivos	O	X	X	O	X	O	O	O	
	Acabados			X	O	X	O		O	
	Pruebas de control de calidad para el tapial	O	X		O		O	O	O	

De manera complementaria, en el manual de construcción australiano se propone un ensayo de compresión en probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm con un valor de diseño de 0.4 a 0.6 MPa. A continuación, la **Tabla 2** compara estos valores.

**Tabla 2** Comparativo normativa nacional e internacional – Resistencia a la compresión (MPa)

Tipo de probeta		Perú	Australia	Colombia	EE.UU. Nuevo México	Nueva Zelanda	Zimbawe (ARSO)	
		Resistencia a la compresión indicada en la norma (MPa)						
	Cubo de 0.1m x 0.1m x 0.1m	1.0	-	-	-	-	-	
	Probeta cilíndrica 6"x12" (con o sin cemento añadido)	-	-	-	2.0	-	-	
	Probeta cilíndrica 150 mm x 300 mm	-	0.4 a 0.6	-	-	-	-	
	Pilas con esbeltez igual a 3	0.6	-	-	-	-	-	
	Muretes de esbeltez de 1.5 a 5	-	-	0.5	-	-	-	
	Probeta cilíndrica con una relación altura ancho de 2 a 1 $\gamma = 0.8-1.4 \text{ Tn/m}^3$ y $1.4-2.2 \text{ Tn/m}^3$	-	-	-	-	0.35 a 0.50	-	
		Resistencia al aplastamiento indicada en la norma (MPa)						
	Aplicar esfuerzo sin mostrar depresión en muros de 0.4 m de espesor y de 3 m a 6 m de altura	-	-	-	-	-	1.5 a 2.0	

En relación a esfuerzos de tracción, y debido a la complejidad de desarrollar ensayos de tracción directa, la norma peruana propone la realización de ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas, o ensayo brasileño, donde se espera una resistencia última a la tracción de 0.08 MPa (artículo 8.2 E.080); también se propone la posibilidad de realizar ensayos de compresión diagonal en muretes donde se espera una resistencia última de 0.025 MPa (artículo 8.5 E.080). Sin embargo, este valor se reportó como admisible en la anterior edición de la norma por lo que se sugiere revisar dicho valor. En ese sentido, si se toma el factor de seguridad usualmente usado para condiciones de laboratorio (FS= 2.5) se tendría una resistencia última

de 0.0625 MPa (Más próximo al valor de 0.08 MPa indicado para probetas cilíndricas). Adicionalmente, la norma indica una resistencia última a la tracción para muros por flexión de 0.14 MPa y una resistencia última por tracción en mortero de barro de 0.012 MPa. El ensayo de tracción indirecta en el caso del mortero de barro fue desarrollado como parte del estudio de reparación de fisuras estructurales en muros históricos (Vargas-Neumann et al, 2010).

Por otro lado, la norma de Nueva Zelanda no menciona el ensayo de compresión diagonal en muretes o de tracción en probetas cilíndricas, pero propone una resistencia a la tracción debido a la flexión de 0.1 MPa (Apéndice J2-NZS4298), y un esfuerzo de unión a tracción/flexión de 0.02 MPa (Tabla 4.1 NZS 4297:1998). Simultáneamente, la norma regional sudafricana, que reemplaza a la anterior norma de Zimbawe, no incluye entre sus ensayos la medida de resistencia a tracción, sólo menciona límites para la resistencia a la flexión controlando la esbeltez de los muros. Por su parte, la norma norteamericana en Nuevo México NMAC 2015 no incluye entre sus ensayos la medida de resistencia por tracción.





En relación a los esfuerzos de corte, solo dos normas además de la peruana lo incluyen: la norma colombiana indica una resistencia de 0.0024 MPa y la norma de Nueva Zelanda precisa un esfuerzo cortante nominal total máximo de 0.09 MPa.

Si bien un ensayo de tracción, indirecto o por flexión, no produce los mismos esfuerzos que un ensayo de corte, si se asumiera un modelo de falla en corte puro, como propone el ASTM, se tendrían resistencias máximas similares o incluso idénticas. A continuación, la **Tabla 3** compara los valores indicados en tracción y en cortante para las normas revisadas.

Por otro lado, sobre la protección frente a la erosión, en la norma peruana no se indica un procedimiento específico para medir o verificar la calidad de la construcción en obra. La densidad del tapial tampoco se indica como medida de control, aunque suele variar entre unos 17 kN/m<sup>3</sup> y 22 kN/m<sup>3</sup>, lo que permitiría, de garantizarse, estimar un buen comportamiento a lo largo de su vida útil. En la norma africana se menciona la resistencia por vulnerabilidad a la erosión y un ensayo para medirlo (en sus anexos F y G), además de indicar la densidad mínima en su artículo 13.2 y su anexo E (> 95% de la máxima densidad seca 18 kN/m<sup>3</sup> o de

17 kN/m<sup>3</sup>). En la norma de Nueva Zelanda y en la de EEUU no se menciona ensayos que midan la vulnerabilidad de los muros frente a la erosión. Se sugiere, por tanto, añadir en la norma peruana por lo menos un control por densidad que permita asegurar un desempeño mínimo frente a la erosión (densidad seca mínima de 17 kN/m<sup>3</sup>).

**Tabla 3** Comparativo normativa nacional e internacional. Resistencia a tracción y al corte (MPa).

		Perú	Colombia	EE.UU. Nuevo México	Nueva Zelanda	Zimbawe (ARSO)
Tipo de ensayo		Resistencia última a tracción indicada en la norma (MPa)				
	Tracción indirecta sobre probeta cilíndrica 6"x12"	0.08	-	-	-	-
-	Módulo de rotura de mampostería de tapia pisada en tensión horizontal	-	0.06	-	-	-
	Tracción por compresión diagonal en muretes de aprox 65 x 65 x e <sub>m</sub>	0.025* (0.0625)	-	-	-	-
	Resistencia a la unión entre mortero y adobe	0.012	-	-	-	-
-	Resistencia por adherencia o unión en tracción/flexión	-	-	-	0.02	-
-	Tracción por Flexión	0.14	-	-	0.10	-
		Resistencia última a corte indicada en la norma (MPa)				
	compresión diagonal en muretes de aprox 65 x 65 x e <sub>m</sub>	0.025* (0.0625)	-	-	-	-
-	Resistencia al cortante de mampostería de tapia pisada	-	0.0024	-	-	-
-	Resistencia al cortante nominal	-	-	-	0.09	-

\*: En la anterior edición de la norma E.080 se indicó como admisible, en cuyo caso la resistencia última resultaría el valor indicado entre paréntesis.

## **CAPÍTULO 3. MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Previo a la construcción de los muretes y cilindros a ser ensayados es necesario estudiar las propiedades de los materiales que se usarán en su conformación. En ese sentido, se analizaron el suelo arcilloso y la arena gruesa empleadas en la conformación de los especímenes de tapial.

En el caso del suelo arcilloso se analizó su clasificación, su granulometría y sus límites de plasticidad. En el caso de la arena su clasificación y la granulometría, no siendo aplicable el ensayo de límite de plasticidad.

Previamente, siguiendo las recomendaciones de la Norma E.080 se realizó un ensayo de control de fisuración con la finalidad de obtener la mejor proporción Suelo: Arena para la conformación del tapial.

### **3.2 ENSAYO DE CONTROL DE FISURACIÓN**

Para determinar la proporción suelo arcilloso y arena gruesa que produce la menor fisuración de las unidades de tapial se suele realizar el ensayo de control de fisuración. Procedimiento utilizado en la construcción con adobe que considera como principales variables para la fisuración la composición de la mezcla y el tiempo de secado del mortero. El ensayo debe ser realizado con adecuada ventilación y bajo sombra.

El ensayo consiste en fabricar ‘emparedados’ elaborados con 2 bloques de adobe unidos por mortero hecho con el suelo en estudio y con la mínima cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla trabajable. La arena gruesa es de tamaño 0.5 a 5mm aproximadamente o comprendida entre las mallas ASTM #40 y ASTM #4, en las proporciones en peso indicadas en la **Tabla 4**, con base en lo indicado en la norma peruana E.080.

**Tabla 4** Proporciones en peso Suelo - Arena Gruesa para control de fisuración (Norma E.080, Anexo 4)

Número de espécimen	Proporción Suelo: Arena Gruesa
1	1: 3.00
2	1: 2.50
3	1: 2.00
4	1: 1.50
5	1: 1.00
6	1: 0.50
7	1: 0.00

Los bloques de adobe empleados en el caso particular fueron de 0.20 x 0.26 x 0.07 m, la mezcla empleada para la elaboración de los bloques no fue relevante pero sí que sea la misma para que la absorción fuese lo más regular posible. El espesor escogido para el mortero fue de unos 15 mm y como base para la obtención de las mezclas se tomó un estimado de 3 kg a 4 kg por tanda, lo cual fue suficiente para obtener el espesor de mortero deseado.

Las herramientas usadas durante el ensayo fueron:

- Cepillo grande: Para limpieza inicial de las caras de los bloques de adobe.
- Badilejo: Para limpieza inicial de los bloques de adobe, proceso de mezclado del suelo arcilloso con la arena gruesa tamizada, y para el proceso de colocación del mortero.
- Botella surtidora de agua: Para el proceso de humedecimiento de las caras de contacto con el mortero.
- Galonera con agua: Para la elaboración del mortero, humedecimiento de la mezcla hasta obtener la consistencia deseada.
- Batea: Para el mezclado del suelo arcilloso con la arena gruesa tamizada en la elaboración del mortero.
- Escantillón: Para controlar el espesor de la junta de mortero y mantenerla uniforme.
- Cinta métrica: Para el proceso de marcado del escantillón.
- Lápiz blando: Para el proceso de marcado del escantillón.
- Martillo de goma: Para dar golpes sobre el bloque de adobe superior al momento de nivelar y alinear los bloques entre sí.

- Plomada: Para nivelar la verticalidad de las caras de control, una de frente y una de lado.
- Tizas: Para marcar los bloques con las características de cada muestra, como la mezcla empleada de suelo arcilloso y arena gruesa, autor del ensayo y fecha de elaboración.

Aunque es costumbre entre los constructores artesanales de adobe y tapial antes de elaborar el mortero hacer dormir el suelo arcilloso para asegurar que la mezcla resulte lo más uniforme posible en su contenido de humedad, y sea trabajable, en esta oportunidad no se hizo tal proceso, sino que se empleó la mezcladora vertical del LEDI.

Las proporciones de Suelo arcilloso: Arena gruesa, fueron medidas con sus humedades naturales, no secas, y preparadas en simultáneo, pero considerando las humedades para fines de control y registro. Para tal efecto se usó el siguiente equipo:

- Balanza electrónica, precisión  $\pm 0.1g$ .
- Vasija de loza, #20, peso 189.1g.
- Bandejas, para colocar las muestras de suelo y arena tras ser pesadas.
- Cuchara surtidora.

### 3.3 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

Una vez seleccionados los bloques se limpió cada uno de estos con ayuda de un badilejo y un cepillo, se ordenaron en pares sobre la mesa de trabajo y se separó el primer par de adobes para su posterior unión con el mortero. Seguidamente, se midió con ayuda de la balanza, vasijas y bandejas, los pesos del suelo y de la arena gruesa tamizada. Descartando los valores extremos, finalmente se emplearon las dosificaciones que se indican en la **Tabla 5**.

Para cada espécimen definido, conforme lo mostrado en la **Figura 2**, se procedió a mezclar la primera tanda en la batea agregando agua hasta tener una consistencia tal que sea posible la aplicación del mortero sobre los bloques de adobe.

**Tabla 5** Proporción en peso Suelo - Arena Gruesa usada

Número de espécimen	Proporción	
	Suelo: Arena Gruesa	Suelo: Arena Gruesa (en kg)
1	1: 2.00	1.20: 2.40
2	1: 1.50	1.44: 2.16
3	1: 1.00	1.80: 1.80
4	1: 0.50	2.00: 1.00
5	1: 0.25	3.20: 0.80

**Figura 2.** Proporciones de suelo arcilloso y arena gruesa previa a la mezcla

Una vez que se tuvo listo el mortero con las proporciones indicadas en la **Tabla 5** y en la **Figura 2**, se procedió a humedecer la cara superior rugosa del primer bloque de adobe, colocado sobre la mesa de trabajo, así como la cara superior lisa del segundo bloque que irá colocado sobre el mortero con ayuda del surtidor de agua. Se procedió a aplicar el mortero con ayuda del badilejo y de la mano libre, desde el centro hacia los costados asegurándose de alcanzar un nivel ligeramente superior al deseado de manera que el mortero colocado no muestre vacíos que induzcan un futuro agrietamiento que se confunda con las grietas naturales esperadas por el proceso de contracción de secado.

Se humedeció la cara lisa del segundo bloque de adobe para evitar que le reste humedad al mortero al momento del asentado del bloque. Con ambas manos se colocó el segundo bloque con la cara humedecida sobre el mortero y se soltó ligeramente por encima de este para luego presionarlo con el fin de lograr la unión con el bloque, y de alcanzar el espesor de junta establecido. Con ayuda del escantillón, el martillo de goma y la plomada se controló el alineamiento final y la uniformidad del espesor de junta. Finalmente, se marcó con una tiza las características de la mezcla usada, la autoría del ensayo y la fecha de realización del mismo conforme lo mostrado en la **Figura 3**.



**Figura 3.** Procedimiento de elaboración de muestras

Luego de 48 horas de secado a la sombra, los emparedados fueron abiertos e inspeccionados cuidadosamente para examinar el fisuramiento presente en el mortero. El emparedado que presente la menor cantidad de fisuras visibles conteniendo la mínima cantidad de arena agregada indicará la proporción o dosificación Suelo: Arena gruesa más adecuada para la construcción. En la **Figura 4** se muestra el resultado final del ensayo.



**Figura 4.** Resultado final del ensayo de Control de Fisuración. Proporción Suelo: Arena gruesa

Tras abrir los 5 “emparedados” y conforme lo recomendado por la norma E.080 se observó que la proporción Suelo: Arena con menor contenido de arena añadida y que muestra menor fisuración, o ausencia de esta, es la que contiene igual contenido de suelo y de arena gruesa en peso, es decir, la proporción **1:1** en peso.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL: SUELO ARCILLOSO Y ARENA GRUESA**

#### **3.4.1 Ensayo de Mecánica de Suelos**

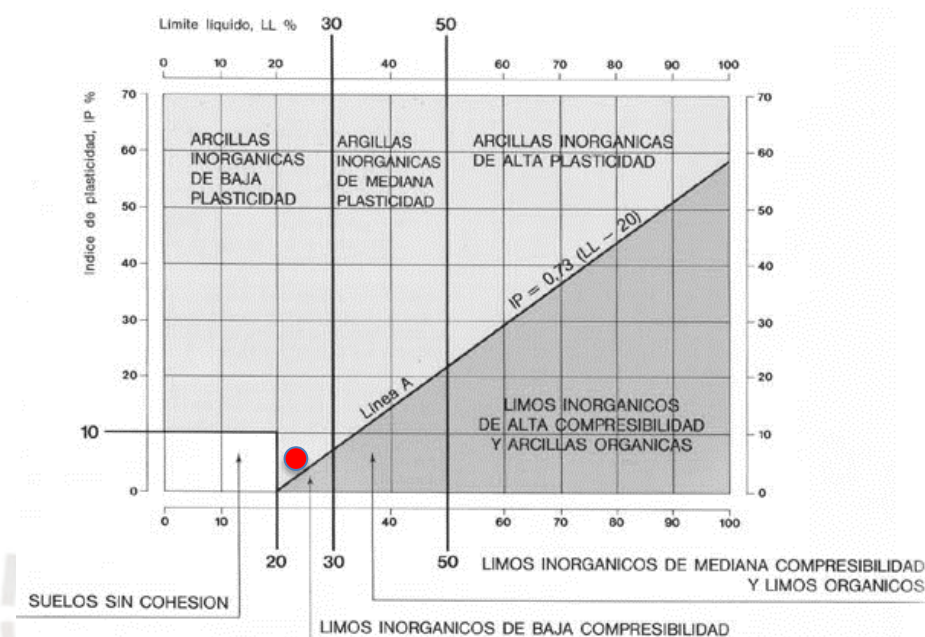
Los ensayos previstos para el suelo y la arena gruesa fueron: Clasificación, granulometría, y límites de plasticidad o de Atterberg. Los resultados para el suelo se muestran en la **Tabla 6** y se adjunta el reporte brindado por el laboratorio en el **Anexo A**.

**Tabla 6** Clasificación SUCS y límites de plasticidad del suelo arcilloso y la arena gruesa

Ensayo	Resultados
Clasificación SUCS Suelo arcilloso	CL-ML
Límites de Atterberg Suelo arcilloso	Límite Líquido: 24 Límite Plástico: 17 Índice de Plasticidad: 7
Clasificación SUCS Arena gruesa	SP-SM

A partir de estos resultados comparando con la carta de Casagrande para caracterización de suelos se puede verificar que el suelo arcilloso se identifica como un CL-ML y cuenta con la cohesión mínima para conformar el tapial como se muestra en la **Figura 5**.

El límite plástico LP y límite líquido LL son los contenidos de agua por encima de los cuales el suelo cambia su comportamiento de semisólido a plástico y de plástico a líquido, respectivamente. De ambos límites se desprende el índice de plasticidad IP el cual expresa el rango de contenido de humedad dentro del cual el suelo permanece plástico y proporciona información sobre la naturaleza probable del suelo (Gomes *et al*, 2014).

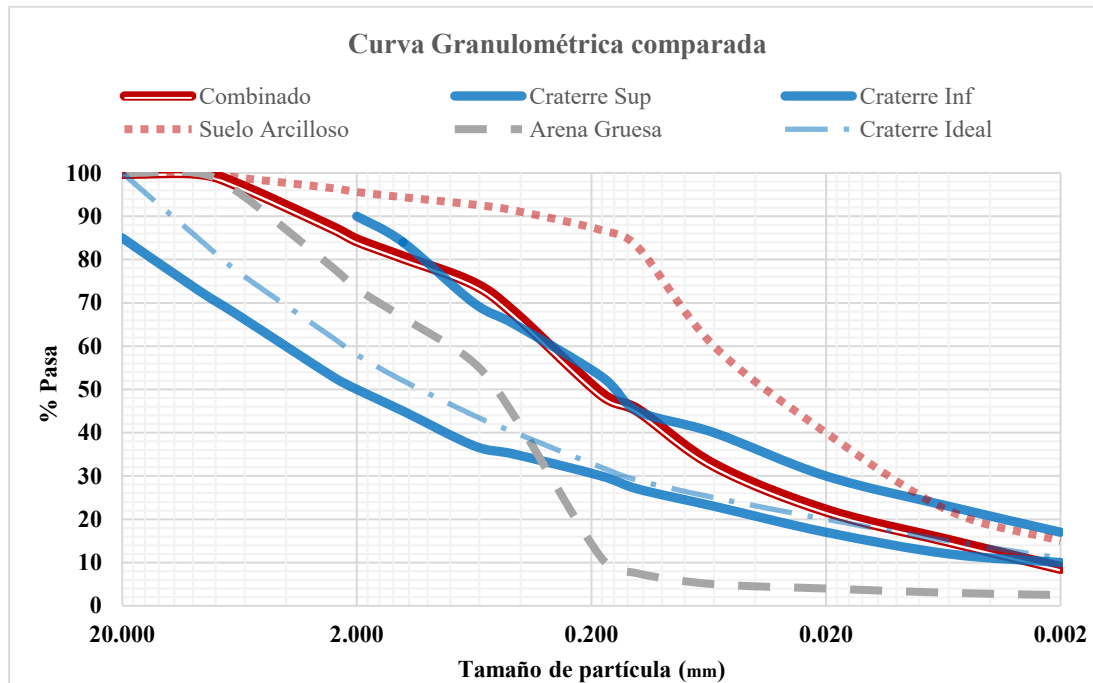


**Figura 5.** Plasticidad del suelo arcilloso empleado en la elaboración de muestras. Imagen adaptada de web

Si bien los valores umbrales para el límite líquido son amplios y variados según diversos autores, estos coinciden en contar con un LL máximo de 45 %, y un IP entre 7 % y 29 %. Por otro lado, los valores recomendados coinciden con un LL alrededor de 35 y un índice de plasticidad entre 15 y 18 (obtenido de la tabla 4, Gomes *et al*, 2014). Por lo tanto, el suelo empleado (LL 24 %, IP 7 %) presenta una plasticidad dentro de los valores límites aunque alejados de los valores recomendados.

Adicionalmente, a partir de las curvas granulométricas del suelo arcilloso y la arena gruesa, resulta una distribución que se puede comparar con las recomendaciones de CRATERRE: Grava, 60 mm to 2 mm (0 a 15%), Arena, 0.06mm a 2.00mm (40 a 50%), Limo 0.002mm a 0.06mm (20 a 35%), Arcilla, menor a 0.002mm (15 a 25%) (Tejada *et al*, 2016).

En la **Figura 6** se muestra una comparación de las curvas de los materiales empleados con los límites superior, inferior e ideal que propone CRATERRE-EAG (obtenido de Hall, 2004 a partir de Houben & Guillaud, 1994).



**Figura 6.** Curva granulométrica de suelo arcilloso con arena gruesa 1:1 comparado con límites recomendados por CRAterre

Finalmente, se verifica que el suelo arcilloso limoso de baja plasticidad posee suficiente cohesión y plasticidad para ser utilizado en la conformación de tapial y que la granulometría de suelo combinado con arena mejora considerablemente su distribución granular de acuerdo a lo recomendado por CRAterre. En ese sentido, si se hubiera elegido una combinación de suelo: arena 1: 0.5 esta hubiera resultado muy por encima de la curva recomendada, no permitiendo una adecuada compactación, y si se hubiera elegido una combinación de 1:1.5, si bien hubiera estado en mayor parte dentro de los límites también se hubiera reducido demasiado la cantidad de arcilla presente, debilitando la cohesión de la mezcla final. Por lo tanto, se confirma la proporción suelo: arena en peso de **1:1** como la más adecuada.

Se sugiere a partir de estos valores introducir en la normativa nacional parámetros que permitan obtener una distribución granulométrica cercana a la indicada por CRAterre, así como límites de plasticidad cercanos a lo indicado por Gomes *et al.* Estas recomendaciones promoverían un contenido arcilloso que brinde cohesión mínima y una óptima granulometría que permita una correcta compactación del material.

## **CAPÍTULO 4. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

De acuerdo a la norma peruana E.080 uno de los métodos para la determinación de la resistencia última al corte es mediante la ejecución de ensayos de compresión diagonal en muretes.

Con el fin de analizar el comportamiento particular del material empleado se construyeron muretes de **0.60 m x 0.60 m x 0.20 m**, los cuales fueron fabricados sin junta de construcción. Las dimensiones elegidas se debieron principalmente a la posibilidad de manipulación de los muretes manteniendo una esbeltez de tres, así como un peso propio que minimice el riesgo de que se dañen las muestras antes de ser ensayadas.

Se alternaron entre dos composiciones de mezcla granulométrica, con y sin arena agregada, y con tres humedades relativas en peso, se elaboraron los muretes que posteriormente fueron ensayados hasta la rotura, registrando además de las cargas las deformaciones locales y globales que permitan identificar las propiedades mecánicas de los especímenes para cada configuración definida.

Además, se elaboró un modelo de elementos finitos utilizando el programa SolidWorks® con el fin de comparar los valores hallados asumiendo isotropía en el rango elástico.

### **4.2 CONSTRUCCIÓN DE MURETES**

Identificados las humedades de mezcla establecidos se procedió a construir 30 muretes. Los muretes fueron construidos utilizando el encofrado de madera mostrado en la **Figura 7**.

En relación al proceso constructivo de cada murete, este consistió de las siguientes etapas:

- Sobre una base de madera sólida se ensambló el encofrado ajustando sus partes y se nivelaron verticalmente las caras internas del encofrado.

- A través de una malla metálica de abertura 1'' se tamizó el suelo para eliminar terrones y gravas.
- Se pesó el suelo con ayuda de baldes y una balanza. Las tandas de suelo arcilloso fueron de aproximadamente 170 kg por murete. Esta cantidad de material se vertió en la tolva de la mezcladora vertical con su humedad natural.
- Se calculó la cantidad necesaria de agua a ser añadida según la corrección por humedad natural del suelo y la humedad deseada (9%, 12% o 15%). La humedad de referencia se obtenía de secar una muestra la tarde anterior al día de la elaboración de los muretes.
- Se pesó la cantidad de agua necesaria y se vertió en la tolva de la mezcladora.
- Se batió con ayuda de la mezcladora vertical eléctrica del LEDI por al menos 3 minutos.
- Se vertió la mezcla dentro del encofrado hasta una altura de aproximada de 10 cm a 12 cm por capa.
- Se apisonó la mezcla con ayuda de un pisón de 10 kg de peso y a través del impacto de 120 a 140 golpes por capa aproximadamente. La capa final o superior del murete tuvo un espesor aproximado de 8 cm a 10 cm.
- Se controló la altura deseada antes del desencofrado sobresaliendo lo suficiente para que no falte altura debido a la concavidad generada al centro del tapial terminado.
- Se registró la humedad real de la mezcla para la fabricación del murete durante su construcción. En todos los casos resultó similar a lo deseado.
- Luego de al menos 15 minutos de terminado el murete se desencofró con cuidado de no dañar las esquinas. En el caso de las mezclas demasiado húmedas fue necesario esperar como mínimo 1 hora para proceder con el desencofrado.
- Una vez seco el murete se marcó con tiza sus principales características para su identificación futura (Por ejemplo, "MSS151" que significa Murete construido con Suelo solo, con una humedad relativa de mezcla de 15% y la numeración del espécimen desde 1 hasta 5).



**Figura 7.** Encofrado de madera empleado, mezcladora vertical y resultado del vaciado

Para poder colocar los sensores de desplazamiento en una de las caras de los muretes se engarzaron fierros de 4mm de diámetro insertados hasta la mitad del muro en estado fresco con el fin de dañar lo menos posible el espécimen. La **Figura 8** muestra la ubicación de uno de estos casos.

Se repite el procedimiento para los treinta muretes, siempre en estado fresco para evitar dañar el espécimen en la medida de lo posible.



**Figura 8.** Murete fresco con elementos incrustados para posterior ensayo de compresión diagonal y registro de deformaciones

## 4.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES

### 4.3.1 Interpretación de los ensayos

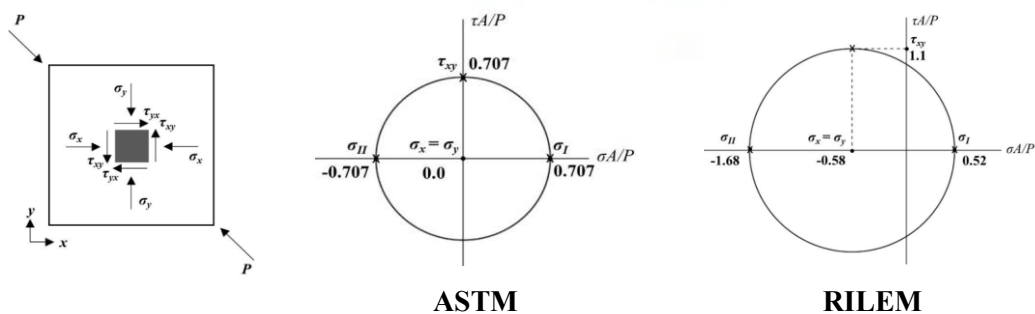
Al respecto del ensayo de compresión diagonal, el procedimiento de laboratorio está normalizado por ASTM y RILEM. Sin embargo, entre ambos se hallan algunas diferencias en la interpretación de los resultados como en la evaluación de las propiedades mecánicas de la prueba experimental; de hecho, el código RILEM proporciona información sólo sobre la resistencia a la tracción diagonal, mientras que la norma ASTM también da indicaciones sobre la evaluación del módulo de corte  $G$ , con la ayuda de deformímetros colocados convenientemente. La principal diferencia es la definición de los esfuerzos dentro del panel, cuando está sujeto a carga diagonal.

La norma ASTM asume que la prueba de compresión diagonal produce una tensión de corte uniforme:

$$\tau_{xy} = \frac{\sqrt{2} P}{2 A} = 0.707 \frac{P}{A} \quad (01)$$

Donde:  $P$  es la carga diagonal aplicada y  $A$  es el área lateral neta (asumiendo la unidad como sólida).

El código RILEM considera que el campo de esfuerzo diagonal en un panel cuadrado no es uniforme, esto fue evaluado por Frocht en 1931 sobre la hipótesis de un espacio elástico homogéneo isotrópico y continuo. Los ejes  $x$  e  $y$  son los indicados en la **Figura 9** para ambas interpretaciones.



**Figura 9.** Interpretación de la prueba de compresión diagonal según ASTM y RILEM con base en el círculo de Mohr (Adaptado de Brignola *et al*, 2008)

Por tanto, de acuerdo a RILEM asumiendo como estado de referencia el esfuerzo de tensión principal máxima en el centro del panel se obtiene:

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.58 \frac{P}{A} \quad (02)$$

$$\tau_{xy} = 1.1 \frac{P}{A} \quad (03)$$

$$\sigma_I = 0.52 \frac{P}{A} \quad (04)$$

$$\sigma_{III} = -1.68 \frac{P}{A} \quad (05)$$

Teniendo en cuenta el valor máximo de la carga aplicada, de acuerdo con la interpretación ASTM de la resistencia a la tracción de un murete se obtiene que es idéntica a la resistencia al corte. Por tanto:

$$f_{t,ASTM} = 0.707 \frac{P}{A} \quad (06)$$

Mientras tanto, en la interpretación de RILEM los esfuerzos de tracción en el centro del panel son diferentes:

$$f_{t,RILEM} = 0.52 \frac{P}{A} \quad (07)$$

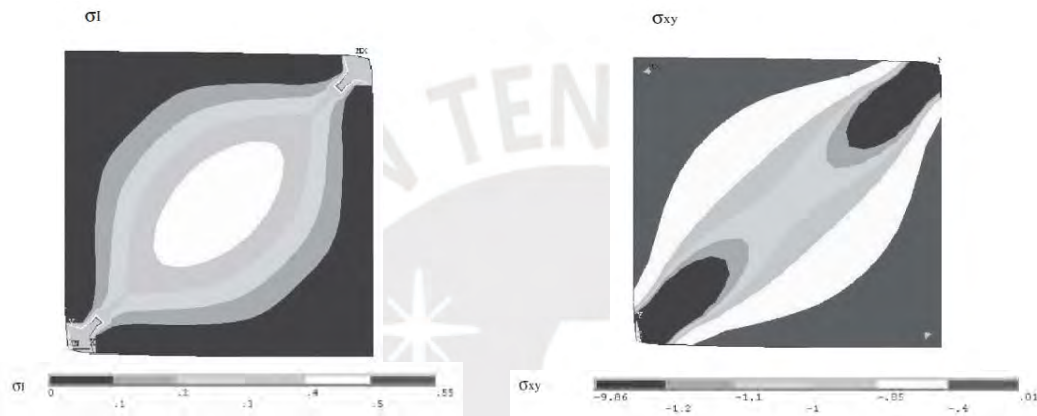
Adicionalmente, de acuerdo a la bibliografía si se hace un análisis por elementos finitos la solución elástica proporciona un estado de esfuerzos en el centro del panel similar (Brignola *et al*, 2008):

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.56 \frac{P}{A} \quad (08)$$

$$\tau_{xy} = 1.05 \frac{P}{A} \quad (09)$$

$$\sigma_I = 0.5 \frac{P}{A} \quad (10)$$

$$\sigma_{II} = -1.62 \frac{P}{A} \quad (11)$$



**Figura 10.** Respuesta elástica normalizada a esfuerzo principal  $\sigma_1$  y cortante  $\sigma_{xy}$  (Adaptado de Brignola *et al*, 2008)

La actual norma peruana E.080 en el artículo 8.5 coincide numéricamente en su propuesta con RILEM y determina la falla por tracción, para un murete de tapial, según la siguiente fórmula:

$$f_t = 0.5 \frac{P}{A} \quad (12)$$

Donde:  $f_t$  es el esfuerzo último a tracción en el centro del murete en la dirección principal,  $P$  es la carga diagonal aplicada y  $A$  es el área lateral neta del murete de ensayo.

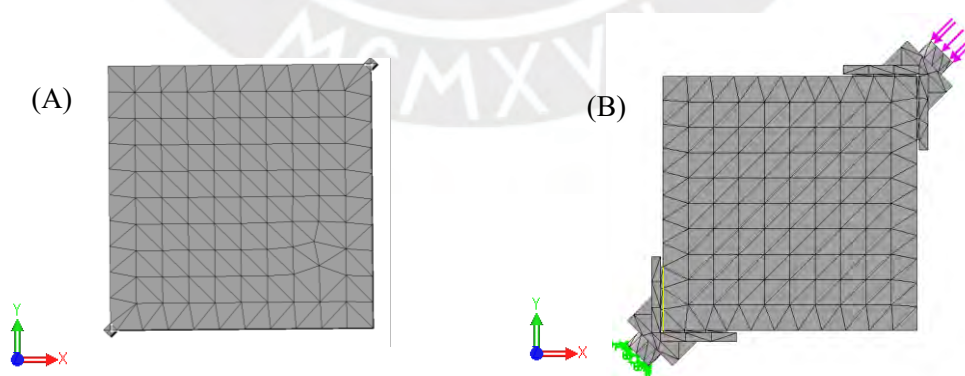
De acuerdo a la norma, la resistencia última es de **0.025 MPa**. Sin embargo, este valor se indicó en su anterior versión como resistencia admisible, por lo que deberá revisarse en el fuero pertinente si ese valor se debe mantener o si, empleando el factor de seguridad usual para condiciones de laboratorio (FS = 2.5), la resistencia última a tracción debe ser **0.0625 MPa**, considerando que al menos cuatro ensayos de seis deben superar ese valor mínimo para aceptar al material como adecuado en la construcción de tapial.

Adicionalmente, la norma peruana asume una distribución de esfuerzos similar a ASTM, es decir de un cortante puro, por lo que su falla última por tracción y por corte serían la misma.

#### 4.3.2 Análisis por elementos finitos

Con el objetivo de revisar la posibilidad de hacer uso de la propuesta teórica de la norma RILEM y en concordancia con lo hecho por otros investigadores, se procedió a analizar con ayuda del software SolidWorks® los esfuerzos máximos obtenidos en el centro de un murete sometido a un ensayo de compresión diagonal.

De este modo, adicional a la propuesta de Frocht (RILEM) y Brignola *et al* (2008) se procedió a modelar y simular el ensayo de compresión diagonal sobre un murete con dimensiones similares al estudio de referencia (120 x 120 x 50 cm) y en segundo lugar a modelar y simular un murete idéntico al ensayado en el presente estudio (60 x 60 x 20 cm). Para el modelo con ancho 50 cm se empleó una malla de carga casi puntual, o de apoyo mínimo, y en el caso del muro de 20 cm de espesor se simularon dos modelos de aplicación de carga, como se muestra en la **Figura 11**, una con un apoyo pequeño o mínimo (Tipo A), que se aproxima a una aplicación de carga puntual, y otro (Tipo B) de dimensiones similares a lo empleado en el ensayo real de laboratorio.



**Figura 11.** Mallas empleadas en el análisis de elementos finitos. Izquierda (Tipo A) con apoyo casi puntual, y a la derecha (Tipo B) con apoyo similar al empleado en el laboratorio PUCP

Se utilizó uso de una malla estándar de diez segmentos por lado, considerando 16 puntos jacobianos, y variando eventualmente el coeficiente de Poisson del material para ver su posible afectación en el resultado final.

Consecuentemente, asumiendo un comportamiento isotrópico, según se muestra en la **Tabla 7**, se obtienen los factores normalizados de esfuerzos principales, y también locales, en el centro del murete.

**Tabla 7** Valores normalizados de esfuerzos en el centro del murete, según teoría y análisis numéricos ( $\alpha P/A$ )

	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{xy}$
Teóricos de referencia					
Frocht – RILEM. Isotrópico teórico	0.52	-1.68	-0.58	-0.58	1.10
Brignola <i>et al.</i> Isotrópico FEM	0.50	-1.62	-0.56	-0.56	1.05
Modelado replicando lo realizado por Brignola <i>et al</i>					
Muretes 120 x 120 x 50 cm. Isotrópico FEM Tipo A, $\nu = 0.24$	0.51	-1.65	-0.57	-0.57	1.08
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Isotrópico FEM Tipo A, $\nu = 0.24$	0.51	-1.61	-0.55	-0.55	1.06
Modelado según ensayos realizados en Laboratorio de Estructuras PUCP					
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Isotrópico FEM Tipo B, $\nu = 0.33$	0.45	-1.60	-0.58	-0.57	1.02
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Isotrópico FEM Tipo B, $\nu = 0.24$	0.44	-1.59	-0.58	-0.57	1.02
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Isotrópico FEM Tipo B, $\nu = 0.15$	0.44	-1.58	-0.57	-0.57	1.00

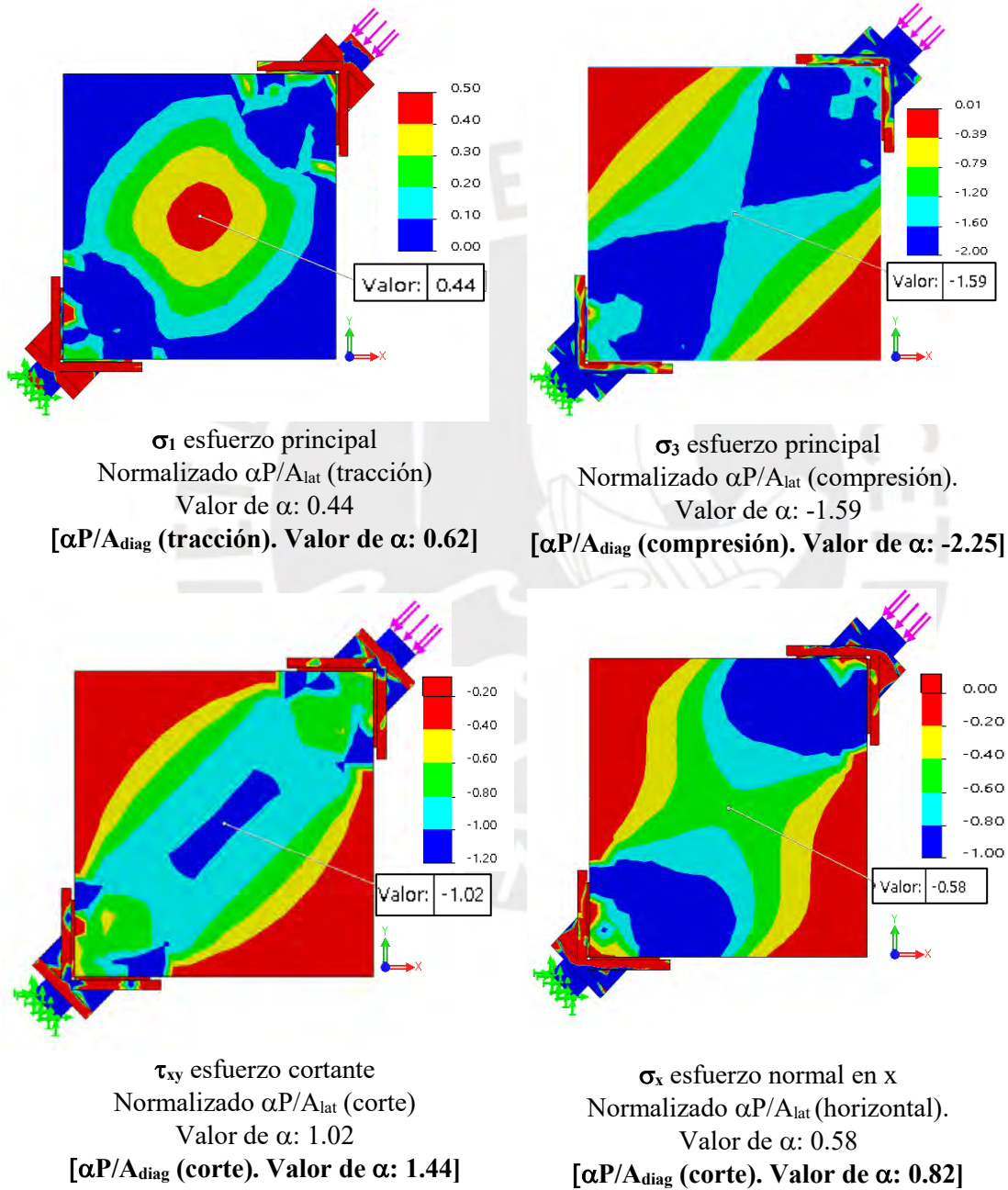
Además, para revisar también el efecto de una eventual ortotropía en el comportamiento del material se comparó el resultado entre un modelo isotrópico y uno ortotrópico con las siguientes proporciones de módulo de elasticidad en el murete:  $E_y/E_x=0.8, 0.6$  y  $0.4$ . De esta forma, los resultados de dicho análisis sumado a lo expuesto en la Tabla 7 se muestran en la Tabla 8 y en la Figura 12.

Posteriormente, con estos valores encontrados se compararon los resultados del ensayo de laboratorio.

**Tabla 8** Valores normalizados de esfuerzos en el centro del murete ( $\alpha P/A$ ), según teoría y análisis numéricos comparando isotropía y ortotropía

	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{xy}$
Teóricos de referencia					
Frocht – RILEM. Isotrópico teórico	0.52	-1.68	-0.58	-0.58	1.10
Brignola <i>et al.</i> Isotrópico FEM	0.50	-1.62	-0.56	-0.56	1.05
Brignola <i>et al.</i> Ortotrópico. $E_y = 0.8E_x$	0.49	-1.59	-0.54	-0.56	1.04
Brignola <i>et al.</i> Ortotrópico. $E_y = 0.6E_x$	0.49	-1.59	-0.52	-0.58	1.04
Brignola <i>et al.</i> Ortotrópico. $E_y = 0.4E_x$	0.44	-1.72	-0.50	-0.61	0.99
Modelado replicando lo realizado por Brignola <i>et al</i>					
Muretes 120 x 120 x 50 cm. Isotrópico FEM	0.51	-1.65	-0.57	-0.57	1.08
Muretes 120 x 120 x 50 cm. Ortotrópico $E_y = 0.8E_x$	0.51	-1.68	-0.57	-0.60	1.11
Muretes 120 x 120 x 50 cm. Ortotrópico $E_y = 0.6E_x$	0.51	-1.73	-0.59	-0.64	1.12
Muretes 120 x 120 x 50 cm. Ortotrópico $E_y = 0.4E_x$	0.52	-1.80	-0.58	-0.69	1.16
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Isotrópico FEM Tipo A	0.51	-1.61	-0.55	-0.55	1.06
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Ortotrópico $E_y = 0.8E_x$	0.50	-1.65	-0.56	-0.58	1.08
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Ortotrópico $E_y = 0.6E_x$	0.50	-1.70	-0.57	-0.63	1.10
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Ortotrópico $E_y = 0.4E_x$	0.51	-1.77	-0.57	-0.69	1.14
Modelado según ensayos realizados en laboratorio					
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Isotrópico FEM Tipo B, $\nu = 0.24$	0.44	-1.59	-0.58	-0.57	1.02
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Ortotrópico $E_y = 0.8E_x$	0.43	-1.61	-0.59	-0.59	1.01
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Ortotrópico $E_y = 0.6E_x$	0.42	-1.64	-0.60	-0.62	1.01
Muretes 60 x 60 x 20 cm. Ortotrópico $E_y = 0.4E_x$	0.41	-1.68	-0.63	-0.64	1.04

Con los valores normalizados obtenidos del modelo se podrán comparar los resultados de los ensayos de laboratorio con otras investigaciones y con lo hallado posteriormente en el ensayo de compresión diametral o tracción indirecta en probetas cilíndricas.

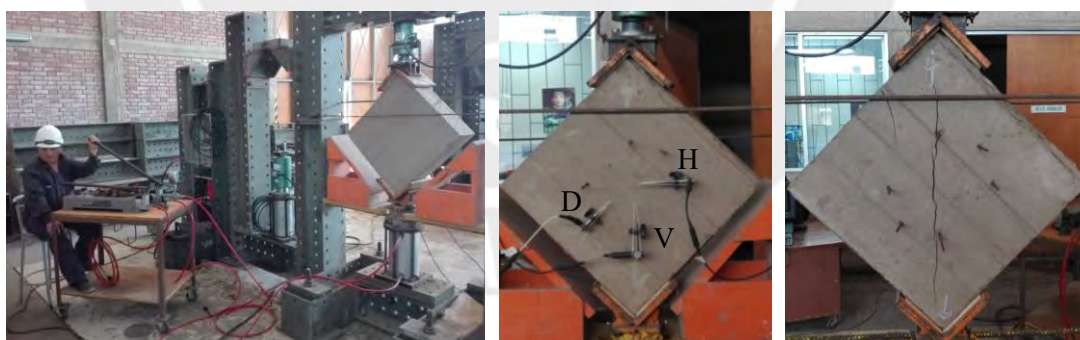


**Figura 12.** Esfuerzos principales normalizados tras modelamiento de apoyos empleado en ensayos de laboratorio

### 4.3.3 Ensayos de compresión diagonal en muretes

Siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM E519 y NTP 399.621 se realizaron ensayos de compresión diagonal con una velocidad de aplicación de carga de 5 kN/min, o de 0.5 ton/min, y para un mayor control de la deformación se hizo uso de sensores LVDT obteniendo un registro continuo de carga y desplazamiento a lo largo del ensayo. Para evitar dañar las esquinas por efecto de la aplicación de carga localizada se usó un capping de triplay de 3mm de espesor. De este modo, la duración neta del ensayo estuvo alrededor de uno a tres minutos por espécimen.

Para medir las deformaciones en el centro del espécimen se colocaron LVDTs (vertical, horizontal y diagonal). En la **Figura 13** se presenta la aplicación de carga, la distribución típica de los instrumentos de medición y el modo de falla esperado.



**Figura 13.** Aplicación manual de carga, distribución de LVDTs y falla típica esperada tras ensayo

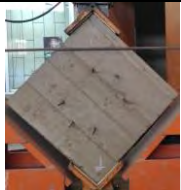



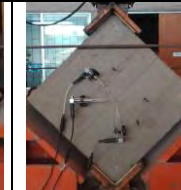
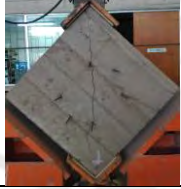
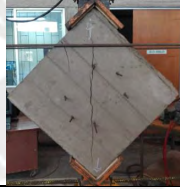







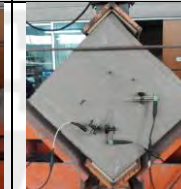



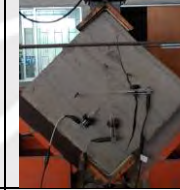





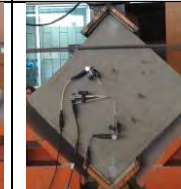




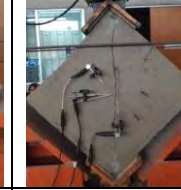
En la **Tabla 9** y en la **Tabla 10** se muestran los muretes construidos antes y después de ser sometidos al ensayo de compresión diagonal, e indicando el tipo de falla. La nomenclatura en cada espécimen significa: Composición de Suelo Solo (MSS) o Suelo con Arena gruesa añadida (MSA), seguida de la humedad de mezcla (09, 12 o 15 en porcentaje) y finalmente el número de muestra correlativa para cada muestra (1 al 5).

En el **Anexo B** se detallan las medidas registradas para cada murete construido.

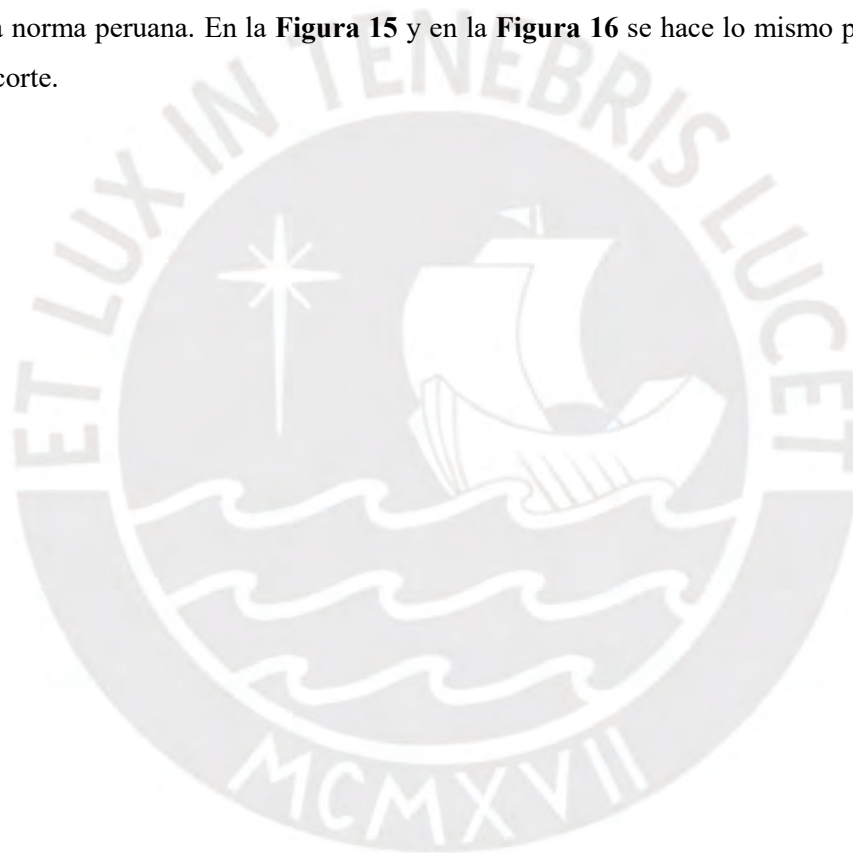
**Tabla 9** Muretes sometidos a ensayo de compresión diagonal. Composición: Suelo Solo (MSS).  
Humedad de mezcla: 09, 12 o 15 %. Espécimen: 1 al 5

	<b>MSS091</b>	<b>MSS092</b>	<b>MSS093</b>	<b>MSS094</b>	<b>MSS095</b>
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Deslizamiento escalonado en junta	Tracción diagonal recta y Deslizamiento en junta	Tracción diagonal recta y Deslizamiento en junta	Tracción diagonal curva	Tracción diagonal con deslizamiento en juntas
	<b>MSS121</b>	<b>MSS122</b>	<b>MSS123</b>	<b>MSS124</b>	<b>MSS125</b>
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Deslizamiento en junta y tracción diagonal recta	Deslizamiento en junta y tracción diagonal curva	Deslizamiento en junta y tracción diagonal curva	Escalonado y tracción diagonal curva	Tracción diagonal curva
	<b>MSS151</b>	<b>MSS152</b>	<b>MSS153</b>	<b>MSS154</b>	<b>MSS155</b>
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Deslizamiento en junta y tracción diagonal curva	Tracción diagonal curva	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal curva

**Tabla 10** Muretes sometidos a ensayo de compresión diagonal. Composición: Suelo Arena (MSA).  
 Humedad de mezcla: 09, 12 o 15 %. Espécimen: 1 al 5

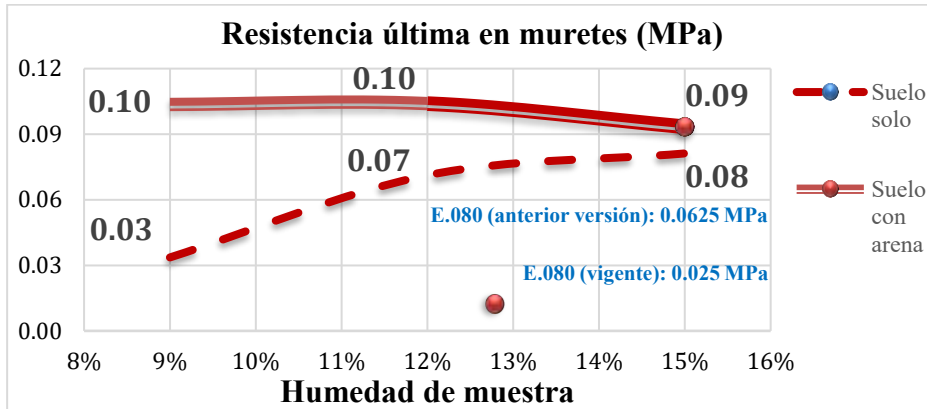
	<b>MSA091</b>	<b>MSA092</b>	<b>MSA093</b>	<b>MSA094</b>	<b>MSA095</b>
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal curva	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal recta
	<b>MSA121</b>	<b>MSA122</b>	<b>MSA123</b>	<b>MSA124</b>	<b>MSA125</b>
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal curva y escalonado	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal curva	Tracción diagonal recta
	<b>MSA151</b>	<b>MSA152</b>	<b>MSA153</b>	<b>MSA154</b>	<b>MSA155</b>
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal recta	Tracción diagonal curva	Tracción diagonal curva	Tracción diagonal recta

En la **Tabla 11** se muestra el resultado por resistencia última a partir del ensayo de compresión diagonal en los muretes, se evidencia una reducción del tamaño de la fisura previa a la falla a medida que se incrementa la humedad de mezcla en los especímenes y una aparente inducción de la falla por los elementos de monitoreo y control. En la **Figura 14** se muestra el valor promedio de estos resultados, y se resalta a modo de referencia la resistencia mínima a tracción indicada por la norma peruana. En la **Figura 15** y en la **Figura 16** se hace lo mismo para la compresión y corte.

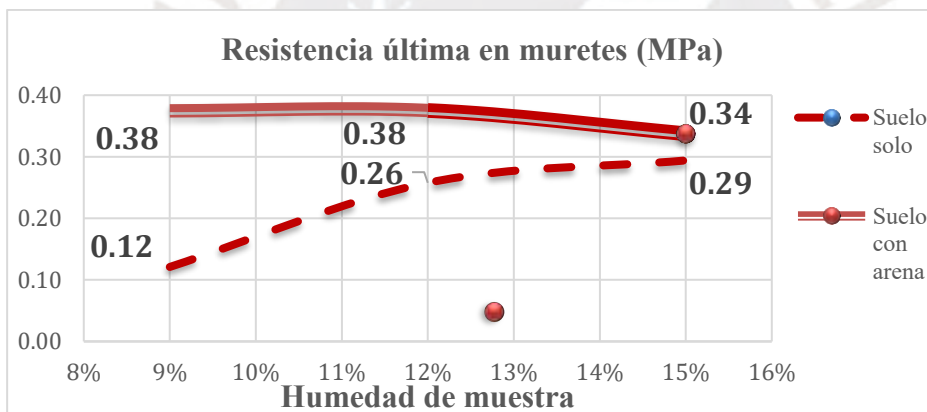


**Tabla 11** Resistencia última a tracción, compresión y corte tras ensayos de compresión diagonal

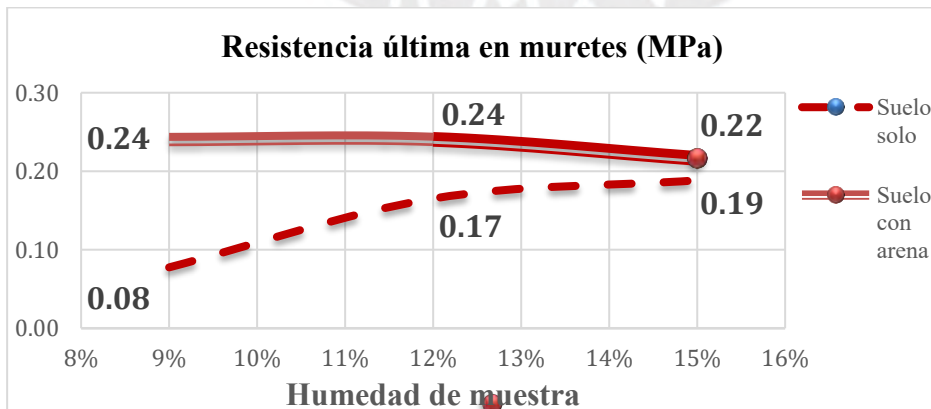
Tipo de Muestra y Humedad de muestra		Densidad media $\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	Resistencia última a tracción (MPa) $f_t = 0.44 \frac{P}{A}$ P: carga máx, A: área lateral					Resist. Media (MPa)	Desv.Est Muestral	Coef. De Variación % DE/media*100%
			1	2	3	4	5			
Suelo solo MSS	9 %	18.0	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.009	30
	12 %	18.7	0.07	0.06	0.06	0.09	0.07	0.07	0.010	14
	15 %	18.4	0.09	0.08	0.10	0.06	0.09	0.08	0.014	18
Suelo con arena MSA	9 %	20.8	0.07	0.11	0.10	0.10	0.14	0.10	0.027	27
	12 %	20.2	0.10	0.08	0.12	0.11	0.11	0.10	0.012	12
	15 %	20.0	0.07	0.12	0.10	0.08	0.09	0.09	0.018	20
Tipo de Muestra y Humedad de muestra		Densidad media $\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	Resistencia última a compresión (Mpa) $f_c = 1.59 \frac{P}{A}$ P: carga máx, A: área lateral					Resist. Media (MPa)	Desv.Est Muestral	Coef. De Variación % DE/media*100%
			1	2	3	4	5			
Suelo solo MSS	9 %	18.0	0.10	0.09	0.12	0.13	0.17	0.12	0.031	26
	12 %	18.7	0.25	0.23	0.23	0.32	0.26	0.26	0.036	14
	15 %	18.4	0.32	0.27	0.35	0.22	0.31	0.29	0.049	17
Suelo con arena MSA	9 %	20.8	0.25	0.40	0.36	0.34	0.52	0.38	0.099	26
	12 %	20.2	0.37	0.30	0.42	0.39	0.40	0.38	0.044	12
	15 %	20.0	0.26	0.42	0.38	0.30	0.33	0.34	0.064	19
Tipo de Muestra y Humedad de muestra		Densidad media $\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	Resistencia última a corte (MPa) $f_s = 1.02 \frac{P}{A}$ P: carga máx, A: área lateral					Resist. Media (MPa)	Desv.Est Muestral	Coef. De Variación % DE/media*100%
			1	2	3	4	5			
Suelo solo MSS	9 %	18.0	0.06	0.06	0.08	0.084	0.11	0.08	0.020	25
	12 %	18.7	0.16	0.15	0.15	0.204	0.17	0.17	0.023	14
	15 %	18.4	0.21	0.17	0.22	0.142	0.20	0.19	0.032	17
Suelo con arena MSA	9 %	20.8	0.16	0.26	0.23	0.220	0.33	0.24	0.063	26
	12 %	20.2	0.24	0.19	0.27	0.25	0.26	0.24	0.028	12
	15 %	20.0	0.17	0.27	0.24	0.20	0.21	0.22	0.041	19



**Figura 14.** Resistencia última a tracción tras ensayo de compresión diagonal en muretes



**Figura 15.** Resistencia última a compresión tras ensayo de compresión diagonal en muretes



**Figura 16.** Resistencia última a corte tras ensayo de compresión diagonal en muretes

Posteriormente, a partir de los registros de carga y deformación fueron calculados los módulos de elasticidad para cada muestra ensayada, bajo el criterio de la línea secante entre el punto ubicado a la 50 millonésima de la deformación unitaria, en compresión, y el 40% del esfuerzo máximo (Afanador, 2013). Adicionalmente, se calculó el módulo de elasticidad correspondiente a los registros de deformación global correspondiente a la línea secante hallada localmente. Para el cálculo del módulo de corte se usaron los valores registrados en el ensayo. Luego, con el módulo de elasticidad y de corte definidos se estableció el módulo de Poisson del material.

En la **Figura 17** se muestra el desarrollo del esfuerzo cortante con la deformación angular y una comparación del módulo de corte para las distintas humedades de mezcla empleadas en los dos tipos de suelo: suelo solo (MSS) y suelo arena (MSA). En la **Figura 18** y en la **Figura 19** se muestra el desarrollo de los esfuerzos de compresión y tracción con su correspondiente deformación longitudinal y una comparación del módulo de elasticidad según las distintas humedades empleadas en los dos tipos de suelo (MSS y MSA).

En la **Tabla 12** se expresan resumidas las propiedades mecánicas halladas para el tapial, a partir de las mediciones obtenidas de los ensayos en muretes.

**Tabla 12** Propiedades mecánicas del tapial para suelo solo (MSS) y suelo con arena (MSA)

Muestra	Humedad de muestra	$\gamma_{media}$ kN/m <sup>3</sup>	Global			Local			Global (MPa)	Local (MPa)
			E (MPa)	G (Mpa)	Deform. máx. elástica (mm)	E (MPa)	G (Mpa)	$\nu$ Poisson		
Suelo solo MSS	9 %	18.0	52	23	0.002	446	199	0.12	$E_{med}=70$	$E_{med}=983$
	12 %	18.7	84	34	0.003	1147	468	0.23	$G_{med}=30$	$G_{med}=422$
	15 %	18.4	73	32	0.004	1358	600	0.13	$\nu = 0.16$	
Suelo con arena MSA	9 %	20.8	109	43	0.003	1544	602	0.28	$E_{med}=97$	$E_{med}=1861$
	12 %	20.2	106	42	0.004	1116	441	0.27	$G_{med}=37$	$G_{med}=704$
	15 %	20.0	75	27	0.004	2922	1070	0.37	$\nu = 0.32$	

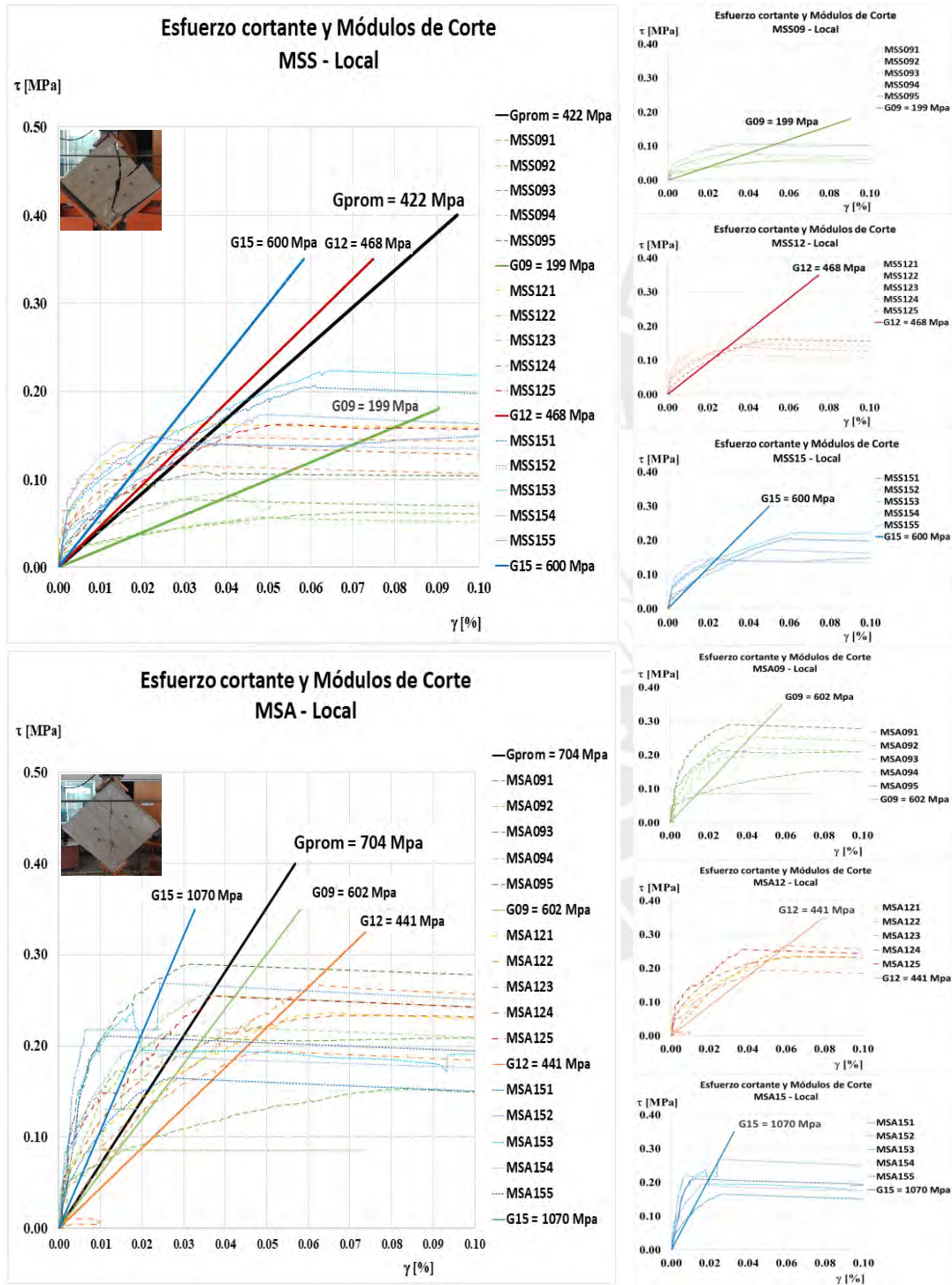


Figura 17. Esfuerzo y módulo de corte en muretes para mezclas de suelo solo (MSS) y suelo arena (MSA)

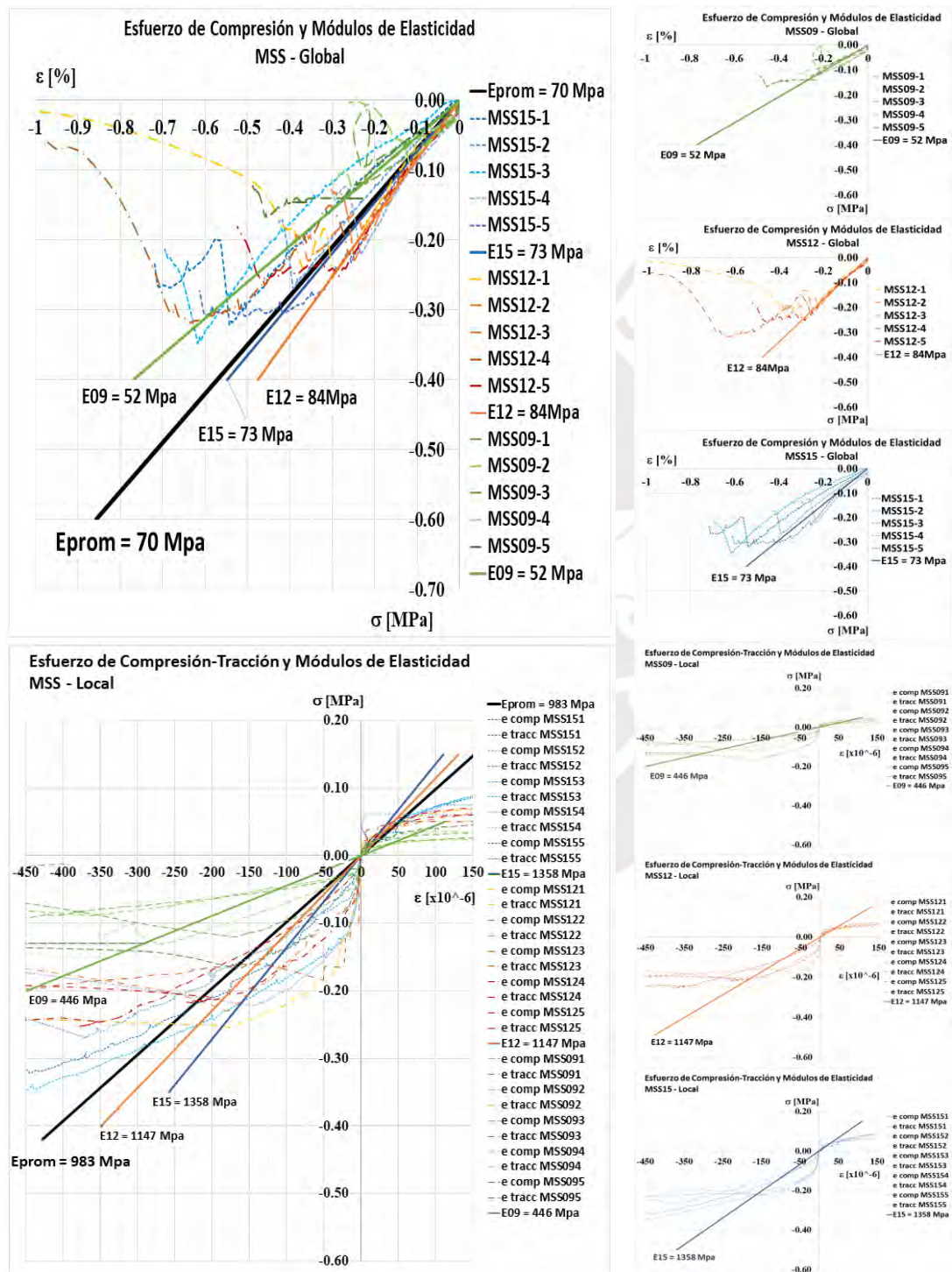


Figura 18. Diagramas Esfuerzo-Deformación unitaria para distintas humedades de mezcla en muretes MSS

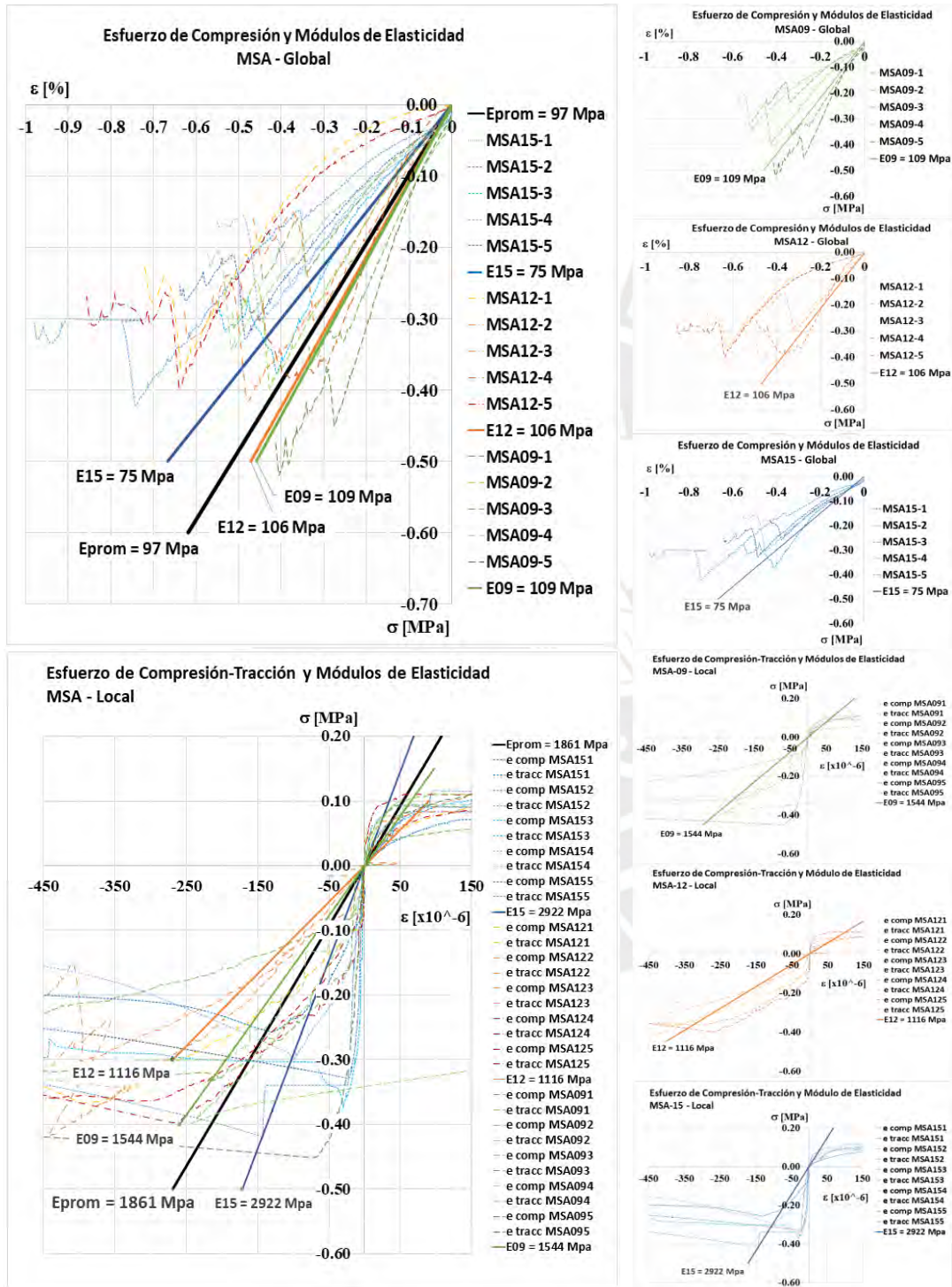


Figura 19. Diagramas Esfuerzo-Deformación unitaria para distintas humedades de mezcla en muretes MSA

En el **Anexo D**, se detallan gráficas Esfuerzo-Deformación unitaria considerando los registros globales (actuador de carga) y locales (LVDT) para cada murete, así como sus propiedades mecánicas medidas de manera individual.

#### **4.3.4 Evaluación de resultados del ensayo de compresión diagonal**

A partir de los resultados mostrados en la **Tabla 11** y en la **Figura 14**, se verifica que la resistencia última a tracción para los especímenes ensayados supera el mínimo indicado en la norma E.080 (0.025 MPa). Sin embargo, debido a que en la anterior versión de la norma este límite era indicado como admisible, en lugar de último, y viendo la diversidad de valores obtenidos en los ensayos individuales, se sugiere revisar este valor límite indicado en la norma con el fin de garantizar un desempeño adecuado del material arcilloso al momento de su elección, independientemente de la posibilidad de usar alguna técnica de refuerzo adicional. Además, el modo de falla de los muretes construidos con suelo solo, resultaron más aparatosos que en el caso de los muretes elaborados a partir de la mezcla de suelo y arena.

Por otro lado, en la **Tabla 12** se verifica que la adición de arena a la mezcla no solo incrementa el peso específico, el módulo elástico y el módulo de corte, sino también la capacidad de deformación asociada a un mayor coeficiente de Poisson.

Independientemente de la mezcla usada, dentro del rango de humedades que señala la norma, y considerando todos los ensayos realizados en muretes, se promedia un coeficiente de Poisson de **0.24**. Este valor coincide con el valor utilizado para la elaboración del modelo de elementos finitos.

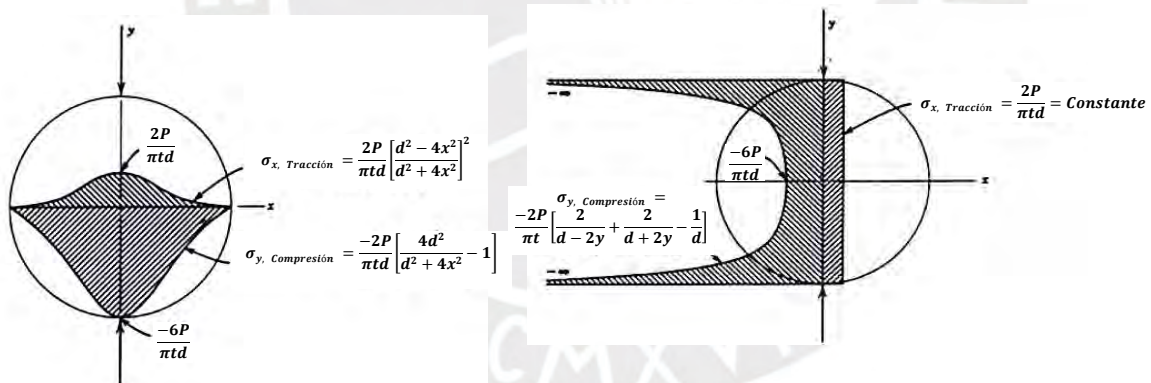
De la misma **Tabla 12** se diferencian los resultados obtenidos con lecturas globales y locales para poder comparar estos resultados con otros estudios realizados por diversos autores de acuerdo a la bibliografía que se indica en las referencias.

## CAPÍTULO 5. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL O DE TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CILÍNDRICAS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El ensayo de compresión diametral o de tracción indirecta destaca por ser un método simple y representativo que permite obtener la resistencia máxima de un material que se espera presente falla frágil. Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas opuestas hasta alcanzar la rotura (Garrote, 2006).

Cuando una probeta cilíndrica es sometida a compresión diametral desarrolla en su interior un estado teórico de tensiones bidimensional, tal como se muestra en la **Figura 20**. De este modo se describe planos principales de tensiones, uno horizontal y otro vertical. Particularmente en el plano vertical se produce una tensión variable de compresión y una tensión teóricamente uniforme de tracción.



**Figura 20.** Distribución teórica de tensiones sobre el plano diametral y vertical para ensayo de tracción indirecta (Modelo adaptado de Frocht, por Garrote, 2006)

A partir de análisis teóricos de la distribución de esfuerzos en un disco sometido a cargas diametralmente opuestas, y con base en la teoría de elasticidad de Timoshenko y Goodier (1970), se cuenta con las siguientes ecuaciones:

En el plano horizontal:

$$\sigma_x, \text{ Tracción} = \frac{2P}{\pi t d} \left[ \frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2 \quad (13); \quad \sigma_y, \text{ Compresión} = \frac{-2P}{\pi t d} \left[ \frac{4d^2}{d^2 + 4x^2} - 1 \right] \quad (14)$$

En el plano vertical:

$$\sigma_x, \text{ Tracción} = \frac{2P}{\pi t d} = \text{Constante} \quad (15); \quad \sigma_y, \text{ Compresión} = \frac{-2P}{\pi t} \left[ \frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right] \quad (16)$$

Es así que, en el centro del disco, para el plano horizontal, el mayor esfuerzo a tracción y compresión resultan:

$$\sigma_x = 2 \frac{P}{\pi t d} \quad (17)$$

$$\sigma_y = -6 \frac{P}{\pi t d} \quad (18)$$

Sin embargo, para el plano vertical, sin considerar los que aparecen por efecto local cerca de los puntos de apoyo, se tiene:

$$\sigma_x = 2 \frac{P}{\pi t d} \quad (\text{cte}) \quad (19)$$

$$\sigma_y = \frac{-2P}{\pi t d} \left[ \frac{4d^2}{d^2-4y^2} - 1 \right] \quad (20)$$

Utilizando la ley generalizada de Hooke, la deformación unitaria a lo largo de la línea central longitudinal del disco en la dirección x, y a partir de un estado plano de esfuerzos ( $\sigma_z=0$ ), resulta:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (21)$$

Donde:

$\varepsilon_x$ : Deformación unitaria a lo largo de la dirección x en la línea central longitudinal del disco.

E: Módulo de elasticidad.

$\nu$ : Relación de Poisson.

Luego, para el centro del disco se tiene:

$$\sigma_y = -3\sigma_x \quad (22)$$

Reemplazando (22) en (21) y en (19), resulta:

$$\varepsilon_x = \frac{2P}{\pi t d E} (1 + 3\nu) \quad (23)$$

Por tanto, la resistencia en tracción o primer esfuerzo principal, resulta:

$$\sigma_t = \sigma_x = E \cdot \varepsilon_x = \frac{2P}{\pi t d} (1 + 3\nu) \quad (24)$$

Análogamente, para la compresión o tercer esfuerzo principal se tiene:

$$\sigma_c = \sigma_y = E \cdot \varepsilon_y = -\frac{6P}{\pi t d} \left(1 + \frac{\nu}{3}\right) \quad (25)$$

Al ser un estado plano de esfuerzos el segundo esfuerzo principal es igual a cero. Adicionalmente, estos resultados teóricos confirman lo propuesto por diversos autores al señalar que la resistencia medida según normas resulta ser menor que su capacidad real.

## 5.2 CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS

A partir del mismo suelo mezclado para la elaboración de muretes se extrajo una muestra para la elaboración de las probetas cilíndricas que fueron construidas imprimiendo la misma energía de compactación que la usada en los muretes de tapial. De este modo, se buscó ensayar el mismo material mediante dos ensayos distintos considerando las mismas energías de compactación y esperando obtener densidades de material similares o idénticas para cada tipo de muestra definida preliminarmente.

Por lo tanto, comparando las energías de compactación empleadas en la elaboración de ambos tipos de especímenes (muretes de .60m x .60 mx .20 m y cilindros de diámetro 6" x 12" de altura o 150 mm x 300 mm), se tiene:

$$Y_m = \frac{n \times N \times \text{Peso} \times h}{\text{volumen}} = \frac{6 \times 140 \times 10 \times 9.81 \times 0.4 \text{ joule}}{0.6 \times 0.6 \times 0.2 \text{ m}^3} = 457.8 \frac{\text{kilojoule}}{\text{m}^3} \quad (26)$$

Donde:  $Y_m$  es la energía empleada en la compactación del murete,  $n$  es el número de capas,  $N$  el número de golpes por capa, el *Peso* hace referencia al pisón empleado y  $h$  la altura de aplicación de la carga para el *volumen* total de la muestra.

$$Y_c = \frac{n \times N \times \text{Peso} \times h}{\text{volumen}} = \frac{6 \times 55 \times 2.5 \times 9.81 \times 0.3 \text{ joule}}{\frac{\pi}{4} \times 0.15^2 \times 0.3 \text{ m}^3} = 457.9 \frac{\text{kilojoule}}{\text{m}^3} \quad (27)$$

Donde:  $Y_c$  es la energía empleada en la compactación de la probeta cilíndrica,  $n$  es el número de capas,  $N$  el número de golpes por capa, el *Peso* hace alusión al pisón empleado,  $h$  la altura de aplicación de la carga para el *volumen* total de la muestra.

De este modo, ambas energías de compactación resultaron similares entre sí y cercanas al 75% de la energía de compactación empleada en un ensayo Proctor estándar (600 kJ/m<sup>3</sup>).

Para el acabado final se hizo uso de un pisón de madera porque un pisón metálico no permitía darle el acabado plano requerido para el posterior ensayo. Adicionalmente, para que la muestra de suelo pueda ser extraída sin problemas tras un día de secado en el molde se utilizaron unas láminas plásticas que ayudaron a desmoldar el mismo. En la **Figura 21** se muestra el proceso seguido y el acabado final.



**Figura 21.** Elaboración de probetas cilíndricas de tierra apisonada en molde estándar de 6"x 12" [150 mm x 300 mm]

## 5.3 COMPRESIÓN DIAGONAL O TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CILÍNDRICAS

### 5.3.1 Interpretación de los ensayos

De acuerdo a la norma peruana E.080 alternativamente a la ejecución de ensayos de compresión diagonal en muretes se propone realizar ensayos de tracción indirecta o ensayo brasileño. En este caso, en el artículo 8, inciso 8.2, párrafo b, se precisa una resistencia última

de **0.08 MPa** o de 0.81 kgf/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, en la norma no se especifica la forma de calcular dicho esfuerzo último.

Al respecto del ensayo de compresión diagonal, o tracción indirecta, en probetas cilíndricas, el procedimiento de laboratorio está normalizado por la norma ASTM C-496, aunque en ese caso está definido para concreto, y no para muestras de tierra compactada. Según dicha norma el esfuerzo de tracción se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi t d}$$

Por otro lado, para el cálculo del módulo de Poisson se analiza una ecuación propuesta por Anagnos y Kennedy (1972), elaborada a partir de ensayos de tracción indirecta o ensayo brasileño en muestras bituminosas, y para el cálculo del módulo de elasticidad se emplearon las ecuaciones propuestas por Ye *et al* (2012), y que también emplearon Araujo y Márquez (2016), que relacionan la deformación total vertical y horizontal con el módulo de elasticidad en cada eje. Luego, con el módulo de elasticidad promedio y el coeficiente de Poisson definidos se estableció el módulo de corte del material.

$$\nu = \frac{0.04524DR - 0.6804}{-0.16648DR - 0.00694} \quad (28)$$

Donde:

DR: Relación de deformación  $Y_t/X_t$ .

$Y_t$ : Deformación vertical.

$X_t$ : Deformación horizontal.

Para el cálculo del módulo de elasticidad a partir de la deformación total horizontal se tiene:

$$E_t = \frac{P}{tD_h} \left( \frac{4}{\pi} + \nu - 1 \right) \quad (29)$$

Donde:

$E_t$ : Módulo de elasticidad en tracción.

P: Carga máxima.

$D_h$ : Deformación total horizontal.

$\nu$ : Coeficiente de Poisson.

Para el cálculo del módulo de elasticidad vertical a partir de la deformación vertical se tiene:

$$E_c = \frac{4P}{t\pi\frac{D}{2}} \operatorname{Ln} \left( \frac{D+2y}{D-2y} \right) + \frac{2P}{t\pi\frac{D}{2}} (\nu - 1) \frac{y}{D} \quad (28)$$

Donde:

$E_c$ : Módulo de elasticidad en compresión.

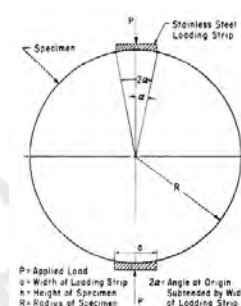
P: Carga máxima.

$D_v$ : Deformación total vertical.

D: Diámetro de la probeta

$\nu$ : Coeficiente de Poisson.

y:  $0.99 D/2$ . Considerando un contacto superior en el orden de los  $2\alpha = 15^\circ$  (aprox. 1" de contacto)



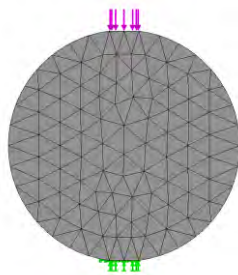
Estas ecuaciones se emplearán para el cálculo de las propiedades mecánicas del material a partir de las lecturas de los ensayos realizados en las probetas cilíndricas.

Sin embargo, para ser coherentes con lo realizado en los muretes, para el caso de los esfuerzos máximos en el presente estudio se emplearon los coeficientes que resulten del análisis de elementos finitos, los mismos que podrán confirmar o ajustar las fórmulas teóricas que existen para el cálculo de esfuerzos.

### 5.3.2 Análisis por elementos finitos

Con el objetivo de revisar el posible uso de la fórmula teórica de esfuerzos, se procedió a analizar con ayuda del software SolidWorks® los esfuerzos máximos obtenidos en el centro de un cilindro sometido a ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta.

De este modo, se procedió a modelar y simular el ensayo de compresión diagonal sobre un elemento cilíndrico de dimensiones similares a las ensayadas en el laboratorio de estructuras (6" x 12" o 150 mm x 300 mm), como se muestra en la **Figura 22**. Para modelar correctamente la aplicación de la carga se consideró un pequeño rebaje que permita la correcta transmisión de fuerzas, este segmento es de unos 20 mm de ancho y el diámetro se redujo de 150 mm a poco más de 149 mm en ese eje.



**Figura 22.** Mallas empleadas en el análisis de elementos finitos para una probeta cilíndrica

Se hizo uso de una malla estándar de 15mm de ancho, con una tolerancia de 1.5 mm, considerando 16 puntos jacobianos, y variando eventualmente el coeficiente de Poisson del material para ver su posible afectación en el resultado final.

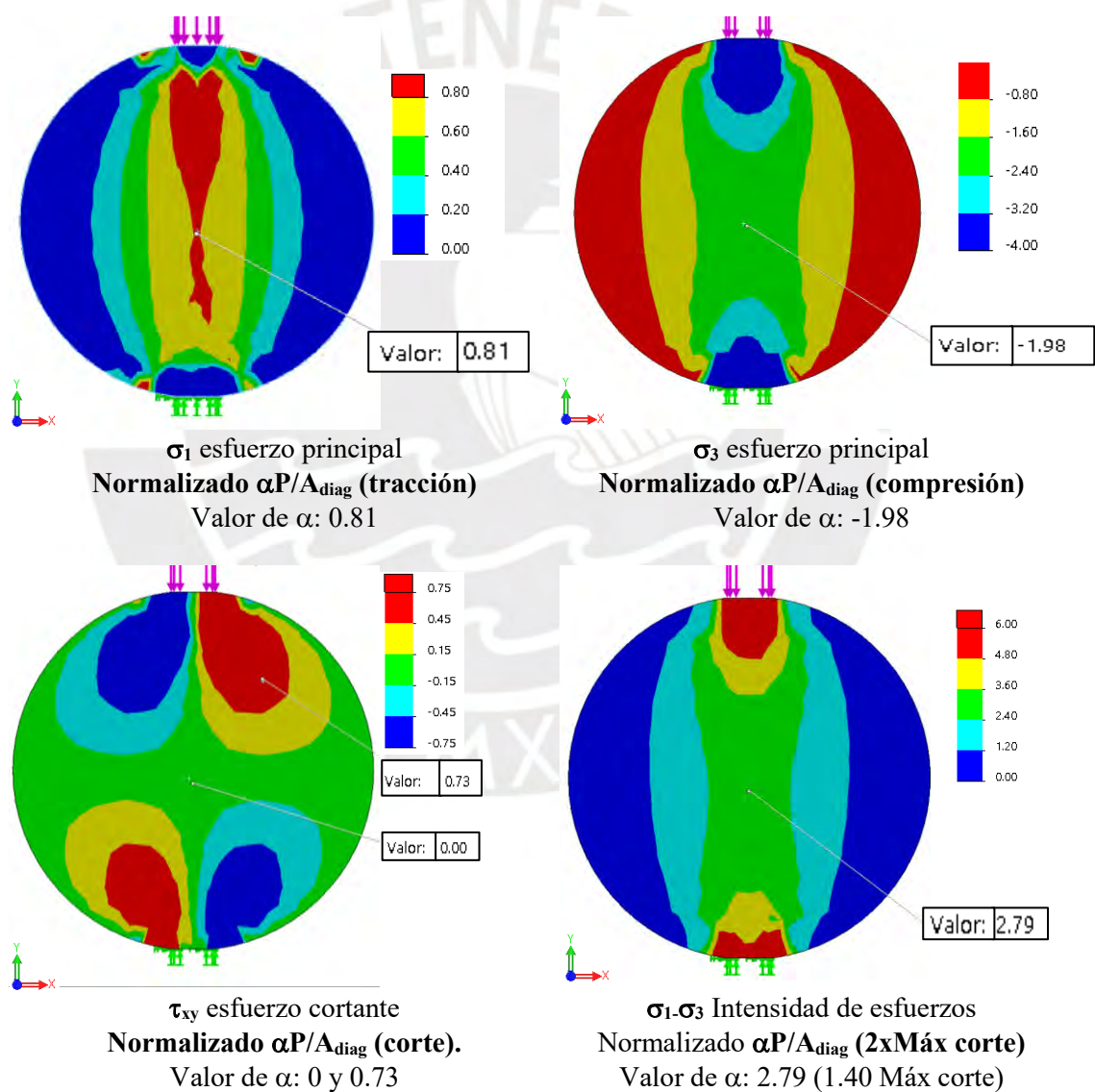
De este modo, asumiendo comportamiento isotrópico, según se muestra en la **Tabla 13**, se obtienen los factores normalizados de esfuerzos en el centro del murete.

**Tabla 13** Valores normalizados de esfuerzos en el centro de la probeta cilíndrica, según teoría y análisis numéricos en función de la carga aplicada y área diagonal de la muestra ( $\alpha P/A_{diag}$ )

	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$
Teórico de referencia					
Isotrópico teórico	0.64	-1.91	0.64	-1.91	1.28
Máximo teórico	$0.64 \cdot (1 + 3\nu)$	$-1.91 \cdot (1 + \nu/3)$	0.64	-1.91	$1.28 \cdot (1 + \nu)$
Modelado según ensayos realizados en Laboratorio de Estructuras PUCP					
Probetas cilíndricas					
6" x 12" o 150 mm x 300 mm	0.88	-2.00	0.88	-2.00	1.44
Isotrópico FEM, $\nu = 0.33$					
Probetas cilíndricas					
6" x 12" o 150 mm x 300 mm	0.81	-1.98	0.81	-1.98	1.40
Isotrópico FEM, $\nu = 0.24$					
Probetas cilíndricas					
6" x 12" o 150 mm x 300 mm	0.73	-1.93	0.73	-1.93	1.33
Isotrópico FEM, $\nu = 0.15$					

Posteriormente, de manera similar a lo realizado con los muretes, se debería proceder a un análisis de afectación de una posible ortotropía. Sin embargo, debido a la orientación de la compactación de las capas en el proceso constructivo el módulo de elasticidad esperado en el eje X y en el eje Y son idénticos, y el módulo de elasticidad que podría estar afectado no está sujeto a esfuerzos, eje Z. Por tanto, se omitirá de dicho análisis.

Luego, se procede a usar los valores normalizados obtenidos para el modelo con un coeficiente de Poisson igual a 0.24. Posteriormente, con estos valores se analizarán los resultados frente a lo hallado previamente en el ensayo de compresión diametral en muretes. En la **Figura 23** se muestran los resultados de esfuerzos principales hallados en la probeta cilíndrica.



**Figura 23.** Esfuerzos principales normalizados tras modelamiento del ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas

### 5.3.3 Ensayos de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas

Debido a la poca resistencia esperada se propuso un ensayo preliminar usando anillos de carga a fin de alcanzar el rango de esfuerzos y deformaciones esperados. Esta suposición inicial se basó en el estudio realizado por Iwaki y Morales el 2008, aunque en esa oportunidad se ensayó la resistencia de grout de unión entre unidades de adobe.

En la **Figura 24** se muestra la primera configuración propuesta para el ensayo de las probetas cilíndricas. Sin embargo, tras unos intentos fallidos y otros de mediano éxito se decidió utilizar un esquema similar, pero con ayuda de la máquina universal de ensayos MTS.



**Figura 24.** Primer intento de calibración del ensayo con anillo de carga acondicionado

En la **Figura 25** se muestra la configuración final de las probetas ensayadas y el modo de falla tras alcanzar la carga última. El ensayo se controló por carga y desplazamientos con ayuda de los LVDTs. La velocidad de carga fue de 0.5 kN/min fallando las muestras para cargas alrededor de 5 kN y con deformaciones en el orden de  $\pm 2$  mm. Estas condiciones se basan en lo referenciado en la norma ASTM D-3967 y ASTM C-496 que señalan que la falla debe darse entre uno y diez minutos de iniciado el ensayo.

En la **Tabla 14** y en la **Tabla 15** se muestran las probetas construidas con suelo solo, identificadas como PSS, y construidos con la mezcla de Suelo-Arena, identificadas como PSA, antes y después de ser sometidos al ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta, agrupados, además, según su humedad de mezcla e indicando el tipo de falla, similar a lo realizado con los muretes.



**Figura 25.** Instrumentación y modo de falla típico en probeta cilíndrica tras calibración de carga y deformímetros acondicionados para valores esperados








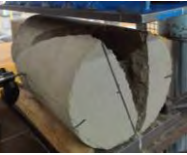






















En la **Tabla 16** y en la **Figura 26** se muestra el resultado por resistencia última a tracción en ensayo brasileño. Se resalta a modo de referencia la resistencia última indicada por la norma peruana. En la **Figura 27** se muestra el resultado correspondiente por resistencia última a compresión.

En el **Anexo C**, se detallan las medidas registradas para cada probeta cilíndrica construida.

**Tabla 14** Probetas cilíndricas PSS sometidas a ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta indicando tipo de falla

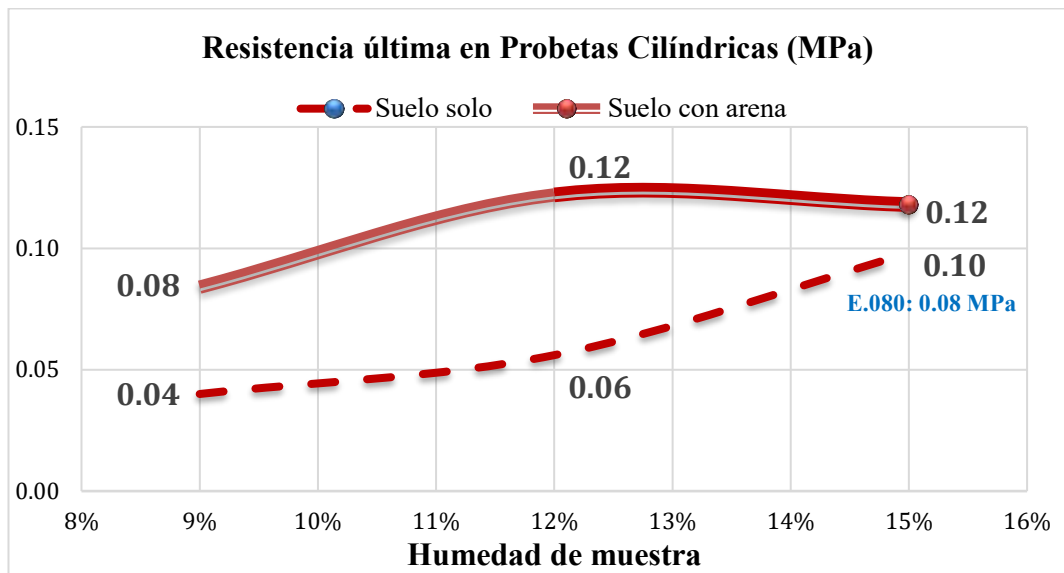
PSS091 Antes del ensayo	PSS091 Después del ensayo		PSS092 Antes del ensayo	PSS092 Después del ensayo	
					
Tipo de falla	Grieta diagonal	Celda 2 KN 15v70/100	Tipo de falla	Grieta diagonal	Celda 2 KN 18v60/100
PSS121		PSS122	PSS123	PSS124	PSS125
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Grieta diagonal y desprendimiento	Grieta diagonal y fisura transv.	Grieta diagonal y desprendimiento	Grieta Diagonal y fisura transv.	Grieta diagonal y desprendimiento
PSS151		PSS152	PSS153	PSS154	PSS155
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Grieta diagonal y desprendimiento	Grieta diagonal y cono central	Grieta diagonal y desprendimiento	Grieta diagonal	Grieta diagonal y desprendimiento

**Tabla 15** Probetas cilíndricas PSA sometidas a ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta indicando tipo de falla

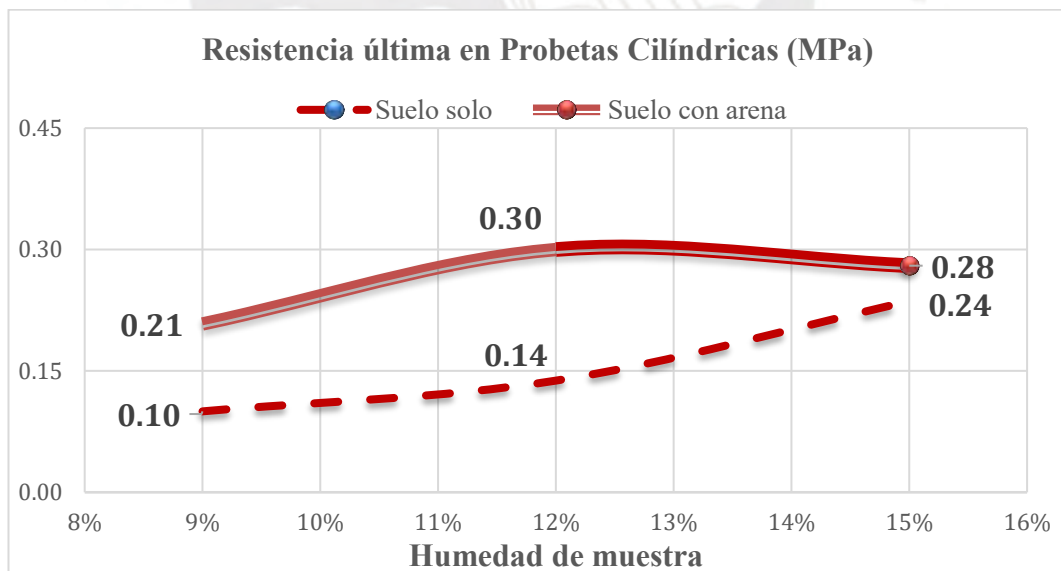
	PSA091	PSA092	PSA093	PSA094	PSA095
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Grieta diagonal	Grieta diagonal	Grieta diagonal con cono lateral	Grieta diagonal	Grieta diagonal
	PSA121	PSA122	PSA123	PSA124	PSA125
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Grieta diagonal y desprendimiento	Grieta diagonal	Grieta diagonal	Grieta diagonal	Grieta diagonal
	PSA151	PSA152	PSA153	PSA154	PSA155
Antes del ensayo					
Después del ensayo					
Tipo de falla	Grieta diagonal	Grieta diagonal	Grieta diagonal	Grieta diagonal	Grieta Diagonal

**Tabla 16** Resultados de ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas

Muestra	Humedad de muestra	$\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	Resistencia última a tracción por espécimen (MPa)					Media	Dev. Estándar muestral	Coef. De Variación % DE/med*100%
			$f_t = 0.81 \frac{P}{A_d}$							
			P: carga máx, A <sub>d</sub> : área diagonal (hd)							
1	2	3	4	5						
Suelo solo PSS	9 %	17.2	0.04	0.04	-	-	-	0.040	0.000	0
	12 %	18.0	0.04	0.07	0.06	0.07	0.04	0.056	0.015	27
	15 %	18.2	0.11	0.12	0.09	0.10	0.07	0.098	0.019	19
Suelo con arena PSA	9 %	20.5	0.09	0.08	0.07	0.09	0.09	0.084	0.009	11
	12 %	20.6	0.10	0.14	0.11	0.15	0.11	0.122	0.022	18
	15 %	20.1	0.12	0.12	0.14	0.10	0.11	0.118	0.015	13
Muestra	Humedad de muestra	$\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	Resistencia última a compresión por espécimen (MPa)					Media	Dev. Estándar muestral	Coef. De Variación % DE/med*100%
			$f_c = 1.98 \frac{P}{A_d}$							
			P: carga máx, A <sub>d</sub> : área diagonal (hd)							
1	2	3	4	5						
Suelo solo PSS	9 %	17.2	0.09	0.11	-	-	-	0.100	0.014	14
	12 %	18.0	0.11	0.16	0.14	0.17	0.11	0.138	0.028	20
	15 %	18.2	0.26	0.30	0.22	0.23	0.17	0.236	0.048	20
Suelo con arena PSA	9 %	20.5	0.22	0.19	0.18	0.22	0.23	0.208	0.022	11
	12 %	20.6	0.24	0.34	0.28	0.36	0.28	0.300	0.049	16
	15 %	20.1	0.28	0.30	0.33	0.23	0.26	0.280	0.038	14
Muestra	Humedad de muestra	$\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	Resistencia última a corte por espécimen (MPa)					Media	Dev. Estándar muestral	Coef. De Variación % DE/med*100%
			$f_s = 1.40 \frac{P}{A_d}$							
			P: carga máx, A <sub>d</sub> : área diagonal (hd)							
1	2	3	4	5						
Suelo solo PSS	9 %	17.2	0.06	0.07	-	-	-	0.065	0.007	11
	12 %	18.0	0.08	0.11	0.10	0.12	0.08	0.098	0.018	18
	15 %	18.2	0.19	0.21	0.15	0.17	0.12	0.168	0.035	21
Suelo con arena PSA	9 %	20.5	0.16	0.13	0.13	0.16	0.16	0.148	0.016	11
	12 %	20.6	0.17	0.24	0.20	0.25	0.20	0.212	0.033	16
	15 %	20.1	0.20	0.21	0.23	0.17	0.19	0.200	0.022	11



**Figura 26.** Resistencia a tracción tras ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas



**Figura 27.** Resistencia a compresión tras ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas

En consecuencia, y tras recopilar la información mostrada, se expresan en la **Tabla 17** las propiedades mecánicas halladas para el tapial a partir de las mediciones obtenidas de los ensayos de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas.

**Tabla 17** Propiedades mecánicas del tapial para PSS y PSA

Muestra	Humedad de muestra	$\gamma_{med}$ kN/m <sup>3</sup>	$E_t$ (MPa)	$E_c$ (Mpa)	Máx D.V. (mm)	E (MPa)	G (Mpa)	$\nu$ Poisson	Propiedades
Suelo solo PSS	9 %	18.3	25	70	1.4	47	20	0.16	$E_{med} = 87$ MPa $G_{med} = 36$ MPa $\nu = 0.22$
	12 %	18.0	39	137	1.2	88	34	0.28	
	15 %	18.4	59	195	1.2	127	52	0.22	
Suelo con arena PSA	9 %	20.5	43	192	1.1	118	43	0.36	$E_{med} = 127$ MPa $G_{med} = 47$ MPa $\nu = 0.35$
	12 %	20.6	53	175	1.8	113	41	0.41	
	15 %	20.0	71	226	1.3	149	58	0.27	

### 5.3.4 Evaluación de resultados del ensayo decompresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas

A partir de los resultados mostrados en la **Tabla 14** y en la **Tabla 15**, se evidencia la fragilidad de las muestras de suelo solo, algunas de las de mínima humedad fallaron incluso antes del ensayo propiamente dicho producto del desencofrado y la manipulación. Las siguientes, si bien soportaron un cierto nivel de carga mostraron modos de falla bastante frágiles. Por otro lado, las muestras con contenido de arena adicional mostraron fallas más uniformes y menos aparatosas, permitiendo incluso una separación franca entre los trozos resultantes.

De la **Tabla 16** y la **Figura 26**, se verifica resultados bastante similares a los obtenidos en los muretes. El análisis numérico de su proximidad se mostrará posteriormente. Sin embargo, dado el límite indicado en la norma E.080 (0.08 MPa), dos muestras no estarían cumpliendo con el mínimo, lo cual contradice con lo hallado en el primer ensayo para las mismas mezclas. Se sugiere igualmente revisar estos valores límite.

En la **Tabla 17** se verifica una gran variación del módulo elástico para las muestras de suelo solo, siendo los de mayor humedad los más rígidos, y valores más constantes para las de suelo combinado con arena, independientemente de la humedad de mezcla. En el caso del coeficiente de Poisson se encuentra una gran dispersión de valores, aunque manteniendo la tendencia de ser mayor en las muestras con suelo arena en comparación con las de suelo solo.

## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS COMPARATIVO Y CORRELACIÓN DE ENSAYOS

### 6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO

Luego de completados los ensayos de compresión diagonal y de tracción indirecta o ensayo brasileño se procede a comparar los resultados en busca de una correlación de resultados considerando las propiedades propias de cada espécimen.

Luego, con respecto a las propiedades mecánicas del tapial identificadas y resumidas en la **Tabla 12** para el caso de los muretes y la **Tabla 17** para el caso de las probetas cilíndricas, se compara lo hallado en la presente investigación con lo encontrado por diversos autores desde 1997 hasta 2018 (adaptado de Arto, 2019).

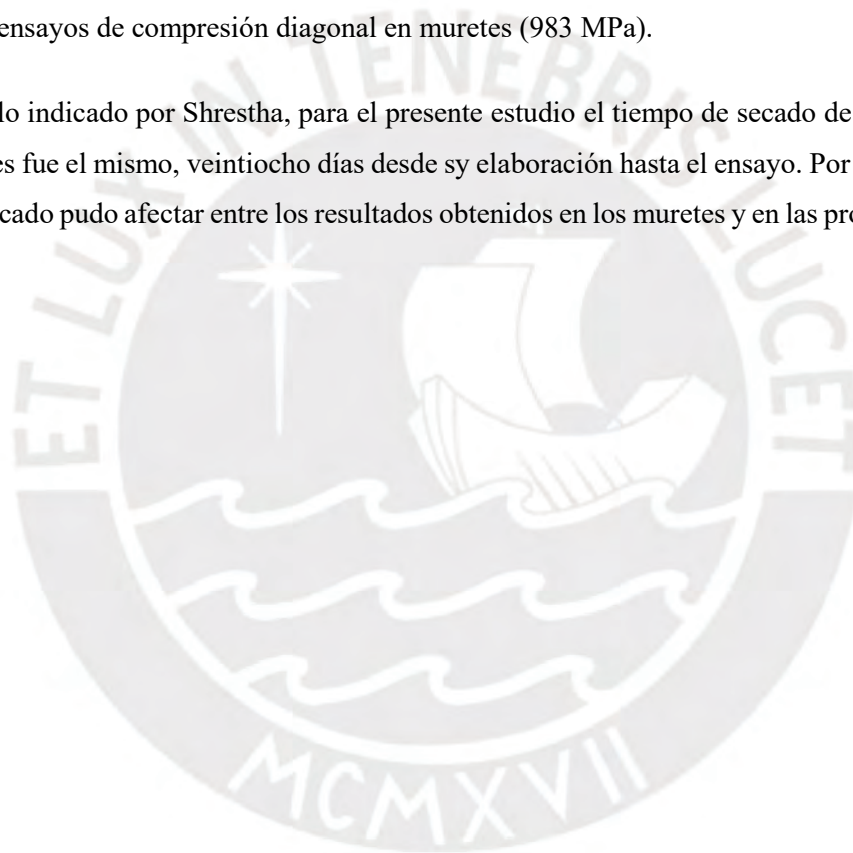
En la **Tabla 18** se compara el peso específico, la máxima resistencia en compresión y en tracción, módulos elásticos, y coeficiente de Poisson señalando brevemente el tipo de probeta, ensayo realizado y particularidades del material empleado.

Se evidencia en esta tabla la similitud de algunos resultados obtenidos tanto en los muretes como en los ensayos en probetas cilíndricas, así como una similitud con algunos de los resultados encontrados por otros investigadores, como Shrestha et al (2020) o Maniatidis y Walker (2008). Particularmente, en ambos casos el módulo de elasticidad a compresión es similar al encontrados de los ensayos de compresión diagonal en muretes de suelo solo, y medido de manera global (70 MPa, 67 MPa y 65 MPa). Al respecto, Shrestha señala que un mayor tiempo de secado puede influir drásticamente en la resistencia final así como en el módulo de elasticidad, tras seis meses de secado obtuvo el doble de resistencia del alcanzado en un mes y el módulo de elasticidad se incrementó casi 4 veces el inicial. Así mismo, si se construye con capas (o tongadas) de menor espesor la resistencia se puede ver reducida para

un mismo periodo de secado. Por otro lado, Maniatidis y Walker muestran una reducción de la capacidad de las unidades ensayadas a medida que estas crecen por un efecto de escala que requiere de un mayor tiempo de secado al ser más grandes y también por un efecto de tamizado del material empleado.

Por otro lado, para el caso de suelo solo, si se considera lo hallado de manera local, el módulo de elasticidad encontrado por Gonzalez, et al en 1997 (922 MPa) se aproximan mucho a lo hallado de los ensayos de compresión diagonal en muretes (983 MPa).

Considerando lo indicado por Shrestha, para el presente estudio el tiempo de secado de todos los especímenes fue el mismo, veintiocho días desde su elaboración hasta el ensayo. Por tanto, el tiempo de secado pudo afectar entre los resultados obtenidos en los muretes y en las probetas cilíndricas.



**Tabla 18** Comparativo de propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de compresión diagonal en unidades de tapial con lo hallado por diversos autores

Nombre	Densidad kN/m <sup>3</sup>	Compresión f <sub>c</sub> (Mpa)	Tracción f <sub>t</sub> (Mpa)	E (MPa)	G (Mpa)	v Poisson	Probeta Tipo de Ensayo	Material
MSS <sub>global</sub>	18.4	0.22	0.06	70	30	0.16	Muretes 600x600x200mm Compresión Diagonal	Limoso arcilloso
MSS <sub>local</sub>				983	422			
MSA <sub>global</sub>	20.3	0.36	0.10	97	37	0.32		
MSA <sub>local</sub>				1861	704			
PSS	18.1	0.16	0.06	87	36	0.22	Probetas cilíndricas 150mm x 300mm Tracción indirecta	Limoso arcilloso con arena gruesa
PSA	20.4	0.26	0.11	127	47	0.35		
Shrestha et al. (2020)	18.8	0.50	0.06	60	(26)	0.15	Bloque 1 capa 1.2x1.2x 0.6 m Compresión diagonal	arcilloso arenoso
Shrestha et al. (2020)	19.5	0.56	0.11	67	(29)	0.15	Bloque 2 capas 1.2x1.2x 0.6 m Carga lateral	
Miccoli et al. (2014)	21.5	3.73	0.71 (corte ASTM)	4143	(1631)	0.27	Muretes 6 capas 500x500x110mm Compresión diagonal	arcilloso gravoso
Bui y Morel (2009) Ortotropía	17.9 - 19.4	0.84 – 0.92 (ortogonal - paralelo)	-	-	-	-	Bloques 40x40x65 cm Compresión uniaxial	poco arcilloso
Maniatidis y Walker (2008)	17.3, 19.3, 19.9	0.62, 0.84, 0.97	-	60, 65, 70	-	-	Columnas 0.3x0.3m x 1.8, 2.4 o 3.0 m altura Compresión	arcilloso con grava y arena
Hall y Djerbib (2004)	19.8-21.0	0.75 - 1.46	-	-	-	-	Cubos 10 cm de lado compresión	Arcilla limosa arenosa o gravosa
Gonzalez et al (1997) estructura	21.0	2.45	0.29	922	(355)	0.30	Cilindros 150x300 mm Compresión uniaxial y tracción indirecta	Limoso con Arcilla ferrugino sa, arena y grava fina
Gonzalez et al (1997) cimentación	22.7	7.85	0.74	6178	(2574)	0.20	Cilindros 150x300 mm Compresión uniaxial y tracción indirecta	

*Nota.* Adaptado de “Caracterización mecánica del tapial y su aplicación a estructuras existentes mediante el uso de ensayos no destructivos”, Ignacio Arto, 2019. Valores indicados entre paréntesis “( )” fueron calculados.

## 6.2 CORRELACIÓN DE ENSAYOS

Con la finalidad de evidenciar de una manera gráfica la correlación de resultados entre los ensayos mecánicos de compresión diagonal en muretes y compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas, se grafica las principales propiedades mecánicas, separadas por tipo de mezcla y considerando los resultados de laboratorio a partir del modelamiento usando elementos finitos: máxima resistencia a la tracción, máxima resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, módulo de corte y límite elástico.

Luego, a partir de los resultados mostrados en la **Tabla 11** y **Tabla 12** para el caso de los muretes y la **Tabla 16** y la **Tabla 17** para el caso de las probetas se planteará la hipótesis de correlación de resultados entre ensayos.

Como se cuentan con 30 datos para relizar la correlación será posible utilizar el coeficiente de correlación de Pearson, pero antes se deberá verificar la normalidad de la distribución de los datos con los que se realizará el análisis.

### 6.2.1 Prueba de Normalidad

Como se cuentan con 30 datos para cada variable analizada, se usará la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para cada caso, tanto en muretes como en probetas cilíndricas. De este modo, para el caso de los muretes se revisarán las siguientes variables: Esfuerzos últimos en tracción, Esfuerzos últimos en compresión, Esfuerzos últimos a corte, Módulo de elasticidad global (obtenido de lecturas del actuador de carga), Módulo de elasticidad local (obtenido de lecturas con LVDTs), Módulo de corte, Coeficiente de Poisson, límite elástico. Para el caso de las probetas cilíndricas se revisarán las variables: Esfuerzos últimos de tracción, Esfuerzos últimos en compresión, Esfuerzos últimos a corte, Módulo de elasticidad en compresión (obtenido de lecturas del actuador de cargas), Módulo de elasticidad promedio (obtenido de promediar el módulo de elasticidad en compresión y en tracción), Módulo de corte, coeficiente de Poisson, límite elástico aparente (obtenido de lecturas del actuador de cargas).

Muretes Resultados de test de Shapiro-Wilk	Probetas cilíndricas Resultados de test de Shapiro-Wilk
Esfuerzos últimos en <b>tracción</b> $f_{tM}$	Esfuerzos últimos en <b>tracción</b> $f_{tC}$
SWc= 0.969 (calculado)	SWc= 0.951 (calculado)
SWt= 0.927 (tablas)	SWt= 0.923 (tablas)
Tiene una distribución normal	Tiene una distribución normal
Esfuerzos últimos en <b>compresión</b> $f_{cM}$	Esfuerzos últimos en <b>compresión</b> $f_{cC}$
SWc= 0.969 (calculado)	SWc= 0.912 (calculado)
SWt= 0.927 (tablas)	SWt= 0.923 (tablas)
Tiene una distribución normal	No tiene una distribución normal
Esfuerzos últimos a <b>corte</b> $f_{sM}$	Esfuerzos últimos a <b>corte</b> $f_{sC}$
SWc= 0.969 (calculado)	SWc= 0.965 (calculado)
SWt= 0.927 (tablas)	SWt= 0.923 (tablas)
Tiene una distribución normal	Tiene una distribución normal
<b>Módulo de elasticidad global</b> $E_{MC}$	<b>Módulo de elasticidad en compresión</b> $E_{cC}$
SWc= 0.845(calculado)	SWc= 0.950 (calculado)
SWt= 0.927 (tablas)	SWt= 0.923 (tablas)
No tiene una distribución normal	Tiene una distribución normal
<b>Módulo de elasticidad local</b> $E_{Mlocal}$	<b>Módulo de elasticidad promedio</b> $E_{PC}$
SWc= 0.88464(calculado)	SWc= 0.9495(calculado)
SWt= 0.92700 (tablas)	SWt= 0.92300 (tablas)
No tiene una distribución normal	Tiene una distribución normal
<b>Módulo de corte</b> $G$	<b>Módulo de corte</b> $G$
SWc= 0.89234 (calculado)	SWc= 0.982 (calculado)
SWt= 0.92700 (tablas)	SWt= 0.923 (tablas)
No tiene una distribución normal	Tiene una distribución normal
<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
SWc= 0.824(calculado)	SWc= 0.909 (calculado)
SWt= 0.927 (tablas)	SWt= 0.923 (tablas)
No tiene una distribución normal	No tiene una distribución normal
<b>Límite elástico global</b>	<b>Límite elástico aparente</b>
SWc= 0.983 (calculado)	SWc= 0.939 (calculado)
SWt= 0.927 (tablas)	SWt= 0.927 (tablas)
Tiene una distribución normal	Tiene una distribución normal

Verificada la normalidad de la distribución de cada una de las variables se procederá con el análisis empleando el coeficiente de correlación de Pearson para los pares de variables en los que es aplicable (tracción, corte y límite elástico). Para los demás casos se propone una correlación de Spearman, que omite o no requiere de una distribución normal de sus datos para ser expresada.

### 6.2.2 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

La correlación de Pearson, también conocido como coeficiente producto momento, examina la relación en el comportamiento entre dos variables. El coeficiente de correlación, mide el grado de covariación entre variables.

$$r = \frac{Cov(x, y)}{S_x S_y} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \sqrt{\sum y^2 - n\bar{y}^2}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde:

$r$ :	Coefficiente de correlación de Pearson
$Cov(x, y)$ :	Covarianza entre X e Y
$S_x$ :	Desviación estándar de X
$S_y$ :	Desviación estándar de Y
$x_i$ :	Valores de la variable x en una muestra
$y_i$ :	Valores de la variable y en una muestra
$\bar{x}$ :	Media de los valores de la variable x
$\bar{y}$ :	Media de los valores de la variable y

El rango de valores en que puede resultar  $r$  y la fuerza de este es como se indica a continuación:

Valor de $r$	Sentido de correlación
-1	Correlación inversa o negativa perfecta
$-1 > r > 0$	Correlación inversa o negativa
0	No existe correlación entre las variables
$0 < r < 1$	Correlación directa o positiva
1	Correlación directa o positiva perfecta

La fuerza de la correlación, dependiendo de donde resulte el coeficiente “ $r$ ”, puede ser:

Valor de $r$	Fuerza de correlación
0.01 – 0.2	Correlación positiva muy baja o muy débil
0.2-0.39	Correlación débil o baja
0.4-0.59	Correlación media o moderada
0.6-0.79	Correlación fuerte o alta
0.8-0.99	Correlación muy fuerte o muy alta

### Prueba de hipótesis

$H_0: \rho = 0$  (hipótesis nula). No existe correlación lineal

$H_1: \rho \neq 0$  (hipótesis alterna). Existe correlación lineal

Estadística de prueba, siguiendo una distribución *t-student* con  $n-2$  grados de libertad si

$H_0: \rho = 0$  es verdadera. Se rechaza la hipótesis nula  $H_0: \rho = 0$  si

$$|t| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}, (\text{valor crítico})$$

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

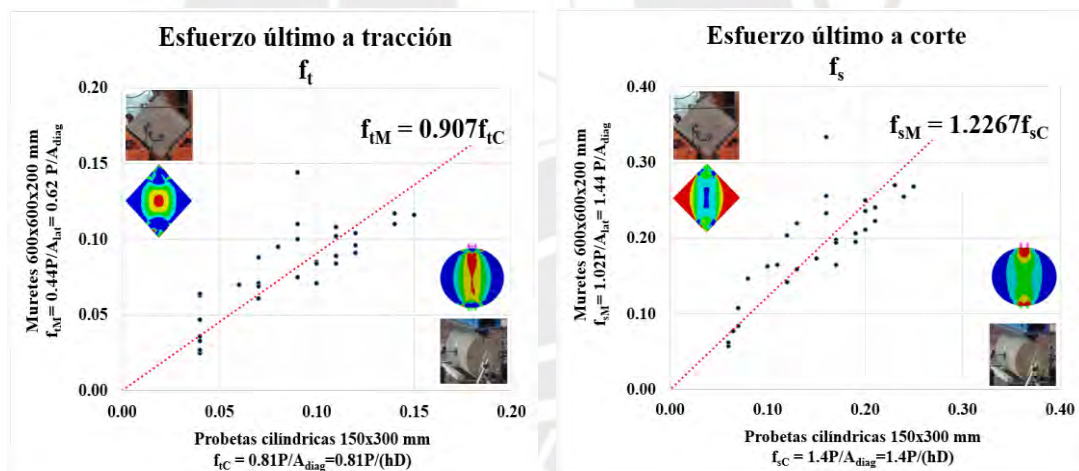
Dicho de otro modo:

Si  $|t| > \text{valor crítico}$ , Rechazar  $H_0$

Si  $|t| \leq \text{valor crítico}$ , No rechazar  $H_0$

Adicionalmente, para evaluar estos resultados se trabajará con un nivel de significancia de 5%.

En la **Figura 28**, se muestra la gráfica de dispersión que relaciona la máxima resistencia a la tracción, entre ensayos de compresión diagonal en muretes y la máxima resistencia a la tracción por compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas. Se compara según valores obtenidos del modelo de elementos finitos.



**Figura 28.** Correlación de resistencia última a tracción y último a corte para ensayos de compresión diagonal en muretes o en probetas cilíndricas según modelo numérico

Luego, para los 2 casos expuestos se indica la correlación existente entre variables:

Tracción		
	$f_{tM}$	$f_{tC}$
$f_{tM}$	1	0.800
$f_{tC}$	0.800	1

$r = 0.800$

$n = 30$

$gl(n-2) = 28$

$t = 7.05$  (estadístico de prueba)

$t_{crítico} = 2.05$

$7.05 > 2.05$ . Por lo tanto,

Existe correlación lineal muy alta

Corte		
	$f_{sM}$	$f_{sC}$
$f_{sM}$	1	0.825
$f_{sC}$	0.825	1

$r = 0.825$

$n = 30$

$gl(n-2) = 28$

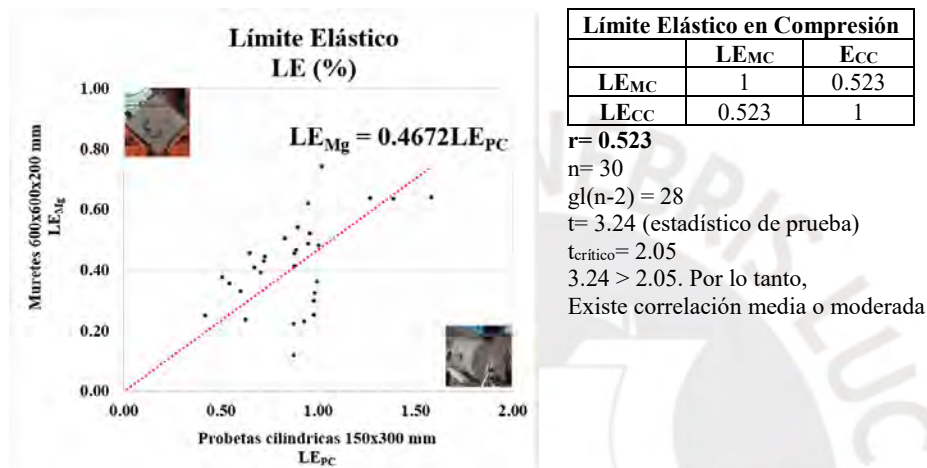
$t = 7.72$  (estadístico de prueba)

$t_{crítico} = 2.05$

$7.72 > 2.05$ . Por lo tanto,

Existe correlación lineal muy alta

En la **Figura 29**, se muestra la gráfica de dispersión que relaciona el límite de elasticidad global obtenido de los ensayos de compresión diagonal en muretes y el límite de elasticidad aparente obtenido del ensayo de compresión diagonal o tracción indirecta en probetas cilíndricas. Luego, se analiza la correlación existente entre ambas variables.



**Figura 29.** Correlación de límite elástico en compresión obtenido a partir de ensayos de compresión diagonal en muretes (600x600x200mm) y en probetas cilíndricas (150x300mm)

### 6.2.3 Coeficiente de correlación de Spearman

Para el análisis de las variables que no cumplen normalidad, o que la cumplen solo en un sentido, se utilizará el coeficiente de correlación de Spearman.

El coeficiente  $\rho$  (ro) de Spearman mide la fuerza y relación monotónica entre dos variables, o, dicho de otra manera, si una se incrementa la otra debería verse afectada de la misma forma, pero no necesariamente de forma lineal. Se calcula sobre rangos de datos y no sobre los datos directamente lo que la hace más resistente ante la aparición de valores atípicos.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

- $r_s$ : Coeficiente de correlación de Spearman
- $d_i$ : Diferencia de rango entre dos variables
- $n$ : Número de casos o tamaño de la muestra

El rango de valores en que puede resultar  $r_s$  y la fuerza de este es igual a lo visto con el coeficiente  $r$  de Pearson:

Valor de $r_s$	Sentido de correlación
-1	Correlación inversa o negativa perfecta
$-1 > r > 0$	Correlación inversa o negativa
0	No existe correlación entre las variables
$0 < r < 1$	Correlación directa o positiva
1	Correlación directa o positiva perfecta

La fuerza de la correlación, dependiendo de donde resulte el coeficiente  $r_s$ , puede ser:

Valor de $r_s$	Fuerza de correlación
0.01 – 0.2	Correlación positiva muy baja o muy débil
0.2-0.39	Correlación débil o baja
0.4-0.59	Correlación media o moderada
0.6-0.79	Correlación fuerte o alta
0.8-0.99	Correlación muy fuerte o muy alta

### Prueba de hipótesis

$H_0: \rho = 0$  (hipótesis nula). No existe correlación lineal

$H_1: \rho \neq 0$  (hipótesis alterna). Existe correlación lineal

Estadística de prueba, siguiendo una distribución *t-student* con  $n-2$  grados de libertad si

$H_0: \rho = 0$  es verdadera. Se rechaza la hipótesis nula  $H_0: \rho = 0$  si

$$|t| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}, (\text{valor crítico})$$

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

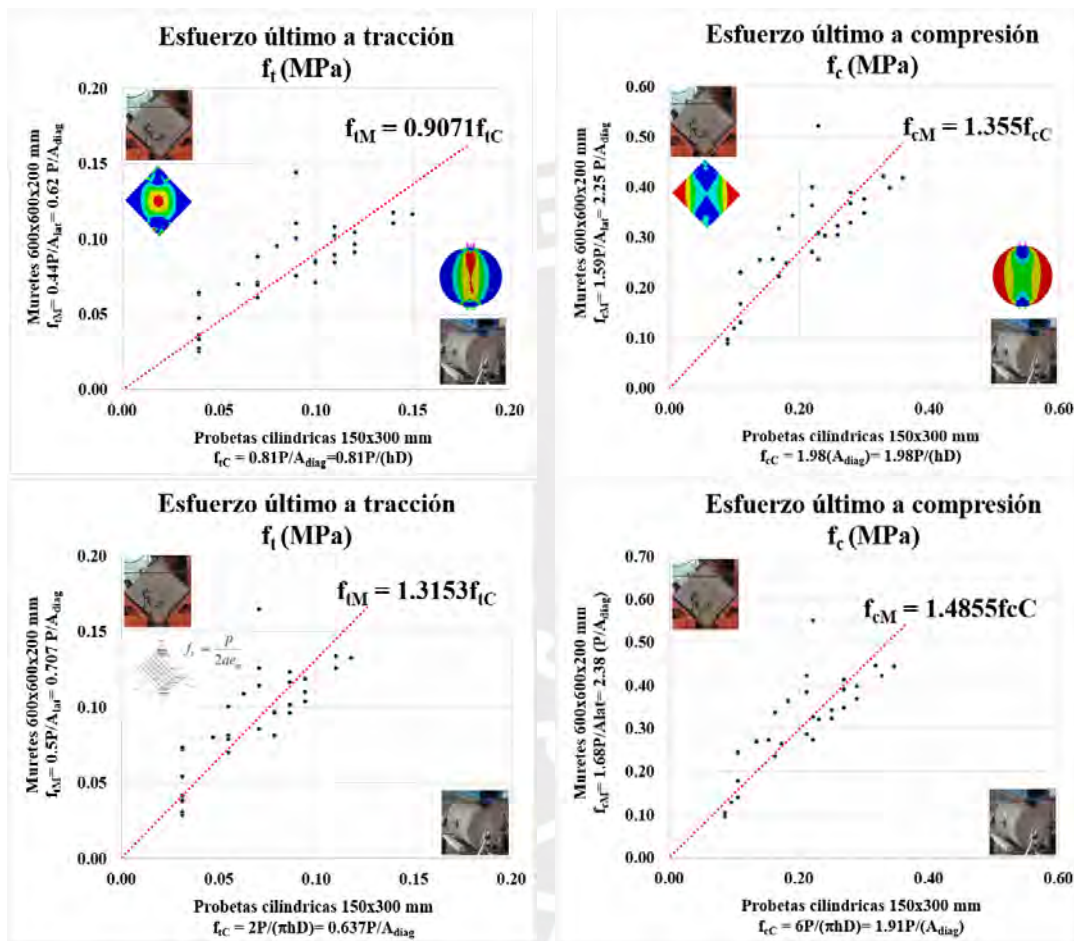
Dicho de otro modo:

Si  $|t| > \text{valor crítico}$ , Rechazar  $H_0$

Si  $|t| \leq \text{valor crítico}$ , No rechazar  $H_0$

Adicionalmente, para evaluar estos resultados se trabajará con un nivel de significancia de 5%.

En la **Figura 30** se muestra la correlación entre ensayos de compresión diagonal en muretes y en probetas cilíndricas. Se añade también la posibilidad de usar o emplear los coeficientes indicados por norma en lugar de los obtenidos con el modelo de elementos finitos.



**Figura 30.** Correlación de esfuerzos últimos en tracción y en compresión obtenido de ensayos de compresión diagonal en muretes y probetas cilíndricas, según modelo (arriba) o norma (abajo)

Esfuerzo último a tracción		
	$f_{tM}$	$f_{tC}$
$f_{tM}$	1	0.822
$f_{tC}$	0.822	1

$$r_s = 0.822$$

$$n = 30$$

$$gl(n-2) = 28$$

$$t = 7.63 \text{ (estadístico de prueba)}$$

$$t_{\text{crítico}} = 2.05$$

$7.63 > 2.05$ . Por lo tanto,

Existe correlación muy fuerte o muy alta

Esfuerzo último a compresión		
	$f_{cM}$	$f_{cC}$
$f_{cM}$	1	0.845
$f_{cC}$	0.845	1

$$r_s = 0.845$$

$$n = 30$$

$$gl(n-2) = 28$$

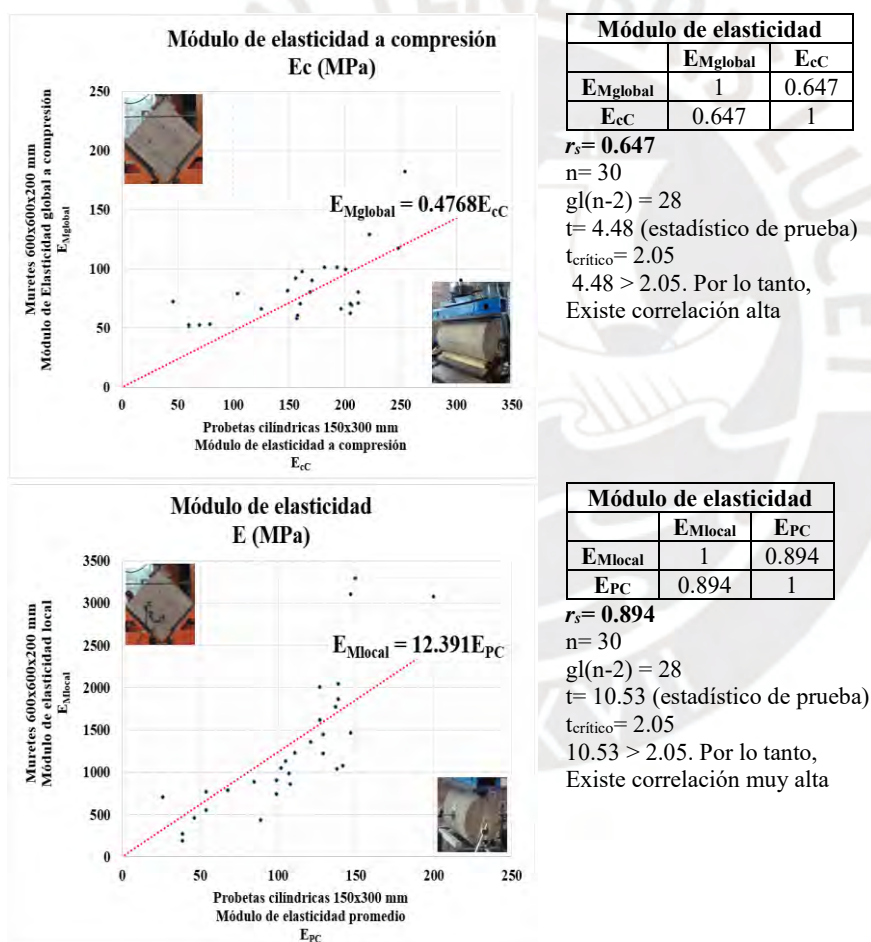
$$t = 8.36 \text{ (estadístico de prueba)}$$

$$t_{\text{crítico}} = 2.05$$

$8.36 > 2.05$ . Por lo tanto,

Existe correlación muy fuerte o muy alta

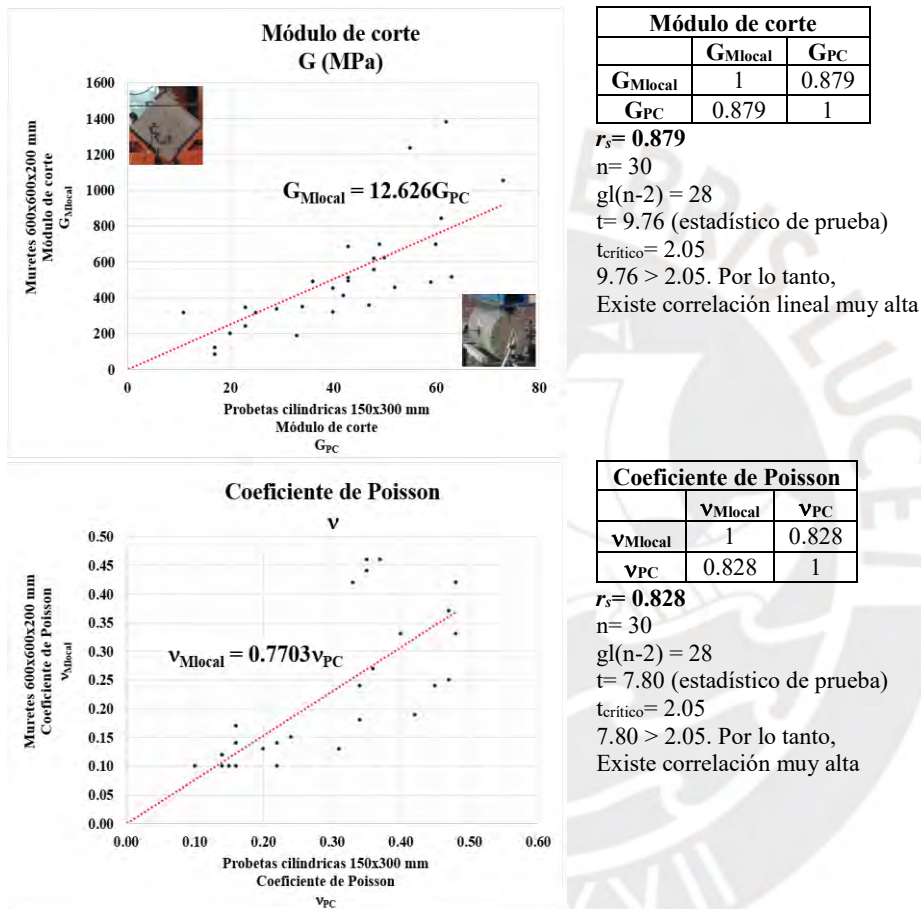
Posteriormente, en la **Figura 31** se muestra la correlación entre módulos de elasticidad. Primero relacionando lo hallado de manera global en el ensayo de compresión diagonal realizado en muretes con el módulo de elasticidad en compresión hallado para las probetas cilíndricas. Seguidamente, la correlación entre módulos de elasticidad promedio a partir de las lecturas de LVDT y el módulo de elasticidad promedio en las probetas cilíndricas.



**Figura 31.** Correlación de módulo de elasticidad obtenido a partir de ensayos de compresión diagonal en muretes y en probetas cilíndricas

Seguidamente, en la **Figura 32** se muestra la correlación entre módulos de corte i coeficientes de Poisson obtenidos del ensayo de compresión diagonal en muretes y módulos de corte

obtenidos del ensayo de tracción indirecta en probetas cilíndricas. En este caso sólo se analizaron los obtenidos a partir de lecturas promedio.



**Figura 32.** Correlación de módulo de corte y coeficiente de Poisson obtenido a partir de ensayos de compresión diagonal en muretes y en probetas cilíndricas

No se realizó el análisis para comparar el límite elástico en el caso de las lecturas locales debido a que no se pudo medir las deformaciones de manera directa en el caso de las probetas cilíndricas. Los resultados de módulo de elasticidad, tanto en compresión como en tracción, fueron calculados para las deformaciones máximas verticales y horizontales externas.

## **CONCLUSIONES**

### **SOBRE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

#### **Revisión de normativa nacional e internacional**

Se revisaron códigos y guías de diseño en tierra que consideren al tapial, o tierra apisonada, como tecnología de construcción en tierra cruda. España, Australia y Alemania cuentan con guías muy completas sobre el diseño y construcción con tierra, incluyendo la tecnología del tapial entre otras, y aunque no tienen el rango de ley son usadas ampliamente en los proyectos en que se recomienda su aplicación. Las normas revisadas en el presente estudio incluyen la de Colombia (solo edificios con valor histórico), Nueva Zelanda, Zimbawe (ARSO) y Perú.

En todas se incluyen aspectos generales, una parte sobre evaluación del material a usar, detalles constructivos, consideraciones del diseño y finalmente detalles y acabados. De la revisión de coincidencias y similitudes se evidencia la necesidad de considerar un capítulo sobre la historia de la construcción con tierra en el Perú, así como su desarrollo a lo largo del territorio peruano. Además, revisar la posibilidad de añadir uno o varios capítulos sobre diseño considerando el nivel de resistencia al fuego, así como densidad mínima del material, permeabilidad, acústica y tipos de acabados que ayuden en la durabilidad del producto final.

#### **Implementación de ensayo mecánico de bajo costo que permita conocer propiedades mecánicas del tapial**

Se realizaron los ensayos mecánicos en probetas cilíndricas, de tierra apisonada, registrando las cargas y las deformaciones necesarias que permitieron identificar las principales propiedades mecánicas del material: Esfuerzo máximo en tracción, en compresión y corte, módulo de elasticidad, módulo de corte, coeficiente de poisson y límite elástico.

El volumen de tierra necesario para construir una probeta cilíndrica de 150 mm x 300 mm es cientos de veces inferior al necesario para elaborar muretes de 600 mm x 600 mm x 200 mm, o de similares dimensiones, lo que la hace una alternativa más barata.

### **Correlación numérica entre ensayos de compresión diagonal en muretes y tracción indirecta en probetas cilíndricas**

Se hizo una prueba de normalidad sobre los resultados obtenidos para ver si era viable plantear la hipótesis de correlación por coeficiente de Pearson ( $r$ ), como en algunos casos no se alcanzó a demostrar la normalidad se hizo uso de una correlación por coeficiente de Spearman ( $r_s$ ). En todos los casos de esfuerzo se alcanzó coeficientes de correlación muy altos (esfuerzos por tracción, corte máximo y compresión), en el resto de propiedades mecánicas evaluadas como el módulo de elasticidad, el módulo de corte y el coeficiente de Poisson, también se alcanzaron coeficientes de correlación muy altos, para el caso del módulo de elasticidad global se alcanzó un coeficiente de correlación alto, y solo en el caso de Límite elástico se alcanzó un coeficiente de correlación media.

En todos los casos se confirmó la hipótesis correlacional entre las variables (ensayo en murete y ensayo correspondiente en probeta cilíndrica).

### **Sobre las recomendaciones para la Norma E.080**

Se recomienda añadir el control por densidad, fijando como mínimo un valor de  $1.7 \text{ kg/cm}^3$  (o de  $17 \text{ kN/m}^3$ ), siguiendo el criterio propuesto por la norma africana ARSO. Para este control o monitoreo del material se debería realizar una muestra cada  $20 \text{ m}^3$  de muros construidos.

El agregar arena gruesa al suelo arcilloso permitió un mejor desempeño por resistencia en las unidades de tapial. Se sugiere que de manera complementaria a la prueba de control por fisuración se indique en la Norma E.080, y que puede resultar algo subjetiva, se precisen límites granulométricos basados en lo publicado por CRAterre, resaltando valores mínimos por contenido de arcilla y máximos por contenido de grava.

60 mm to 2 mm (0 a 15%), Arena, 0.06mm a 2.00mm (40 a 50%), Limo 0.002mm a 0.06mm (20 a 35%), Arcilla, menor a 0.002mm (15 a 25%).

Se sugiere añadir a la Norma E.080 los rangos sugeridos por expertos internacionales en los límites de plasticidad o Atterberg para la elaboración de tapial (LL e IP). Los valores recomendados coinciden con un límite líquido LL alrededor de 35 y un índice de plasticidad IP entre 15 y 18.

En el punto 8.1 de la Norma E-080, con respecto a la elaboración de probetas de ensayo, y en analogía a lo desarrollado en un ensayo Proctor estándar, falta precisar la cantidad de capas y la altura a la que debe ser liberado el mazo de 5 kg. Comprendiendo que es poco probable alcanzar una energía idéntica al ensayo Próctor estándar ( $600 \text{ kJ/m}^3$ ), se sugiere proponer un valor relativo mínimo referencial (75% del mismo), es decir, de al menos  $400 \text{ kJ/m}^3$ .

En la norma E.080 se propone la posibilidad de realizar ensayos de compresión diagonal en muretes donde se espera una resistencia última de 0.025 MPa (artículo 8.5, E.080). Sin embargo, este valor se reportó como admisible en su versión anterior por lo que se sugiere revisar dicho valor. En ese sentido, si se toma el factor de seguridad usualmente empleado para condiciones de laboratorio ( $FS= 2.5$ ) se tendría una resistencia última de 0.0625 MPa, más parecido al de 0.08 MPa indicado para tracción en probetas cilíndricas

## **SOBRE LAS HIPÓTESIS**

### **Importancia de humedad de mezcla y granulometría del suelo en la resistencia del tapial**

De la prueba de control de fisuración se evidencia que distintas conformaciones granulométricas pueden producir mayor o menor fisuración según su contenido final de arcilla, limo, arena, y grava. Adicionalmente, del análisis de la granulometría del suelo solo y de una mezcla de suelo con arena gruesa en proporción 1:1 la curva final se aproxima a los límites recomendados por CRAterre.

En ese sentido, si se hubiera elegido una combinación de suelo: arena 1: 0.5 la curva hubiera resultado por encima de los valores recomendados, no permitiendo una adecuada compactación, y con una combinación de 1:1.5, si bien hubiera estado dentro de los límites se hubiera reducido demasiado la cantidad de arcilla presente, debilitando la cohesión de la mezcla final. Por tanto, la proporción suelo: arena en peso de 1:1 resulta la más adecuada.

Por otro lado, la variación de la humedad en la conformación de muretes y de probetas cilíndricas evidencian distintas resistencias finales promedio. En el caso del suelo solo, un incremento de humedad de 9 a 15% resulta en un incremento significativo de resistencia final

a la tracción, es decir, con 15% de humedad para una mezcla de suelo solo se alcanza resistencias mayores al doble del valor alcanzado con una humedad de mezcla de 9%, mientras que en el caso de la mezcla de una mezcla de suelo con arena gruesa en proporción 1:1, si bien se reduce la resistencia, esta reducción resulta en menos del 10%.

Por lo tanto, es importante controlar ambos parámetros para alcanzar el máximo desempeño del material.

### **Existencia de correlación entre resistencias máximas a tracción para unidades de tapial para distintos ensayos mecánicos**

Se verificó usando resultados de la modelación por elementos finitos y también para valores estándar productos de las normas vigentes. En todos los casos se pudo confirmar la correlación entre resistencias. Sin embargo, se evidenció una menor desviación en la correlación de ensayos empleando los modelos de elementos finitos.

### **Existencia de comportamiento isotrópico en las unidades de tapial en el rango elástico.**

Tras la elaboración de los modelos con elementos finitos se evidencia que las máximas resistencias o esfuerzos principales no varían sustancialmente si se asumen distintos niveles de ortotropía. Si bien se ven afectadas las máximas resistencias en tracción y compresión, el máximo esfuerzo de corte se mantiene casi constante. Por lo tanto, es válido asumir la isotropía sabiendo que el resultado no variará de manera sustancial por criterio de falla.

## **SOBRE LOS RESULTADOS TRAS ENSAYOS**

### **Propiedades mecánicas**

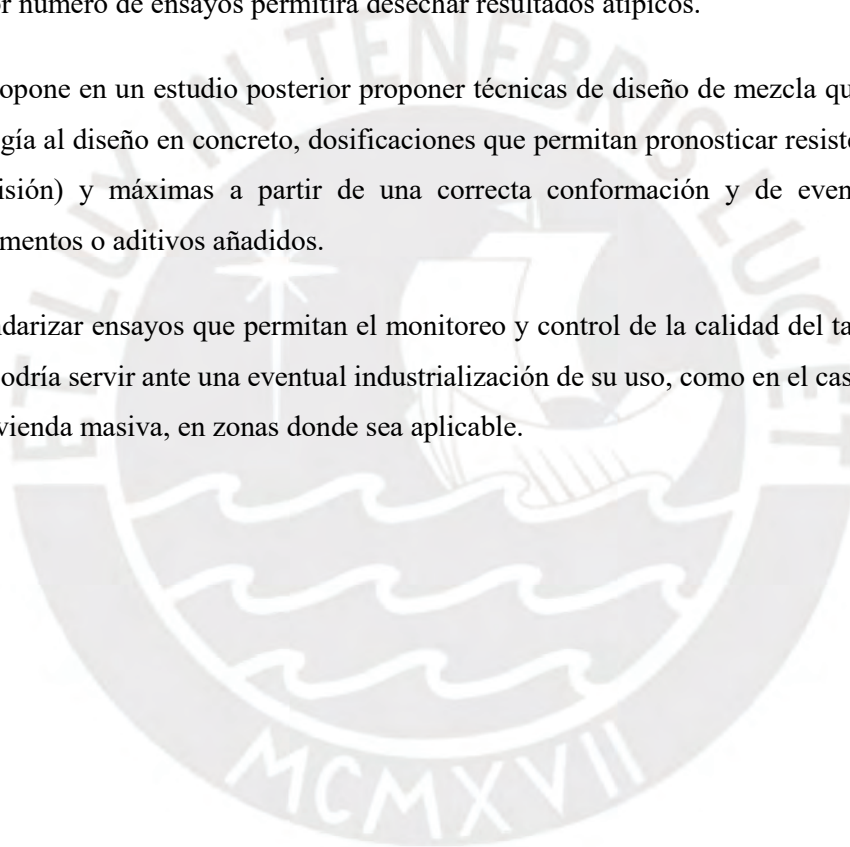
Con respecto al modo de falla de los muretes y de las probetas cilíndricas, se evidencia que el adicionar arena gruesa de acuerdo a lo recomendado por CRAterre, se produce un incremento en el límite elástico, permitiendo una mayor capacidad de deformación importante. En el caso de los muretes en el orden de 40% y en el caso de las probetas cilíndricas alrededor del 20%.

## **SOBRE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Se propone como futura línea de investigación con base en lo avanzado en el presente estudio realizar un Mapa de caracterización de materiales arcillosos en el Perú. Poder realizar un mayor número de ensayos permitirá desechar resultados atípicos.

Se propone en un estudio posterior proponer técnicas de diseño de mezcla que considere, en analogía al diseño en concreto, dosificaciones que permitan pronosticar resistencias deseadas (precisión) y máximas a partir de una correcta conformación y de eventualmente usar suplementos o aditivos añadidos.

Estandarizar ensayos que permitan el monitoreo y control de la calidad del tapial en obra, lo que podría servir ante una eventual industrialización de su uso, como en el caso de programas de vivienda masiva, en zonas donde sea aplicable.



## REFERENCIAS

- Afanador, Nelson; Carrascal, Mayerly; Bayona, Marvin. (2013) Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pisada. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, julio - diciembre de 2013, Vol 22, No. 35.
- Almeida, João; Pereira, Eduardo; Barros, Joaquim. (2015). Assessment of overlay masonry strengthening system under in-plane monotonic and cyclic loading using the diagonal tensile test. *Construction and Building Materials: Volume 94*, 30 September 2015, Pages 851-865.
- Anagnos, James; Kennedy, Thomas. (1972). Practical method of conducting the indirect tensile test. Evaluation of tensile properties of subbases for use in new rigid pavement design. Research Project 3-8-66-98 conducted for The Texas Highway Department.
- Araujo, Nómár y Marquez, Jogly. (2016). Deducción analítica del módulo en mezclasasfálticas asociado al ensayo de tracciónindirecta. *Ciencia e Ingeniería*, vol. 37, núm. 3, pp. 157-165. Universidad de los Andes.
- ARSO. (2015). Rammed earth structures – Code of practice THC 03. SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724.
- Arto Torres, Ignacio. (2019). Caracterización mecánica del tapial y su aplicación a estructuras existentes mediante el uso de ensayos no destructivos. Universidad de Granada.
- ASTM E519-02. (2018). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages.
- Atala, César. (2011). Estudio experimental sobre correlaciones en suelos granulares finos (arenas) compactados, usando equipos de penetración. Tesis para optar el grado de maestro en ciencias con mención en ingeniería geotécnica. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Balbo, José. (2013). Relations between indirect tensile and flexural strengths for dry and plastic concretes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Vol 6 pp 854-874. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000600003>
- Borri, Antonio, Castori, Giulio; Corradi, Marco. (2012). Evaluation of shear strength of masonry panels through different experimental analyses. 14th Structural Faults and Repair, 3 - 5 July 2012, Edinburgh, Scotland. <http://nrl.northumbria.ac.uk/17348/>

- Brignola, Anna; Frumento, Sara; Lagomarsino, Sergio; Podestà, Stefano (2008) Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, Vol 3:1, 52-73. <http://dx.doi.org/10.1080/15583050802138634>
- Bui, Quoc-Bao; Morel, Jean-Claude. (2009). Assessing the anisotropy of rammed earth. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 3005–3011.
- Bui, Quoc-Bao; Morel, Jean-Claude; Hans, Stéphane; Walker, Peter. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth.
- Calderini, Chiara; Cattari, Serena; Lagomarsino, Sergio (2009) Identification of shear mechanical parameters of masonry piers from diagonal compression test.
- Calderini, Chiara; Cattari, Serena; Lagomarsino, Sergio (2010) The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 677–685.
- Chang, Gerardo; Fiori, Christine; Schexnayder, Cliff. (2013). *Rammed Earth: Construction Lessons from Experience*. Practice Periodical On Structural Design And Construction. ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000152)
- Chien-Ching Maa, Kuang-Ming Hung. (2008). Exact full-field analysis of strain and displacement for circular disks subjected to partially distributed compressions. *International Journal of Mechanical Sciences* 50 (2008) 275–292.
- Cid, J.; Mazarrón, F. R.; Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, v. 63, n. 523, p. 159-169
- COGUANOR NTG 41051 h3. (2012). Norma Técnica Guatemalteca. Método de Ensayo. Determinación de la tracción diagonal (corte) en ensamblajes de mampostería.
- CYTED. (2003). *Arquitecturas de tierra en Iberoamérica*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. PROTERRA, HABITERRA.
- Dachverband Lehm e. V. (1999). *Lehmbau Regeln*. Begriffe Baustoffe Bauteile.
- Durán García, H.M. (2002) Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco. *TERRA volumen 20 número 3:227-234*.
- Flores, Luis; Moroni, Isabel (2006) Comportamiento de las edificaciones con tierra cruda después del terremoto de septiembre del 2005 ciudad de Lamas-Perú. Comité Técnico Especializado para la Actualización de la Norma para la Construcción con Tierra Cruda.

- Gatti, Fabio. (2012). *Arquitectura y construcción en tierra. Estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Golondrino, Chanchí et al (2008). Ensayos a compresión y tensión diagonal sobre muretes hechos a base de papel periódico reciclado y engrudo de almidón de yuca. *Revista ingeniería de construcción*, 23(3), 145-154.  
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732008000300002>
- Garrote Villar, Elisabet. (2006). Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas. Capítulo 2. El ensayo de tracción indirecta. Tesina. Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio. Universidad Politécnica de Cataluña
- Gomez, Ma. Soledad; Vidal, Sergio. (2007). Correlation of soils moisture determination through drying in oven and microwaves. UCL.
- Gomes, Maria Idália; Gonçalves, Teresa; Faria, Paulina. (2014). Unstabilised Rammed Earth: Characterization of Material Collected from Old Constructions in South Portugal and Comparison to Normative Requirements. *International Journal of Architectural Heritage*, Taylor & Francis, 8(2): 185-212
- Hall, Mathew; Djerbib, Youseff. (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials* 18, 281–286.
- ICPI. (2007). Compactación de suelos. Sección 4: Características y compactación del suelo. Parte A Fundamentos sobre Gradación (Granulometría), Tamizado y Normas. Interlocking Concrete Pavement Institute.
- Illampas, Rogiros; Ioannou, Ioannis; Charmpis, Dimos C. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation. *Construction and Building Materials* Volume 53, pp 83–90.
- INEI. (2018). Perú perfil socioeconómico informe nacional. Censos nacionales 2017: xii de población, vii de vivienda y iii de comunidades indígenas. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Presidencia del Consejo de Ministros.
- Jurina, Lorenzo; Righetti, Monica. (2011). Traditional building in Peru. ICOMOS.
- Malyszko, Leszek. (2005). In-plane shear and tensile strength tests of small brickwork specimens. *Proceedings of Structural Analysis of Historical Constructions*, Modena, Lourenc,o & Roca (eds), Padova, Italia, 2004; 291–298. Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 15363799
- Maniatidis, Vasilios and Walker, Peter. (2003) A Review of Rammed Earth Construction. Natural Building Technology Group Department of Architecture & Civil Engineering, University of Bath.
- Maniatidis, Vasilios and Walker, Peter. (2008). Structural capacity of rammed earth in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering – ASCE*, march, pp 230-238.

- Miccoli, Lorenzo; Oliveira, Daniel; Silva, Rui; Müller, Urs; Schueremans, Luc. (2015). Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling. *Materials and Structures* (2015) 48:3443–3456.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0411-7>
- Minke, Gernot. (2006). *Building with earth. Design and technology of a sustainable architecture*. Birkhäuser.
- Montgomery, Douglas. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. 2da edición. Editorial Limusa.
- MVCS. (2017). Norma E.080 Diseño y construcción con tierra reforzada. Resolución ministerial N° 121-2017-Vivienda. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- NCC (2013) *Building Code of Australia - Volume Two. Class 1 and Class 10 buildings*. Australian Building Codes Board.
- NMAC.14.7.4. (2016). Title 14 housing and construction. Chapter 7 Building codes general. Part 4 2015 New Mexico earthen building materials code. New Mexico Administrative Code. NMAC. <http://164.64.110.134/parts/title14/14.007.0004.html>
- NMAC.14.7.8. (2016). Title 14 housing and construction. Chapter 7 Building codes general. Part 8 2015 New Mexico historic earthen building. New Mexico Administrative Code. NMAC. <http://164.64.110.134/parts/title14/14.007.0008.html>
- Perrucci, Daniele; Tarque, Nicola; Camata, Guido; Spacone, Enrico (2015) Pseudo static nonlinear analysis of the asinelli tower. 12th North American Masonry Conference.
- Petry, Sarah; Beyer, Katrin. (2013). Comparison of seismic test on URM piers at half-and full-scale. 12th Canadian Masonry Symposium, Vancouver, British Columbia, June 2-5.
- Petry, Sarah; Beyer, Katrin. (2014). Scaling unreinforced masonry for reduced-scale seismic testing. *Bulletin of Earthquake Engineering* Volume 12, Issue 6, pp 2557-2581.
- Pehovaz Alvarez, Humberto I. (2004). *Ensaio não convencionais para determinação da tenacidade à fratura em rochas: análise e comparação*. Master's Dissertation, Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.  
<https://doi.org/10.11606/D.18.2004.tde-06042006-160509>
- Price, Natalie; Heath, Andrew. (2013). Quality control of earth construction in developing áreas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Construction Materials* 167 April 2014 Issue CM2. Pages 104–113.  
<http://dx.doi.org/10.1680/coma.13.00006>

- Rodríguez-Larraín, Sofía et al. (2014). Cuadernos 18. Aportes de la enseñanza de la arquitectura en tierra a la mitigación de riesgos. Departamento Académico de Arquitectura. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- San Bartolomé, Ángel. (1983). Ensayos de carga lateral cíclica en muros de albañilería confinada –correlación de resultados entre especímenes a escala natural y probetas pequeñas. COLLOQUIA '83, XXII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Santiago de Chile.
- Tejada, U; Mendoza, A y Torrealva, D. (2016). Uso del tapial en la construcción. Gerencia de Investigación y Normalización. SENCICO - Servicio Nacional de Capacitación para la industria de la Construcción, Lima, Perú.
- Solís, M; Torrealva, D, Santillán, P; Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas. Informes de la Construcción Vol. 67, 539, e092 julio-septiembre 2015 ISSN-L: 0020-0883.  
<http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.141>
- Suarez, Ludger; Castro, Alvaro; Pacheco, André. (2010). Anisotropía mecánica del neis de la casa de máquinas de la hidroeléctrica porce. Boletín de Ciencias de la Tierra – número 27 noviembre 2009-junio 2010, Medellín, ISSN 0120-3630 pp 79-96.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169516257007>
- Tarque, Nicola; Camata, Guido; Benedetti, Andrea; Spacone, Enrico (2017) Alternative approach for reproducing the in-plane behaviour of rubble stone walls. Earthquakes and Structures, Vol. 13, No. 1 (2017) 29-38.  
<https://doi.org/10.12989/eas.2017.13.1.029>
- Torres, Adolfo; Lamus, Fabián; Bahamón, Sebastián; Vesga, Juan. (2013). Estudio analítico del estado de esfuerzos en un disco indeformable ante carga diametral. Épsilon (20), 11-39.
- UNE 41410. (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- Vargas-Neumann, Julio et al. (2010). Uso de grouts de barro líquido para reparar fisuras estructurales en muros históricos de adobe. En: Arquitectura construida en tierra, Tradición e Innovación. Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos 2004/2009. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2010. P. 281-288. Disponible en internet:  
[http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2010/2010\\_978846934554\\_2\\_p281-288\\_vargasneumann.pdf](http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2010/2010_978846934554_2_p281-288_vargasneumann.pdf)
- Vargas-Neumann, Julio; Bariola, Juan; Blondet, Marcial. (1983). Investigación científica innovativa: edificaciones de adobe en áreas sísmicas: Proyecto AID 936/5542. PUCP.
- Vyncke Johan; Kupers, Laura; Denies, Nicolas (2018) Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics. MATEC Web of Conferences 149, 02001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902001>
- Walker, Paul. (2002). The Australian Earth Building Handbook. Standards Australia International.

- Walker, Richard & Morris, Hugh. (2021) Development of the New Zealand earth building standards NZS 4297:2020, NZS 4298:2020 AND NZS4299:2020.
- Ye, JH et al. (2012). Estimation of the bi-modulus of materials through deformation measurement in a Brazilian disk test. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*.
- Zami, Mohammad Sharif; Lee, Angela. (2009). Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – State-of-the-art review. *Journal of Building Appraisal* Volume 5, Issue 3, 259–271.



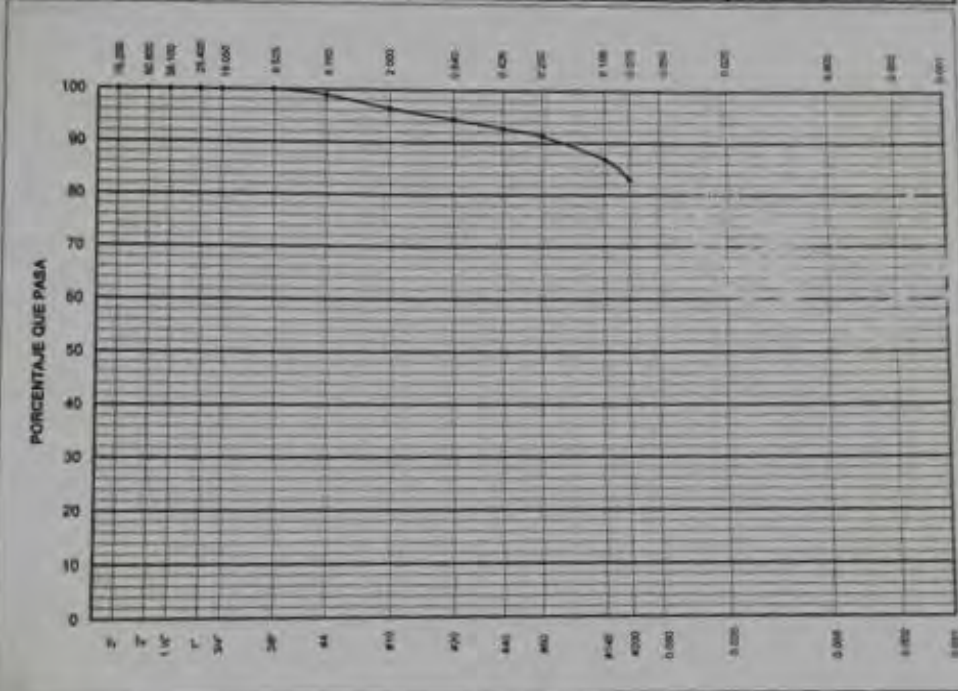


**ANEXO A. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA Y  
CARACTERIZACION SUCS**



ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN  
NTP 339.127, 339.128, 339.129, 339.131

Solicitante : ESCUELA DE POSGRADO	Expediente <b>16-310</b>
Proyecto : ENSAYOS MECANICOS EN UNIDADES DE TAPIAL	
Muestra : SUELO ARCILLOSO (HUACHIPA) Profundidad: -----	Fecha : 22-nov-2016



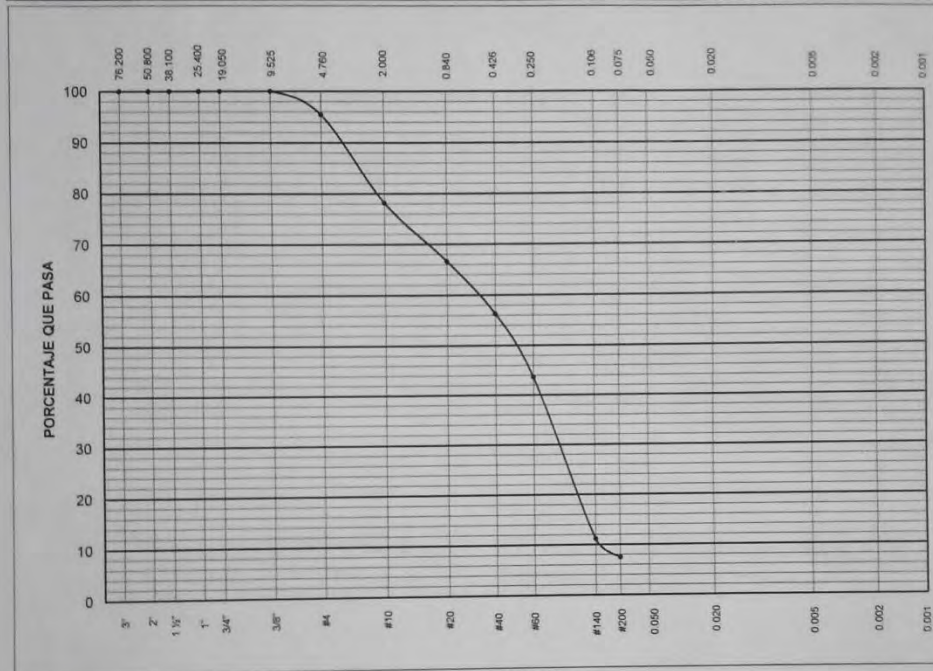
Tamiz ASTM	Porcentaje que pasa	Diámetro en mm	Porcentaje que pasa	LL = 24	LP = 17	IP = 7	CLASIFICACIÓN	
3"	100.0	---	---	---	---	---	SUCS	CL-ML
2"	100.0	---	---	---	---	---	AASHTO	---
1 1/2"	100.0	---	---	---	---	---		
1"	100.0	---	---	---	---	---		
3/4"	100.0	---	---	---	---	---		
3/8"	100.0	---	---	---	---	---		
#4	98.9	---	---	---	---	---		
#10	96.5	---	---	---	---	---		
#20	94.4	---	---	---	---	---		
#40	92.7	---	---	---	---	---		
#60	91.3	---	---	---	---	---		
#140	88.8	---	---	---	---	---		
#200	82.9	---	---	---	---	---		

  
**MANUEL A. OLCESE FRANZOSO**  
 Ingeniero Civil CIP 12969  
 Jefe del Laboratorio

16-310/2/GM/1 de 1

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN  
NTP 339.127, 339.128, 339.129, 339.131

Solicitante : ESCUELA DE POSGRADO	Expediente <b>16-310</b>
Proyecto : ENSAYOS MECANICOS EN UNIDADES DE TAPIAL	
Muestra : ARENA GRUESA Profundidad: -----	Fecha : 22-nov-2016



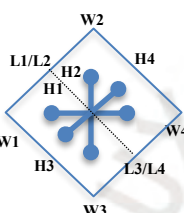
Tamiz ASTM	Porcentaje que pasa	Diámetro en mm	Porcentaje que pasa	LL = NP	LP = NP	IP = ---	CLASIFICACIÓN
3"	100.0	---	---	---	---	---	SUCS <b>SP-SM</b>
2"	100.0	---	---	---	---	---	AASHTO -----
1 1/2"	100.0	---	---	---	---	---	
1"	100.0	---	---	---	---	---	
3/4"	100.0	---	---	---	---	---	
3/8"	100.0	---	---	---	---	---	
#4	95.4	---	---	---	---	---	
#10	78.2	---	---	---	---	---	
#20	66.6	---	---	---	---	---	
#40	56.2	---	---	---	---	---	
#60	43.6	---	---	---	---	---	
#140	11.1	---	---	---	---	---	
#200	7.5	---	---	---	---	---	

**MANUEL A. OLCESE FRANZERO**  
 Ingeniero Civil CIP 12969  
 Jefe del Laboratorio

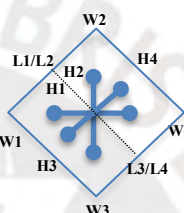
**ANEXO B. DATOS TOMADOS PREVIO A ENSAYO DE  
COMPRESIÓN DIAGONAL**



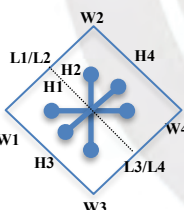
**MURETE SS-091**

W1	W2	W3	W4	W mm	
200	195	200	190	<b>196.3</b>	
L1	L2	L3	L4	L mm	
605	605	605	595	<b>602.5</b>	
H1	H2	H3	H4	H mm	
610	610	610	610	<b>610.0</b>	
				LVDT vert. (mm)	295
				LVDT horiz. (mm)	295
				LVDT diag. (mm)	320
				Peso (kN)	1.2567
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	17.4

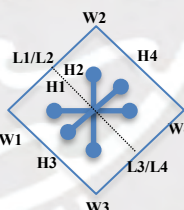
**MURETE SS-092**

W1	W2	W3	W4	W mm	
200	200	200	195	<b>198.8</b>	
L1	L2	L3	L4	L mm	
600	600	600	605	<b>601.3</b>	
H1	H2	H3	H4	H mm	
610	610	605	610	<b>608.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	295
				LVDT horiz. (mm)	285
				LVDT diag. (mm)	330
				Peso (kN)	1.2746
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	17.5

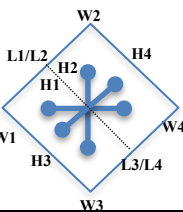
**MURETE SS-093**

W1	W2	W3	W4	W mm	
190	200	190	195	<b>193.8</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
580	605	610	580	<b>593.8</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
605	600	560	600	<b>591.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	295
				LVDT horiz. (mm)	295
				LVDT diag. (mm)	320
				Peso (kN)	1.2779
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.8

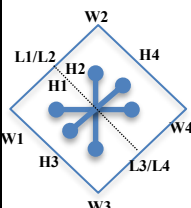
**MURETE SS-094**

W1	W2	W3	W4	W mm	
195	205	200	195	<b>198.8</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
610	610	615	615	<b>612.5</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
600	605	600	600	<b>601.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	290
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	305
				Peso (kN)	1.3081
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	17.9

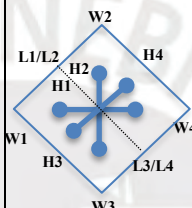
**MURETE SS-095**

W1	W2	W3	W4	W mm	
200	195	195	195	<b>197.0</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
605	605	600	610	<b>605.0</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
600	600	600	595	<b>598.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	300
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	320
				Peso (kN)	1.3088
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.3

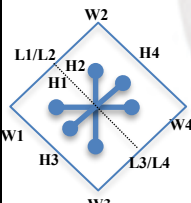
**MURETE SS-121**

W1	W2	W3	W4	W mm	
190	195	196	196	<b>194.3</b>	
L1	L2	L3	L4	L mm	
590	610	605	605	<b>602.5</b>	
H1	H2	H3	H4	H mm	
603	605	595	600	<b>600.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	305
				LVDT horiz. (mm)	295
				LVDT diag. (mm)	315
				<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3160</b>
				<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>18.7</b>

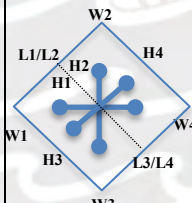
**MURETE SS-122**

W1	W2	W3	W4	W mm	
195	195	190	200	<b>197.0</b>	
L1	L2	L3	L4	L mm	
605	600	600	608	<b>603.8</b>	
H1	H2	H3	H4	H mm	
605	615	610	600	<b>607.5</b>	
				LVDT vert. (mm)	300
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	310
				<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3445</b>
				<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>18.6</b>

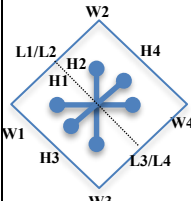
**MURETE SS-123**

W1	W2	W3	W4	W mm	
200	200	200	198	<b>199.5</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
605	605	600	610	<b>605.0</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
<b>605</b>	<b>610</b>	<b>610</b>	<b>610</b>	<b>608.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	290
				LVDT horiz. (mm)	285
				LVDT diag. (mm)	310
				<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3769</b>
				<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>18.7</b>

**MURETE SS-124**

W1	W2	W3	W4	W mm	
200	200	198	202	<b>200.0</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
595	600	600	610	<b>601.3</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
600	605	605	605	<b>603.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	300
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	305
				<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3582</b>
				<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>18.7</b>

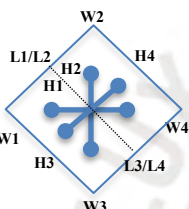
**MURETE SS-125**

W1	W2	W3	W4	W mm	
195	200	200	200	<b>198.8</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
605	605	605	600	<b>603.8</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
610	610	610	605	<b>608.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	300
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	315
				<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3827</b>
				<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>18.9</b>

**MURETE SS-151**

W1	W2	W3	W4	W mm
209	198	200	195	<b>200.5</b>
L1	L2	L3	L4	L mm
590	595	595	600	<b>595.0</b>
H1	H2	H3	H4	H mm
605	605	608	590	<b>602.0</b>

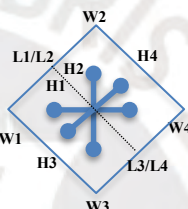
  

	LVDT vert. (mm)	280
	LVDT horiz. (mm)	280
	LVDT diag. (mm)	300
	Peso (kN)	1.3435
	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.7

**MURETE SS-152**

W1	W2	W3	W4	W mm
200	192	200	195	<b>196.8</b>
L1	L2	L3	L4	L mm
600	600	600	600	<b>600.0</b>
H1	H2	H3	H4	H mm
606	603	605	595	<b>602.8</b>

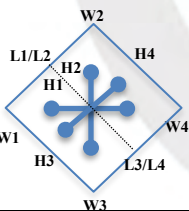
  

	LVDT vert. (mm)	285
	LVDT horiz. (mm)	277
	LVDT diag. (mm)	295
	Peso (kN)	1.3043
	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.3

**MURETE SS-153**

W1	W2	W3	W4	W mm
198	195	202	202	<b>199.3</b>
L1	L2	L3	L4	L
600	590	602	608	<b>600</b>
H1	H2	H3	H4	H
600	600	598	600	<b>599.5</b>

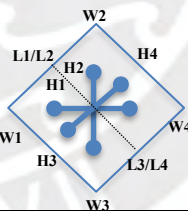
  

	LVDT vert. (mm)	290
	LVDT horiz. (mm)	280
	LVDT diag. (mm)	300
	Peso (kN)	1.3043
	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.2

**MURETE SS-154**

W1	W2	W3	W4	W mm
200	195	202	195	<b>198.0</b>
L1	L2	L3	L4	L
600	603	603	600	<b>601.5</b>
H1	H2	H3	H4	H
602	608	602	595	<b>601.8</b>

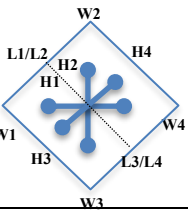
  

	LVDT vert. (mm)	290
	LVDT horiz. (mm)	280
	LVDT diag. (mm)	300
	Peso (kN)	1.3268
	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.5

**MURETE SS-155**

W1	W2	W3	W4	W mm
202	195	203	194	<b>198.5</b>
L1	L2	L3	L4	L
600	602	600	598	<b>600.0</b>
H1	H2	H3	H4	H
603	608	603	598	<b>603.0</b>

	LVDT vert. (mm)	280
	LVDT horiz. (mm)	275
	LVDT diag. (mm)	285
	Peso (kN)	1.3317
	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	18.5

**MURETE SA-091**

W1	W2	W3	W4	W mm	
200	200	200	200	<b>200.0</b>	
L1	L2	L3	L4	L mm	
610	603	613	605	<b>607.8</b>	
H1	H2	H3	H4	H mm	
605	600	605	595	<b>601.3</b>	
				LVDT vert. (mm)	290
				LVDT horiz. (mm)	300
				LVDT diag. (mm)	320
				Peso (kN)	<b>1.5040</b>
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	<b>20.6</b>

**MURETE SA-092**

W1	W2	W3	W4	W mm	
210	200	205	195	<b>202.5</b>	
L1	L2	L3	L4	L mm	
610	610	605	605	<b>607.5</b>	
H1	H2	H3	H4	H mm	
610	605	605	600	<b>605.0</b>	
				LVDT vert. (mm)	290
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	310
				Peso (kN)	<b>1.5358</b>
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	<b>20.6</b>

**MURETE SA-093**

W1	W2	W3	W4	W mm	
195	195	200	195	<b>196.3</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
600	600	595	610	<b>601.3</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
615	610	610	610	<b>611.3</b>	
				LVDT vert. (mm)	290
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	315
				Peso (kN)	<b>1.5209</b>
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	<b>21.1</b>

**MURETE SA-094**

W1	W2	W3	W4	W mm	
205	20	200	195	<b>200.0</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
600	595	600	605	<b>600.0</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
610	600	610	595	<b>603.8</b>	
				LVDT vert. (mm)	290
				LVDT horiz. (mm)	290
				LVDT diag. (mm)	305
				Peso (kN)	<b>1.4822</b>
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	<b>20.5</b>

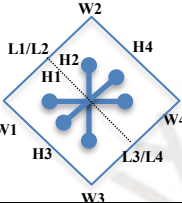
**MURETE SA-095**

W1	W2	W3	W4	W mm	
195	195	200	195	<b>196.3</b>	
L1	L2	L3	L4	L	
600	605	600	610	<b>603.8</b>	
H1	H2	H3	H4	H	
610	610	610	615	<b>611.3</b>	
				LVDT vert. (mm)	300
				LVDT horiz. (mm)	300
				LVDT diag. (mm)	315
				Peso (kN)	<b>1.5181</b>
				Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	<b>21.0</b>

**MURETE SA-121**

W1	W2	W3	W4	W mm
198	196	201	198	<b>198.3</b>
L1	L2	L3	L4	L mm
591	592	599	605	<b>596.8</b>
H1	H2	H3	H4	H mm
578	578	585	588	<b>582.3</b>

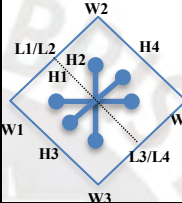
  

	LVDT vert. (mm)	270
	LVDT horiz. (mm)	260
	LVDT diag. (mm)	290
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3989</b>
	<b>Densidad (kN/m³)</b>	<b>20.3</b>

**MURETE SA-122**

W1	W2	W3	W4	W mm
195	195	205	207	<b>200.5</b>
L1	L2	L3	L4	L mm
593	593	602	600	<b>597.0</b>
H1	H2	H3	H4	H mm
584	580	590	590	<b>586.0</b>

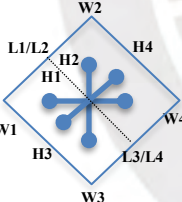
  

	LVDT vert. (mm)	280
	LVDT horiz. (mm)	285
	LVDT diag. (mm)	285
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.4099</b>
	<b>Densidad (kN/m³)</b>	<b>20.1</b>

**MURETE SA-123**

W1	W2	W3	W4	W mm
198	200	200	190	<b>194.8</b>
L1	L2	L3	L4	L
590	592	583	586	<b>587.8</b>
H1	H2	H3	H4	H
601	606	600	586	<b>598.3</b>

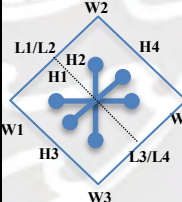
  

	LVDT vert. (mm)	275
	LVDT horiz. (mm)	280
	LVDT diag. (mm)	280
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3827</b>
	<b>Densidad (kN/m³)</b>	<b>20.1</b>

**MURETE SA-124**

W1	W2	W3	W4	W mm
202	200	210	195	<b>201.8</b>
L1	L2	L3	L4	L
585	590	590	588	<b>588.3</b>
H1	H2	H3	H4	H
603	605	595	590	<b>598.3</b>

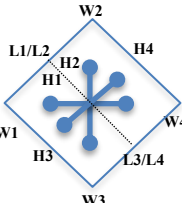
  

	LVDT vert. (mm)	280
	LVDT horiz. (mm)	280
	LVDT diag. (mm)	300
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.4886</b>
	<b>Densidad (kN/m³)</b>	<b>21.0</b>

**MURETE SA-125**

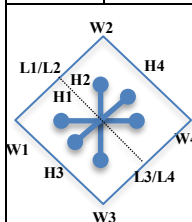
W1	W2	W3	W4	W mm
200	195	195	195	<b>196.3</b>
L1	L2	L3	L4	L
595	600	600	600	<b>598.8</b>
H1	H2	H3	H4	H
600	605	597	594	<b>599.0</b>

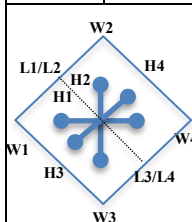
  

	LVDT vert. (mm)	275
	LVDT horiz. (mm)	275
	LVDT diag. (mm)	290
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3729</b>
	<b>Densidad (kN/m³)</b>	<b>19.5</b>

**MURETE SA-151**

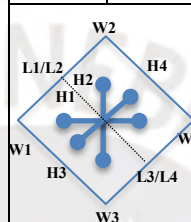
W1	W2	W3	W4	W mm
195	200	197	201	<b>198.3</b>
L1	L2	L3	L4	L mm
590	600	605	610	<b>601.3</b>
H1	H2	H3	H4	H mm
570	570	580	580	<b>575.0</b>

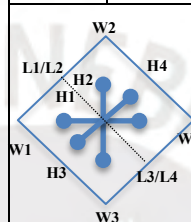


	LVDT vert. (mm)	275
	LVDT horiz. (mm)	270
	LVDT diag. (mm)	275
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3680</b>
	<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>20.0</b>

**MURETE SA-152**

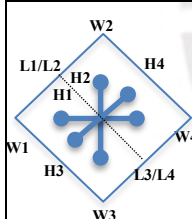
W1	W2	W3	W4	W mm
205	195	205	190	<b>198.8</b>
L1	L2	L3	L4	L mm
555	565	550	555	<b>556.3</b>
H1	H2	H3	H4	H mm
605	605	605	580	<b>598.8</b>

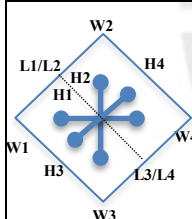


	LVDT vert. (mm)	250
	LVDT horiz. (mm)	265
	LVDT diag. (mm)	255
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3327</b>
	<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>20.1</b>

**MURETE SA-153**

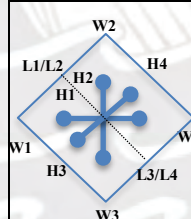
W1	W2	W3	W4	W mm
200	195	200	195	<b>197.5</b>
L1	L2	L3	L4	L
595	600	585	585	<b>591.3</b>
H1	H2	H3	H4	H
600	605	600	605	<b>602.5</b>

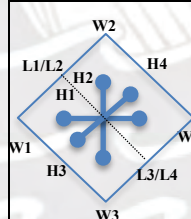


	LVDT vert. (mm)	280
	LVDT horiz. (mm)	275
	LVDT diag. (mm)	285
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.4160</b>
	<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>20.1</b>

**MURETE SA-154**

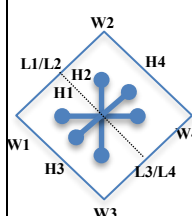
W1	W2	W3	W4	W mm
205	200	200	195	<b>200</b>
L1	L2	L3	L4	L
585	585	585	590	<b>586.3</b>
H1	H2	H3	H4	H
605	605	600	585	<b>598.8</b>

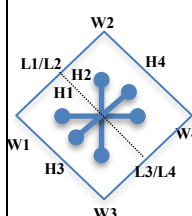


	LVDT vert. (mm)	575
	LVDT horiz. (mm)	580
	LVDT diag. (mm)	585
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3749</b>
	<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>19.6</b>

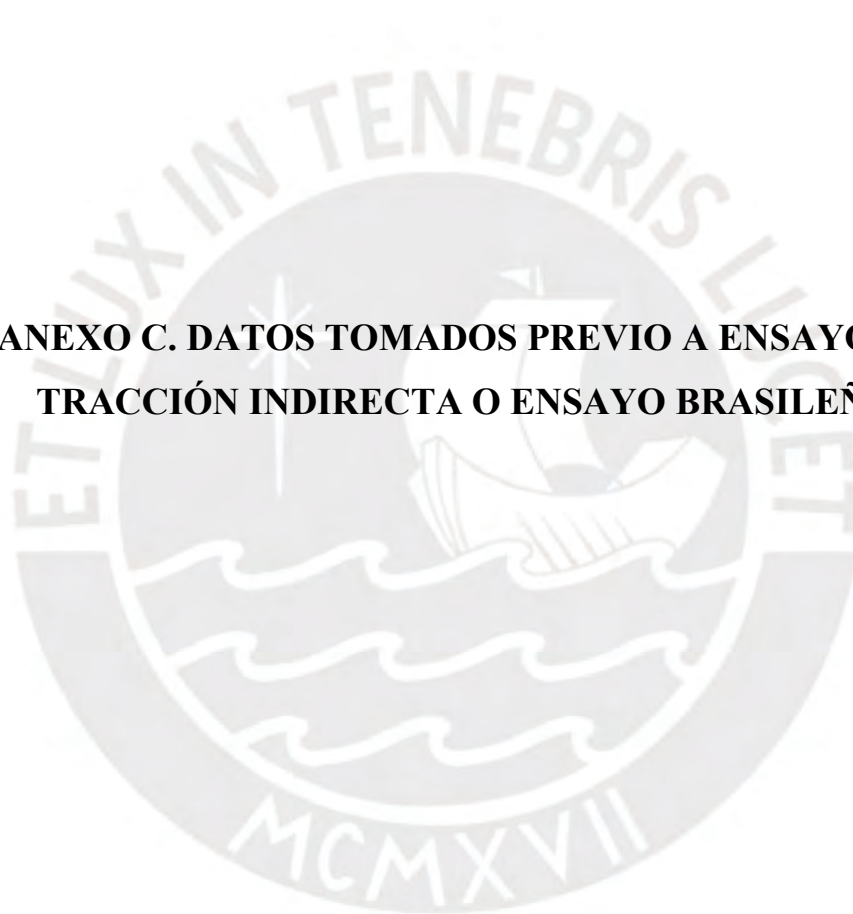
**MURETE SA-155**

W1	W2	W3	W4	W mm
195	195	205	200	<b>198.8</b>
L1	L2	L3	L4	L
580	580	605	600	<b>591.3</b>
H1	H2	H3	H4	H
570	570	580	590	<b>577.5</b>

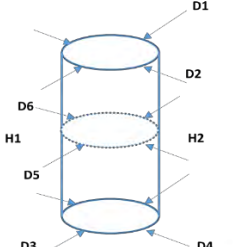


	LVDT vert. (mm)	275
	LVDT horiz. (mm)	270
	LVDT diag. (mm)	280
	<b>Peso (kN)</b>	<b>1.3749</b>
	<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>20.3</b>

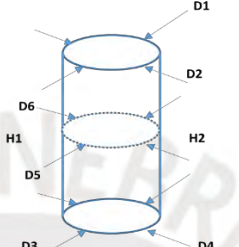
**ANEXO C. DATOS TOMADOS PREVIO A ENSAYO DE  
TRACCIÓN INDIRECTA O ENSAYO BRASILEÑO**



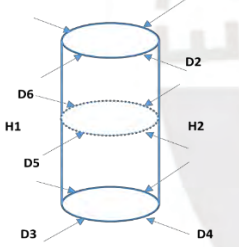
**PROBETA SS-091**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.8	153.0	152.8	153.2	152.5	153.7
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
304.0			302.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	153.0	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	303.0	
			<b>Peso (kN)</b>	0.094	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	17.0	

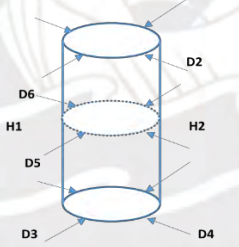
**PROBETA SS-092**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
154.3	152.5	153.8	154.0	154.5	152.6
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
306.0			305.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.6	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	305.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.097	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	17.4	

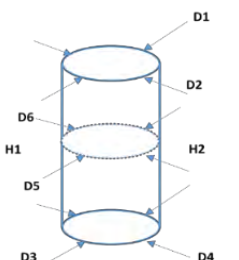
**PROBETA SS-093**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.3	152.3	152.2	153.8	152.6	153.1
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
291.3			291.1		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.6	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	291.2	
			<b>Peso (kN)</b>	0.1094	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20.5	

**PROBETA SS-094**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
-	-	-	-	-	-
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
-			-		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	-	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	-	
			<b>Peso (kN)</b>	-	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	-	

**PROBETA SS-095**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
-	-	-	-	-	-
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
-			-		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	-	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	-	
			<b>Peso (kN)</b>	-	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	-	

**PROBETA SS-121**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.1	152.3	152.8	152.1	154.3	152.8
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
308.0			305.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	153.1	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	306.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.100	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	17.7	

**PROBETA SS-122**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
150.4	150.3	150.3	150.3	149.0	150.3
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
305.5			304.8		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	150.1	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	305.2	
			<b>Peso (kN)</b>	0.098	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.1	

**PROBETA SS-123**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.4	153.0	152.6	152.2	151.4	152.9
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
307.0			302.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.3	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	304.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.100	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.1	

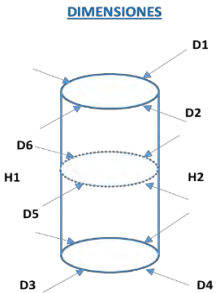
**PROBETA SS-124**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.6	152.3	151.8	151.2	151.9	149.2
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
303.0			304.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	151.5	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	303.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.100	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.3	

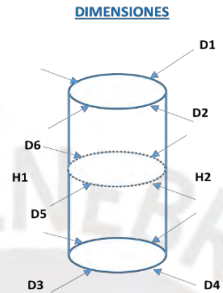
**PROBETA SS-125**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.3	152.1	152.0	152.1	151.7	151.9
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
308.0			306.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.0	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	307.0	
			<b>Peso (kN)</b>	0.098	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	17.6	

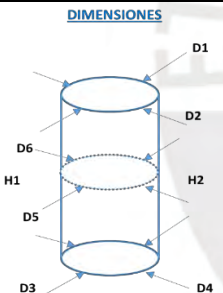
**PROBETA SS-151**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
150.0	149.8	150.4	150.0	150.3	148.8
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
304.0			305.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	149.9	
			<b>H<sub>prom</sub> (mm)</b>	304.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.097	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.1	

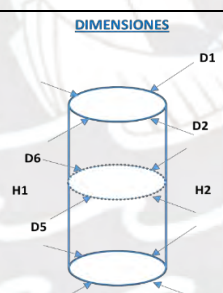
**PROBETA SS-152**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
153.3	154.6	151.7	152.5	151.6	153.0
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
303.0			304.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.8	
			<b>H<sub>prom</sub> (mm)</b>	303.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.102	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.3	

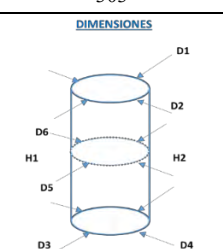
**PROBETA SS-153**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.0	149.7	150.5	152.0	150.7	150.0
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
301.0			301.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	150.8	
			<b>H<sub>prom</sub> (mm)</b>	301.0	
			<b>Peso (kN)</b>	0.098	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.2	

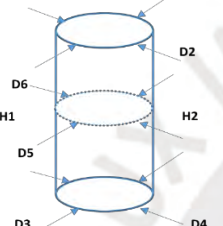
**PROBETA SS-154**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
150.0	151.0	150.8	150.0	151.0	150.9
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
303			302		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	150.6	
			<b>H<sub>prom</sub> (mm)</b>	302.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.099	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.4	

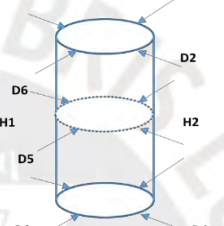
**PROBETA SS-155**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.0	150.9	150.5	149.8	151.4	150.5
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
303			301		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	150.7	
			<b>H<sub>prom</sub> (mm)</b>	302	
			<b>Peso (kN)</b>	0.098	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	18.2	

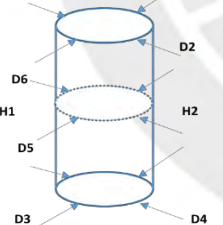
**PROBETA SA-091**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.1	149.0	152.0	150.0	150.0	151.0
H1 (mm)			H2 (mm)		
306.0			306.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub></b> (mm)	150.7	
			<b>H<sub>Prom</sub></b> (mm)	306.0	
			<b>Peso</b> (kN)	0.113	
			<b>Densidad</b> (kN/m <sup>3</sup> )	20.7	

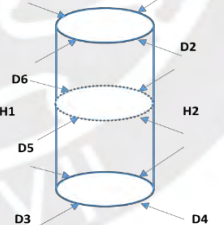
**PROBETA SA-092**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.7	152.0	150.7	151.8	152.3	152.0
H1 (mm)			H2 (mm)		
303.0			305.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub></b> (mm)	151.9	
			<b>H<sub>Prom</sub></b> (mm)	304.0	
			<b>Peso</b> (kN)	0.112	
			<b>Densidad</b> (kN/m <sup>3</sup> )	20.3	

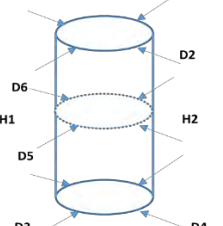
**PROBETA SA-093**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.3	152.0	150.7	152.0	150.2	152.4
H1 (mm)			H2 (mm)		
301.0			303.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub></b> (mm)	151.4	
			<b>H<sub>Prom</sub></b> (mm)	302.0	
			<b>Peso</b> (kN)	0.111	
			<b>Densidad</b> (kN/m <sup>3</sup> )	20.4	

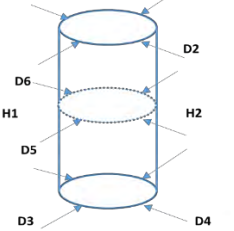
**PROBETA SA-094**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
150.0	150.2	147.8	150.5	148.0	150.0
H1 (mm)			H2 (mm)		
306.0			304.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub></b> (mm)	149.4	
			<b>H<sub>Prom</sub></b> (mm)	305.0	
			<b>Peso</b> (kN)	0.110	
			<b>Densidad</b> (kN/m <sup>3</sup> )	20.6	

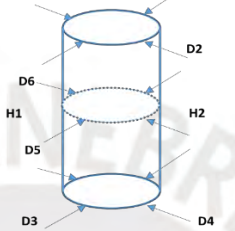
**PROBETA SA-095**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.2	154.2	152.5	154.0	152.0	152.3
H1 (mm)			H2 (mm)		
304.0			305.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub></b> (mm)	152.9	
			<b>H<sub>Prom</sub></b> (mm)	304.5	
			<b>Peso</b> (kN)	0.115	
			<b>Densidad</b> (kN/m <sup>3</sup> )	20.6	

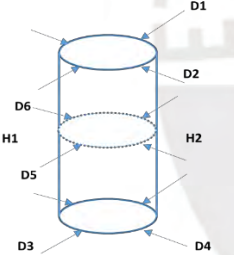
**PROBETA SA-121**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.5	152.2	152.0	152.2	153.0	151.3
H1 (mm)			H2 (mm)		
296.0			298.0		
DIMENSIONES					
			$D_{prom}$ (mm)	152.0	
			$H_{Prom}$ (mm)	297.0	
			Peso (kN)	0.110	
			Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	20.4	

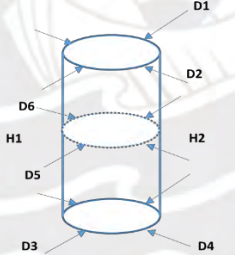
**PROBETA SA-122**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
153.2	154.2	153.9	154.2	153.3	154.8
H1 (mm)			H2 (mm)		
300.0			294.0		
DIMENSIONES					
			$D_{prom}$ (mm)	153.9	
			$H_{Prom}$ (mm)	297.0	
			Peso (kN)	0.112	
			Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	20.3	

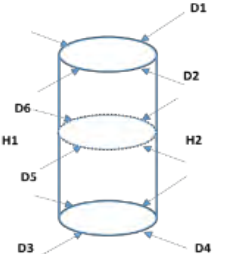
**PROBETA SA-123**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.3	150	152.0	152.0	152.0	150.6
H1 (mm)			H2 (mm)		
300.0			296.0		
DIMENSIONES					
			$D_{prom}$ (mm)	151.3	
			$H_{Prom}$ (mm)	298.0	
			Peso (kN)	0.111	
			Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	20.8	

**PROBETA SA-124**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.0	152.0	153.0	153.0	151.7	152.9
H1 (mm)			H2 (mm)		
296.0			300.0		
DIMENSIONES					
			$D_{prom}$ (mm)	152.4	
			$H_{Prom}$ (mm)	298.0	
			Peso (kN)	0.114	
			Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	21.1	

**PROBETA SA-125**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.5	150.5	150.2	152.2	151.3	152.4
H1 (mm)			H2 (mm)		
295.0			297.0		
DIMENSIONES					
			$D_{prom}$ (mm)	151.4	
			$H_{Prom}$ (mm)	296.0	
			Peso (kN)	0.108	
			Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	20.3	

**PROBETA SA-151**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
152.4	151.3	153.0	152.7	152.0	153.3
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
291.0			293.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.5	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	292.0	
			<b>Peso (kN)</b>	0.109	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20.5	

**PROBETA SA-152**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
149.0	149.5	150.0	150.9	149.1	151.0
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
290.0			295.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	149.9	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	292.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.104	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	19.6	

**PROBETA SA-153**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.0	152.0	152.9	151.5	152.0	151.4
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
295.0			295.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	151.8	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	295.0	
			<b>Peso (kN)</b>	0.107	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20.1	

**PROBETA SA-154**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
153.2	152.0	153.4	152.0	151.6	154.0
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
299.0			300.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	152.7	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	299.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.110	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20.1	

**PROBETA SA-155**

D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm	D6 mm
151.7	152.0	151.7	150.0	152.0	148.3
<b>H1 (mm)</b>			<b>H2 (mm)</b>		
300.0			299.0		
<b>DIMENSIONES</b>					
			<b>D<sub>prom</sub> (mm)</b>	150.9	
			<b>H<sub>Prom</sub> (mm)</b>	299.5	
			<b>Peso (kN)</b>	0.107	
			<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20.0	

**ANEXO D. PROPIEDADES MECÁNICAS MSS Y MSA**



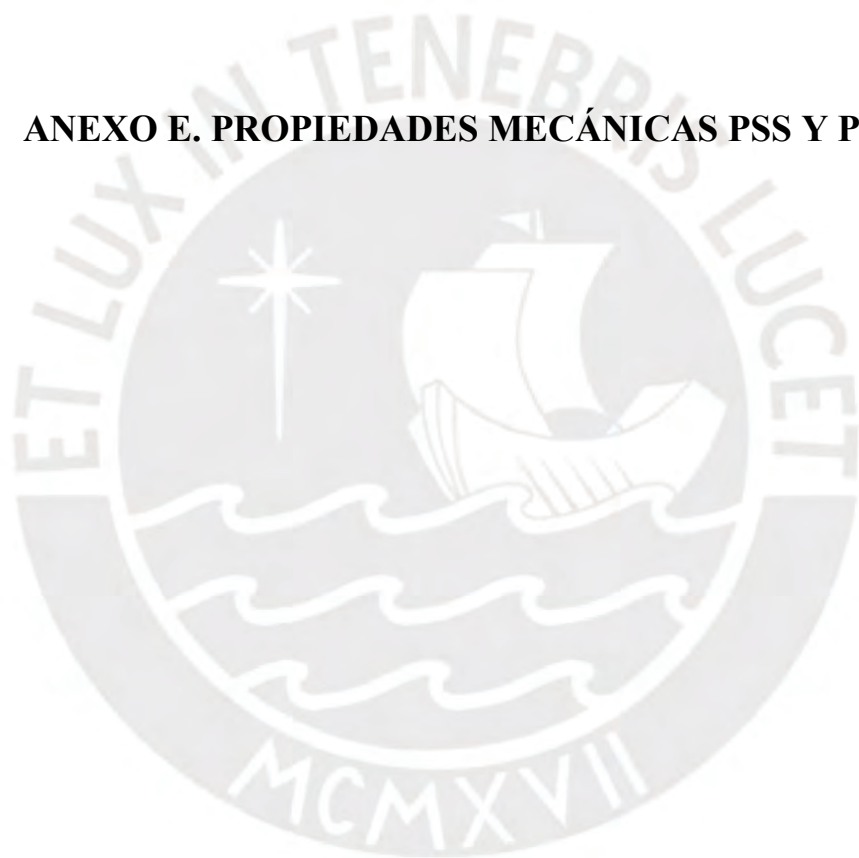
Resultados gráficos de ensayos de compresión diagonal en muretes MSS

	MSS091	MSS092	MSS093	MSS094	MSS095
$\sigma$ - $Du$ <sub>global</sub>					
$\sigma$ - $Du$ <sub>local</sub>					
Prop. Mec.	$E_g = 53$ MPa $G_g = 24$ MPa	$E_g = 52$ MPa $G_g = 24$ MPa	$E_g = 51$ MPa $G_g = 22$ MPa	$E_g = 53$ MPa $G_g = 23$ MPa	$E_g = 52$ MPa $G_g = 24$ MPa
	$E_c = 274$ Mpa $E_t = 268$ Mpa $G_u = 123$ MPa $\nu = 0.10$	$E_c = 177$ Mpa $E_t = 201$ Mpa $G_u = 86$ MPa $\nu = 0.10$	$E_c = 788$ Mpa $E_t = 310$ Mpa $G_u = 241$ MPa $\nu = 0.14$	$E_c = 512$ Mpa $E_t = 401$ Mpa $G_u = 200$ MPa $\nu = 0.14$	$E_c = 969$ MPa $E_t = 555$ MPa $G_u = 345$ MPa $\nu = 0.10$
	MSS121	MSS122	MSS123	MSS124	MSS125
$\sigma$ - $Du$ <sub>global</sub>					
$\sigma$ - $Du$ <sub>local</sub>					
Prop. Mec.	$E_g = 101$ MPa $G_g = 35$ MPa	$E_g = 79$ MPa $G_g = 36$ MPa	$E_g = 80$ MPa $G_g = 36$ MPa	$E_g = 90$ MPa $G_g = 36$ MPa	$E_g = 72$ MPa $G_g = 32$ MPa
	$E_c = 3543$ Mpa $E_t = 470$ Mpa $G_u = 696$ MPa $\nu = 0.44$	$E_c = 875$ Mpa $E_t = 519$ Mpa $G_u = 317$ MPa $\nu = 0.10$	$E_c = 1882$ Mpa $E_t = 573$ Mpa $G_u = 558$ MPa $\nu = 0.10$	$E_c = 917$ Mpa $E_t = 647$ Mpa $G_u = 316$ MPa $\nu = 0.24$	$E_c = 845$ Mpa $E_t = 1127$ Mpa $G_u = 452$ MPa $\nu = 0.13$
	MSS151	MSS152	MSS153	MSS154	MSS155
$\sigma$ - $Du$ <sub>global</sub>					
$\sigma$ - $Du$ <sub>local</sub>					
Prop. Mec.	$E_g = 62$ MPa $G_g = 28$ MPa	$E_g = 60$ MPa $G_g = 26$ MPa	$E_g = 58$ MPa $G_g = 24$ MPa	$E_g = 69$ MPa $G_g = 31$ MPa	$E_g = 117$ MPa $G_g = 52$ MPa
	$E_c = 1249$ Mpa $E_t = 889$ Mpa $G_u = 486$ MPa $\nu = 0.10$	$E_c = 592$ Mpa $E_t = 885$ Mpa $G_u = 321$ MPa $\nu = 0.15$	$E_c = 994$ Mpa $E_t = 712$ Mpa $G_u = 358$ MPa $\nu = 0.19$	$E_c = 3867$ Mpa $E_t = 2328$ Mpa $G_u = 1379$ MPa $\nu = 0.12$	$E_c = 1543$ MPa $E_t = 523$ MPa $G_u = 456$ MPa $\nu = 0.13$

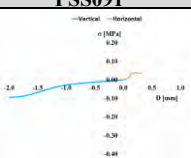
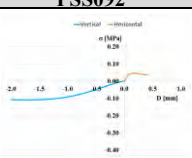
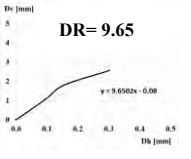
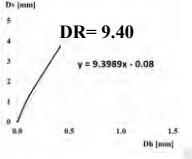
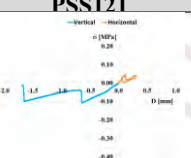
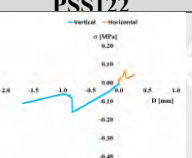
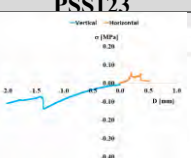
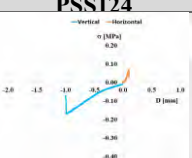
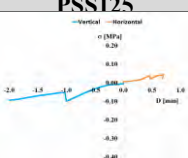
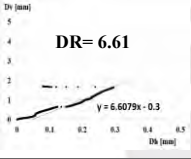
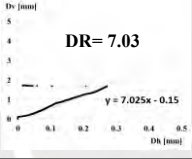
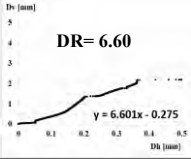
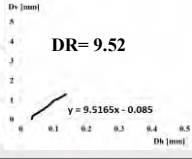
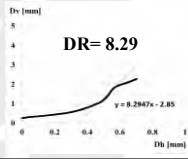
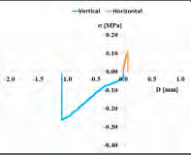
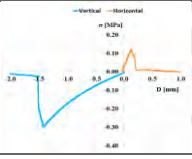
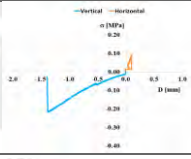
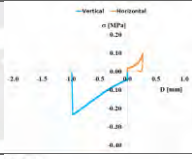
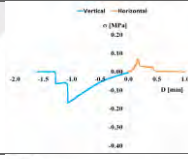
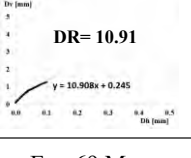
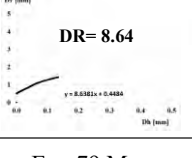
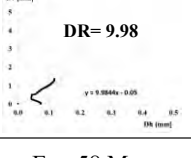
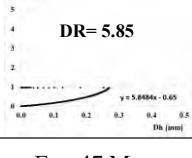
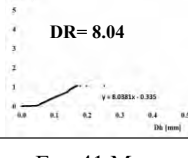
Resultados gráficos de ensayos de compresión diagonal en muretes MSA

	MSA091	MSA092	MSA093	MSA094	MSA095
$\sigma$ -D <sub>global</sub>					
$\sigma$ -D <sub>local</sub>					
Prop. Mec.	E <sub>g</sub> = 66 MPa G <sub>g</sub> = 29 MPa	E <sub>g</sub> = 99 MPa G <sub>g</sub> = 41 MPa	E <sub>g</sub> = 129 MPa G <sub>g</sub> = 47 MPa	E <sub>g</sub> = 70 MPa G <sub>g</sub> = 28 MPa	E <sub>g</sub> = 182 MPa G <sub>g</sub> = 68 MPa
	E <sub>c</sub> = 461 Mpa E <sub>t</sub> = 392 Mpa G <sub>u</sub> = 187 MPa ν = 0.14	E <sub>c</sub> = 1794 Mpa E <sub>t</sub> = 1429 Mpa G <sub>u</sub> = 683 MPa ν = 0.18	E <sub>c</sub> = 1505 Mpa E <sub>t</sub> = 1201 Mpa G <sub>u</sub> = 494 MPa ν = 0.37	E <sub>c</sub> = 1239 Mpa E <sub>t</sub> = 842 Mpa G <sub>u</sub> = 410 MPa ν = 0.27	E <sub>c</sub> = 5934 Mpa E <sub>t</sub> = 640 Mpa G <sub>u</sub> = 1236 MPa ν = 0.33
	MSA121	MSA122	MSA123	MSA124	MSA125
P-D <sub>global</sub>					
P-Def. u.					
Prop. Mec.	E <sub>g</sub> = 101 MPa G <sub>g</sub> = 41 MPa	E <sub>g</sub> = 92 MPa G <sub>g</sub> = 35 MPa	E <sub>g</sub> = 81 MPa G <sub>g</sub> = 37 MPa	E <sub>g</sub> = 158 MPa G <sub>g</sub> = 63 MPa	E <sub>g</sub> = 97 MPa G <sub>g</sub> = 34 MPa
	E <sub>c</sub> = 1776 Mpa E <sub>t</sub> = 652 Mpa G <sub>u</sub> = 490 MPa ν = 0.24	E <sub>c</sub> = 744 Mpa E <sub>t</sub> = 1059 Mpa G <sub>u</sub> = 339 MPa ν = 0.33	E <sub>c</sub> = 1333 Mpa E <sub>t</sub> = 912 Mpa G <sub>u</sub> = 510 MPa ν = 0.10	E <sub>c</sub> = 1139 Mpa E <sub>t</sub> = 618 Mpa G <sub>u</sub> = 351 MPa ν = 0.25	E <sub>c</sub> = 1619 Mpa E <sub>t</sub> = 1309 Mpa G <sub>u</sub> = 515 MPa ν = 0.42
	MSA151	MSA152	MSA153	MSA154	MSA155
P-D <sub>global</sub>					
P-Def. u.					
Prop. Mec.	E <sub>g</sub> = 70 MPa G <sub>g</sub> = 30 MPa	E <sub>g</sub> = 71 MPa G <sub>g</sub> = 25 MPa	E <sub>g</sub> = 90 MPa G <sub>g</sub> = 31 MPa	E <sub>g</sub> = 66 MPa G <sub>g</sub> = 30 MPa	E <sub>g</sub> = 80 MPa G <sub>g</sub> = 27 MPa
	E <sub>c</sub> = 2268 Mpa E <sub>t</sub> = 622 Mpa G <sub>u</sub> = 617 MPa ν = 0.17	E <sub>c</sub> = 1630 Mpa E <sub>t</sub> = 1907 Mpa G <sub>u</sub> = 623 MPa ν = 0.42	E <sub>c</sub> = 4239 Mpa E <sub>t</sub> = 1917 Mpa G <sub>u</sub> = 1054 MPa ν = 0.46	E <sub>c</sub> = 2561 Mpa E <sub>t</sub> = 1152 Mpa G <sub>u</sub> = 844 MPa ν = 0.10	E <sub>c</sub> = 2601 Mpa E <sub>t</sub> = 1473 Mpa G <sub>u</sub> = 698 MPa ν = 0.46

**ANEXO E. PROPIEDADES MECÁNICAS PSS Y PSA**



**Resultados gráficos de ensayos de compresión diagonal en probetas PSS**

	PSS091	PSS092	PSS093	PSS094	PSS095
<b>P-Dv. Dh</b>			Muestra dañada, no se pudo ensayar	Muestra dañada, no se pudo ensayar	Muestra dañada, no se pudo ensayar
<b>Dv. Dh</b>			Muestra dañada, no se pudo ensayar	Muestra dañada, no se pudo ensayar	Muestra dañada, no se pudo ensayar
<b>Prop. Mec.</b>	$E_t = 19 \text{ Mpa}$ $E_c = 60 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 39 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 17 \text{ MPa}$ $\nu = 0.15$	$E_t = 30 \text{ Mpa}$ $E_c = 79 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 54 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 23 \text{ MPa}$ $\nu = 0.16$	Muestra dañada, no se pudo ensayar	Muestra dañada, no se pudo ensayar	Muestra dañada, no se pudo ensayar
	PSS121	PSS122	PSS123	PSS124	PSS125
<b>P-Dv. Dh</b>					
<b>Dv. Dh</b>					
<b>Prop. Mec.</b>	$E_t = 42 \text{ Mpa}$ $E_c = 171 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 107 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 40 \text{ MPa}$ $\nu = 0.34$	$E_t = 61 \text{ Mpa}$ $E_c = 193 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 127 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 49 \text{ MPa}$ $\nu = 0.31$	$E_t = 33 \text{ Mpa}$ $E_c = 104 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 68 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 25 \text{ MPa}$ $\nu = 0.35$	$E_t = 54 \text{ Mpa}$ $E_c = 169 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 111 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 48 \text{ MPa}$ $\nu = 0.16$	$E_t = 6 \text{ Mpa}$ $E_c = 46 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 26 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 11 \text{ MPa}$ $\nu = 0.22$
	PSS151	PSS152	PSS153	PSS154	PSS155
<b>P-Dv. Dh</b>					
<b>Dv. Dh</b>					
<b>Prop. Mec.</b>	$E_t = 69 \text{ Mpa}$ $E_c = 206 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 138 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 62 \text{ MPa}$ $\nu = 0.10$	$E_t = 79 \text{ Mpa}$ $E_c = 205 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 142 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 59 \text{ MPa}$ $\nu = 0.20$	$E_t = 58 \text{ Mpa}$ $E_c = 158 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 108 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 47 \text{ MPa}$ $\nu = 0.14$	$E_t = 47 \text{ Mpa}$ $E_c = 248 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 147 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 52 \text{ MPa}$ $\nu = 0.42$	$E_t = 41 \text{ Mpa}$ $E_c = 157 \text{ Mpa}$ $E_{prom} = 99 \text{ Mpa}$ $G_{prom} = 40 \text{ MPa}$ $\nu = 0.24$

**Resultados gráficos de ensayos de compresión diagonal en probetas PSA**

	PSA091	PSA092	PSA093	PSA094	PSA095
$\sigma$ -Dv. Dh					
Dv. Dh	DR= 6.05 $y = 6.0482x - 0.3$	DR= 8.22 $y = 8.2213x - 0.3725$	DR= 6.62 $y = 6.6212x - 0.3$	DR= 5.50 $y = 5.5024x - 0.025$	DR= 6.43 $y = 6.4254x - 0.6$
Prop. Mec.	$E_t = 40$ Mpa $E_c = 201$ Mpa $E_{prom} = 121$ Mpa $G_{prom} = 43$ MPa $\nu = 0.40$	$E_t = 45$ Mpa $E_c = 160$ Mpa $E_{prom} = 102$ Mpa $G_{prom} = 42$ MPa $\nu = 0.22$	$E_t = 53$ Mpa $E_c = 125$ Mpa $E_{prom} = 89$ Mpa $G_{prom} = 33$ MPa $\nu = 0.34$	$E_t = 32$ Mpa $E_c = 222$ Mpa $E_{prom} = 127$ Mpa $G_c = 43$ MPa $\nu = 0.47$	$E_t = 46$ Mpa $E_c = 254$ Mpa $E_{prom} = 150$ Mpa $G_{prom} = 55$ MPa $\nu = 0.36$
	PSA121	PSA122	PSA123	PSA124	PSA125
P-Dv. Dh					
Dv. Dh	DR= 5.60 $y = 5.5979x$	DR= 5.41 $y = 5.4088x - 1.2$	DR= 9.54 $y = 9.5412x$	DR= 5.45 $y = 5.4531x$	DR= 5.44 $y = 5.4422x - 0.45$
Prop. Mec.	$E_t = 49$ Mpa $E_c = 162$ Mpa $E_{prom} = 105$ Mpa $G_{prom} = 36$ MPa $\nu = 0.45$	$E_t = 33$ Mpa $E_c = 224$ Mpa $E_{prom} = 129$ Mpa $G_{prom} = 43$ MPa $\nu = 0.48$	$E_t = 112$ Mpa $E_c = 182$ Mpa $E_{prom} = 147$ Mpa $G_{prom} = 63$ MPa $\nu = 0.16$	$E_t = 49$ Mpa $E_c = 149$ Mpa $E_{prom} = 99$ Mpa $G_c = 34$ MPa $\nu = 0.47$	$E_t = 24$ Mpa $E_c = 156$ Mpa $E_{prom} = 85$ Mpa $G_{prom} = 29$ MPa $\nu = 0.48$
	PSA151	PSA152	PSA153	PSA154	PSA155
P-Dv. Dh					
Dv. Dh	DR= 6.54 $y = 6.5433x - 0.31$	DR= 9.35 $y = 9.3529x + 0.3$	DR= 9.89 $y = 9.8912x - 0.0033$	DR= 6.33 $y = 6.3329x - 0.0295$	DR= 6.72 $y = 6.7229x - 0.85$
Prop. Mec.	$E_t = 62$ Mpa $E_c = 212$ Mpa $E_{prom} = 137$ Mpa $G_{prom} = 50$ MPa $\nu = 0.35$	$E_t = 73$ Mpa $E_c = 205$ Mpa $E_{prom} = 139$ Mpa $G_{prom} = 60$ MPa $\nu = 0.16$	$E_t = 65$ Mpa $E_c = 212$ Mpa $E_{prom} = 139$ Mpa $G_{prom} = 61$ MPa $\nu = 0.14$	$E_t = 95$ Mpa $E_c = 304$ Mpa $E_{prom} = 200$ Mpa $G_c = 73$ MPa $\nu = 0.37$	$E_t = 61$ Mpa $E_c = 197$ Mpa $E_{prom} = 129$ Mpa $G_{prom} = 48$ MPa $\nu = 0.33$