

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Obtención del módulo de elasticidad, deformación última y la resistencia a la compresión en prismas de mampostería por medio de la curva esfuerzo-deformación de bloques de 12x20x40 cm bajo carga axial concéntrica**

**Trabajo de Graduación**

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Yoshua Daniel Quirós Castro**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. Andrea Ramírez Villalba**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

## Tribunal de Graduación

---

Ing. Andrea Ramírez Villalba, Lic.

**Director**

---

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.

**Asesor**

---

Ing. Guillermo González Beltrán, PhD.

**Asesor**

---

Yoshua Daniel Quirós Castro

**Candidato**

**Fecha: 2023, agosto, 17**

El suscrito, **Yoshua Daniel Quirós Castro**, cedula 2-0767-0541, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con numero de carne B65616, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Obtención del módulo de elasticidad, deformación última y la resistencia a la compresión en prismas de mampostería por medio de la curva esfuerzo-deformación de bloques de 12x20x40 cm bajo carga axial concéntrica**, bajo la Dirección de la **Ing. Andrea Ramírez Villalba Lic.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

A mis padres Allen y Karla y a mi esposa Marcela.

## **Agradecimientos**

Primeramente, agradecer a Dios por haberme permitido llegar a concluir este capítulo de mi vida.

A mis padres que lo han dado todo desde que nací, para que yo pudiera soñar y alcanzar esos sueños. Gracias por sus enseñanzas, sacrificios y amor incondicional.

A mi esposa que me ha mostrado su apoyo y amor incondicional en todo momento.

A mis hermanos menores: Isaac, Zamy y Santi. Los cuales siempre han estado presentes y han sido de inspiración para culminar mi carrera profesional.

A mis amigos y compañeros de Universidad: Allison, Angelo, Barboza, Braulio, Emma, Jimmy, Jose, Manuel, Marvin, Mauricio, Montero, Steven, Wen. Por cada conversación, momento compartido, ayuda brindada, consejo y maratón de estudio.

A mi directora de tesis Ing. Andrea Ramírez y al Ing. Alejandro Navas por la constante disposición a la hora de llevar a cabo este trabajo.

Asimismo, a las empresas CONCREPAL e INTACO por la donación de materiales que permitieron realizar esta investigación.

# Índice

Índice Figuras .....	iv
Índice de Tablas .....	vi
Abreviaturas .....	vii
Resumen .....	viii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación .....	1
1.1.1 Problema específico.....	1
1.1.2 Importancia .....	2
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema .....	3
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo general.....	7
1.2.2 Objetivos específicos .....	7
1.3 Delimitación del problema .....	7
1.3.1 Alcance .....	7
1.4 Descripción de la metodología .....	9
Capítulo 2. Marco teórico .....	12
2.1.1 Prismas de mampostería .....	13
2.1.2 Unidades de mampostería.....	15
2.1.3 Mortero de pega .....	17
2.1.4 Concreto de relleno .....	18
2.1.5 Curva esfuerzo-deformación.....	19
Capítulo 3. Programa experimental .....	22
3.1 Elaboración de los especímenes de ensayo .....	22
3.1.1 Unidades de mampostería.....	22
3.1.2 Mortero de pega .....	22

3.1.3	Concreto de relleno .....	23
3.1.4	Prismas de mampostería .....	25
3.1.5	Coronamiento .....	26
3.2	Montaje experimental .....	27
3.2.1	Instrumentación .....	27
3.2.2	Diseño del aditamento .....	28
3.2.3	Diseño de placas del montaje .....	29
3.2.4	Protocolo de carga para la máquina MTS-64 .....	29
Capítulo 4.	Presentación y análisis de resultados .....	30
4.1	Unidades de mampostería .....	30
4.2	Mortero de pega .....	32
4.3	Concreto de relleno .....	34
4.4	Curvas esfuerzo-deformación .....	35
4.5	Prismas de mampostería .....	38
4.5.1	Resistencia a la compresión .....	39
4.5.2	Módulo de Elasticidad .....	42
4.5.3	Deformación última .....	46
4.6	Factores que influyen sobre $f'm$ .....	47
4.6.1	Resistencia de los bloques .....	48
4.6.2	Mortero de pega .....	50
4.6.3	Concreto de relleno .....	51
4.7	Modos de falla .....	52
Capítulo 5.	Conclusiones y recomendaciones .....	55
5.1	Conclusiones .....	55
5.1.1	Resistencia a la compresión de los prismas .....	55
5.1.2	Módulo Elasticidad .....	56

5.1.3 Deformación última .....	56
5.2 Recomendaciones .....	57
Referencias bibliográficas.....	59
Apéndices.....	64
Apéndice A. Resistencia a la compresión del mortero .....	64
Apéndice B. Prismas de concreto de relleno .....	66
Apéndice C. Mediciones de los prismas .....	69
Apéndice D. Detección de los valores atípicos (outliers).....	73
Apéndice E. Área neta, relación $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de la mampostería .....	77
Apéndice F. Módulo de elasticidad y relación $E_m/f_m$ .....	80
Apéndice G. Deformación última de los prismas de mampostería .....	83
Apéndice H. Modos de falla de los prismas de mampostería.....	85
Apéndice I. Curvas esfuerzo-deformación .....	92



## Índice Figuras

<b>Figura 1.</b> Cantidad de especímenes por cada combinación. ....	9
<b>Figura 2.</b> Descripción de la metodología .....	9
<b>Figura 3.</b> Stonehenge.....	12
<b>Figura 4.</b> Machu Picchu .....	12
<b>Figura 5.</b> Esquema de la mampostería de concreto reforzada .....	13
<b>Figura 6.</b> Elaboración de los prismas de mampostería (INTE C55).....	14
<b>Figura 7.</b> Modos de falla de los prismas .....	15
<b>Figura 8.</b> Partes de la unidad de mampostería de concreto.....	15
<b>Figura 9.</b> Curva esfuerzo-deformación para la mampostería. ....	20
<b>Figura 10.</b> Bloque de concreto tradicional utilizado .....	22
<b>Figura 11.</b> Fabricación del mortero de pega: a) Plasticidad adecuada de la mezcla y b) Cubos de mortero de 50x50 mm. ....	23
<b>Figura 12.</b> Mezcla de concreto de relleno.....	24
<b>Figura 13.</b> Especímenes de concreto de relleno: a) Elaboración de los prismas de concreto de relleno y b) Prismas de concreto relleno desmoldados. ....	24
<b>Figura 14.</b> Confección de los prismas de mampostería: a) Colocación del mortero, b) Fijación del segundo bloque y c) Nivelación correcta del prisma terminado.....	25
<b>Figura 15.</b> Procedimiento final de la confección de los prismas de mampostería: a) Vertido del concreto de relleno a las 4 h y b) prismas de mampostería sellados. ....	26
<b>Figura 16.</b> Coronamiento de los diferentes elementos: a) Coronamiento de los bloques, b) Coronamiento de los prismas de concreto de relleno y c) Coronamiento de los prismas de mampostería .....	26
<b>Figura 17.</b> Instrumentación utilizada en los prismas de mampostería. ....	28
<b>Figura 18.</b> Marco de dos anillos (uno en la parte superior y el otro en la parte inferior) para la medición de deformaciones. ....	29
<b>Figura 19.</b> Dimensiones de los bloques de concreto.....	30
<b>Figura 20.</b> Ejemplo de curva esfuerzo-deformación (PRS-2) a partir del promedio de la lectura de los dos LVDT .....	36
<b>Figura 21.</b> Ejemplo de curva esfuerzo-deformación (PRM-3) a partir de la lectura de un solo LVDT (LVDT 25 descartado) .....	37
<b>Figura 22.</b> Curva de esfuerzo-deformación resultante de todos los prismas .....	38

<b>Figura 23.</b> Módulo de Elasticidad vs resistencia a la compresión de los prismas de mampostería con sus valores sugeridos por normativa y literatura.....	44
<b>Figura 24.</b> Relación entre la resistencia a compresión de los prismas mampostería y el módulo de Elasticidad.....	45
<b>Figura 25.</b> Deformación última y los valores sugeridos por el TMS y CSCR.....	46
<b>Figura 26.</b> Influencia de $f_{mor}$ sobre $f_m$ .....	51
<b>Figura 27.</b> Modos de falla típicos de los prismas huecos: a), b) falla de cono y grieta vertical y C) falla de cortante.....	53
<b>Figura 28.</b> Modos de falla típicos de los prismas rellenos: a) falla por separación de la pared externa, b) falla de cortante y c) falla de cono y grieta vertical .....	54

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Resumen de investigaciones experimentales donde se obtuvieron valores de $E_m$ y $\epsilon_m$ , según sus variables estudiadas .....	6
<b>Tabla 2.</b> Factores de corrección para prismas de mampostería (INTE C55) .....	14
<b>Tabla 3.</b> Clasificación por densidad y absorción máxima según su densidad (INTE C90) ..	16
<b>Tabla 4.</b> Dimensiones mínimas de las paredes internas y externas del bloque (INTE C90) .....	16
<b>Tabla 5.</b> Resistencia del mortero de pega (INTE C91) .....	18
<b>Tabla 6.</b> Tipos de concreto de relleno según el CSCR 2010-14 .....	19
<b>Tabla 7.</b> Propiedades del concreto de relleno CRC Convencional .....	23
<b>Tabla 8.</b> Dimensiones registradas de los bloques .....	30
<b>Tabla 9.</b> Densidad, área neta y otras propiedades físicas de los bloques .....	31
<b>Tabla 10.</b> Resistencia a compresión de los bloques, $f_b$ .....	32
<b>Tabla 11.</b> Resistencia a la compresión del mortero en condiciones de sitio, $f_{mor}$ .....	32
<b>Tabla 12.</b> Flujo y resistencia a la compresión del mortero en condición de laboratorio ...	33
<b>Tabla 13.</b> Comprobación de la resistencia del mortero a los 28 días .....	34
<b>Tabla 14.</b> Resistencia a la compresión del concreto de relleno, $f_g$ .....	35
<b>Tabla 15.</b> Comparación histórica de $E_m$ , $E_m/f'_m$ y $\epsilon_m$ para la mampostería clase A .....	39
<b>Tabla 16.</b> Resistencia a la compresión de los prismas rellenos .....	39
<b>Tabla 17.</b> Resistencia a la compresión de los prismas huecos .....	40
<b>Tabla 18.</b> Módulo de elasticidad de los prismas rellenos .....	42
<b>Tabla 19.</b> Módulo de elasticidad de los prismas huecos .....	42
<b>Tabla 20.</b> Deformación unitaria última de los prismas de mampostería .....	46
<b>Tabla 21.</b> Resumen de la resistencia de los componentes para la mampostería clase A, según el espesor nominal del bloque .....	48
<b>Tabla 22.</b> Eficiencia de los prismas de mampostería .....	48
<b>Tabla 23.</b> Razón de la resistencia de los bloques de estudios previos y de este trabajo ..	49

## Abreviaturas

$f'_m$ : Resistencia a la compresión de la mampostería especificada

$f_m$ : Resistencia a la compresión de la mampostería alcanzada

$f'_b$ : Resistencia a la compresión de los bloques de concreto especificada

$f_b$ : Resistencia a la compresión de los bloques de concreto alcanzada

$f'_g$ : Resistencia a la compresión del concreto de relleno especificada

$f_g$ : Resistencia a la compresión del concreto de relleno alcanzada

$f'_{mor}$ : Resistencia a la compresión del mortero de pega especificada

$f_{mor}$ : Resistencia a la compresión del mortero de pega alcanzada

$E_m$ : Módulo de Elasticidad

$\varepsilon$ : Deformación unitaria

$\varepsilon_{mu}$ : Deformación unitaria última

f: Esfuerzo a compresión

F. C: Factor de corrección

PRM – #: Prisma relleno con mortero tipo M- número de espécimen

PSRM – #: Prisma sin relleno con mortero tipo M- número de espécimen

PRN – #: Prisma relleno con mortero tipo N- número de espécimen

PSRN – #: Prisma sin relleno con mortero tipo N- número de espécimen

PRS – #: Prisma relleno con mortero tipo S- número de espécimen

PSRS – #: Prisma sin relleno con mortero tipo S- número de espécimen

Quiros Castro Yoshua Daniel

Obtención del módulo de elasticidad, deformación última y la resistencia a la compresión en prismas de mampostería por medio de la curva esfuerzo-deformación de bloques de 12x20x40 cm bajo carga axial concéntrica.

Proyecto de Graduación-Ingeniería Civil-San José. CR.;

Y. D. Quiros C., 2023

vii, 63, [44]h; ils. col.-49 refs.

## Resumen

Este estudio tiene como propósito determinar el comportamiento a compresión de la mampostería de concreto bajo carga axial concéntrica, por medio de la derivación de las curvas esfuerzo-deformación unitaria. A partir de estas curvas, se puede encontrar las propiedades mecánicas de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y la deformación unitaria última de la mampostería hueca y rellena.

Para esto, se utilizan prismas de mampostería conformados por bloques (completos) de concreto de 12 cm de espesor, clase A. Además, se incluyen las siguientes variables como parte del análisis: el tipo de mortero, prismas huecos y rellenos. En el caso de mortero se emplean los tipos M, S y N; por su parte, para los prismas rellenos se maneja una resistencia del concreto de relleno constante.

Asimismo, se establece una correlación entre la resistencia de la mampostería, la resistencia de los bloques y la resistencia del mortero para ver la influencia que tienen estos resultados sobre la mampostería hueca y rellena.

La información generada de esta investigación ampliará el registro experimental a nivel nacional, lo que permitirá establecer un comportamiento local de la mampostería, con mayor precisión, y así comparar los parámetros de diseño de la mampostería expuestos por la normativa internacional. A su vez, se busca que estos resultados sirvan de insumo para futuras actualizaciones del Código Sísmico de Costa Rica, específicamente para el capítulo de mampostería.

**PALABRAS CLAVE:** MAMPOSTERÍA, PRISMAS DE MAMPOSTERÍA, DEFORMACIÓN UNITARIA, MÓDULO DE ELASTICIDAD, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Justificación

### 1.1.1 Problema específico

En Costa Rica, durante las últimas décadas, ha sido notable el uso de la mampostería con bloques de concreto en la mayoría de las construcciones. Sin embargo, el conjunto de estudios realizados en el país, a partir de las curvas esfuerzo-deformación, no concentran un tamaño de muestra estadísticamente representativo para determinar con precisión las propiedades mecánicas de compresión de un material tan heterogéneo, como es la mampostería de concreto. Debido a que su comportamiento puede variar según de la composición de sus materiales, condiciones constructivas, climáticas, entre otras consideraciones.

Por su parte, el Código Sísmico de Costa Rica 2010, revisión 2014 (CSCR 2010-14) basa sus criterios de diseño en mampostería sobre la normativa extranjera: "Código de Construcción, Requerimientos y Especificaciones para Estructuras de Mampostería" (Building Code Requirements for Masonry Structures, TMS 402), de la Sociedad de Mampostería (TMS 402-08) en conjunto con la Sociedad Estadounidense de Concreto (ACI 530-08) y la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE 5-08). No obstante, las expresiones para la mampostería de concreto del TMS 402 no precisamente representan las mismas condiciones nacionales, lo que genera incertidumbre en cuanto a la validez de estos valores de diseño en el contexto costarricense.

Aunado a esto, existen diferencias entre ambos códigos en cuanto a las expresiones de diseño de la deformación unitaria última ( $\epsilon_{mu}$ ), el módulo de elasticidad ( $E_m$ ) y la resistencia a la compresión de la mampostería ( $f_m$ ). Específicamente, el CSCR 2010-14 señala un valor para  $\epsilon_{mu}$  de 0,003 mientras que el TMS 402-16 indica un valor de 0.0025. Por otra parte, el CSCR 2010-14 establece que la relación  $E/f'_m$  es igual que 750, pero el TMS 402-16 reporta que  $E/f'_m = 900$ . En cuanto a la resistencia a la compresión, el CSCR 2010 establece que, cuando no se tengan datos experimentales, se debe usar la resistencia mínima de 100 kg/cm<sup>2</sup> para la mampostería clase A.

A partir de esta situación, se pretende someter a experimentación prismas de mampostería, en este caso, con bloques de concreto con dimensiones de 12x20x40 cm por medio de la

Máquina Universal TMS, modelo 64 del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) y determinar el comportamiento mecánico de la mampostería de concreto a partir de la construcción de los gráficos de deformaciones en función de los esfuerzos axiales concéntricos. De esta manera, se busca verificar los parámetros de diseño para respaldar o bien, adaptar los valores señalados en el CSCR 2010-14.

Para garantizar que los resultados experimentales obtenidos sean parámetros fiables y eventualmente considerados en otras investigaciones para los requisitos en el diseño de mampostería, se siguen las normas nacionales del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), así como las normas estadounidenses de la Sociedad Estadounidense por Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). Donde se establecen los procedimientos y exigencias de los ensayos, así como los requisitos de los materiales que conforman a los especímenes.

### ***1.1.2 Importancia***

Como se mencionó anteriormente, los ensayos experimentales de mampostería en el país son limitados. Se busca con este estudio incrementar el tamaño de muestra para tener mayor respaldo al encontrar expresiones para las propiedades mecánicas de la mampostería de concreto en el país.

Por otra parte, el LanammeUCR cuenta con un nuevo equipo, de mayor tamaño, que permite ensayar prismas de mampostería con bloques completos, esto significa que los resultados en esta investigación pretenden tener mayor precisión para los valores del módulo de elasticidad, deformaciones unitarias y resistencia a la compresión. De este modo, comparar dichos valores con otros estudios realizados anteriormente en el país. Cabe resaltar, que en estos estudios anteriores no se midió la deformación última de la mampostería de concreto, parámetro asociado a la parte descendente de la curva esfuerzo-deformación.

Además de comparar las propiedades mecánicas de la mampostería definidas en estudios previos, se busca verificar los parámetros de diseño establecidos por el CSCR 2010-14 con la finalidad de aportar información experimental a futuras actualizaciones del CSCR, para las consideraciones de diseño en el comportamiento de la mampostería.

### ***1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema***

En el ámbito internacional se han llevado a cabo múltiples investigaciones que cuantificaron el comportamiento en compresión de la mampostería de concreto tales como: Hamid (1975), Boulton (1979), Drysdale y Hamid (1979), Drysdale y Wong (1985), Khalaf et al. (1992), Khalaf et al. (1994), Khalaf (1996), Hamid et al. (2008), Cheema y Klingner (1986), Fortes et al. (2014). Pero, al ser la mampostería un material que presenta gran variabilidad en sus propiedades, como se ha mencionado anteriormente, Navas (1999) señala que existe cierta incertidumbre en cuanto a la aplicación directa de las expresiones obtenidas en otros lugares al medio nacional. Por lo que se busca contrastar esos resultados con las investigaciones realizadas en el país, las cuales se presentan a continuación.

Las primeras investigaciones experimentales, de las que se tiene registro en la Escuela de Ingeniería Civil, donde se buscaba determinar las propiedades mecánicas de la mampostería con unidades de concreto corresponden a Mata (1979) y Rodríguez (1986); los cuales tenían por título: "Ensayos de las propiedades mecánicas de la mampostería de bloques de concreto" y "Pruebas de mampostería de bloques de concreto", respectivamente. No obstante, por las limitaciones de los equipos de esa época y al reducido tamaño muestral de estos estudios, las expresiones brindadas no fueron de confianza. En efecto, Navas (1999) indica que las formulaciones anteriores no pudieron ser incorporadas de forma directa en el CSCR.

Navas (1999) en su tesis de maestría: "Propiedades mecánicas de la mampostería de concreto", midió las siguientes propiedades: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a tensión diagonal (cortante), resistencia al cortante de las juntas de mortero y el módulo de cortante para generar información experimental confiable que pudiera ser considerada, de forma directa, en la tercera versión del CSCR 2002. En ese entonces, el CSCR para la mampostería de concreto basaba sus expresiones de diseño en los códigos: ACI 530 (del American Concrete Institute) y UBC (Uniform Building Code); lo que permitió también comparar, por primera vez, estos resultados locales con dichas normativas extranjeras y así tomar las consideraciones respectivas en el CSCR 2002, como se mencionó anteriormente.

A raíz de esto, Navas utilizó prismas huecos (sin concreto de relleno) con bloques de 12x20x40 cm cuyas variables en consideración fueron el tipo de mortero y la resistencia de



las unidades de mampostería. Se reportó valores de  $f_m$  de 146, 129 y 90 kg/cm<sup>2</sup> con morteros M, S y N respectivamente. Mientras que para el  $E_m$  se obtuvo valores de 130 566, 118 814 y 94 252 kg/cm<sup>2</sup> con morteros M, S y N respectivamente.

En ese mismo año de 1999, Rodríguez en su investigación, "Medición de las propiedades estructurales en la mampostería de Bloques de concreto", obtuvo la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia al cortante (mediante tensión diagonal), módulo de rigidez y resistencia al cortante en las juntas de la mampostería rellena. En este caso, se emplearon bloques de 15x20x40 cm y mortero tipo S donde la variante en análisis fue la resistencia del concreto de relleno. Se encontró que  $f_m = 115$  kg/cm<sup>2</sup> y  $E_m = 85 942$  kg/cm<sup>2</sup> en los prismas con mayor  $f_g$ .

Carvajal (2000), entre otras propiedades, logró establecer el valor de resistencia y del módulo de elasticidad para la mampostería rellena, pero con bloques de concreto de 12 cm de espesor en su investigación titulada: "Propiedades mecánicas de la mampostería de bloques rellenos de concreto de 12x20x40 cm. Al igual que Rodríguez, usó diferentes resistencias de concreto de relleno para ver cómo estos factores podían afectar la resistencia de la mampostería. Empleando los prismas con mayor resistencia del concreto de relleno, se obtuvo una resistencia a la compresión de 128 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 148 681 kg/cm<sup>2</sup>.

Bajo esas mismas variables consideradas por Rodríguez (1999) y Carvajal (2000), pero con bloques de concreto de 20 cm de espesor, Cascante (2001), en su proyecto final de graduación para obtener el grado de licenciatura: "Propiedades mecánicas de la mampostería de bloques rellenos de concreto de 20x20x40 cm", determinó una resistencia a la compresión de 164 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 170 978 kg/cm<sup>2</sup> para la mampostería rellena (prismas con el concreto de relleno más resistente).

Por su parte, Navas en el año 2007 reúne los resultados de estas cuatro investigaciones en un artículo donde relaciona los resultados obtenidos para hallar los comportamientos mecánicos generalizados sobre la resistencia a la compresión de la mampostería de concreto a nivel nacional.

Chaves (2016), en su trabajo final de graduación: "Análisis de la consolidación del concreto de relleno en mampostería de 12 cm de espesor utilizando las dosificaciones del Código

Sísmico de Costa Rica 2010”, reportó para mampostería clase A, valores de  $f_m$  asociados a diferentes proporciones de concreto de relleno tipo A.

Más recientemente, Núñez (2019) también caracterizó la curva de esfuerzo-deformación para bloques rellenos y huecos de espesores de 12 y 15 cm para encontrar  $f_m$ ,  $E_m$  y  $\varepsilon$  (asociada a la resistencia máxima) en su investigación: “Caracterización de la curva esfuerzo-deformación de prismas de mampostería con bloques de concreto de 120 mm y 150 mm de espesor bajo carga axial concéntrica”. En promedio, para todos los prismas, la resistencia máxima alcanzada fue de 153 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la deformación fue de 0.0038 y una relación de  $E_m/f_m = 811$ .

Durante ese mismo año, en su trabajo titulado como: “Curva esfuerzo-deformación de mampostería con bloques de 20x20x40 cm y 13,6x13,6x28,6 cm”; Vaca (2019) halló tres parámetros derivados de la curva esfuerzo-deformación:  $f_m$ ,  $E_m$  y  $\varepsilon$  (asociada a la resistencia máxima); siendo estos valores de 146 kg/cm<sup>2</sup>, 93 608 kg/cm<sup>2</sup> y 0.0034 respectivamente. Lo anterior se realizó utilizando las siguientes variables: espesor de bloque (13.6 y 20 cm), tipo de mortero (N y S), prismas huecos y rellenos.

Por otra parte, cabe destacar que, Vargas (2020) en su proyecto final de graduación: “Efecto del mortero de pega y el concreto de rellenos en la resistencia en compresión de la mampostería nacional”, reúne múltiples investigaciones a nivel local (además de los estudios anteriormente descritos) en el cual se reportaron diferentes valores de  $f_{mor}$ ,  $f_g$ ,  $f_b$  y  $f_m$ . A partir de estas fuentes, Vargas (2020) relacionó la resistencia a la compresión del mortero de pega, concreto de relleno, así como de los bloques para determinar la influencia de estos componentes sobre la resistencia final mampostería ( $f'_m$ ). De este modo, se brindó una expresión que busca predecir el valor de la resistencia a la compresión de la mampostería nacional en función de sus componentes.

A continuación, la Tabla 1 resume las investigaciones experimentales a nivel local, mencionadas anteriormente, donde se midió el módulo de elasticidad y deformación en prismas rellenos y huecos con unidades de concreto. En las cuales se emplearon diferentes variables como la resistencia del mortero, concreto de relleno, resistencia del bloque o diferentes espesores de los bloques, los cuales se exponen a continuación.

**Tabla 1.** Resumen de investigaciones experimentales donde se obtuvieron valores de  $E_m$  y  $\varepsilon_m$ , según sus variables estudiadas

No.	Investigación	Variables estudiadas					
		Unidad		Mortero	Concreto de relleno	Prismas	
		Espesor	Resistencia	Tipo	Resistencia	Huecos	Rellenos
1	Navas (1999)		✓	✓		✓	
2	Rodríguez (1999)				✓		✓
3	Carvajal (2000)				✓		✓
4	Cascante (2001)				✓		✓
5	Vaca (2019)	✓		✓		✓	✓
6	Núñez (2019)	✓		✓		✓	✓
7	Este estudio			✓		✓	✓

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Determinar el módulo de elasticidad, deformación última y la resistencia a la compresión en prismas de mampostería, conformados por bloques de 12x20x40 cm, por medio de ensayos experimentales con carga axial concéntrica y comparar estos parámetros con trabajos anteriores, asimismo con los valores de diseño del CSCR 2010-14.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Definir las características del concreto de relleno, mortero de pega y los bloques de 12x20x40 cm, según los lineamientos de las normas técnicas nacionales.
- Diseñar el montaje experimental de carga axial concéntrica y la instrumentación para los ensayos de los prismas de mampostería.
- Obtener la curva de esfuerzo-deformación a partir de prismas rellenos y huecos con tres tipos morteros: M, S y N para cada combinación.
- Encontrar los valores del módulo de elasticidad, deformación última y la resistencia a la compresión en prismas de mampostería.
- Comparar los resultados obtenidos con los valores de trabajos anteriores, que definen las mismas propiedades de la mampostería.
- Contrastar los parámetros encontrados con los valores de diseño establecidos por el CSCR 2010-14.

## **1.3 Delimitación del problema**

### ***1.3.1 Alcance***

El propósito de este estudio es encontrar la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y la deformación unitaria última que surgen a partir de los gráficos del esfuerzo axial en compresión en función de las deformaciones unitarias de los prismas de mampostería. Para confeccionar y caracterizar los materiales de los prismas se utiliza las normas INTECO: INTE C57 (2022), INTE C90 (2021) y INTE C91 (2014). Para el método de los ensayos y los muestreos se tomarán como referencias las normas INTE C50 (2021), INTE C53 (2018), INTE C55 (2015) y INTE C56 (2018). Estando todas estas normas con su versión vigente (más reciente).

En esta investigación se consideran cinco variables involucradas, que son:

- Prismas de unidades huecas rellenos (con concreto de relleno) y sin rellenar (sin concreto de relleno). Todos del mismo lote y con una altura de dos bloques de clase A.
- Tres tipos de Mortero premezclado: M, S y N.

Como resultado, se obtiene un total de seis combinaciones posibles a partir de estas variables en análisis.

Adicionalmente, para determinar la cantidad de especímenes se utilizó la siguiente expresión, correspondiente al error estándar:

$$d = \frac{Z S_x}{\sqrt{n}} \quad [1]$$

Donde,

d: Error estándar

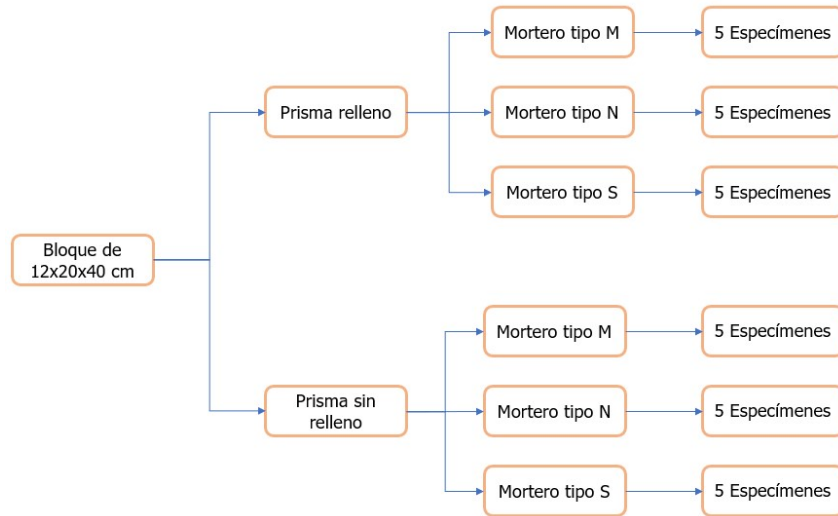
Z: estadístico Z para distribución normal estándar

$S_x$ : desviación estándar

$n$ : tamaño de muestra

Ahora bien, de acuerdo con Navas (1999), la variabilidad de los materiales involucrados, precisión de los equipos y mediciones, así como otros factores, hacen que el comportamiento de la mampostería sea bastante heterogéneo, como consecuencia se podrían aceptar errores de hasta el 20 % con un intervalo del 95 % de confianza. De este modo, con un 95 % en el intervalo de confianza, el estadístico de prueba Z corresponde a un valor de 1,96. Por otra parte, Núñez (2019) y Vaca (2019) indican que a partir de una premuestra de prismas de mampostería ensayados en compresión en las instalaciones del LanammeUCR, se registró una desviación estándar de 21,2 kg/cm<sup>2</sup> con un promedio aritmético de 148 kg/cm<sup>2</sup> en dichos datos históricos.

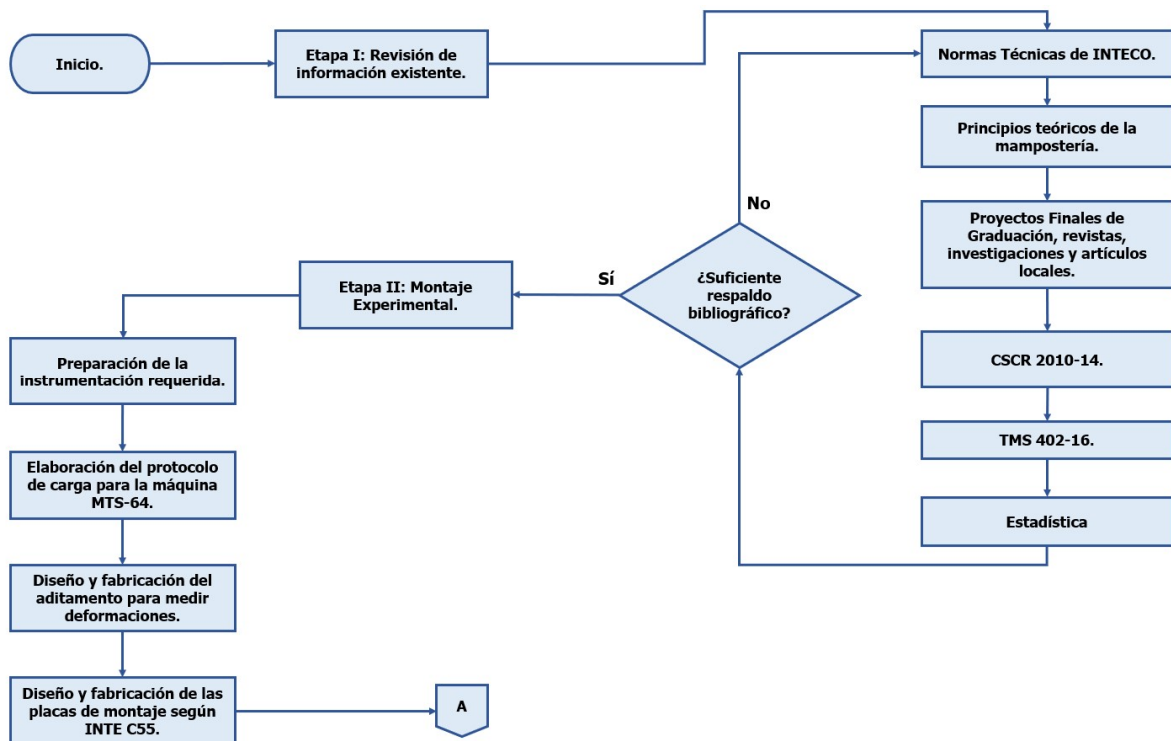
Con los datos mencionados anteriormente, se despeja el tamaño de muestra de la ecuación y se obtiene que el número mínimo de especímenes que corresponde a 5 por cada variable para cumplir con el error esperado. Es decir, un total de 30 especímenes, como se aprecia en la Figura 1.



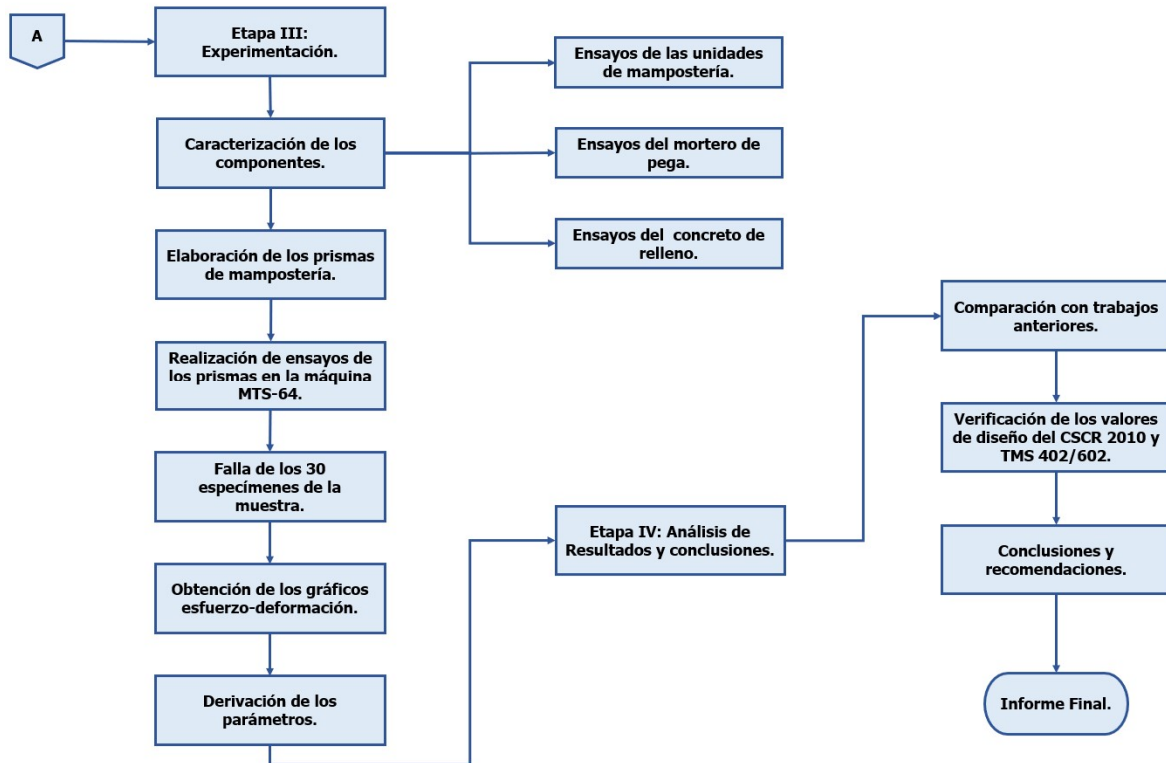
**Figura 1.** Cantidad de especímenes por cada combinación.

### 1.4 Descripción de la metodología

El desarrollo de esta investigación se compone de cuatro etapas: revisión de la información existente, montaje experimental, experimentación, por último, el análisis de resultados y conclusiones. En la **Figura 2** se muestra la metodología empleada en este estudio.



**Figura 2.** Descripción de la metodología



**Figura 2.** Descripción de la metodología (continuación).

La primera etapa (revisión de información existente) consistió en buscar la bibliografía relacionada con los tres parámetros de diseño de la mampostería de concreto, anteriormente mencionados en la sección 1.1.1. Para esto fue necesario, en primera instancia, revisar los códigos TMS 402-16 y CSCR 2010-14, los cuales establecen los valores de estos parámetros a nivel internacional y nacional respectivamente. Asimismo, se consultaron las fuentes de información generadas a nivel local como artículos, revistas y proyectos finales de graduación que describieran las propiedades mecánicas de la mampostería de concreto; pero también se recopilaron aquellas investigaciones realizadas en el extranjero que describieran estas propiedades con diferentes variables involucradas en el análisis de la mampostería de concreto rellena y hueca. Por último, se estudiaron todas las normas técnicas de INTECO que indicaran los procedimientos, ensayos y requisitos para derivar los resultados experimentales de la mampostería de concreto de relleno sometida a carga axial concéntrica. Con el propósito de obtener datos de confianza y representativos, con errores estándares esperados, fue necesario la consulta de recursos estadísticos.

En el montaje experimental (II etapa) se preparó y toda la instrumentación requerida para la falla de los prismas de mampostería. De este modo, se recurrió al diseño de las placas del montaje y el aditamento (arreglo para medir las deformaciones). También, se programó el protocolo de la máquina universal TMS-64.

Durante la tercera etapa (experimentación) se llevó a cabo la fabricación de especímenes de mortero, concreto de relleno y prismas de mampostería, así como la preparación de los especímenes de las unidades de mampostería para determinar las propiedades de los componentes (bloques, mortero y concreto de relleno) y de los prismas de mampostería huecos y rellenos. Al final de esta fase se derivaron los valores de  $f_m$ ,  $E_m$  y  $\epsilon_{mu}$  a través de las curvas esfuerzo-deformación.

Para el análisis de resultados y conclusiones se estudiaron los resultados experimentales y la relación entre estos mismos para determinar su influencia en el comportamiento en compresión de la mampostería. Una vez que los resultados fueron procesados y analizados se contrastaron estos valores con las investigaciones seleccionadas en la etapa I, y con valores de diseño de los códigos CSCR 2010-14 y TMS 402-16. De este modo, se generaron las conclusiones y recomendaciones de lo estudiado en este proceso.



## Capítulo 2. Marco teórico

La mampostería es uno de los sistemas constructivos más longevos utilizado desde los inicios de la civilización humana. Se puede definir, de acuerdo con los Códigos y Especificaciones de Mampostería, como: la combinación de unidades de construcción o materiales de arcilla, lutita, concreto, piedra, vidrio o alguna otra unidad, unidos entre sí por algún mortero, concreto de relleno u otro método de unión. (MIA, 2006, p.18).

Las edificaciones de mampostería más antiguas, de las que se tiene registro, van inclusive desde varios milenios antes de Cristo, como es el caso de pirámides de Giza, que datan del año 2500 a. C o el monumento megalítico de Stonehenge con una edad de 4000 años. De este modo, las primeras unidades de mampostería en ser utilizadas fueron hechas de piedra, lo cual permitió la construcción de estructuras simples hasta colosales y complejas (Chrysler et al., 2007, p.19). La mampostería con bloques de piedra se mantuvo en épocas más recientes en diferentes culturas, por ejemplo, el sitio arqueológico de Machu Picchu cuyo periodo de construcción fue de 1200 a 1400 años d.C aproximadamente.

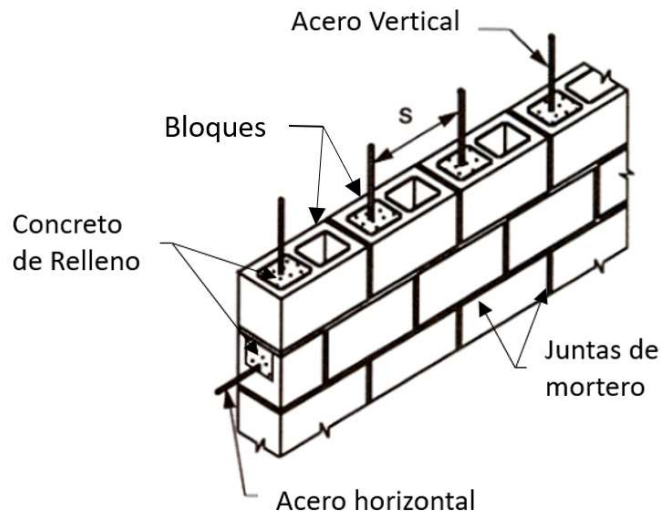


**Figura 3.** Stonehenge  
**Fuente:** (Joe Mc Nally, s.f.)



**Figura 4.** Machu Picchu  
**Fuente:** (Erika Skogg: National Geographic Creative, 2017)

Actualmente, como Costa Rica es una zona de alta actividad sísmica, se utiliza la mampostería de concreto reforzada debido a **que permite un comportamiento dúctil de las estructuras y también** puede aportar mayor resistencia ante las cargas laterales provocadas por los sismos. Este tipo de mampostería se compone de cuatro materiales: bloques de concreto, mortero, concreto de relleno y acero; como se muestra en la Figura 5.

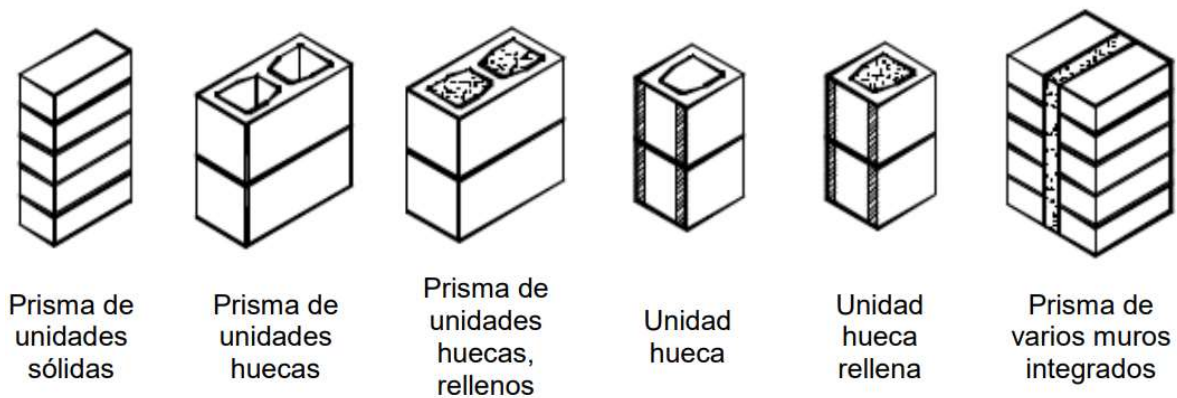


**Figura 5.** Esquema de la mampostería de concreto reforzada  
**Fuente:** (Canada Masonry Design Centre, 2009)  
 Modificado por: (Quirós, 2023)

El CSCR 2010-14 señala dos sistemas constructivos de mampostería: la mampostería confinada e integral (también puede incluir bordes de concreto). Según el CSCR 2010-14 la mampostería confinada, como bien lo dice su nombre, consiste en que todas las paredes de mampostería quedan confinadas por elementos cerrados de concreto reforzado como vigas y columnas, de manera que formen cuadros (17/13). Mientras que, en la mampostería integral, las vigas y columnas se encuentran embebidas en los bloques. Cuando la carga axial es relativamente alta sobre un muro de mampostería integral se puede incluir bordes de concreto especiales (Navas, 2022, p.6); lo que da lugar a la mampostería integral con bordes de concreto. Actualmente, en Costa Rica se utiliza la combinación de ambos sistemas constructivos, lo que da origen al nombre de “mampostería a la tica” (Hidalgo, 2020).

### **2.1.1 Prismas de mampostería**

Para estudiar el comportamiento de la mampostería se ensayan prismas de mampostería hasta su falla. Estos elementos son un ensamblaje de unidades de mampostería y mortero con o sin concreto de relleno usados como un espécimen de prueba (Instituto de Mampostería de América, 2006). En la Figura 6, se muestra los ensamblajes de los prismas de mampostería permitidos por la norma INTE C55 (2015).



**Figura 6.** Elaboración de los prismas de mampostería (INTE C55).  
**Fuente:** (INTE C55, 2015)

Como se aprecia en la figura anterior, los prismas pueden ser de arcilla o de concreto. Estos segundos son huecos y pueden ser rellenos o no, con bloques completos o partidos. Los pasos para la elaboración, los requisitos para el ensayo experimental y la determinación de la resistencia a la compresión de los prismas son establecidos a través de la norma INTE C55 (2015): “*Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería.*”

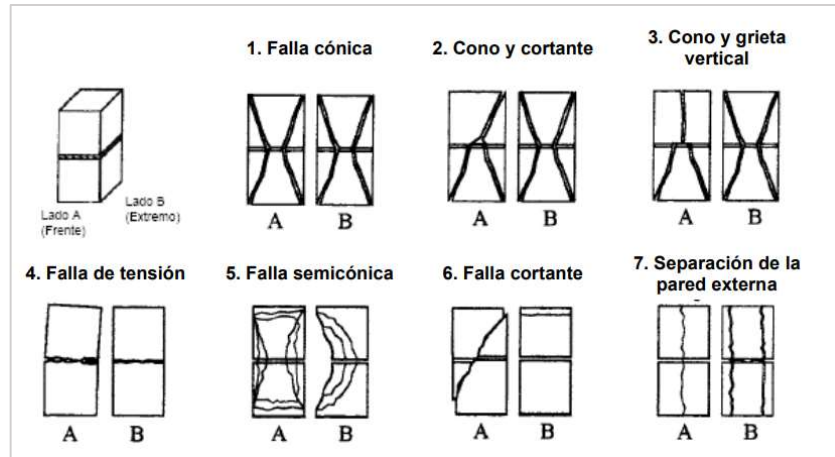
La razón entre altura y espesor ( $h_p/t_p$ ) del prisma es un factor que afecta su resistencia, por lo que la norma INTE C55 (2015) establece un factor de corrección (F.C) según la relación de  $h_p/t_p$ . En la Tabla 2 se exponen estos valores mencionados.

**Tabla 2.** Factores de corrección para prismas de mampostería (INTE C55)

$(h_p/t_p)$	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
F.C	0,75	0,86	1,0	1,04	1,07	1,15	1,22

Fuente:(INTE C55, 2015)

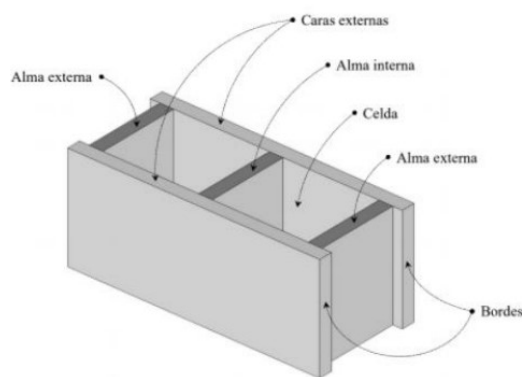
Por lo tanto, la altura de los prismas está previamente delimitada según el espesor de este o viceversa. Adicionalmente, en caso de ser necesario se permite interpolar linealmente si la cifra  $h_p/t_p$  se encuentra entre dos valores permitidos. También, esta norma expone siete posibles modos de falla, los cuales pueden ocurrir en los prismas cargados axialmente, como se presenta en la Figura 7.



**Figura 7.** Modos de falla de los prismas  
**Fuente:** (INTE C55, 2015)

### 2.1.2 Unidades de mampostería

Las unidades de mampostería son bloques de materiales como concreto, arcilla entre otros como se mencionó anteriormente, los primeros pueden ser unidades sólidas o huecas. Se define como bloque de concreto a la unidad de mampostería que tiene aproximadamente una forma de un prisma rectangular, compuesto de partículas de agregado inerte inmersas en una matriz cementicia endurecida (Códigos y Especificaciones de Mampostería, 2006, p.17). Navas y Salazar (2014) señalan que los bloques más comunes en Costa Rica son los modulares y de 12 cm, 15 cm y 20 cm de espesor. En la Figura 8, se puede apreciar las partes que componen a un bloque de concreto común.



**Figura 8.** Partes de la unidad de mampostería de concreto.  
**Fuente:** (INTE C90, 2021)

La resistencia a la compresión de los bloques ( $f_b$ ) es un factor determinante sobre la resistencia de la mampostería ( $f_m$ ). Sarhat y Sherwood (2013) señalan que existen

numerosas investigaciones, tales como: Boulton (1979), Drysdale y Hamid (1983), Baba y Senbu (1986), Romagna y Roman (1998), NCMA (1988), Scrivener y Baker (1988), Kingsley et al. (1989), Khalaf et al. (1994), NCMA (2012) y Steadman et al. (1995) donde se demuestra que el valor de  $f_m$  incrementa al aumentar  $f_b$ . La relación es aproximadamente lineal entre ambas resistencias (párr. 8).

La norma delegada a establecer las exigencias de los materiales y sus respectivas características físicas de las unidades de mampostería de concreto, huecas y solidas es la INTE C90 (2021): "*Unidades de mampostería de concreto para uso estructural*". Esta norma califica a los bloques, de acuerdo con su densidad, en tres categorías: peso liviano, peso medio y peso normal. Además, indica la absorción máxima permitida por cada densidad, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Clasificación por densidad y absorción máxima según su densidad (INTE C90)

Clasificación por densidad	Densidad seca al horno del concreto	Absorción de agua máxima	
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
	Promedio de 3 unidades	Promedio de 3 unidades	Unidades individuales
Peso Liviano	Menor de 1680	288	320
Peso Intermedio	De 1680 a menos de 2000	240	272
Peso Normal	Mayor o igual que 2000	208	240

Fuente: (INTE C90, 2021)

Asimismo, esta norma designa los espesores mínimos para las caras externas y de las almas externas e internas en función del espesor del bloque, como se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Dimensiones mínimas de las paredes internas y externas del bloque (INTE C90)

Ancho nominal de las unidades (mm)	Espesor mínimo de caras externas $t_s$ (mm)	Espesor mínimo de las almas $t_w$ (mm)
$W \leq 120$	19	19
$120 < W < 200$	25	19
$W \geq 200$	32	19

Fuente: (INTE C90, 2021)

Por otra parte, el CSCR 2010-14 agrupa a la mampostería en tres categorías según la resistencia promedio a la compresión de los bloques de concreto a los 28 días. La mampostería clase A debe tener una resistencia promedio mínima de 133 kg/cm<sup>2</sup> (13 MPa) y no menor de 120 kg/cm<sup>2</sup> (11,8 MPa) por muestra individual sobre el área neta. Asimismo, es obligatoria en construcciones de más de 1000 m<sup>2</sup> y de tres pisos de altura. La mampostería clase B es aquella que posee una resistencia mínima promedio de 90 kg/cm<sup>2</sup> (8,8 MPa) y no menor de 80 kg/cm<sup>2</sup> (7,8 MPa) por ejemplar individual. Por último, la mampostería Clase C corresponde a una resistencia promedio no menor de 75 kg/cm<sup>2</sup> (7,4 MPa) y por cada ejemplar una resistencia mínima de 70 kg/cm<sup>2</sup> (6,9 MPa) (sección A/1).

Adicionalmente, para determinar la resistencia a la compresión de las unidades de mampostería de concreto para ensayos experimentales, se hace uso de la norma INTE C50 (2021): "*Morteros y mampostería. Muestreo y método de ensayo de unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas*". Conjuntamente, dicha norma dicta los procedimientos para sus respectivos muestreos y los cálculos necesarios que implican para encontrar la resistencia de los bloques de concreto.

### **2.1.3 Mortero de pega**

El mortero es una mezcla de materiales cementicios, agregado fino y agua usados para adherir las unidades de mampostería en una masa estructural, aunque algunas veces se puede agregar un aditivo para mejorar sus propiedades. Entre sus propósitos principales, además de unir las unidades entre sí, también puede incrementar la resistencia a la compresión y a los esfuerzos cortantes paralelos a los muros de mampostería (Amrhein y Porter, 2009).

Varios estudios (Drysdale y Hamid (1983), Romagna y Roman (1998), NCMA (1988), Scrivener y Baker (1988), Khalaf (1996), NCMA (2012)) encontraron que  $f_{mor}$  afecta ligeramente a  $f_m$  (Sarhat y Sherwood, 2013, párr.8). Sin embargo, Khalaf encontró que este aporte se vuelve insignificante con los prismas de mampostería con concreto de relleno, en comparación con los prismas de mampostería hueca (1996).

Según la norma INTE C91 (2014): "*Mortero para unidades de mampostería*", existen cuatro tipos de mortero de pega: M, S, N y O. El mortero tipo M es de alta resistencia y durabilidad, pero presenta una trabajabilidad y porcentaje de retención de agua bajo. El mortero tipo S posee un nivel medio de resistencia con una trabajabilidad adecuada y un nivel de retención

de agua moderado. El mortero tipo N, por su parte presenta una resistencia baja pero una alta trabajabilidad y capacidad de retener agua. Por su parte, el mortero O, no es de uso estructural, por lo que su resistencia es relativamente baja. Sin embargo, tiene un grado de trabajabilidad alto, así como su retención de agua (Navas, 2022).

Cabe destacar, que el mortero de pega debe tener características adecuadas según el estado en que se encuentre: plástico y endurecido. La norma INTE C91 (2014) indica que, en su primer estado, las características asociadas a una correcta elaboración de la mezcla corresponden a la trabajabilidad y la retención de agua. Mientras que, en su estado endurecido, para lograr un comportamiento final conveniente del mortero, se debe contemplar las propiedades de: adherencia, durabilidad, elasticidad y resistencia a la compresión (2018).

En la Tabla 5 se observa la resistencia a la compresión (a los 28 días de edad) que debe presentar cada tipo de mortero

**Tabla 5.** Resistencia del mortero de pega (INTE C91)

Tipo	Resistencia kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
M	176 (17,2)
S	127 (12,4)
N	53 (5,2)
O	25 (2,4)

Fuente: (INTE C91, 2014)

Para determinar la resistencia a la compresión del mortero se sigue el procedimiento señalado de la norma INTE C57 (2022): "*Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm*".

#### **2.1.4 Concreto de relleno**

El concreto de relleno es una mezcla de un material cementicio y agregados con suficiente agua agregada para producir una consistencia de vertido adecuada (Chrysler et al. 2007), ya que el concreto de relleno se coloca dentro de las celdas de los bloques y no debe presentar segregación en la mezcla. El CSCR 2010-14 dicta que el concreto de relleno debe tener un revenimiento de 20 a 25 cm (A/3).

Su función principal es la adherencia estructural de los bloques y el refuerzo de acero entre sí para integrar al muro de mampostería y poder transferir los esfuerzos de tensión al acero

(Navas,2022). Igualmente, el concreto de relleno permite soportar mayores esfuerzos cortantes al incrementar la sección transversal del muro. Otros usos del concreto de relleno podrían ser el aislar de sonido y prever mayor resistencia contra incendios. El concreto de relleno se puede clasificar según el CSCR 2010-14 acorde a su resistencia a la compresión ( $f_g$ ). En la Tabla 6 se presentan los tipos de concreto de relleno de acuerdo con la clasificación del CSCR 2010-14.

**Tabla 6.** Tipos de concreto de relleno según el CSCR 2010-14

Tipo	$f_{g,mínimo}$
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
A	175 (17,2)
B	140 (13,7)
C	120 (11,8)

Fuente: CFIA,2014

El CSCR 2010-14 expresa que, para la mampostería clase A se debe utilizar concreto de relleno tipo A, para la mampostería clase B se podría emplear concreto de relleno tipo A o B y en el caso de la mampostería clase C podría usarse cualquiera de los 3 tipos de concreto de relleno (sección A/3).

Por otra parte, el TMS 402-16 indica que el concreto de relleno, a menos que se requiera lo contrario, debe cumplir los requerimientos de ASTM C476 (INTE C-88, 2018). En dicha norma se establece que el concreto de relleno debe alcanzar una resistencia a la compresión mínima de 143 kg/cm<sup>2</sup> (MPa). No obstante, cuando a la resistencia a la compresión de la mampostería supera el valor de 141 kg/cm<sup>2</sup>,  $f_g$  debe ser igual o mayor al valor de  $f_m$ .

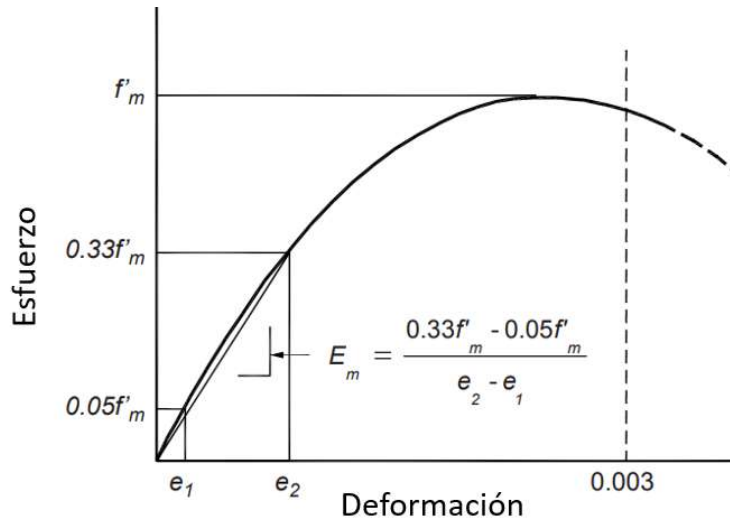
La norma INTE C56 (2018): "Concreto de para mampostería Muestreo y método de ensayo" establece el método para el muestreo *in situ* y de laboratorio del concreto de relleno cuando se utiliza en la mampostería de concreto. Además, esta norma provee el procedimiento del ensayo para determinar la resistencia a la compresión del concreto de relleno.

### **2.1.5 Curva esfuerzo-deformación**

La curva esfuerzo-deformación describe el comportamiento de un material que sufre deformaciones debido a la aplicación de una fuerza o carga con cierta dirección sobre una sección del elemento (esfuerzo). O sea, existe una relación proporcional entre ambos



valores, cuando se incrementa gradualmente este esfuerzo así también las deformaciones en el elemento serán mayores, hasta que se alcanza el esfuerzo último y el material ya no puede resistir y falla. A continuación, en la Figura 9, se muestra una curva típica de mampostería sometida a una carga axial.



**Figura 9.** Curva esfuerzo-deformación para la mampostería.

Fuente: (Amrhein y Porter, 2009)

Modificado por: (Quirós, 2023)

Como se muestra en la imagen anterior, esta curva es típica de los materiales frágiles como lo es la mampostería de concreto y permite determinar los parámetros característicos como el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión y la deformación unitaria última del prisma.

La resistencia a la compresión del prisma se describe matemáticamente como (INTE C 55, 2015):

$$(f_m) = \frac{P_{max}}{A_{np}} \quad [1]$$

Donde,

$P_{max}$ : Carga máxima sobre el prisma.

$A_{np}$ : Área neta de la sección transversal del prisma.

Este parámetro se deriva para cada espécimen, es decir, define la resistencia a la compresión de los prismas de mampostería.

El módulo de elasticidad, también conocido como el módulo de Young, es una medida física que expresa la relación del esfuerzo entre la deformación dentro del rango elástico del material. Por definición del TMS 402-16, el módulo de elasticidad para la mampostería ( $E_m$ ), es determinado por el método de la secante cuya pendiente describe a la línea que empieza desde  $0,05f'_m$  hasta el punto de la curva de  $0,33f'_m$  (comentarios 4.2.2).

$$E = \frac{0.33 f'_m - 0.05 f'_m}{e_2 - e_1} \quad [2]$$

Esto quiere decir que experimentalmente, se asume que el rango elástico va desde el 5 % hasta el 33 % del valor del esfuerzo máximo axial. Por su parte, la deformación unitaria última se obtiene en la parte descendente de la curva cuando en esta se supera el esfuerzo máximo. En esta investigación la deformación unitaria última corresponde al valor de la deformación unitaria cuando se alcanza el 80 % de  $f_m$  después de haber alcanzado la resistencia máxima (etapa de descarga).

## Capítulo 3. Programa experimental

### 3.1 Elaboración de los especímenes de ensayo

#### 3.1.1 Unidades de mampostería

En esta investigación se utilizaron bloques de concreto tradicional, tal como se observa en la Figura 10, con dimensiones nominales de 12x20x40 cm (espesor, alto y largo); siendo estos del mismo lote y de clase A. Estos fueron almacenados en un lugar ventilado bajo techo sin exposición directa al sol ni a la lluvia. Además de conformar los prismas de mampostería, se usaron 6 ejemplares para caracterizar las propiedades de dichas unidades de mampostería, como lo establece la norma INTE C50 (ASTM C140). Siendo de este modo, 3 unidades para las pruebas de absorción, las cuales permiten obtener el área neta, la densidad, el porcentaje de absorción, entre otros. Las otras 3 unidades restantes fueron usadas para medir la resistencia a compresión que aportan los bloques.



**Figura 10.** Bloque de concreto tradicional utilizado

#### 3.1.2 Mortero de pega

Para la elaboración de la mezcla del mortero tipo M, S y N se utilizó una dosificación de agua de 6,5 L, 6 L y 6,32 L respectivamente, por cada saco de 40 kg de mortero premezclado. De este modo, se logró alcanzar la trabajabilidad y plasticidad adecuada, por medio de la prueba en campo de la cuchara invertida como se observa en la Figura 11. Garantizando, al mismo tiempo que estas dosificaciones de agua empleadas cumplieran con las dosificaciones señaladas en las fichas técnicas del fabricante.



**Figura 11.** Fabricación del mortero de pega: a) Plasticidad adecuada de la mezcla y b) Cubos de mortero de 50x50 mm.

Asimismo, de cada batida de mortero se extrajo un lote de 3 cubos de mortero (Figura 11) como lo indica la norma INTE C57 (2022), equivalente a ASTM C109, para determinar la resistencia del mortero. En este caso, hubo un total de 3 lotes, uno por cada tipo de mortero. Cada lote se falló a una edad de 57 días, al igual que los prismas de mampostería.

Por otra parte, se realizaron pruebas de control en el laboratorio, como se señala en la norma INTE C57 (2022). Una vez que se alcanzó la consistencia requerida por medio de la prueba de flujo, se elaboraron 3 cubos de mortero por cada tipo de mortero (M, S y N). Estas muestras se fallaron a los 28 días.

### **3.1.3 Concreto de relleno**

El concreto de relleno empleado en los prismas rellenos fue premezclado. Este concreto presenta una formulación de microcemento con agregados de granulometría controlada y modificado con aditivos (INTACO, 2023). En la Tabla 7 se muestra las propiedades esperadas según el fabricante.

**Tabla 7.** Propiedades del concreto de relleno CRC Convencional

Revenimiento	20 a 25 cm
Tamaño máximo de agregado	< 12 mm
Resistencia máxima ( $f_g$ )	$\geq 175$ kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: (INTACO, 2023)  
Modificado por: (Quirós, 2023)

Además, en este caso, se manejó una dosificación de agua de 6 L por saco de 40 kg, como se estipula en la ficha técnica. En la Figura 12 se muestra una batida de concreto de relleno lista para verter en las celdas de los prismas de mampostería.



**Figura 12.** Mezcla de concreto de relleno

También, por cada batida de concreto de relleno se fabricó un set de 3 prismas de concreto de relleno con una relación de aspecto 2:1 (largo: ancho), como lo establece la norma INTE C56 (2018), equivalente a ASTM C1019, para determinar la resistencia a la compresión del concreto de relleno (Figura 13b). Para la confección de estos prismas fue necesario simular las condiciones del concreto de relleno dentro de las celdas por lo que se utiliza un acomodo de bloques con un material aislante (como papel, servilletas o similar) que facilite el desmoldeo de los prismas cuando se retiren los bloques como se muestra en la Figura 13a. Cada set se falló a una edad de 57 días, al igual que los prismas de mampostería.



**Figura 13.** Especímenes de concreto de relleno: a) Elaboración de los prismas de concreto de relleno y b) Prismas de concreto relleno desmoldados.

### **3.1.4 Prismas de mampostería**

Los 32 prismas de mampostería (2 de calibración y 30 para la obtención de resultados) fueron contruidos por un albañil con experiencia para tener una representación de la mano de obra local. El primer paso fue colocar los primeros bloques (primera mitad del prisma) dentro de una bolsa plástica para que cuando estos fueran terminados pudieran sellarse y así no perder humedad, como lo indica la norma INTE C55 (2015), equivalente a ASTM C1314. Una vez que las primeras unidades estuvieran con una bolsa plástica a su alrededor y situadas en una superficie plana, se agrega el mortero de pega sobre las caras externas y las almas de la primera unidad. Seguidamente, sobre el mortero de pega se coloca el segundo bloque de concreto y con un maso de goma se le proporciona unos golpes para generar una adherencia y nivelación adecuada entre ambas unidades. Por último, se remueve el exceso de mortero en la junta y luego se cierra la bolsa plástica. En la Figura 14 se muestra el proceso descrito.



**Figura 14.** Confección de los prismas de mampostería: a) Colocación del mortero, b) Fijación del segundo bloque y c) Nivelación correcta del prisma terminado.

La norma INTE C55 (2015) permite agregar el concreto de relleno para los prismas rellenos en un tiempo no menor a 4 horas ni mayor a 48 horas. Así que, en el caso de los prismas rellenos, pasadas las 4 horas se cubren las bolsas y se agrega el concreto de relleno. Con una llaneta se enrasa el excedente del concreto de relleno en la parte superior del prisma para cerrar nuevamente la bolsa, como se aprecia en la Figura 15. Los prismas de mampostería se mantuvieron dentro de la bolsa por 28 días para ser coronados (capeados). Sin embargo, estos se fallaron a una edad de 57 días.



**Figura 15.** Procedimiento final de la confección de los prismas de mampostería: a) Vertido del concreto de relleno a las 4 h y b) prismas de mampostería sellados.

### **3.1.5 Coronamiento**

El coronamiento se realizó según la norma INTE C53 (2018), equivalente a ASTM C1552, para todos los especímenes sometidos a pruebas de compresión que requerían nivelación y superficies planas, como se muestra en la Figura 16 .



**Figura 16.** Coronamiento de los diferentes elementos: a) Coronamiento de los bloques, b) Coronamiento de los prismas de concreto de relleno y c) Coronamiento de los prismas de mampostería

Para el coronamiento se utilizó una mezcla de cemento de alta resistencia y yeso, donde se agregaba agua hasta alcanzar la contextura requerida. Para este fin, se manejó una proporción volumétrica de 1:1 (cemento: yeso). Asimismo, se emplearon los equipos de coronamiento, los cuales presentaban dos placas unidas en escuadra. En la parte inferior se tenía otra placa de mayor espesor dispuesta horizontalmente que ayuda a tener una

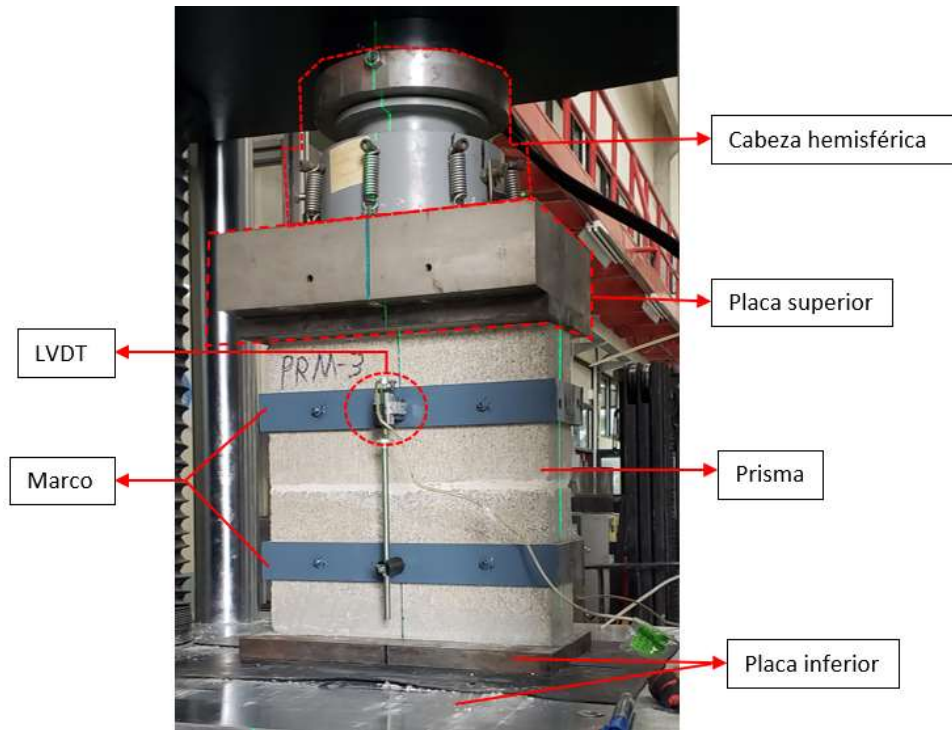
superficie plana. La placa vertical presentaba dos guías soldadas a la misma, lo cual garantiza una correcta nivelación.

## **3.2 Montaje experimental**

### ***3.2.1 Instrumentación***

Para obtener los datos necesarios en la construcción de los gráficos de esfuerzo-deformación, se emplearon dos equipos, uno que aplicaba la carga axial y el otro que medía las deformaciones verticales. Para la aplicación y lectura de la carga axial se utilizó la máquina universal MTS-64 con una cabeza móvil hemisférica, con un diámetro de 242 mm y una placa con un espesor de 96.6 mm. Por otra parte, se emplearon dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT, por sus siglas en inglés), los cuales estaban conectados a un controlador que recibía las señales provenientes de los dos LVDT y de este modo procedía a registrar en un computador las deformaciones de compresión en ambos lados largos del prisma. Además, para poder registrar la deformación y garantizar una distribución de carga uniforme sobre el espécimen, se diseñó un aditamento y un dimensionamiento de placa (superior e inferior) respectivamente, como se verá más adelante con mayor detalle. También se hizo uso de dos niveladores láser para asegurar que el prisma junto con las placas quedara correctamente centrado y alineado con la cabeza hemisférica. En la Figura 17 se muestra la instrumentación empleada en un prisma listo para ser fallado.

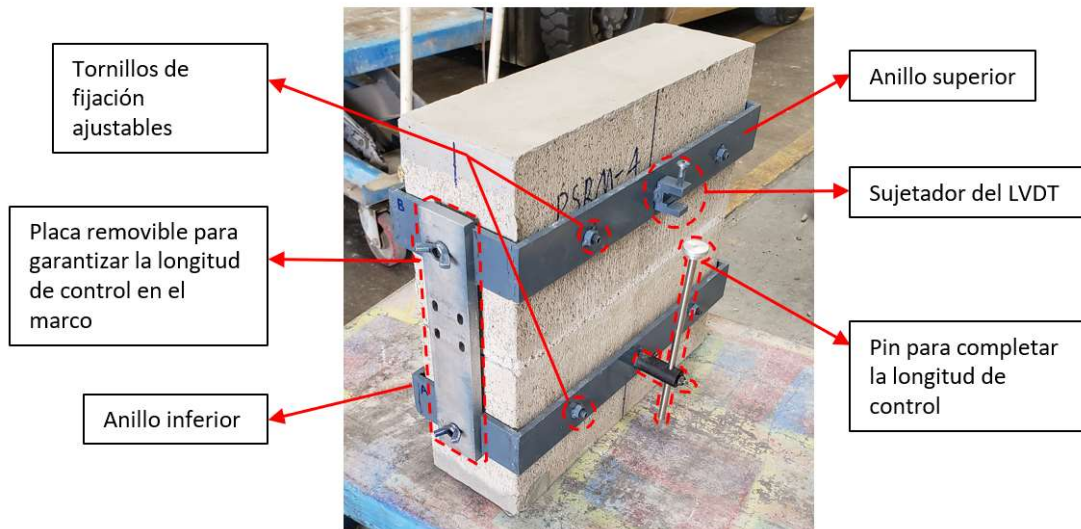




**Figura 17.** Instrumentación utilizada en los prismas de mampostería.

### ***3.2.2 Diseño del aditamento***

Para medir las deformaciones en los prismas de mampostería se diseñó un aditamento conformado por dos anillos de acero, uno inferior y otro en la parte superior, como se aprecia en la Figura 18. Se definió una longitud de control de 200 mm así que, para garantizar esta longitud, se ajusta ambos anillos a dos placas removibles para que estos mantuvieran dicha distancia. Una vez que los anillos estuvieran acomodados, de forma nivelada y centrada con el espécimen, se fija ambos anillos a este, por medio de 8 tornillos de punta plana (cuatro por cada anillo). Asimismo, se soldaron dos accesorios a los anillos superiores, a cada cara del prisma, para sujetar los sensores LVDT por medio de un tornillo ajustable. En el caso de los anillos inferiores se contaba con dos pines, que terminaban de completar la longitud de control, con una terminación circular donde descansaba el LVDT. Una vez que todo estuviera adecuadamente colocado, se removía las dos placas, para que los dos anillos pudieran desplazarse cuando el prisma se deformara en compresión debido al sometimiento de la carga axial y así obtener la lectura de la deformación unitaria en el prisma.



**Figura 18.** Marco de dos anillos (uno en la parte superior y el otro en la parte inferior) para la medición de deformaciones.

### **3.2.3 Diseño de placas del montaje**

El diseño para ambas placas (superior e inferior) del montaje se describe en la norma ASTM C1716. Esta norma señala que el espesor de las placas depende de la configuración de la cabeza hemisférica; en este caso, dio como resultado el espesor mínimo permitido de 25.4 mm para las placas de carga superior e inferior. Asimismo, se tiene que las dimensiones del largo y ancho de las placas se definen por el tamaño del espécimen; donde la placa deber ser mayor que 6.6 mm (3.3 mm en cada extremo) como mínimo, el ancho y el largo del prisma. Así que, por facilidad de acomodo y maniobrabilidad en el montaje, se fabricaron dos placas de 420 mm de largo (10 mm en cada sentido) por 220 mm de ancho (50 mm en cada sentido).

### **3.2.4 Protocolo de carga para la máquina MTS-64**

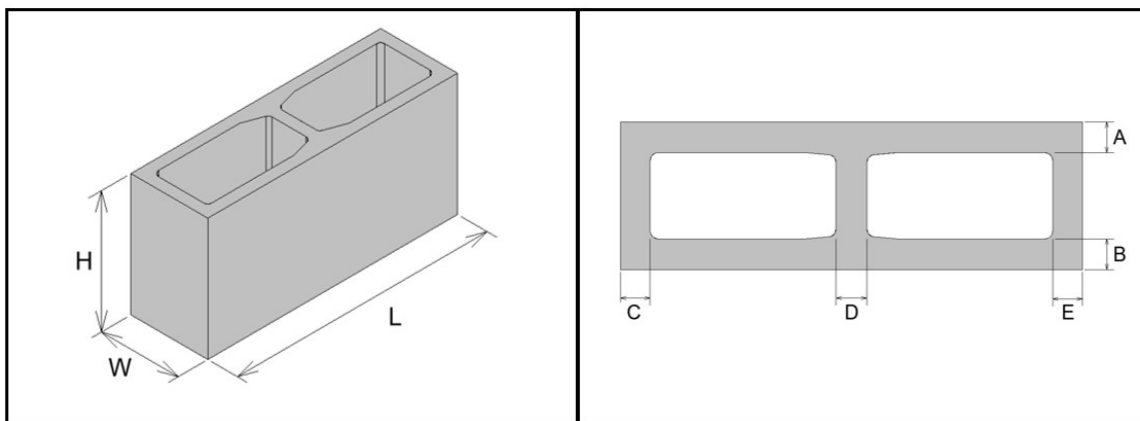
La norma INTE C55 (2015) indica que la velocidad de carga inicial hasta la mitad de carga esperada o de falla se puede aplicar de manera conveniente. No obstante, la carga restante hasta la carga de falla debe estar dentro de un rango no menor de 1 minuto ni mayor de 2 minutos. Así que, para cumplir con esta disposición se confeccionaron 2 prismas de prueba, uno relleno y otro sin relleno, para determinar las velocidades de carga requeridas por medio de desplazamiento; es decir, deformación entre tiempo. Lo anterior dio como resultado para los prismas rellenos 1 mm/min y para los prismas vacíos 0,7 mm/min. De este modo, se utilizaron estos datos de entrada para el protocolo de carga en la máquina universal MTS-64.

## Capítulo 4. Presentación y análisis de resultados

### 4.1 Unidades de mampostería

En esta sección se exponen los resultados que permiten caracterizar los bloques de concreto: las dimensiones registradas, los ensayos de las de las propiedades físicas (absorción, densidad, área neta, entre otros) y las pruebas de resistencia a la compresión de las unidades utilizadas.

A continuación, se muestra en la Figura 19 la simbología empleada de cada dimensión de los bloques. De este modo, en la Tabla 8 se reportan estas mediciones en función de esta nomenclatura.



**Figura 19.** Dimensiones de los bloques de concreto

**Tabla 8.** Dimensiones registradas de los bloques

Dimensión (mm)	Bloque			Promedio (mm)
	1	2	3	
W	120,0	120,0	120,0	<b>120,0</b>
H	192,5	192,5	192,5	<b>192,5</b>
L	390,0	390,0	390,0	<b>390,0</b>
A	25,7	26,0	26,3	<b>26,0</b>
B	26,4	27,3	25,7	<b>26,5</b>
C	26,6	26,6	26,2	<b>26,5</b>
D	26,9	27,4	26,7	<b>27,0</b>
E	26,4	26,8	26,8	<b>26,6</b>

La norma INTE C90 (2021) establece que los espesores de las caras externas y de las almas deben ser de 19 mm como mínimo, para unidades cuyo ancho es de 12 cm, como se indicó anteriormente en la sección 2.1.2. De la Tabla 8 se observa que todos los espesores medidos tanto de las almas (dimensiones C, D y E) como de las caras externas (A y B) son mayores de 19 mm, donde el espesor mínimo registrado fue de 26,5 mm y 26 mm respectivamente. Además, dicha norma indica que las medidas encontradas para el ancho (W), alto (H) y largo (L) deben tener una tolerancia de  $\pm 3$  mm en cada dirección, según la dimensión indicada por el fabricante (120, 190 y 390 mm respectivamente). En este caso, las longitudes W, H y L están dentro las tolerancias permitidas, como también se aprecia en la Tabla 8.

En la siguiente Tabla 9 se detalla las principales propiedades físicas de las tres unidades en cuestión, así como sus valores promedio.

**Tabla 9.** Densidad, área neta y otras propiedades físicas de los bloques

Determinación	Unidad	Bloque			Promedio
		1	2	3	
Peso sumergido ( $W_i$ )	kg	6,30	6,45	6,30	<b>6,35</b>
Peso saturado ( $W_s$ )	kg	11,45	11,60	11,45	<b>11,50</b>
Peso final secado al horno ( $W_d$ )	kg	10,51	10,73	10,50	<b>10,60</b>
Absorción	kg/m <sup>3</sup>	182	168	187	<b>179</b>
Porcentaje absorción	%	14,8	13,3	15,3	<b>14,5</b>
Contenido de humedad	%	60,7	58,9	49,7	<b>56,4</b>
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	2042	2094	2032	<b>2056</b>
Volumen neto ( $V_n$ )	cm <sup>3</sup>	5250	5000	5250	<b>5250</b>
Área neta	mm <sup>2</sup>	26800	26650	26950	<b>26800</b>

A partir de la Tabla 9, se obtuvo una densidad promedio de 2056 kg/m<sup>3</sup> para los 3 bloques. Por ende, los bloques se clasifican (según su densidad) como unidades de peso normal debido a que la densidad obtenida fue superior a 2000 kg/m<sup>3</sup> (Tabla 3, de acuerdo con la norma INTE C90 (2021)). Además, según esta clasificación por densidad, los bloques de peso normal deben presentar un valor máximo de absorción de agua de 208 kg/cm<sup>3</sup> para el promedio de los tres bloques y de 240 kg/cm<sup>3</sup> por cada espécimen (Tabla 3). La absorción de agua obtenida concuerda según su densidad, ya que como se muestra en la Tabla 9, la absorción promedio fue 179 kg/cm<sup>3</sup> mientras que la mayor absorción reportada en un espécimen fue de 187 kg/cm<sup>3</sup>; siendo estos resultados inferiores a los valores máximos de

absorción de la norma INTE C90 (2021), mencionados anteriormente, para los bloques de peso normal.

Por último, en la Tabla 10 se reporta la resistencia a la compresión de los tres especímenes, así como su valor promedio.

**Tabla 10.** Resistencia a compresión de los bloques,  $f_b$

Bloque	Fuerza máxima	Área neta	$f_b$
	kN	mm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
4	493,9	26800	188 (18,4)
5	462,7	26800	176 (17,3)
6	575,5	26800	219 (21,5)
<b>Promedio</b>			<b>194 (19,5)</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>22,2 (2,2)</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>			<b>11,4</b>

En este estudio se obtuvo una resistencia a la compresión promedio  $f_b$  de 194 kg/m<sup>2</sup>, donde el espécimen con el menor valor de resistencia fue de 176 kg/cm<sup>2</sup>, como se observa en la Tabla 10. Estos valores cumplen con los requisitos del CSCR 2010-14 para las unidades huecas de mampostería de concreto clase A; ya que se superó en un 46 % y un 47 % las resistencias requeridas promedio (133 kg/cm<sup>2</sup>) e individual (120 kg/cm<sup>2</sup>) respectivamente, como se indicó previamente en la sección 2.1.2.

## 4.2 Mortero de pega

En este apartado se presentan los valores de  $f_{mor}$  para los morteros M, S y N para las dos condiciones: en sitio (al momento de la confección de los prismas) y en el laboratorio.

En la Tabla 11 se muestra la resistencia a la compresión de los morteros (M, S y N respectivamente) provenientes de la misma batida utilizada en los prismas.

**Tabla 11.** Resistencia a la compresión del mortero en condiciones de sitio,  $f_{mor}$

Tipo de mortero	$f_{mor}$	Desviación estándar	Coefficiente variación
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%
M	172 (16,9)	4,8 (0,5)	2,8
S	160 (15,7)	3,3 (0,3)	2,1
N	72 (7,1)	8,9 (0,9)	12,4

De la Tabla 11, se puede observar que todos los morteros cumplen con la resistencia mínima de acuerdo con su tipo, a excepción del mortero tipo M de esta investigación. El

$f_{mor}$  del mortero tipo M fue un 2 % menor a la resistencia mínima (176 kg/cm<sup>2</sup>) establecida por la norma INTE C91 (2014), como se indicó anteriormente en la Tabla 5. En cambio, el mortero tipo S logró alcanzar una resistencia 26 % mayor que la mínima (127 kg/cm<sup>2</sup>) y en el caso del mortero tipo N, el incremento fue del 36 % con respecto al resistencia límite (53 kg/cm<sup>2</sup>).

Por otra parte, en la Tabla 12 se detalla los valores obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas por cada tipo de mortero. Esto con el propósito de determinar el cumplimiento de las especificaciones del mortero en uso. Las muestras para estas pruebas de control se extrajeron de otros sacos, diferentes a los aprovechados en los prismas, pero del mismo lote.

**Tabla 12.** Flujo y resistencia a la compresión del mortero en condición de laboratorio

Tipo	Dosificación	Cantidad	Temperatura	Flujo	$f_{mor}$ promedio
	L	kg	°C	%	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
M	0,38	2	24,1	114,5	93 (9,2)
S	0,30	2	23,9	105,0	134 (13,2)
N	0,30	2	22,7	115,0	61 (6,0)

La norma INTE C57 (2022) establece que la cantidad de agua de la mezcla debe generar un flujo de 110±5, con una temperatura controlada de 23 °C±3 °C. En la Tabla 12 se denota que para cada tipo de mortero se logró alcanzar el flujo y la temperatura requeridos. Sin embargo, al igual que el mortero tipo M usado en los prismas, el mortero Tipo M en condición de laboratorio (93 kg/cm<sup>2</sup>) tampoco alcanzó la resistencia mínima de 176 kg/cm<sup>2</sup>. En el caso los morteros tipo S y N se tiene que la resistencia alcanzada es un 6 % y un 13 % mayor respectivamente, a la resistencia mínima.

Otra observación notable es que los valores de  $f_{mor}$  de los prismas son mayores, en todos los casos, a los obtenidos en las pruebas de control. Este comportamiento podría esperarse, ya que los cubos de mortero de los prismas fueron fallados a una mayor edad (57 días) que en el caso de los cubos de mortero elaborados en el laboratorio (28 días).

Para comprobar estas pruebas, debido a la baja resistencia del mortero tipo M, se solicitó a los técnicos del LanammeUCR que determinaran la resistencia de cada tipo de mortero según la norma INTE C91 (2014), como se muestra en la Tabla 13. Donde se utilizó la

misma dosificación indicada por el fabricante para la elaboración de los cubos de mortero en estas pruebas.

**Tabla 13.** Comprobación de la resistencia del mortero a los 28 días

Tipo de mortero	$f_{mor}$ promedio	Desviación estándar	Coficiente variación
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%
M	201 (19,8)	8,3 (0,8)	4,1
S	138 (13,5)	6,0 (0,6)	4,3
N	66 (6,5)	4,5 (0,4)	6,7

Como se observa en la Tabla 13 todos los tipos de mortero presentaron un valor de  $f_{mor}$  superior a la resistencia a la compresión mínima de acuerdo con su tipo. En este caso, el mortero tipo M fue un 14 % mayor a la resistencia límite y 116 % superior a la resistencia reportada en condición de laboratorio (Tabla 12). Cabe destacar que en estas pruebas de comprobación las muestras fueron tomadas de sacos de mortero diferentes (pero del mismo lote) a los que se usaron en los prismas de mampostería y en las condiciones de laboratorio.

Esto podría indicar que las pruebas en sitio como las de laboratorio, la mano de obra (apisonamiento inadecuado de los cubos de mortero, incumplimiento en los tiempos, entre otros) pudo haber provocado la disminución en el mortero tipo M. Por lo tanto, la resistencia reportada del mortero tipo M para los prismas (Tabla 11) pudo haber sido mayor. Sin embargo, se puede notar que los morteros tipo S y N sí cumplieron con los requisitos de resistencia en las tres pruebas realizadas. En consecuencia, cabe la posibilidad que algunos sacos de mortero tipo M presentaran resistencias inferiores a las especificadas.

### 4.3 Concreto de relleno

Los prismas de concreto de relleno tienen una relación h/w (alto/ancho) de 2,0 ó 2,1 (ver Apéndice B. Prismas de concreto de relleno). Por otra parte, cabe resaltar que el espécimen 2 del lote asociado a los prismas rellenos de mampostería con mortero tipo N fue descartado debido a que excedía las tolerancias de perpendicularidad indicadas en la norma INTE C56 (2018).

Seguidamente, la Tabla 14 muestra las resistencias del concreto de relleno empleado en cada grupo de prismas de mampostería.

**Tabla 14.** Resistencia a la compresión del concreto de relleno,  $f_g$ 

Prismas asociados	$f_g$	Desviación estándar	Coficiente de variación
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%
PRM	148 (14,5)	8,3 (0,8)	5,6
PRS	135 (13,3)	3,1 (0,3)	2,3
PRN	147 (14,4)	16,6 (1,6)	11,3
<b>Promedio</b>	<b>143 (14,0)</b>	-	-

Como se observa en la Tabla 14, ninguno de los concretos de relleno premezclados, utilizados en los quince prismas, logró superar la resistencia mínima de 175 kg/cm<sup>2</sup> para el concreto de relleno tipo A, como lo estipula el CSCR 2010-14. Es decir, el concreto de relleno premezclado de esta investigación no cumple con los requisitos para considerarse de Tipo A, ni tampoco como se indica por el fabricante en la Tabla 7. El concreto de relleno utilizado en los prismas rellenos de mampostería con mortero tipo M y N presentó un valor más cercano que en el empleado en los prismas con mortero tipo N. Siendo la resistencia del concreto de relleno para los PRM un 15 % menor que la resistencia mínima. En el caso de los PRS y los PRN, los valores de  $f_g$  fueron 22 % y 16 % respectivamente, inferiores a la resistencia límite.

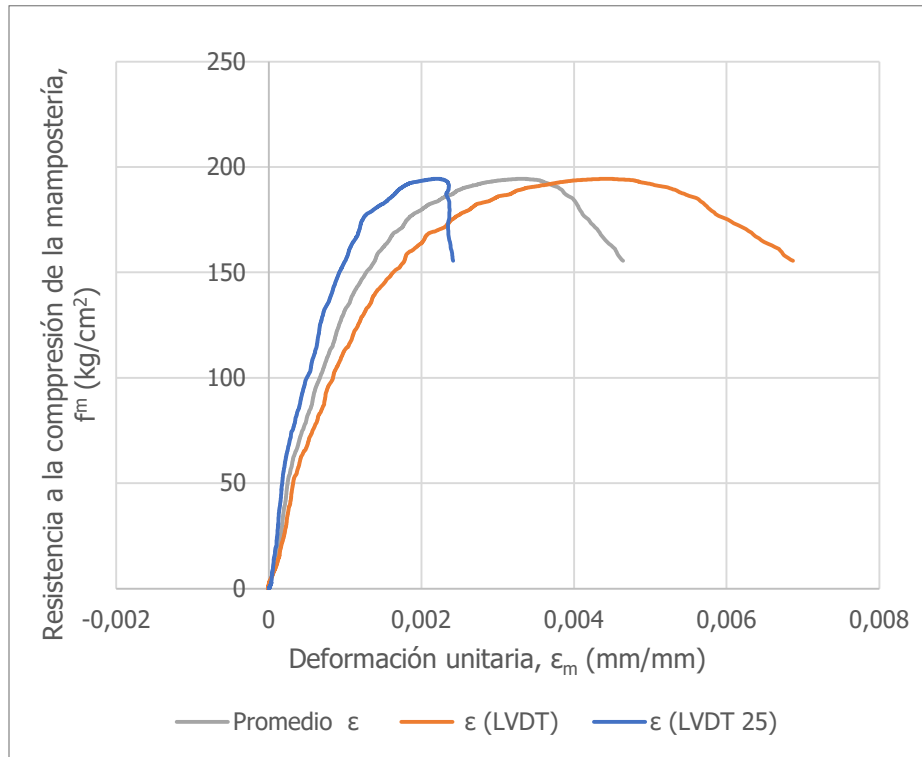
Aunado a esto, también se puede notar que el valor promedio de  $f_g$  tampoco cumplió con el criterio de resistencia para el concreto de relleno señalado por el TMS 402-16. En este caso, al ser la resistencia de los prismas rellenos superior a 141 kg/cm<sup>2</sup> (de 195 kg/cm<sup>2</sup>, como se discutirá más adelante), la resistencia requerida para el concreto de relleno debería ser igual o mayor a este valor alcanzado de  $f_m$ . Es decir, el valor de  $f_g$  obtenido fue un 36 % inferior a la resistencia mínima requerida por el TMS 402-16.

#### 4.4 Curvas esfuerzo-deformación

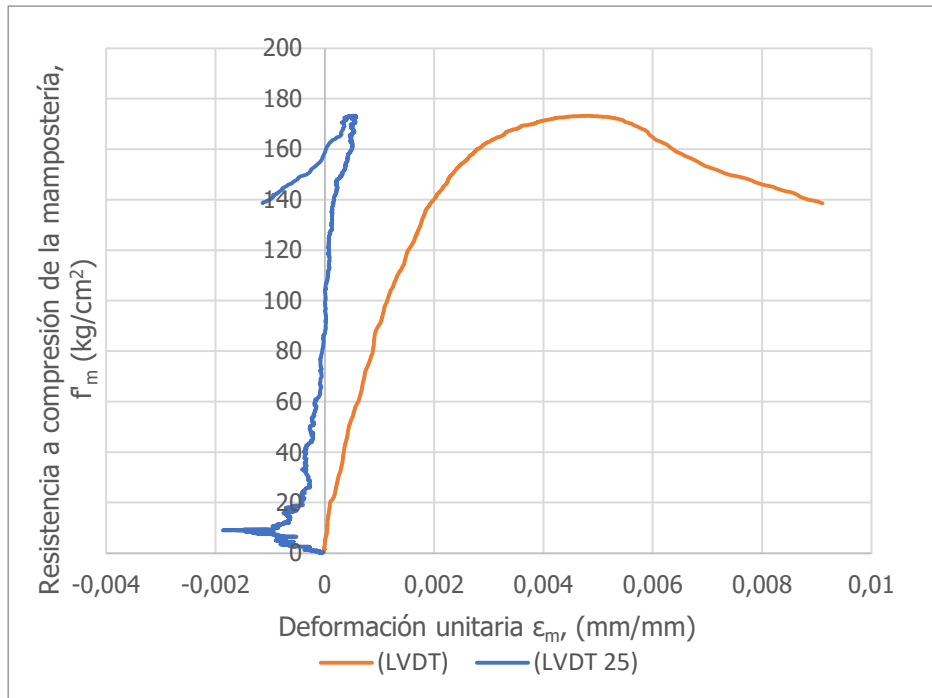
Como se indicó en el apartado 3.2.1, se emplearon dos LVDT (los cuales se identificaron como LVDT y LVDT25) para medir las deformaciones en cada prisma. De esta manera, la deformación reportada fue el promedio de las dos curvas generadas por cada LVDT como se muestra en la Figura 20. No obstante, hubo algunas excepciones, donde uno de los LVDT registró un comportamiento atípico en las deformaciones por lo que se tuvo que desechar la curva del respectivo sensor y seleccionar la deformación del otro LVDT. Se podría atribuir a las excentricidades accidentales, nivelación del prisma o problemas propios del montaje



experimental las posibles causas de estas situaciones peculiares. Un ejemplo de esto se observa en la Figura 21, en la cual se eliminó la curva producida por el LVDT 25. En el Apéndice I. Curvas esfuerzo-deformación, se exhiben todas las curvas resultantes de cada prisma.

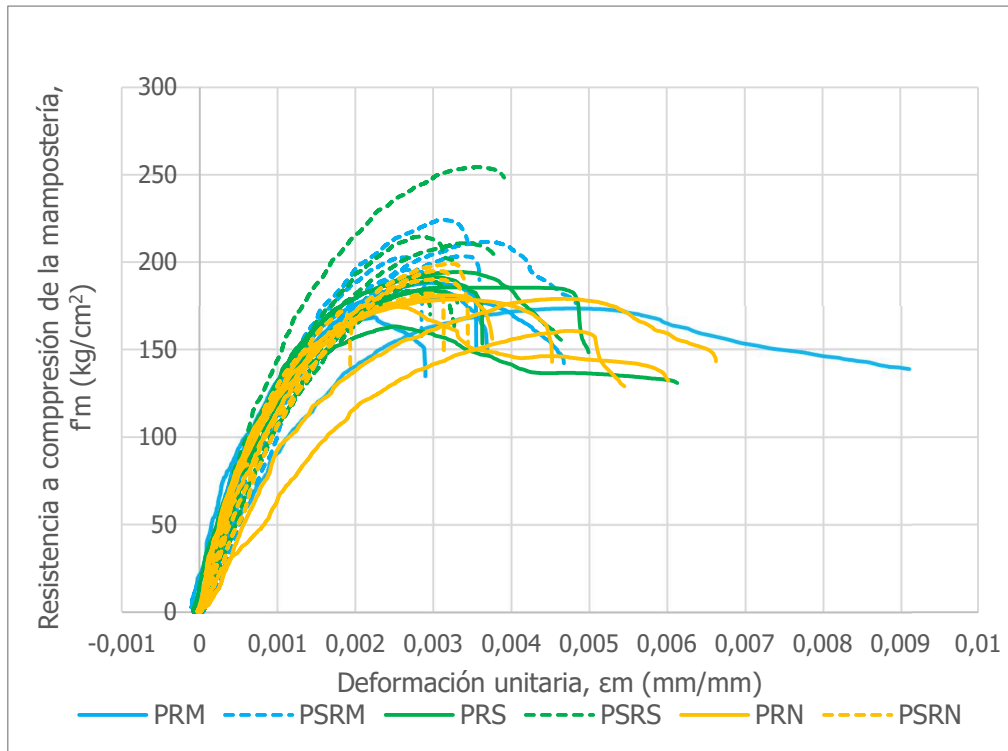


**Figura 20.** Ejemplo de curva esfuerzo-deformación (PRs-2) a partir del promedio de la lectura de los dos LVDT



**Figura 21.** Ejemplo de curva esfuerzo-deformación (PRM-3) a partir de la lectura de un solo LVDT (LVDT 25 descartado)

A partir de esta selección de datos de la deformación unitaria, se obtuvo el módulo de elasticidad y la deformación última en los prismas huecos y rellenos. Seguidamente, en la Figura 22 se aprecia como las curvas esfuerzo-deformación tienen un comportamiento similar entre sí y al esperado de acuerdo con la teoría (sección 2.1.5). Donde, las curvas en su parte ascendente muestran cierta linealidad y conforme se va acercando al esfuerzo máximo empieza a formar una especie de parábola hasta que se alcanza la descarga del 80 % de la resistencia máxima (región descendente).



**Figura 22.** Curva de esfuerzo-deformación resultante de todos los prismas

#### 4.5 Prismas de mampostería

Esta sección presenta los valores experimentales de  $f_m$ ,  $E_m$  y  $\epsilon_{mu}$  derivados de los prismas de mampostería rellena y hueca. Para la detección de valores atípicos (*outliers*, en inglés) de estos 3 parámetros, se emplearon gráficos de cajas. De este modo, aquellos resultados identificados con una alta dispersión y que no se alinean a la tendencia de los datos en estudio, fueron descartados. Para mayor detalle ver el Apéndice D. Detección de los valores atípicos (outliers).

Conjuntamente, en la Tabla 15 se comparan los valores históricos, a nivel local, del módulo de elasticidad, relación entre módulo de elasticidad y resistencia a la compresión de la mampostería y la deformación unitaria para la mampostería de concreto, clase A.

**Tabla 15.** Comparación histórica de  $E_m$ ,  $E_m/f'_m$  y  $\epsilon_m$  para la mampostería clase A

Estudio	$f'_m$	$E_m$	$E_m/f'_m$	$\epsilon_{mu}$
	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	-	mm/mm
Navas (1999)	133	114 544	861	-
Rodríguez (1999)	115	85 942	747	-
Carvajal (2000)	128	148 681	1162	-
Cascante (2001)	164	170 978	1043	-
Vaca (2019) *	147	101 998	694	0,0034
Núñez (2019) *	153	131 523	860	0,0038
<b>Este estudio</b>	<b>206</b>	<b>162 430</b>	<b>788</b>	<b>0,0039</b>

\*Deformaciones asociadas a la resistencia máxima.

#### 4.5.1 Resistencia a la compresión

Los prismas fabricados presentaron una relación  $h_p/t_p$  entre 3.2 y 3.3. Esto significa que el valor de F.C correspondiente fue de 1,09 para todos los especímenes, como se reporta en el Apéndice E. Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de la mampostería. En la Tabla 16 y Tabla 17 se muestra las resistencias a la compresión promedio según el mortero en uso de los prismas rellenos y huecos, respectivamente.

**Tabla 16.** Resistencia a la compresión de los prismas rellenos

Prisma	$f_m$	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Error Estándar
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%	%
PRM	195 (19,1)	8,7 (0,9)	4,5	7,6
PRS	200 (19,6)	13,3 (1,3)	6,7	11,7
PRN	191 (18,7)	9,0 (0,9)	4,7	7,9
<b>Promedio</b>	<b>195 (19,2)</b>	-	-	-

De la Tabla 16 se aprecia que al incrementar la resistencia del mortero hay un incremento en la resistencia de los prismas rellenos con mortero tipo S y N. No obstante, este comportamiento no sucede con el mortero tipo M, ya que los prismas con este mortero reportan una resistencia (195 kg/cm<sup>2</sup>) menor a aquellos con el mortero tipo S (200 kg/cm<sup>2</sup>). A este hecho se le podría atribuir al concreto de relleno o la resistencia de los bloques, por dos posibles razones. En primer lugar, a pesar de que el mortero tipo M presentaba valores de  $f_{mor}$  por debajo de la resistencia mínima, como se observó anteriormente en la sección 4.2, este a su vez era superior a la resistencia del mortero tipo S y N (Tabla 11). En segundo

lugar, los prismas huecos con mortero tipo M exhiben mayor resistencia que los prismas con mortero tipo S y N, como se verá más adelante, donde la principal diferencia de estos con los segundos es precisamente la presencia del concreto de relleno (posteriormente se discutirá cómo el concreto de relleno puede afectar el valor de  $f_m$ ). En cuanto a los bloques, se reportaron valores de  $f_b$  más bajos que otros (Tabla 10). Esta dispersión podría esperarse, principalmente, debido al proceso de fabricación y moldeo. Por tanto, cabe la posibilidad de que los bloques empleados, específicamente en los prismas rellenos con mortero tipo M, fueran de menor resistencia. De este modo, se podría explicar la falla anticipada de estos prismas rellenos.

Por otra parte, el coeficiente de variación es bajo donde comprende valores de 4,5 % a 6,7 %. También, para todos los casos, con un intervalo de confianza del 95 %, se tienen errores inferiores al 20 % (error definido previamente en la sección 1.3.1), por lo que se puede decir que el tamaño de muestra es aceptable estadísticamente.

**Tabla 17.** Resistencia a la compresión de los prismas huecos

Prisma	$f_m$	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Error Estándar
	Kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	Kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%	%
PSRM	226 (22,2)	11,9 (1,2)	5,3	10,5
PSRS	218 (21,3)	17,0 (1,7)	7,8	14,9
PSRN	205 (20,1)	11,9 (1,2)	5,8	10,4
<b>Promedio</b>	<b>216 (20,3)</b>	-	-	-

Asimismo, a partir de la Tabla 17 se observa que la resistencia de los prismas vacíos aumenta si se acrecienta la resistencia del mortero. La resistencia de los prismas con mortero tipo M es 4 % y 10 % mayor que las resistencias los prismas con mortero tipo S y N respectivamente. Además, se tiene que el coeficiente variación va del 5,3 % al 7,8 % y el error estándar obtenido no supera, en ningún caso, el 20 %; lo que significa que la cantidad de muestras es adecuada para determinar su comportamiento.

Por otra parte, cabe destacar que los prismas rellenos (sobre el área bruta) poseen menor resistencia en compresión que los prismas huecos (sobre el área neta). La resistencia de los prismas rellenos fue 16 %, 9 % y 7 % inferior a los prismas huecos con mortero tipo M, S y N respectivamente.

En términos globales, la resistencia promedio de los prismas huecos fue de 216 kg/cm<sup>2</sup> y de 195 kg/cm<sup>2</sup> para los prismas rellenos. O sea, la mampostería sin concreto de relleno tuvo un aumento en su resistencia del 11 %. Según Hamid (1978), esto ocurre debido a los esfuerzos de tensión sobre las paredes externas de los bloques, generados por la expansión bilateral del concreto de relleno (además del mortero). Es decir, el bloque es el componente que debe resistir la combinación de los esfuerzos de compresión y tensión en el ensamblaje. De este modo, ante una misma carga axial en compresión la mampostería rellena experimenta un incremento de esfuerzos por intentar confinar el mortero y el concreto de relleno, por ello su resistencia disminuye. A diferencia de la mampostería hueca que solo debe resistir la tensión del mortero únicamente.

Este comportamiento observado es consistente con las investigaciones de Drysdale y Hamid (1979), Khalaf et al. (1994), Drysdale et al. (2008) y Fortes et al. (2014). De lo anterior, se puede afirmar que coincidir la resistencia del concreto de relleno con respecto a la resistencia esperada del prisma no resulta, necesariamente, en aumento de  $f'_m$ . Es decir, el concepto de sumar la resistencia del concreto de relleno y la resistencia del bloque para obtener un mayor  $f'_m$  no es válido (Drysdale & Hamid, 1979).

La resistencia promedio alcanzada en los prismas de mampostería de este estudio fue de 206 kg/cm<sup>2</sup>. A su vez, el CSCR 2010-14 establece que, para la mampostería clase A, el valor  $f'_m$  mínimo posible a usar es de 100 kg/cm<sup>2</sup> y cuando no se tenga información experimental existente también se debe usar esta resistencia mínima. De manera que, la resistencia obtenida es 2,1 veces la resistencia mínima; en otras palabras, el valor de  $f'_m$  es un 106 % superior al valor recomendado por el CSCR 2010-14.

Este incremento de la resistencia mínima de este estudio también es notable en las investigaciones anteriores realizadas en el país. De hecho, más recientemente Núñez (2019) y Vaca (2019) consiguieron una resistencia de 153 kg/cm<sup>2</sup> (53 % mayor al valor sugerido) y 146 kg/cm<sup>2</sup> (46 % mayor al valor sugerido) respectivamente. Mientras que Navas (1999), Rodríguez (1999), Carvajal (2000) y Cascante (2001) obtuvieron resistencias de 122, 115, 128 y 164 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente; es decir, en ese mismo orden, estas resistencias fueron 22 %, 15 %, 28 % y 64 % superior a la resistencia recomendada.

#### 4.5.2 Módulo de Elasticidad

En la Tabla 18 y Tabla 19 se presentan los módulos de elasticidad para los prismas rellenos y huecos, con sus respectivos coeficientes de variación y desviación estándar. Para mayor profundidad, en el Apéndice F. Módulo de elasticidad y relación  $E_m/f_m$  se encuentra el valor de  $E_m$  por cada espécimen.

**Tabla 18.** Módulo de elasticidad de los prismas rellenos

Prismas	$E_m$	Desviación Estándar	Coficiente de variación
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%
PRM	187 273 (18 371)	54 070 (5 304)	28,9
PRS	178 626 (17 523)	37 965 (3 724)	21,3
PRN	148 605 (14 578)	60 311 (5 917)	40,6
<b>Promedio</b>	<b>171 501 (16 824)</b>	-	-

**Tabla 19.** Módulo de elasticidad de los prismas huecos

Prismas	$E_m$	Desviación Estándar	Coficiente de variación
	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	%
PSRM	148 118 (14 530)	16 479 (1 617)	11,1
PSRS	157 078 (15 409)	33 734 (3 309)	21,5
PSRN	154 881 (15 193)	30 261 (2 969)	19,5
<b>Promedio</b>	<b>153 359 (15 045)</b>	-	-

El módulo de elasticidad promedio para los prismas rellenos fue de 171 501 de kg/cm<sup>2</sup> y para los huecos fue de 153 359 kg/cm<sup>2</sup>, o sea, el valor de  $E_m$  para los prismas rellenos es 12 % superior a los prismas huecos. Además, se puede observar que los coeficientes de variación son altos en cada caso; siendo esta variabilidad mayor en los prismas rellenos que en los vacíos. Para los primeros esta variación se ubica entre 11,1 % y 21,5 %, mientras que, en los segundos, va desde 21,3 % hasta 40,6 %. Es de esperar que los prismas rellenos presenten mayor variabilidad debido a que se incluye una variable más en el análisis, el concreto de relleno. Esta gran dispersión observada en los resultados es de esperar, ya que como indica Drysdale et al. (2008), en parte puede ser atribuida por las variaciones propias en el método de ensayo, tales como: particularidades en la instrumentación o en la aplicación de carga, métodos de cálculo, configuración de cada prisma.

Teóricamente, los prismas rellenos deberían presentar menor rigidez axial (valores de  $E_m$  menores) que los prismas huecos, ya que estos primeros exhiben mayores deformaciones (como se expone más adelante en el apartado 4.5.3) y al mismo tiempo, los esfuerzos en

compresión en promedio son más bajos. El comportamiento elástico del material, descrito por la ley de Hooke, indica que el módulo de elasticidad es proporcional a la resistencia e inversamente proporcional a las deformaciones. Esto podría explicarse por la alta variabilidad mostrada, lo que demuestra, una vez más, el comportamiento no homogéneo de la mampostería. De hecho, Hamid (1978) halló que los prismas rellenos eran menos rígidos axialmente en comparación que los vacíos.

Empleando el mismo espesor del bloque, concreto de relleno tipo A (preparado en sitio) y mortero tipo S, Carvajal (2000) obtuvo un módulo de elasticidad de 148 681 kg/cm<sup>2</sup> para los prismas rellenos; esto significa que el  $E_m$  de este estudio es 20 % superior para dichos prismas.

Siguiendo con los prismas rellenos, Vaca (2019) reportó módulos de elasticidad para los prismas con morteros tipo S y N de 103 012 kg/cm<sup>2</sup> y 100 984 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Es decir, los valores anteriores de  $E_m$  son 58 % y 68 % menores que los valores de  $E_m$  obtenidos en este estudio por cada caso respectivamente. Por otra parte, se tiene una diferencia del 62 % del módulo de elasticidad promedio para los prismas rellenos con respecto al estudio de Núñez (2019), el cual registró un  $E_m$  de 131 523 kg/cm<sup>2</sup>. Cabe mencionar que, en ambas investigaciones los prismas no eran de unidades completas (cortados a la mitad), se utilizó concreto de relleno fabricado en sitio y se utilizaron bloques con diferentes espesores a esta investigación. Además, se tuvo que realizar correcciones en la parte elástica de la curva de esfuerzo-deformación para poder calcular el módulo de elasticidad, ya que en dicha región se presentaba una lectura atípica en las deformaciones, especialmente con los prismas rellenos. Lo que, en parte, podría deberse estas diferencias encontradas.

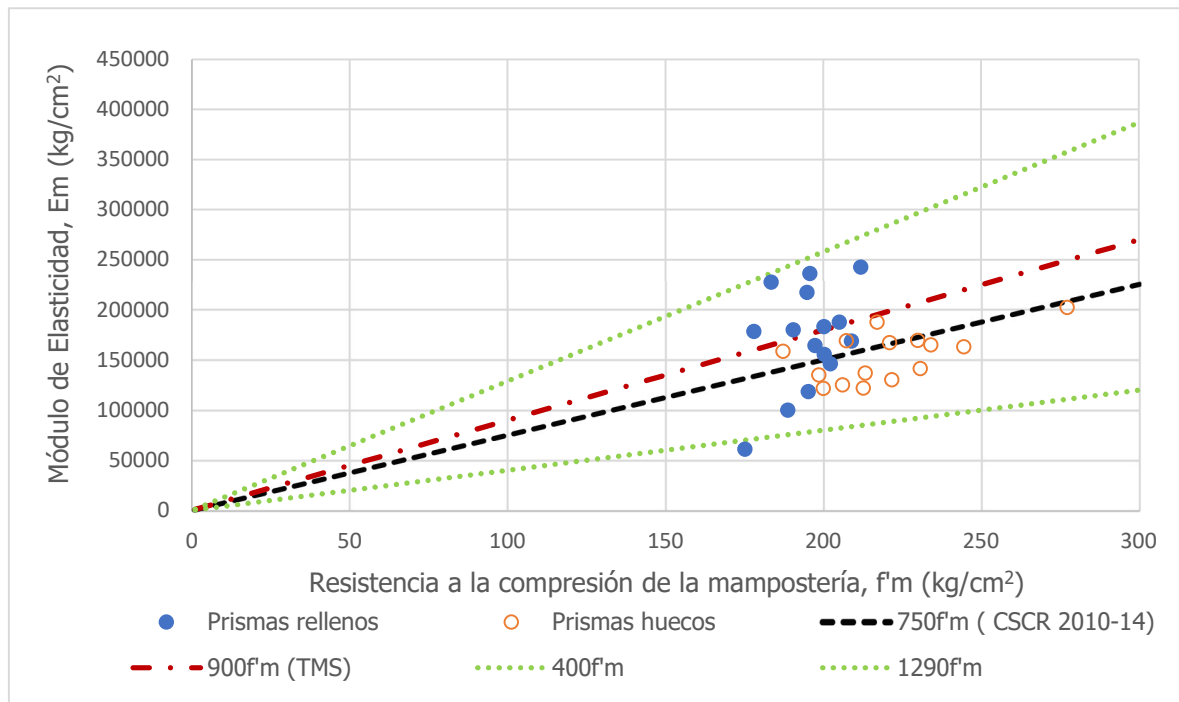
En el caso de los prismas vacíos con bloques de 12 cm de espesor, Navas (1999) encontró que los módulos de elasticidad para los prismas con mortero tipo M, S y N correspondían a 130 566 kg/cm<sup>2</sup>, 118 814 kg/cm<sup>2</sup> y 94 252 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. En otras palabras, estos valores de  $E_m$  son menores en un 13 %, 32 % y 64 % respectivamente, a los de esta investigación. Mientras que Vaca (2019) alcanzó módulos de elasticidad de 133 293 kg/cm<sup>2</sup> (18 % menor a este estudio) y 83 522 kg/cm<sup>2</sup> (85 % inferior a este estudio) para prismas huecos con mortero tipo S y N respectivamente. Por último, se tiene que el módulo de



elasticidad promedio registrado por Núñez (2019), para todos los prismas vacíos ( $106\ 153\ \text{kg/cm}^2$ ), es 44 % inferior al valor derivado de la Tabla 19.

Como se mencionó anteriormente, el módulo de elasticidad, al depender directamente de la resistencia en compresión del prisma se podría esperar que estas diferencias con los estudios previos sean el producto de haber alcanzado una resistencia en compresión considerablemente superior tanto en los prismas vacíos como rellenos. Por lo tanto, el módulo de elasticidad también fue mayor en todas las ocasiones.

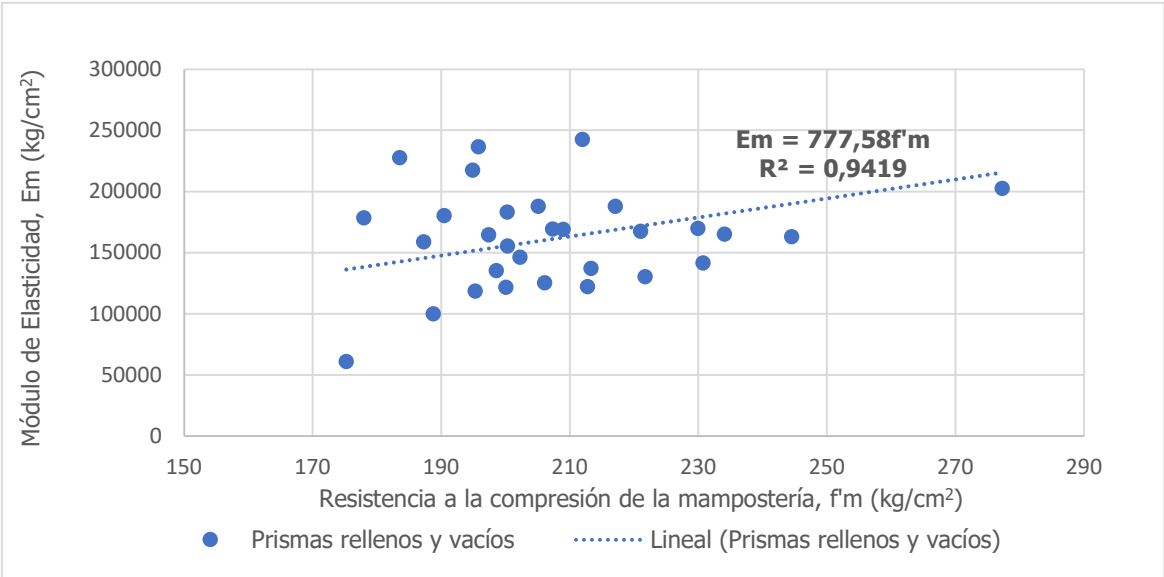
El valor de la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia en compresión ( $E_m/f'_m$ ) podría estar ubicado, de acuerdo con Drysdale et al. (2008), dentro de un rango de 400 a 1290, como consecuencia de la alta variabilidad. En la Figura 23 se muestra el módulo de elasticidad en función de la resistencia en compresión de todos los prismas con las expresiones sugeridas por la literatura y las normativas en consideración (CSCR 2010-14 y TMS 402-16).



**Figura 23.** Módulo de Elasticidad vs resistencia a la compresión de los prismas de mampostería con sus valores sugeridos por normativa y literatura.

Se puede apreciar que, a partir de la Figura 24, la relación general obtenida de  $E_m/f'_m$  fue de 778 con una alta correlación entre ambos parámetros, donde el 94 % de las variaciones

fue explicada por el modelo. Siendo esta relación superior a la expresión propuesta por el CSCR 2010-14 ( $E_m/f'_m=750$ ). Sin embargo, la relación entre de  $E_m$  y  $f'_m$  recomendada por el TMS 402-16 es superior. Es decir, los prismas cumplen con la rigidez global esperada del CSCR 2010-14 pero no con la del TMS 402-16.



**Figura 24.** Relación entre la resistencia a compresión de los prismas mampostería y el módulo de Elasticidad

Por otro lado, Navas (2007) encontró que  $E_m = 932f'_m$  con  $R^2=0,49$ . Presentando una correlación más baja entre ambas variables debido a que el tamaño muestral fue mucho mayor, al integrar cuatro investigaciones con variables diferentes. Con un  $R^2=0,064$ , Vaca (2019) determinó que el módulo de elasticidad es 719 veces la resistencia a la compresión. Mientras que Núñez (2019) halló que la relación promedio entre de  $E_m$  y  $f'_m$  fue 811. O sea, la expresión de este estudio es 17 y 20 % menor al resultado de Navas (2007) y Núñez (2019) respectivamente y un 8% superior a la relación reportada por Vaca (2019).

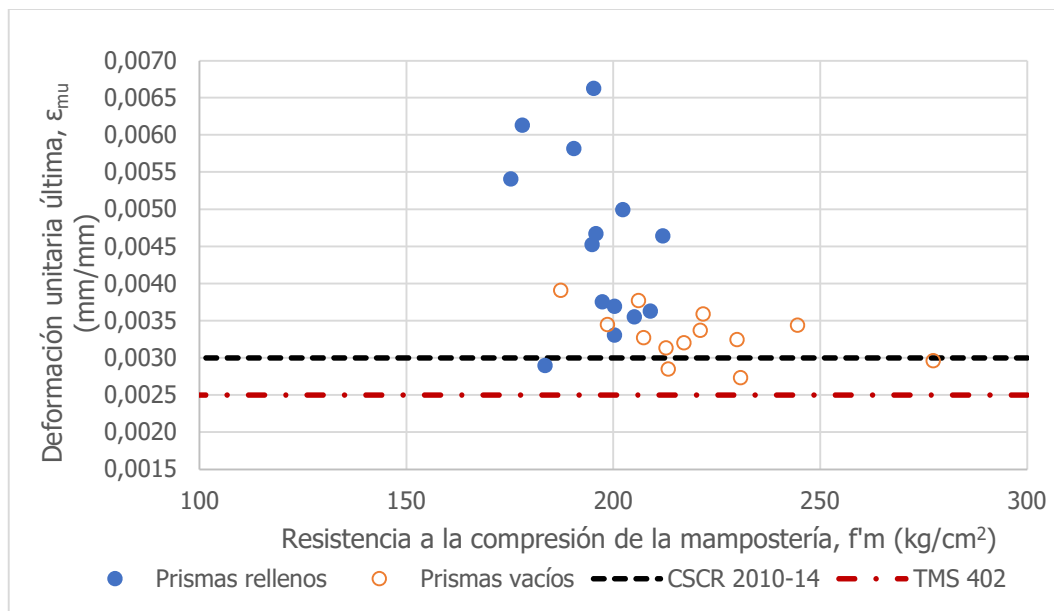
### 4.5.3 Deformación última

La Tabla 20 exhibe las deformaciones unitarias últimas alcanzadas en los prismas. Donde la deformación promedio en los prismas rellenos y vacíos fue de 0,0045 y 0,0033 respectivamente. Como resultado, la deformación promedio para la mampostería es de 0,0039. En el Apéndice G. Deformación última de los prismas de mampostería, se muestra la deformación ultima obtenida en cada prisma.

**Tabla 20.** Deformación unitaria última de los prismas de mampostería

Prismas	$\epsilon_{mu}$	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
	mm/mm	mm/mm	%
Rellenos	0,0045	0,0011	25,1
Vacíos	0,0033	0,0003	10,4
<b>Promedio</b>	0,0039	-	-

Dicho esto, es notable que la deformación última global es superior al valor sugerido del CSCR 2010-14 (0,0030) y el TMS 402-16 (0,0025). En efecto, los prismas de este estudio se deforman más de lo esperado según estas normativas (específicamente con el CSCR 2010-14), aunque este comportamiento no sucede con todos los especímenes, como se muestra en la Figura 25.



**Figura 25.** Deformación última y los valores sugeridos por el TMS y CSCR

La Figura 25 muestra todos los valores adquiridos de deformación (prismas rellenos y vacíos), así como los valores límites indicados por el CSCR 2010-14 y TMS 402-16. De allí,

se tiene que el 100 % del total de muestras aceptables (13 prismas vacíos y 14 prismas rellenos) presentan valores de  $\epsilon_{mu}$  superior al valor sugerido del TMS 402-16; mientras que solo el 85 % supera el valor del CSCR 2010-14. Esto mismo acontece en las dos investigaciones anteriores, que se tienen hasta el momento, donde se reportan deformaciones unitarias más allá del rango elástico. En el primer caso, para Vaca (2019), solo el 38 % de los prismas (de los 8 tipos de prismas empleados) excedió el valor de 0.003, mientras que el 75 % de los especímenes es igual o mayor que 0,0025. Por otro lado, Núñez (2019) señaló que el 80 % de la muestra total supera el 0,003, pero se alcanza un 95 % si se compara con el valor de 0,0025. Cabe recordar que, en ambos estudios las deformaciones registradas están asociadas al esfuerzo máximo por lo que la deformación última, debería ser mayor que estos valores. Por lo tanto, se podría esperar que el porcentaje de los prismas, de ambos estudios, que alcanzaron el valor sugerido del TMS 402-16 sea mayor.

Además, el quinto percentil de todos los datos de deformación última de esta investigación corresponde al valor de 0,0028. En otras palabras, el 95% de la población analizada, alcanza o supera este valor. Por ende, el valor de deformación que mejor se ajusta a la deformación de estudio corresponde al indicado por el TMS 402-16; ya que la deformación señalada por el CSCR 2010-14 es superior.

Por lo tanto, es más conveniente usar el valor sugerido por el TMS 402-16 que del CSCR-2010-14, al ser este primero más seguro. Los valores de diseño establecidos en los códigos no son valores esperados o reales, sino que funcionan como un límite inferior donde garanticen la mayor participación de los datos presentes.

#### **4.6 Factores que influyen sobre $f'_m$**

En la Tabla 21 se agrupa los resultados históricos, a nivel nacional, de las resistencias a la compresión de los bloques, mortero y concreto de relleno según el espesor nominal de bloque, de las investigaciones que registraron lecturas de esfuerzo a compresión en función de la deformación sobre la mampostería de concreto, clase A

**Tabla 21.** Resumen de la resistencia de los componentes para la mampostería clase A, según el espesor nominal del bloque

Estudio	Espesor	$f'_m$	$f'_b$	$f'_{mor}$			$f'_g$
	de bloque			M	N	S	
	cm	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Navas (1999)	12	133	166	177	140	75	-
Rodríguez (1999)	15	115	162	-	-	135	218
Carvajal (2000)	12	128	154	-	-	136	182
Cascante (2001)	20	164	171	-	-	227	181
Vaca (2019)	20	153	174	-	57	111	197
	13,6	140	146	-	55	111	204
Núñez (2019)	12	150	156	-	50	126	202
	15	156	161	-	-	-	-
Este estudio*	12	206	194	172	160	72	143

\*Concreto de relleno premezclado

#### 4.6.1 Resistencia de los bloques

Como se observó anteriormente, los prismas vacíos son más resistentes que los prismas rellenos. Al ser el bloque el elemento que confina, la resistencia de la mampostería, a fin de cuentas, se ve limitada por la capacidad de este para resistir los esfuerzos tanto en compresión como en tensión (Navas, 2007). Por ende, de la Tabla 22 se puede ver que los prismas vacíos presentan un factor eficiencia (razón entre  $f_m/f_b$ ) mayor que los rellenos; 1,11 para los prismas huecos y de 1,01 para los prismas rellenos.

**Tabla 22.** Eficiencia de los prismas de mampostería

Prismas	Huecos			Prismas	Rellenos		
	$f_b$	$f_m$	Eficiencia		$f_b$	$f_m$	Eficiencia
	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	-		Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	-
PSRM	194	226	1,17	PRM	194	195	1,00
PSRS	194	218	1,12	PRS	194	200	1,03
PSRN	194	205	1,05	PRN	194	191	0,98
<b>Promedio</b>	<b>216</b>	<b>216</b>	<b>1,11</b>	<b>Promedio</b>	<b>195</b>	<b>195</b>	<b>1,01</b>

Como la resistencia de la mampostería está controlada por la resistencia del bloque, usualmente el factor eficiencia de los prismas toma valores entre 0 y 1. No obstante, en las ocasiones en que este valor es superior a 1, podría deberse a que la resistencia individual

de esos bloques hubiera sido mayor que 194 kg/cm<sup>2</sup> (valor promedio de tres muestras). Esto se evidencia de la Tabla 10, donde la resistencia individual con mayor valor reportado fue de 219 kg/cm<sup>2</sup>.

Por otra parte, al comparar la resistencia de la mampostería obtenida en los trabajos realizados anteriormente en el país con la resistencia de esta investigación, se puede notar que estas resistencias son menores, sin importar el hecho de usar mortero o concreto de relleno más resistentes (como se puede observar en Tabla 21). Esto resulta debido a que en esta investigación se alcanzó un valor de  $f_b$  superior con respecto a estos autores locales. En la Tabla 23, se resume los resultados de  $f_b$  derivados de las investigaciones anteriores y la razón de estas resistencias con el valor  $f_b$  de este estudio.

**Tabla 23.** Razón de la resistencia de los bloques de estudios previos y de este trabajo

Estudio	Espesor de bloque	$f_b$	$f_b$ actual	$f_b/f_b$ actual
	cm	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	-
Navas (1999)	12	166	194	0,86
Rodríguez (1999)	15	162	194	0,84
Carvajal (2000)	12	154	194	0,79
Cascante (2001)	20	171	194	0,88
Vaca (2019)	20	174	194	0,90
	13,6	146	194	0,75
Núñez (2019)	12	156	194	0,80
	15	161	194	0,83
<b>Promedio</b>				<b>0,83</b>

En promedio las resistencias de los bloques de los otros estudios son un 83 % de la resistencia registrada en este trabajo de investigación. Dicho de otra manera, la resistencia de los bloques, en este caso, es 17 % superior. Con esto, al igual que Drysdale y Hamid (1979) se puede afirmar que el factor más significativo sobre  $f'_m$  es la resistencia del bloque.

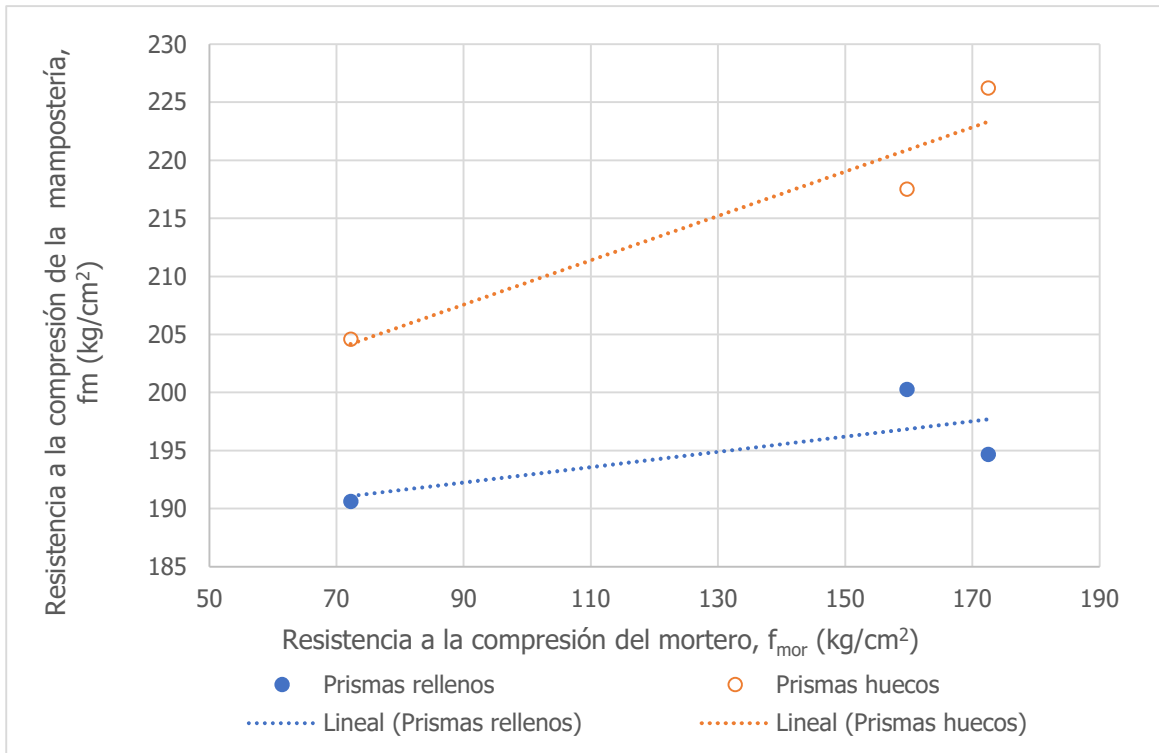
#### **4.6.2 Mortero de pega**

Como se observó en la sección 4.5.1, la resistencia a la compresión del mortero es un factor que afecta la resistencia a la compresión de los prismas. Al disminuir la resistencia del mortero también se reduce la resistencia del prisma. Según Drysdale et al. (citado por Navas, 2007), este comportamiento sucede porque los morteros, al disminuir su resistencia, su módulo de elasticidad también se reduce y este, al ser menor que el de los bloques, genera mayores deformaciones transversales en el mortero. Como resultado, se induce esfuerzos mayores de tracción en la interfase de contacto entre el mortero y la unidad de mampostería.

A nivel general, un incremento del 139 % en la resistencia del mortero (pasar del mortero tipo N a M) genera un aumento de apenas 6,5 % en la resistencia de la mampostería. Específicamente, este aumento en la resistencia del mortero significó un incremento en el valor de  $f_m$  para los prismas huecos del 10,2 %, mientras que en el caso de los prismas rellenos el aumento fue de un 2.1 %.

De lo anterior, se puede notar que el mortero aporta ligeramente al valor de  $f_m$ , como se mencionó anteriormente en la sección 2.1.3. Núñez (2019) obtuvo que al aumentar la resistencia del mortero (de tipo N a S) se alcanzó un incremento de un 2.7 % en la resistencia de los prismas. Análogamente, Vaca (2019) determinó que al incrementar la resistencia del mortero en un 148 % se logró un aumento del 13 % sobre los prismas huecos, mientras que en los prismas rellenos consiguió un aumento del 5,8 % de  $f_m$  al incrementar un 59 % el valor de  $f_{mor}$  para los prismas con bloques de 200 mm.

De la Figura 26 se puede ver que el efecto del mortero es mayor en los prismas vacíos que en los prismas rellenos. La explicación de este fenómeno se relaciona con la influencia de los esfuerzos de confinamiento horizontal ejercidos sobre la junta de mortero por las columnas rígidas del concreto de relleno, lo cual incrementa la resistencia aparente del mortero. Estos esfuerzos de confinamiento son inversamente proporcionales a la resistencia del mortero debido a las altas razones de Poisson del mortero (Khalaf, 1996). Lo mismo sucede en los estudios de Núñez (2019) y Vaca (2019), donde el efecto es mayor en los prismas huecos. Sin embargo, la influencia del mortero sobre los prismas rellenos parece no tener una tendencia definida en comparación con esta investigación, incluso hubo una disminución en los prismas rellenos con mortero tipo M.



**Figura 26.** Influencia de  $f_{mor}$  sobre  $f_m$

Cabe recordar que los prismas PRM presentaron un valor más bajo de  $f_m$  que los PRS a pesar de que la resistencia del mortero tipo M fuera mayor que 8 % la del mortero tipo S. Esto apunta a que hubo una mayor incompatibilidad de deformaciones en los prismas PRM, debido a lo explicado en los párrafos anteriores de esta sección. Aunado a que el mortero tipo M, posiblemente, no cumpliera con la resistencia esperada.

#### **4.6.3 Concreto de relleno**

Varios estudios como Hamid (1978), Drysdale y Hamid (1979), Fortes et al. (2014) y Khalaf et al. (1992) han demostrado que los prismas vacíos (sobre el área neta) presentan mayor resistencia a la compresión que los prismas rellenos (sobre el área bruta). En efecto, la presencia del concreto de relleno redujo en un 11 % la resistencia en compresión de los prismas como se presentó en la sección 4.5.1. De acuerdo con Hamid y Drysdale, citado por Fortes et al. (2014), se podría esperar incluso, que la resistencia de los prismas rellenos fuera hasta un 30 % menor que la de los prismas vacíos.

Previamente se explicó que el concreto de relleno induce a esfuerzos laterales de tensión sobre el bloque, lo que provoca una falla anticipada del prisma ante una misma carga axial. Hamid et al. (2008) sugieren que las causas a estos esfuerzos de tensión son la



incompatibilidad en las propiedades de esfuerzo-deformación (incluyendo diferentes razones Poisson) de los materiales, compactación incompleta, la contracción plástica y por secado del concreto de relleno, así como factores geométricos (columnas de concreto actuando como una especie de cuña).

Por otra parte, Drysdale y Hamid (1979), Khalaf et al. (1994), (Khalaf, 1996) llegaron a la conclusión que, para tener los mejores resultados de la resistencia a compresión en los prismas rellenos, las características de deformación (como la razón de Poisson y la rigidez) entre el concreto de relleno y el bloque deben coincidir. De esta forma, los prismas rellenos podrían alcanzar valores superiores de  $f_m$  que los prismas huecos. Pero para que esto sea posible, Khalaf et al. (1994) indica que la resistencia del concreto de relleno debe ser entre 1.45 y 1.5 veces la resistencia del bloque. Además, como indica Sarhat y Sherwood (2018), solo una porción en la resistencia del concreto de relleno sería efectiva, en este caso, ya que la falla del prisma se caracteriza porque la falla del bloque ocurre antes de que el concreto de relleno se aplaste. Por lo tanto, se vuelve a reafirmar que el bloque es el factor más influyente en la determinación de  $f_m$ . Así que, en términos económicos y prácticos, no conviene incrementar tanto la resistencia del concreto de relleno.

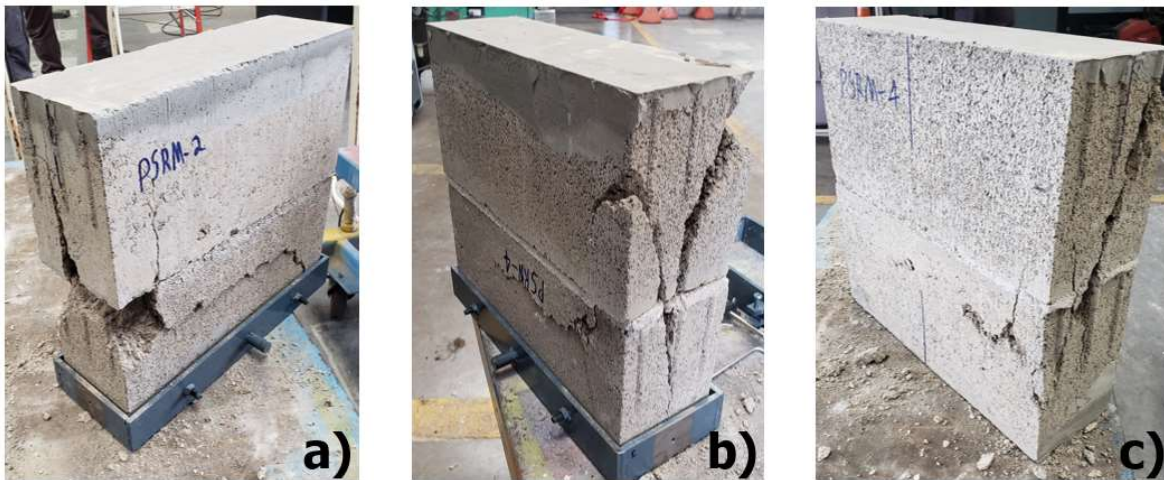
#### **4.7 Modos de falla**

Es importante mencionar que lo más apropiado para este tipo de pruebas de carga axial, es emplear prismas de al menos tres bloques de altura como lo señala Drysdale y Hamid (1979), Drysdale et al. (2008) y Khalaf (1996). Esto porque, se asemeja más al comportamiento real de un muro y permitiría la obtención de modos de falla más representativos. No obstante, entre mayores sean las alturas de los prismas, se vuelve menos práctico (especialmente por la manipulación). En consecuencia, se opta por utilizar prismas de dos bloques de altura.

Según Drysdale et al. (2008), el asunto de los prismas con razones de  $h_p/t_u$  inferiores a 2, es que estos tienden a generar fallas de cono-cortante debido a los efectos de confinamiento en los extremos de las placas, cuyo comportamiento no sucede en los muros, al ser elementos esbeltos. Por eso, los prismas, al tener una altura adecuada minimizan la influencia de este efecto de confinamiento y pueden exhibir un agrietamiento vertical sobre los bloques. En este estudio, a pesar de que los prismas fueran de dos bloques de altura, la relación de  $h_p/t_p$  fue mayor de 3. Como resultado, se observa un agrietamiento vertical en

casi todos los prismas y un efecto de confinamiento alejado, al no haber ningún caso con falla cono-cortante, como se detalla a continuación.

Los prismas vacíos, casi en su totalidad, mostraron una falla de tipo cónica y grieta vertical como se muestra en la Figura 27a) y 27b). En una cantidad muy reducida se presentó la falla de cortante la cual corresponde a la Figura 27c). Mientras que, los prismas rellenos, como se ilustra en Figura 28a), la falla predominante fue un agrietamiento vertical a lo largo de su altura (separación de la pared externa). Además, en menor proporción se observaron fallas por cortante y cono vertical como se visualiza en la Figura 28b) y 28c), respectivamente.



**Figura 27.** Modos de falla típicos de los prismas huecos: a), b) falla de cono y grieta vertical y C) falla de cortante



**Figura 28.** Modos de falla típicos de los prismas rellenos: a) falla por separación de la pared externa, b) falla de cortante y c) falla de cono y grieta vertical

De lo anterior, los prismas huecos y rellenos presentaron principalmente un agrietamiento vertical (fallas 3 y 7 de la Figura 7) de los bloques, similar al comportamiento observado por Fortes et al. (2014) y Cheema y Klinger (1986), producida por la expansión lateral del mortero y el concreto de relleno, según el caso.

Además, los modos de falla observados coinciden, por ejemplo, con los estudios de Carvajal (2000) y Vaca (2019), los cuales emplearon valores similares de  $h_p/t_p$  (3.3 y 2.79 respectivamente). Vaca obtuvo principalmente fallas de cono-grieta vertical y también separación de la pared externa. Mientras que Carvajal reportó un agrietamiento sobre el eje vertical del prisma relleno.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

#### *5.1.1 Resistencia a la compresión de los prismas*

El componente más influyente sobre la resistencia a la compresión de la mampostería hueca y rellena es la resistencia del bloque. El factor de eficiencia promedio obtenido en este estudio fue de 1.06.

La resistencia a la compresión promedio de la mampostería resultó ser de 206 kg/cm<sup>2</sup> lo cual superó la resistencia mínima especificada en el CSCR20-14 (100 kg/cm<sup>2</sup> cuando no se tienen pruebas experimentales) aun cuando el concreto de relleno y el mortero (en un caso) no alcanzaron las resistencias a compresión mínimas especificadas.

El mortero tiene poco aporte en la resistencia de los prismas. Un aumento del 139% en la resistencia a compresión del mortero se refleja un incremento apenas del 6,5% en la resistencia a la compresión de la mampostería. Además, el aporte de la resistencia del mortero es todavía menor en los prismas rellenos que en los prismas huecos. Donde este incremento en la resistencia del mortero significó apenas un aumento de 2,1 % en la resistencia a la compresión de los prismas rellenos.

Los prismas rellenos (sobre el área bruta) presentaron una disminución de 11 % en la resistencia a la compresión con respecto a los prismas vacíos (sobre el área neta) probablemente porque hubo una incompatibilidad de deformaciones entre el bloque y el concreto de relleno.

De manera predominante, la falla en los prismas fue ocasionada por un agrietamiento vertical sobre el bloque. El modo de falla predominante en los prismas huecos fue de tipo cono y grieta vertical. Por otra parte, los prismas rellenos mostraron principalmente la falla tipo separación de la pared externa.

Se comprobó que a mayores razones de esbeltez ( $h_p/t_p$  superior a 2) en los prismas el efecto de confinamiento producido por las placas es menor.

### **5.1.2 Módulo Elasticidad**

El módulo de elasticidad de la mampostería fue de 162 430 kg/cm<sup>2</sup> (15 934 MPa). Donde se presentó una alta dispersión en los prismas vacíos y rellenos, como se ha observado en otras investigaciones. En los prismas rellenos el coeficiente de variación fue de 11,1% a 21,5 %, mientras que en los prismas huecos este valor se ubicó en el rango de 21,3 % a 40,6 %.

Se obtuvo una relación promedio de  $E_m/f'_m$  de 778, valor que se ubica por encima de lo señalado por el CSCR 2010-14 en su sección 9.3.4 (750), pero es inferior a la expresión dada por el TMS 402-16 en su apartado 4.2.2 (900). De este modo, el valor del CSCR 2010-14 es más conservador y pareciera que se ajusta mejor al comportamiento de la mampostería nacional.

### **5.1.3 Deformación última**

La deformación unitaria ultima para todos los prismas fue 0,0039. Los prismas rellenos presentan mayor deformación que los vacíos; siendo la deformación última de 0,0045 y 0,0033 respectivamente.

Basado en esta investigación e incluyendo los valores medidos hasta el momento a nivel local, el valor más apropiado para definir la deformación última de diseño es 0,0025, como se establece en el TMS 402-16 (sección 9.3) y que garantiza un valor más seguro donde la deformación real sea superior a la de diseño en una población de mayor tamaño en comparación con el valor del CSCR 2010-14 (sección 9.5.2).

## 5.2 Recomendaciones

Realizar más estudios con diferentes variables, por ejemplo: diferentes proveedores de los componentes (mortero, concreto de relleno y bloques), geometría de los bloques, relación de esbeltez, espesor de la junta de mortero, patrón de colocación del mortero, entre otros; que permitan aumentar el registro experimental y así obtener un comportamiento con mayor representatividad de la realidad nacional.

Efectuar estas pruebas con prismas cuyas alturas sean como mínimo de 3 bloques. De tal forma que se incremente la relación de esbeltez y obtener resultados más precisos del comportamiento real de los muros. Ya que a menores relaciones de altura y ancho de los prismas el efecto de confinamiento generado por las placas es mayor.

Evitar posibles excentricidades accidentales en el proceso de carga. Para lograr esto, es necesario garantizar la verticalidad durante la confección de los prismas, así como el correcto coronamiento de estos. Además, se requiere que los prismas estén completamente alineados y centrados antes de empezar la falla.

Como la medición de la carga aplicada y de las deformaciones se realizaron en dos plataformas diferentes, se obtuvo dos paquetes de datos: fuerza en función del tiempo y deformación en función del tiempo. De este modo, las deformaciones se asociaban al tiempo que se registraba en la máquina MTS-64 para coincidir la fuerza aplicada y la deformación. Sin embargo, de esta manera se pierde exactitud en el registro de los resultados, ya que manualmente se debe procurar iniciar la lectura de datos de ambos equipos en el mismo instante; de lo contrario el mínimo retraso, en uno de los equipos, provoca un desfase en los tiempos. Por ende, se sugiere que el registro de deformaciones pueda estar sincronizado con la máquina MTS-64 y así derivar la deformación real asociada a su respectiva carga.

Además, los sensores LVDT son muy sensibles a cualquier perturbación en el aditamento, por lo que una posible rotación o movimiento de los anillos podría generar una lectura de deformaciones no asociadas a las deformaciones verticales del prisma. Por lo tanto, se aconseja usar medidores láser de deformaciones para tener datos con mayor precisión.

Medir otras propiedades mecánicas como módulos de elasticidad, deformaciones, razones de Poisson, entre otras en el bloque, mortero de pega y concreto de relleno para determinar,

de manera precisa, la interacción entre sí y diferenciar la afectación de cada componente sobre el comportamiento del prisma.

## Referencias bibliográficas

- American Society for Testing Materials. (2016). *Standard Practice for Capping Concrete Masonry Units, Related Units and Masonry Prisms for Compression Testing*. (ASTM C1552).
- American Society for Testing Materials. (2017). *Standard Specification for Mortar Cement*. (ASTM C1329).
- American Society for Testing Materials. (2019). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. (ASTM C270).
- American Society for Testing Materials. (2020). *Standard Test Method for Sampling and Testing Grout*. (ASTM C1019).
- American Society for Testing Materials. (2021). *Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units*. (ASTM C90).
- American Society for Testing Materials. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. (ASTM C109).
- American Society for Testing Materials. (2021). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*. (ASTM C140).
- American Society for Testing Materials. (2021). *Standard Specification for Compression Testing Machine Requirements for Concrete Masonry Units, Related Units and Prisms*. (ASTM C1716).
- American Society for Testing Materials. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms*. (ASTM C1314).
- Amrhein, E. & Porter, M. (2009). *Reinforced Masonry Engineering Handbook: Clay and Concrete Masonry*. (6<sup>th</sup> edition). Masonry Institute of America and International Code Council.
- Boult, B. (1979). Concrete Masonry Prism Testing. *Journal of the American Concrete Institute*, 76(24), 513-535.



- Carvajal, W. (2000). *Propiedades mecánicas de la mampostería de bloques rellenos de concreto de 12x20x20 cm.* [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Cascante, L. (2001). *Propiedades mecánicas de la mampostería de bloques rellenos de concreto de 12x20x20 cm.* [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Chaves, D. (2016). *Análisis de la consolidación del concreto de relleno en mampostería de 12 cm de espesor utilizando las dosificaciones del Código Sísmico de Costa Rica 2010.* [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Cheema, T. & Klinger (1986). Compressive Strength of Concrete Masonry Prisms. *Journal of the American Concrete Institute*, 83(11), 88-97.
- Chrysler, J. Baltimore, C. & Escobar, T. (2007). *Masonry Design Manual.* (4<sup>th</sup> edition). Masonry Institute of America and International Code Council.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (CFIA). (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010* (2014). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Drysdale, R. & Hamid, A. (1979) Behavior Characteristics of Block Masonry under Axial Compression. *Journal of the American Concrete Institute*, 76(6), 707-722.
- Drysdale, R. & Wong, H. (1985). Compression Characteristics of Concrete Block Masonry Prisms. *Masonry Research of American Society for Testing and Materials STP 879*, 166-177
- Fortes, E., Parsekian, G. & Fonseca, F. (2014). Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units. *Journal of the American Society of Civil Engineers*, 27(9), 1-12.
- Hamid, A. (1978). *Behavior Characteristics of Concrete Masonry.* [Thesis for the Degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering, McMaster University, Ontario, Canada].

- Hamid, A. & Drysdale, R. (1979). Suggested Failure Criteria for Grouted Concrete Masonry Under Axial Compression. *Journal of the American Concrete Institute*, 76 (43),1047-1061.
- Hamid, A., Drysdale R. & Baker, L. (2008). *Masonry Structures Behavior and Design*. 3<sup>rd</sup> edition, Prentice Hall.
- Hidalgo, D. (13 de febrero, 2023). Muros de mampostería en Costa Rica. Blog LanammeUCR. <https://bloglanammeucr.wordpress.com/2020/02/13/muros-de-mamposteria-en-costa-rica/>
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2014). *Mortero para unidades de mampostería. Requisitos*. (INTE C91).
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2015). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería*. (INTE C55).
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2018). *Práctica para el coronamiento de unidades de mampostería de concreto. Unidades relacionadas y prismas de mampostería para ensayos de compresión*. (INTE C53).
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2018). *Morteros y mampostería. Muestreo y ensayos de concreto de relleno para mampostería hueca de concreto*. (INTE C56).
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2021). *Morteros y mampostería. Muestreo y método de ensayo de unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas. Método de ensayo*. (INTE C50).
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2021). *Unidades de mampostería de concreto para uso estructural. Requisitos*. (INTE C90).
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2022). *Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas)*. Método de ensayo. (INTE C57).
- INTACO (2023). *CRC Convencional: Concreto de relleno de celdas de bloques [Ficha técnica]*. [https://www.intaco.com/costa-rica/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/ft\\_crc\\_convencional.pdf](https://www.intaco.com/costa-rica/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/ft_crc_convencional.pdf)

- Khalaf, F. (1996). Factor Influencing Compressive Strength of Concrete Masonry Prisms. *Magazine of Concrete Research*, 48(175), 95-101.
- Khalaf, F., Hendry, A. & Fairbairn, D. (1992). Mechanical properties of materials used in concrete blockwork construction. *Magazine of Concrete Research*, 44 (158), 1-14.
- Khalaf, F., Hendry, A. & Fairbairn, D. (1994). Study of the Comprehensive Strength of Blockwork Masonry. *Journal of the American Concrete Institute*, 91 (4), 367-375.
- Masonry Institute of America. (2006). *Masonry: Codes and Specifications*. Masonry Institute of America and the International Code Council.
- Masonry Standards Joint Committee. (2016). *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures*. The Masonry Society, The American Concrete Institute and American Society of Civil Engineers.
- Mata, C. (1979). *Ensayos de las propiedades mecánicas de la mampostería de bloques de concreto*. [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Minaie, E., Moon, F. & Hamid, A. (2009). In-Plane Shear Resistance of Partially Grouted Reinforced Concrete Masonry Shear Walls [Fotografía]. [http://canadamasonrydesigncentre.com/download/11th\\_symposium/A2-1.pdf](http://canadamasonrydesigncentre.com/download/11th_symposium/A2-1.pdf)
- Nally, J. (s.f). *Stonehenge* [Fotografía]. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/viaje-y-aventuras/stonehenge?gallery=9351&image=9796.600x450>
- Navas, A. (1999). *Propiedades mecánicas de la mampostería de concreto*. [Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Navas, A. (2007). Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto. *Revista Ingeniería*, 17 (2), 53-70. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/7746/7410>
- Navas, A. (2022). *Estructuras de mampostería*. Manual del curso IC-1014: Diseño de estructuras de mampostería. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

- Navas, A. & Salazar, J. (2014). Propiedades geométricas de los bloques y la mampostería de concreto. *Revista Ingeniería*, 24 (2), 129-130. [https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/13929/pdf\\_27](https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/13929/pdf_27)
- Núñez, B. (2019). Caracterización de la curva esfuerzo-deformación de prismas de mampostería con bloques de concreto de 120 mm y 150 mm de espesor bajo carga axial concéntrica. [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Rodríguez, F. (1986). *Pruebas de mampostería de bloques de concreto*. [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Rodríguez, R. (1999). *Medición de las propiedades estructurales en la mampostería de bloques de concretos rellenos de 15x20x40*. [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica].
- Sarhat, A. & Sherwood, E. (2013). The prediction of compressive strength of grouted hollow concrete block masonry based on the contributions of its individual components. *Construction and Building Materials*, 394 (58), 111-121. [https://www.researchgate.net/publication/311799976\\_The\\_prediction\\_of\\_compressive\\_strength\\_of\\_grouted\\_hollow\\_concrete\\_block\\_masonry\\_based\\_on\\_the\\_contributions\\_of\\_its\\_individual\\_components](https://www.researchgate.net/publication/311799976_The_prediction_of_compressive_strength_of_grouted_hollow_concrete_block_masonry_based_on_the_contributions_of_its_individual_components).
- Vaca, C. (2019). *Curva esfuerzo-deformación de mampostería con bloques de 20x20x40 cm y 13.6x13.6x28.6 cm*. [Proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica].

## **Apéndices**

### **Apéndice A. Resistencia a la compresión del mortero**

**Tabla A 1.** Resistencia a la compresión del mortero tipo M

Espécimen	Mortero Tipo M		
	Fuerza máxima		$f_{mor}$
	kN	MPa	
1	41,3	16,5	168
2	42,0	16,8	171
3	43,6	17,4	178
<b>Promedio</b>	<b>42,3</b>	<b>16,9</b>	<b>172</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>1,2</b>	<b>0,5</b>	<b>4,8</b>
<b>Coefficiente variación (%)</b>		<b>2,8</b>	

**Tabla A 2.** Resistencia a la compresión del mortero tipo S

Espécimen	Mortero Tipo S		
	Fuerza máxima		$f_{mor}$
	kN	MPa	
1	38,7	15,5	158
2	40,1	16,0	164
3	38,7	15,5	158
<b>Promedio</b>	<b>39,2</b>	<b>15,7</b>	<b>160</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>	<b>3,3</b>
<b>Coefficiente variación (%)</b>		<b>2,1</b>	

**Tabla A 3.** Resistencia a la compresión del mortero tipo N

Espécimen	Mortero Tipo N		
	Fuerza máxima		$f_{mor}$
	kN	MPa	
1	19,3	7,7	79
2	15,2	6,1	62
3	18,6	7,4	76
<b>Promedio</b>		<b>7,1</b>	<b>72</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>0,9</b>	<b>8,9</b>
<b>Coefficiente variación (%)</b>			<b>12,4</b>

## **Apéndice B. Prismas de concreto de relleno**

**Tabla B 1.** Medidas de los prismas de concreto de relleno según el tipo del prisma de mampostería

Prismas de mampostería	Espécimen	Ancho $w$	Alto $h$	$h/w$
	No.	mm	mm	-
PRM	1	94	194	2,1
	2	92	194	2,1
	3	92	192	2,1
PRS	1	98	196	2,0
	2	96	194	2,0
	3	94	194	2,1
PRN	1	96	196	2,0
	3	96	194	2,0

**Tabla B 2.** Resistencia a la compresión de los prismas de concreto de relleno asociados a los PRM

Espécimen	A	Fuerza máxima		$f_g$
	mm <sup>2</sup>	kN	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
1	8728	132,0	15,1	154,1
2	8450	115,0	13,6	138,7
3	8460	126,0	14,9	151,9
<b>Promedio</b>			<b>14,5</b>	<b>148,2</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>0,8</b>	<b>8,3</b>
<b>Coefficiente de variación</b>			<b>5,6%</b>	

**Tabla B 3.** Resistencia a la compresión de los prismas de concreto de relleno asociados a los PRS

Espécimen	A	Fuerza máxima		$f_g$
	mm <sup>2</sup>	kN	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
1	9436	127,9	13,6	138,2
2	9184	122,7	13,4	136,2
3	8904	115,4	13,0	132,1
<b>Promedio</b>			<b>13,3</b>	<b>135,5</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>0,3</b>	<b>3,1</b>
<b>Coefficiente de variación</b>			<b>2,3%</b>	



**Tabla B 4.** Resistencia a la compresión de los prismas de concreto de rellenos asociados a los PRN

Espécimen	A	Fuerza máxima		$f_g$
	mm <sup>2</sup>	kN	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
1	9338	145,1	15,5	158
3	9326	123,5	13,2	135
<b>Promedio</b>			<b>14,4</b>	<b>147</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>1,6</b>	<b>16,6</b>
<b>coeficiente de variación</b>				<b>11,3%</b>

## **Apéndice C. Mediciones de los prismas**

**Tabla C 1.** Dimensiones del ancho, largo y altura de los prismas rellenos con mortero tipo M

Dimensión	Medición (mm)	PRM-1	PRM-2	PRM-3	PRM-4	PRM-5
Ancho ( $t_p$ )	W1	120	121	121	121	120
	W2	121	120	120	120	120
	W3	120	121	121	121	121
	W4	122	120	120	120	121
	<b>Promedio</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>121</b>
Largo	L1	390	390	390	390	390
	L2	390	390	391	390	390
	L3	390	390	390	390	390
	L4	390	390	391	390	390
	<b>Promedio</b>	<b>390</b>	<b>390</b>	<b>391</b>	<b>390</b>	<b>390</b>
Altura ( $h_p$ )	H1	390	394	393	392	392
	H2	392	395	391	393	392
	H3	392	395	391	393	392
	H4	391	393	393	392	390
	<b>Promedio</b>	<b>391</b>	<b>394</b>	<b>392</b>	<b>393</b>	<b>392</b>

**Tabla C 2.** Dimensiones del ancho, largo y altura de los prismas vacíos con mortero tipo M

Dimensión	Medición (mm)	PSRM-1	PSRM-2	PSRM-3	PSRM-4	PSRM-5
Ancho ( $t_p$ )	W1	121	120	120	121	121
	W2	120	120	120	120	120
	W3	121	121	120	121	120
	W4	120	120	121	120	121
	<b>Promedio</b>	<b>121</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>121</b>	<b>121</b>
Largo	L1	390	389	390	390	390
	L2	390	391	390	390	390
	L3	390	390	390	390	390
	L4	391	390	390	390	391
	<b>Promedio</b>	<b>390</b>	<b>390</b>	<b>390</b>	<b>390</b>	<b>390</b>
Altura ( $h_p$ )	H1	388	388	390	389	390
	H2	392	389	393	389	390
	H3	390	387	393	387	388
	H4	390	389	394	389	389
	<b>Promedio</b>	<b>390</b>	<b>388</b>	<b>393</b>	<b>389</b>	<b>389</b>

**Tabla C 3.** Dimensiones del ancho, largo y altura de los prismas rellenos con mortero tipo N

Dimensión	Medición (mm)	PRN-1	PRN-2	PRN-3	PRN-4	PRM-5
Ancho ( $t_p$ )	W1	120	120	121	121	120
	W2	121	120	121	121	120
	W3	120	120	121	121	120
	W4	120	120	120	120	120
	<b>Promedio</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>120</b>
Largo	L1	390	390	391	390	390
	L2	390	391	391	390	390
	L3	391	391	390	391	390
	L4	390	390	391	390	391
	<b>Promedio</b>	<b>390</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>390</b>	<b>390</b>
Altura ( $h_p$ )	H1	393	389	397	394	391
	H2	392	389	398	393	392
	H3	392	389	396	394	392
	H4	393	388	394	391	393
	<b>Promedio</b>	<b>393</b>	<b>389</b>	<b>396</b>	<b>393</b>	<b>392</b>

**Tabla C 4.** Dimensiones del ancho, largo y altura de los prismas vacíos con mortero tipo N

Dimensión	Medición (mm)	PSRN-1	PSRN-2	PSRN-3	PSRN-4	PSRN-5
Ancho ( $t_p$ )	W1	121	120	121	121	121
	W2	120	121	120	120	120
	W3	121	121	121	120	121
	W4	120	121	120	120	120
	<b>Promedio</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>120</b>	<b>121</b>
Largo	L1	390	391	391	391	390
	L2	390	390	390	390	390
	L3	390	391	391	391	390
	L4	391	390	390	390	390
	<b>Promedio</b>	<b>390</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>390</b>
Altura ( $h_p$ )	H1	391	391	392	392	390
	H2	391	392	392	392	391
	H3	390	390	392	390	389
	H4	391	391	389	392	389
	<b>Promedio</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>392</b>	<b>390</b>

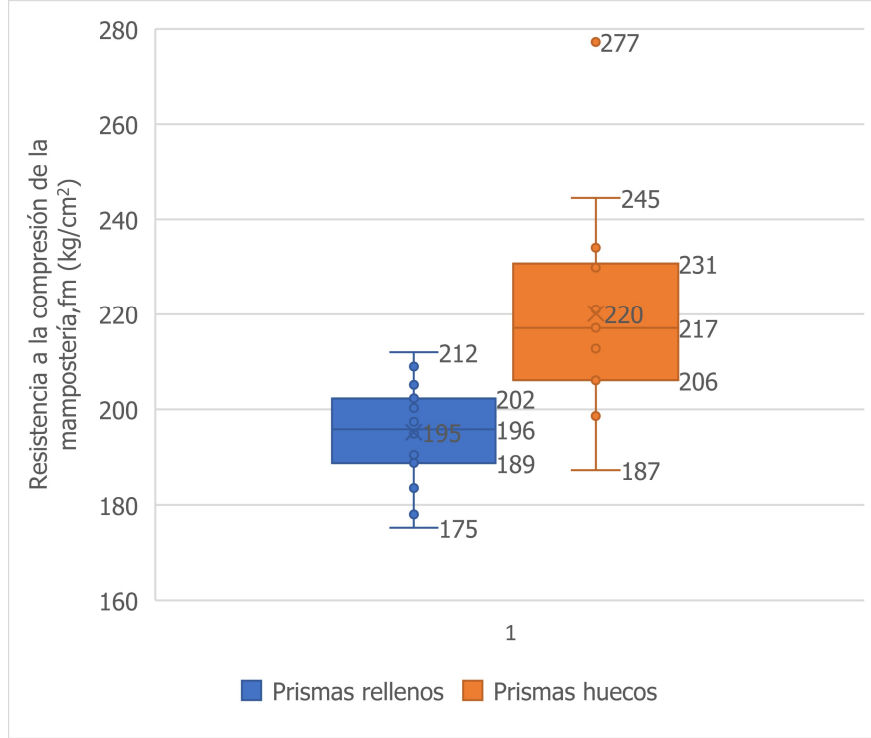
**Tabla C 5.** Dimensiones del ancho, largo y altura de los prismas rellenos con mortero tipo S

Dimensión	Medición (mm)	PRS-1	PRS-2	PRS-3	PRS-4	PRS-5
Ancho ( $t_p$ )	W1	121	121	121	121	120
	W2	122	120	120	121	120
	W3	120	120	120	121	120
	W4	120	120	120	121	120
	<b>Promedio</b>	<b>121</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>121</b>	<b>120</b>
Largo	L1	391	391	391	391	390
	L2	390	390	390	390	391
	L3	391	391	392	391	390
	L4	390	390	390	390	391
	<b>Promedio</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>391</b>
Altura ( $h_p$ )	H1	393	390	390	394	392
	H2	393	391	391	394	391
	H3	391	391	391	397	391
	H4	392	390	391	394	388
	<b>Promedio</b>	<b>392</b>	<b>391</b>	<b>391</b>	<b>395</b>	<b>391</b>

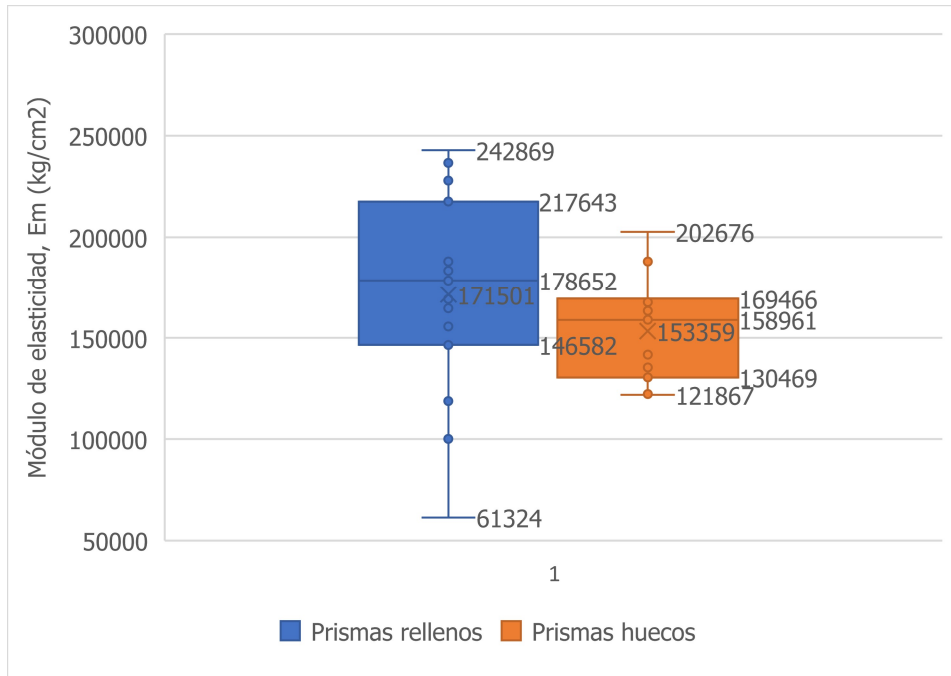
**Tabla C 6.** Dimensiones del ancho, largo y altura de los prismas vacíos con mortero tipo S

Dimensión	Medición (mm)	PSRS-1	PSRS-2	PSRS-3	PSRS-4	PSRS-5
Ancho ( $t_p$ )	W1	120	120	120	121	121
	W2	120	120	120	120	120
	W3	121	120	121	120	121
	W4	121	121	121	120	120
	<b>Promedio</b>	<b>121</b>	<b>120</b>	<b>121</b>	<b>120</b>	<b>121</b>
Largo	L1	391	390	390	391	390
	L2	390	390	391	390	390
	L3	391	390	390	392	391
	L4	390	391	390	390	391
	<b>Promedio</b>	<b>391</b>	<b>390</b>	<b>390</b>	<b>391</b>	<b>391</b>
Altura ( $h_p$ )	H1	391	390	392	395	391
	H2	391	392	393	390	391
	H3	390	392	394	393	391
	H4	390	392	394	392	391
	<b>Promedio</b>	<b>391</b>	<b>392</b>	<b>393</b>	<b>393</b>	<b>391</b>

## **Apéndice D. Detección de los valores atípicos (outliers)**

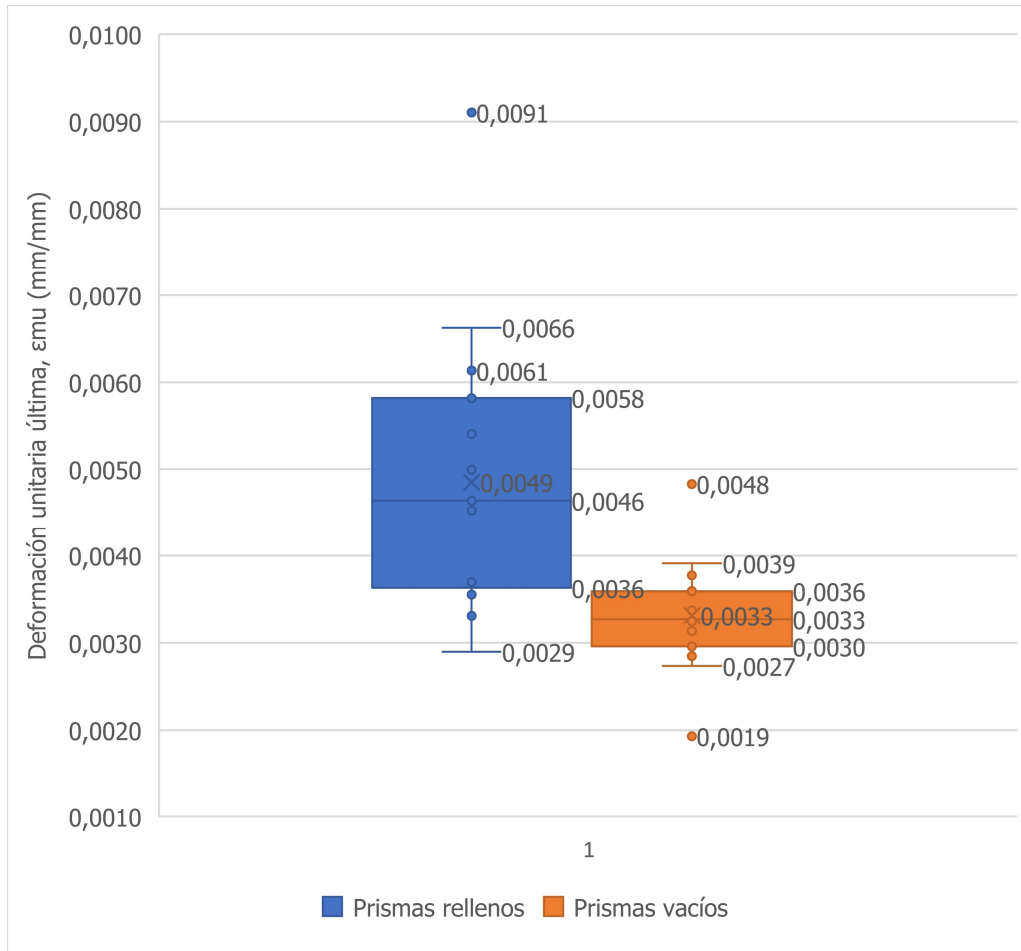


**Figura D 1.** Gráfico de cajas para la resistencia a la compresión de los prismas rellenos y huecos



**Figura D 2.** Gráfico de cajas para el módulo de elasticidad de los prismas rellenos y huecos





**Figura D 3.** Gráfico de cajas y bigotes para la deformación última de los prismas rellenos y huecos

**Apéndice E. Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de la mampostería**

**Tabla E 1.** Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de los PRM

Prisma	Carga máxima	Área neta	$h_p/t_p$	$F.C$	$f_m$	
	kN	mm <sup>2</sup>	-	-	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
PRM-1	850,6	47190	3,2	1,09	19,6	200
PRM-2	779,5	47190	3,3	1,09	18,0	184
PRM-3	803,7	47311	3,2	1,09	18,5	189
PRM-4	831,6	47190	3,2	1,09	19,2	196
PRM-5	871,1	47190	3,2	1,09	20,1	205
<b>Promedio</b>					<b>19,1</b>	<b>195</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,9</b>	<b>8,7</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>					<b>4,5</b>	
<b>Error Estándar</b>					<b>7,6</b>	

**Tabla E 2.** Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a compresión de los PSRM

Prisma	Carga máxima	Área neta	$h_p/t_p$	$F.C$	$f_m$	
	kN	mm <sup>2</sup>	-	-	MPa	kN
PSRM-1	514,4	26800	3,2	1,09	20,9	213
PSRM-2	589,8	26800	3,3	1,09	24,0	245
PSRM-3	534,8	26800	3,3	1,09	21,7	222
PSRM-4	556,5	26800	3,2	1,09	22,6	231
PSRM-5	533,1	26800	3,2	1,09	21,7	221
<b>Promedio</b>					<b>22,2</b>	<b>226</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>1,2</b>	<b>11,9</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>					<b>5,3</b>	
<b>Error estándar (%)</b>					<b>10,5</b>	

**Tabla E 3.** Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de los PRS

Prisma	Carga máxima	Área neta	$h_p/t_p$	$F.C$	$f_m$	
	kN	mm <sup>2</sup>	-	-	MPa	kN
PRS-1	889,7	47311	3,2	1,09	20,5	209
PRS-2	895,0	46920	3,3	1,09	20,8	212
PRS-3	845,8	46920	3,3	1,09	19,6	200
PRS-4	757,9	47311	3,3	1,09	17,5	178
PRS-5	854,2	46920	3,3	1,09	19,8	202
<b>Promedio</b>					<b>19,6</b>	<b>200</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>1,3</b>	<b>13,3</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>					<b>6,7</b>	
<b>Error estándar (%)</b>					<b>11,7</b>	

**Tabla E 4.** Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de los PSRS

Prisma	Carga máxima	Área neta	$h_p/t_p$	$F.C$	$f_m$	
	kN				mm <sup>2</sup>	MPa
PSRS-1	497,1	26800	3,2	1,09	20,2	206
PSRS-3	554,6	26800	3,2	1,09	22,6	230
PSRS-4	482,5	26800	3,3	1,09	19,6	200
PSRS-5	564,6	26800	3,2	1,09	23,0	234
<b>Promedio</b>					<b>21,3</b>	<b>218</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>1,7</b>	<b>17,0</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>					<b>7,8</b>	
<b>Error estándar (%)</b>					<b>14,9</b>	

**Tabla E 5.** Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de los PRN

Prisma	Carga máxima	Área neta	$h_p/t_p$	$F.C$	$f_m$	
	kN				mm <sup>2</sup>	MPa
PRN-1	802,3	46800	3,3	1,09	18,7	190
PRN-2	824,6	46920	3,2	1,09	19,2	195
PRN-3	829,8	47311	3,3	1,09	19,1	195
PRN-4	744,2	47190	3,2	1,09	17,2	175
PRN-5	831,4	46800	3,3	1,09	19,4	197
<b>Promedio</b>					<b>18,7</b>	<b>191</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>0,9</b>	<b>9,0</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>					<b>4,7</b>	
<b>Error estándar (%)</b>					<b>7,9</b>	

**Tabla E 6.** Área neta, relación  $h_p/t_p$ , factor de corrección y resistencia a la compresión de los PSRN

Prisma	Carga máxima	Área neta	$h_p/t_p$	$F.C$	$f_m$	
	kN				mm <sup>2</sup>	MPa
PSRN-1	523,6	26800	3,2	1,09	21,3	217
PSRN-2	513,1	26800	3,2	1,09	20,9	213
PSRN-3	479,0	26800	3,2	1,09	19,5	199
PSRN-4	500,1	26800	3,3	1,09	20,3	207
PSRN-5	451,7	26800	3,2	1,09	18,4	187
<b>Promedio</b>					<b>20,1</b>	<b>205</b>
<b>Desviación estándar</b>					<b>1,2</b>	<b>11,9</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>					<b>5,8</b>	
<b>Error estándar (%)</b>					<b>10,4</b>	

## **Apéndice F. Módulo de elasticidad y relación $E_m/f_m$**

**Tabla F 1.** Módulo de elasticidad y relación  $E_m/f_m$  para los prismas rellenos

Espécimen	$f_m$	$E_m$	$E_m/f_m$
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	-
PRM-1	200	183444	916
PRM-2	184	227956	1242
PRM-3	189	100184	531
PRM-4	196	236660	1209
PRM-5	205	188119	917
PRN-1	190	180496	948
PRN-2	195	118811	608
PRN-3	195	217643	1117
PRN-4	175	61324	350
PRN-5	197	164751	835
PRS-1	209	169304	810
PRS-2	212	242869	1146
PRS-3	200	155724	777
PRS-4	178	178652	1004
PRS-5	202	146582	725
<b>Promedio</b>		<b>171501</b>	<b>876</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>50799</b>	<b>254</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>		<b>29,6</b>	<b>29,1</b>

**Tabla F 2.** Módulo de elasticidad y relación  $E_m/f'_m$  para los prismas rellenos

Espécimen	$f_m$	$E_m$	$E_m/f_m$
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	-
PSRM-1	213	137249	644
PSRM-2	245	163355	668
PSRM-3	222	130469	588
PSRM-4	231	141792	615
PSRM-5	221	167726	759
PSRN-1	217	188126	867
PSRN-2	213	122372	575
PSRN-3	199	135478	682
PSRN-4	207	169466	817
PSRN-5	187	158961	849
PSRS-1	206	125487	609
PSRS-2	277	202676	731
PSRS-3	230	169925	739
PSRS-4	200	121867	609
PSRS-5	234	165433	707
<b>Promedio</b>		<b>153359</b>	<b>786</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>24820</b>	<b>209</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>		<b>16,2</b>	<b>26,6</b>

**Apéndice G. Deformación última de los prismas de  
mampostería**



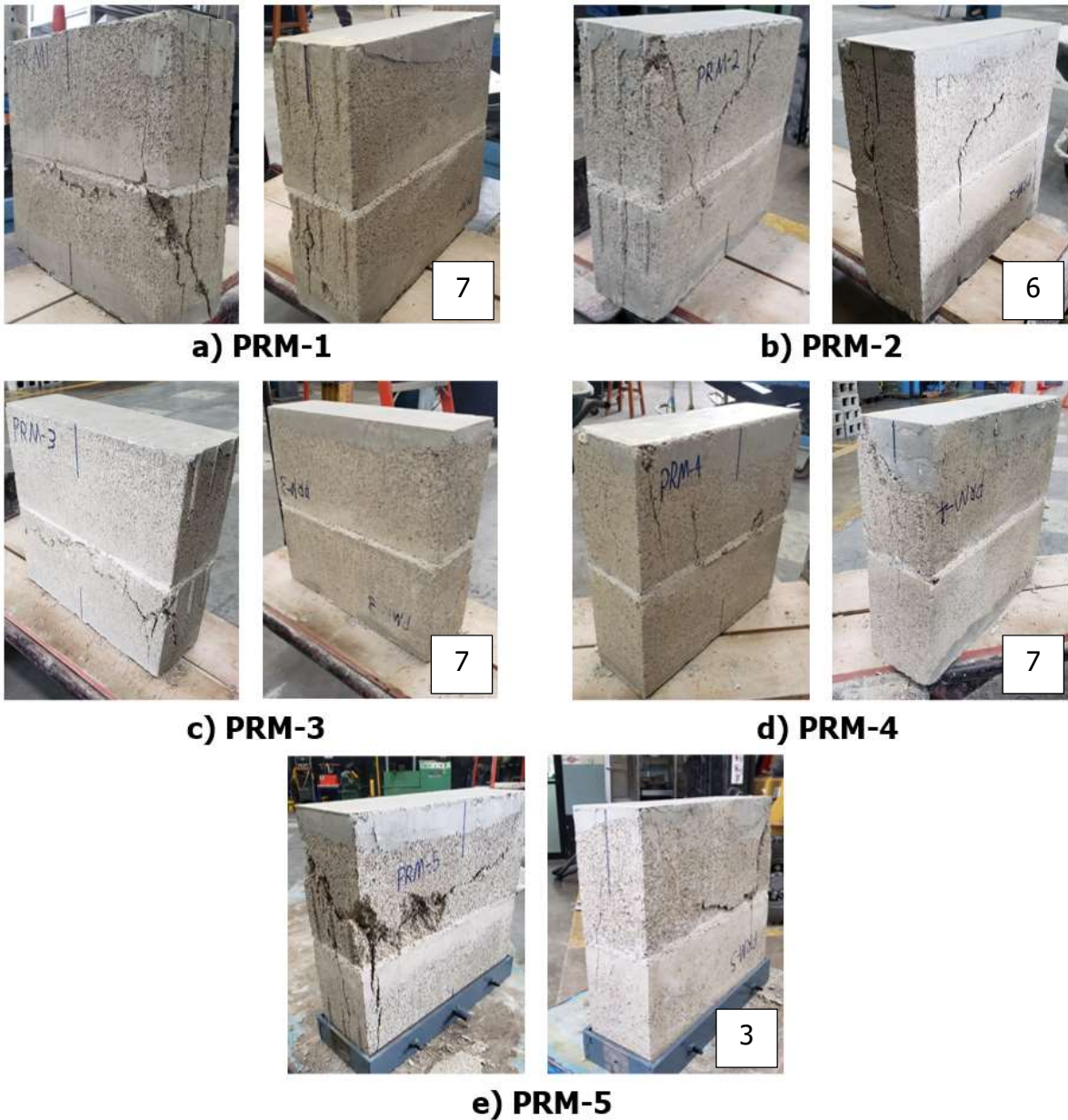
**Tabla F 3.** Deformación última de los prismas rellenos

Espécimen	$\epsilon_{mu}$
	mm/mm
PRM-1	0,0037
PRM-2	0,0029
PRM-4	0,0047
PRM-5	0,0036
PRN-1	0,0058
PRN-2	0,0066
PRN-3	0,0045
PRN-4	0,0054
PRN-5	0,0038
PRS-1	0,0036
PRS-2	0,0046
PRS-3	0,0033
PRS-4	0,0061
PRS-5	0,0050
<b>Promedio</b>	<b>0,0045</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,0011</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>25,1</b>

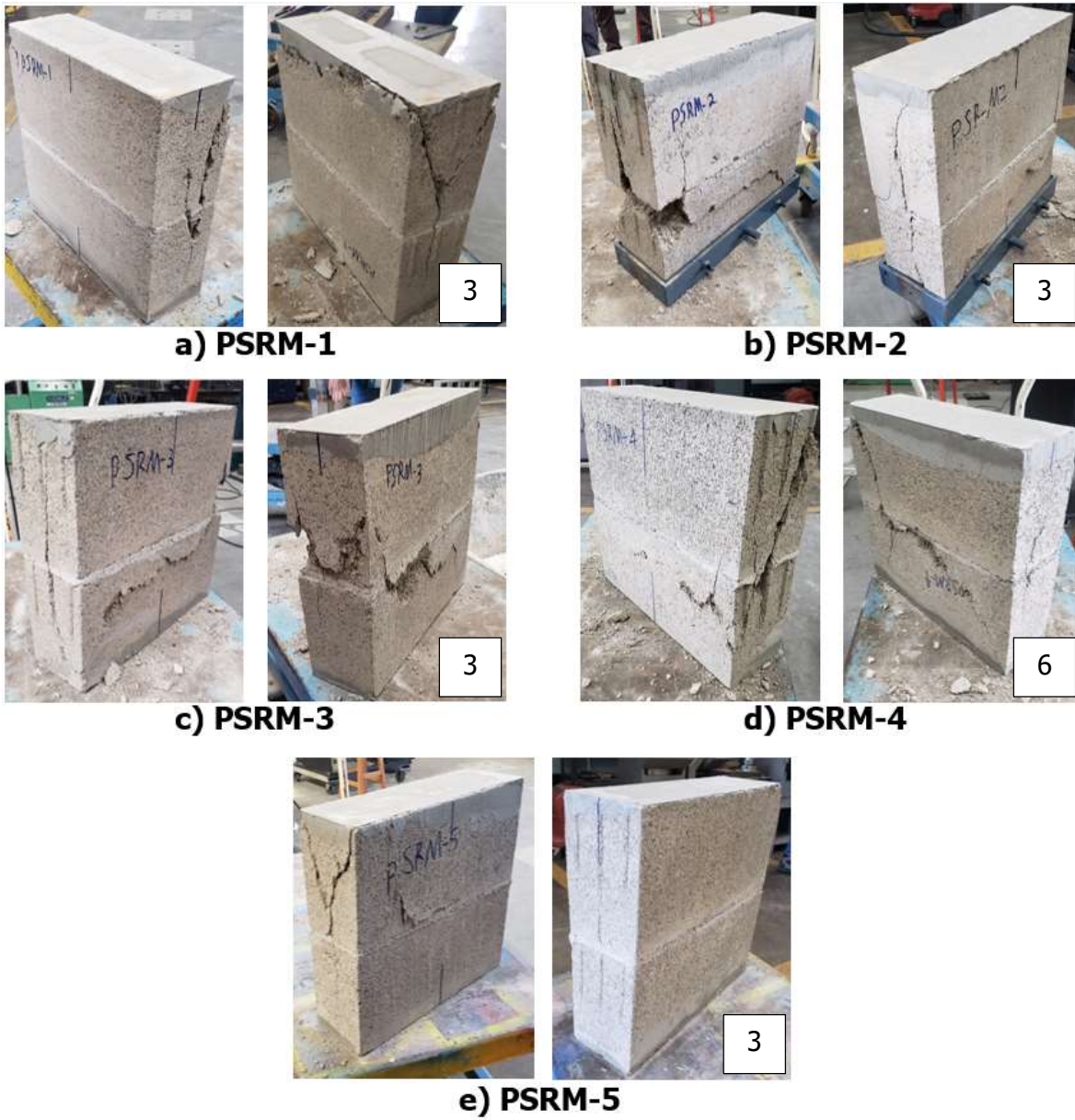
**Tabla F 4.** Deformación última de los prismas vacíos

Espécimen	$\epsilon_{mu}$
	mm/mm
PSRM-1	0,0028
PSRM-2	0,0034
PSRM-3	0,0036
PSRM-5	0,0027
PSRN-1	0,0034
PSRN-2	0,0032
PSRN-3	0,0031
PSRN-4	0,0034
PSRS-1	0,0033
PSRS-2	0,0039
PSRS-3	0,0038
PSRS-4	0,0030
PSRS-5	0,0032
<b>Promedio</b>	<b>0,0033</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>0,0003</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>10,4</b>

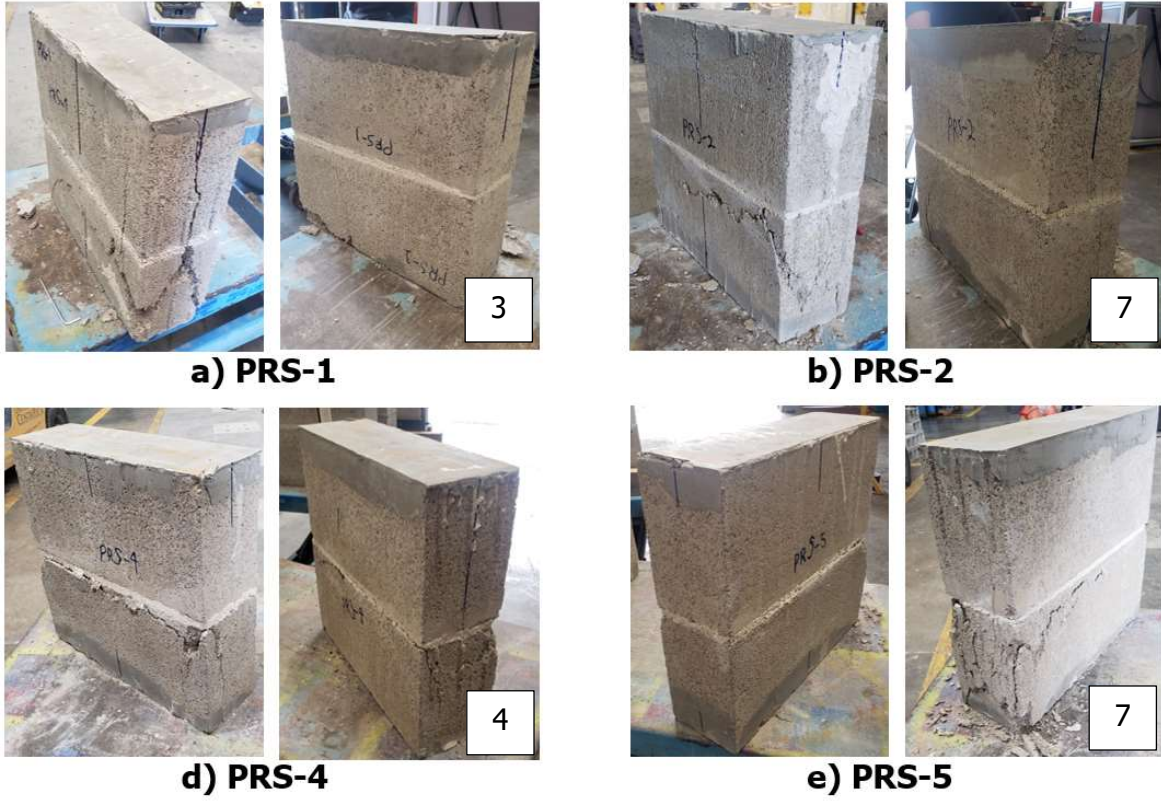
## **Apéndice H. Modos de falla de los prismas de mampostería**



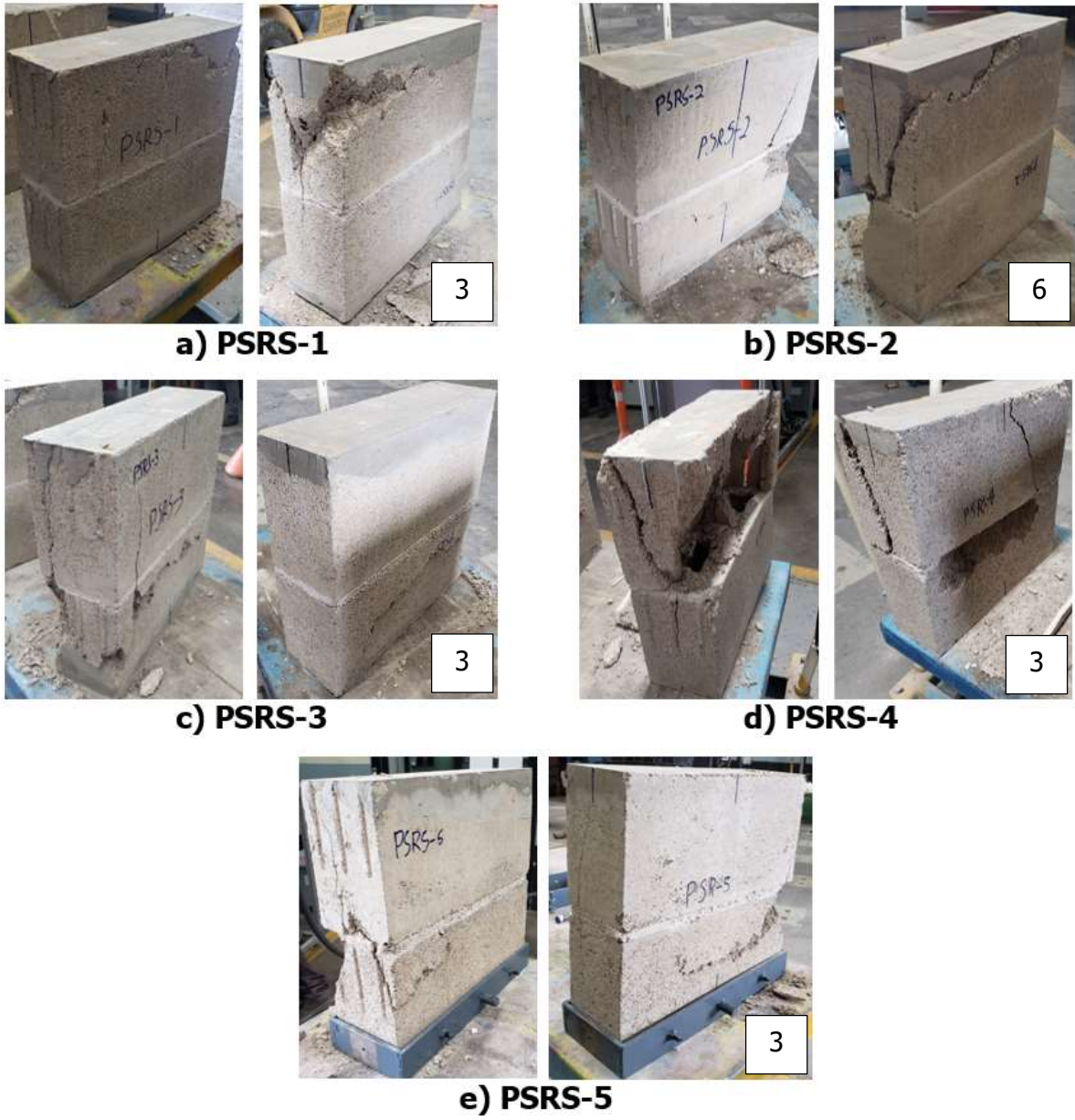
**Figura H 1.** Modos de falla de los prismas PRM según el número de falla de la norma INTE C55



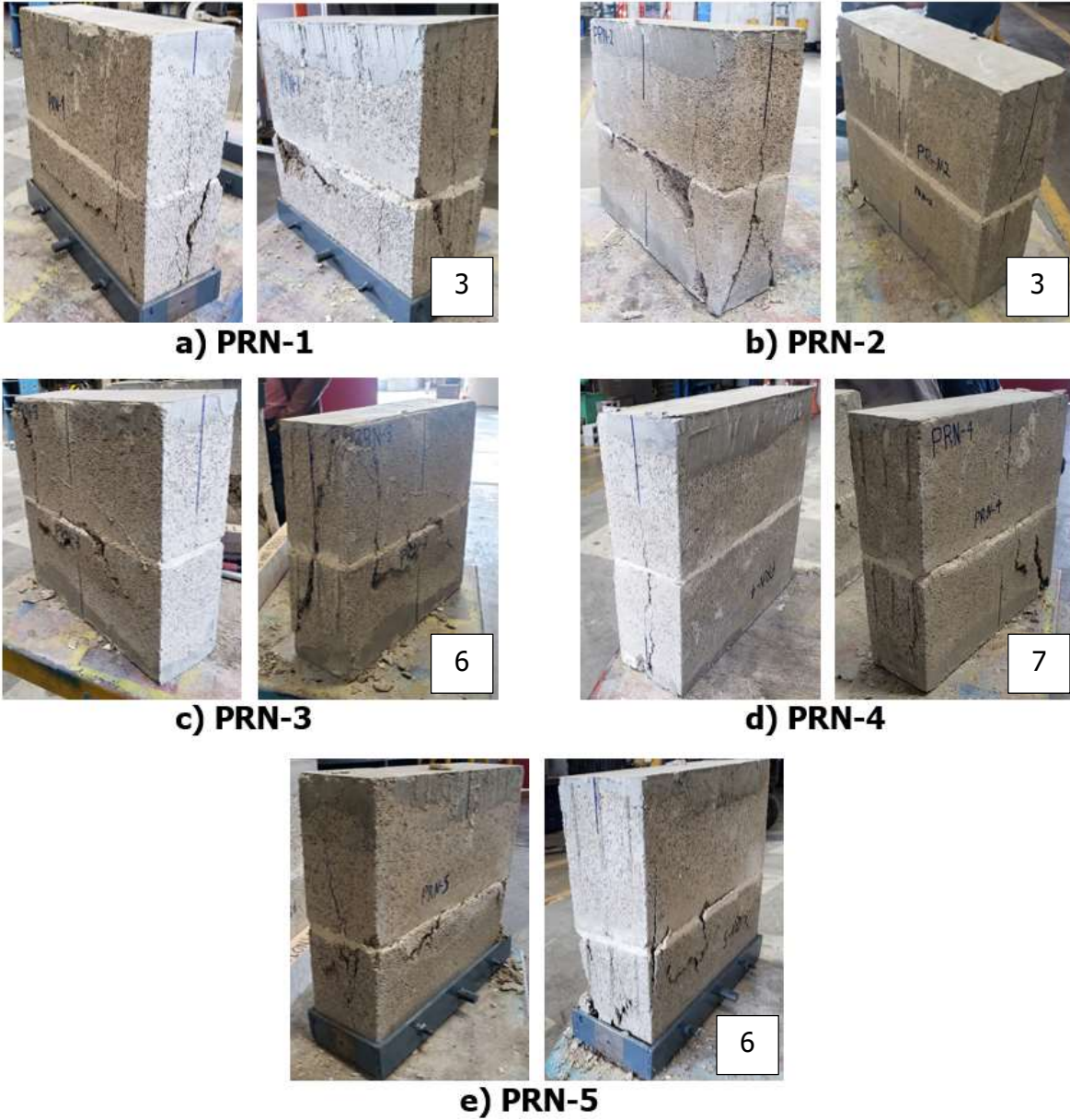
**Figura H 2.** Modos de falla de los prismas PSRM según el número de falla de la norma INTE C55



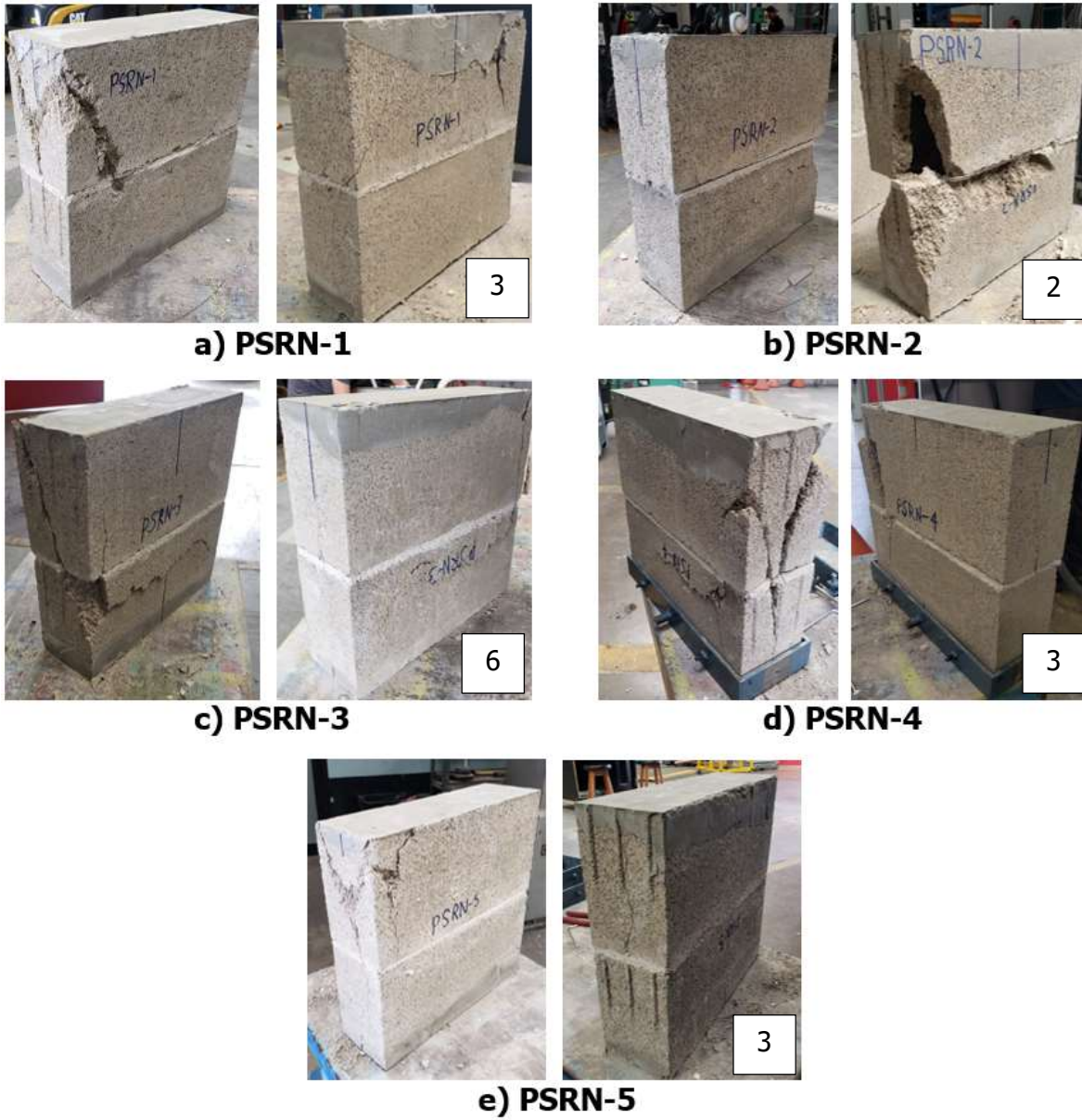
**Figura H 3.** Modos de falla de los prismas PRS según el número de falla de la norma INTE C55



**Figura H 4.** Modos de falla de los PSRS según el número de falla de la norma INTE C55



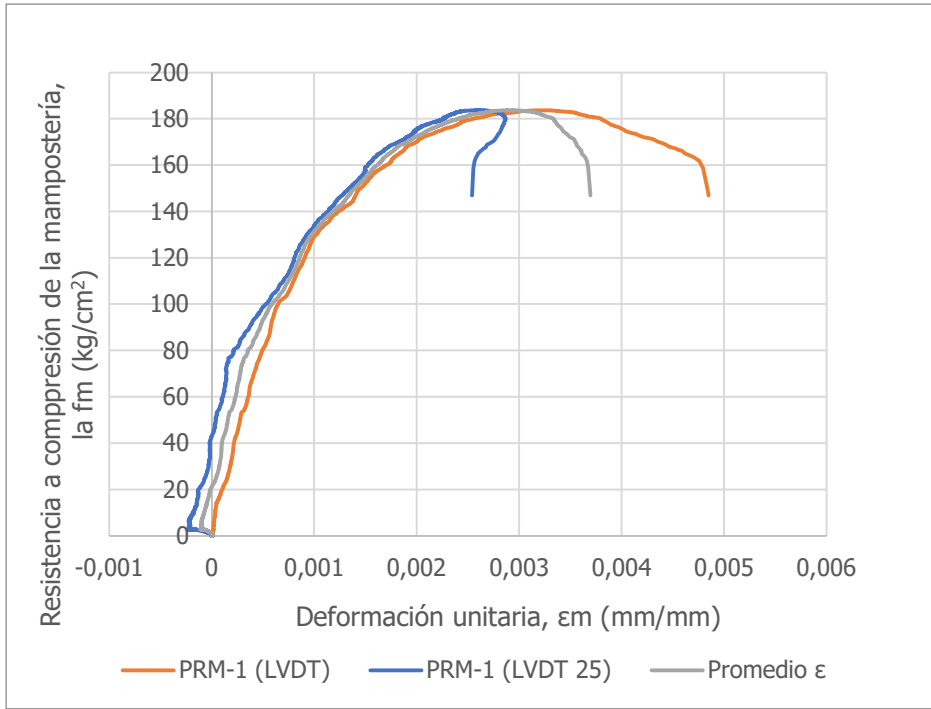
**Figura H 5.** Modos de falla de los PRN según el número de falla de la norma INTE C55



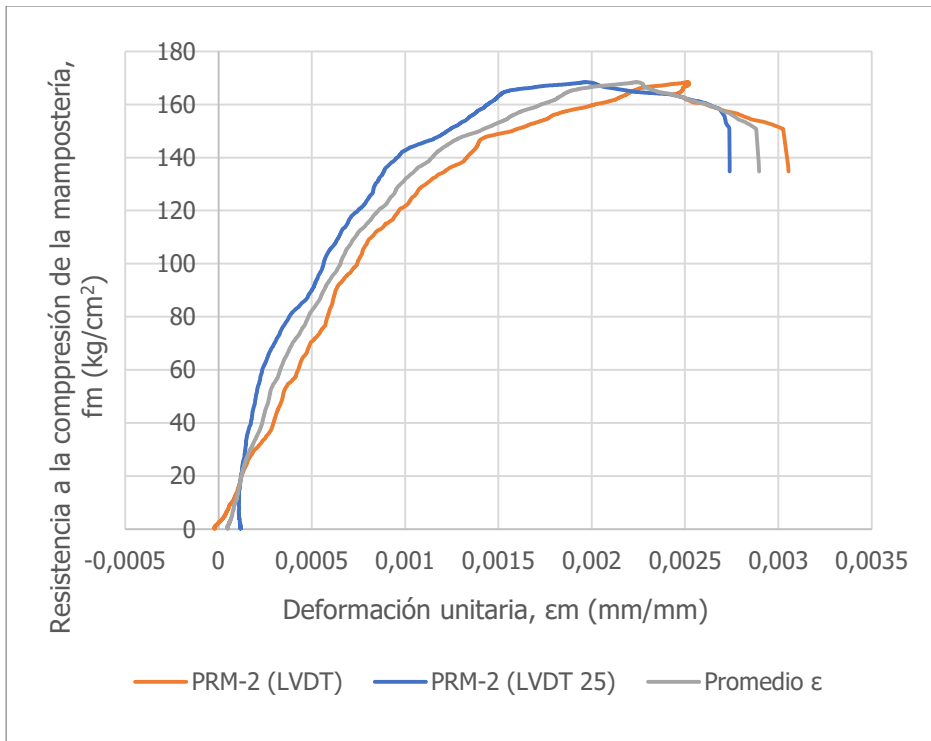
**Figura H 6.** Modos de falla de los PSRN según el número de falla de la norma INTE C55



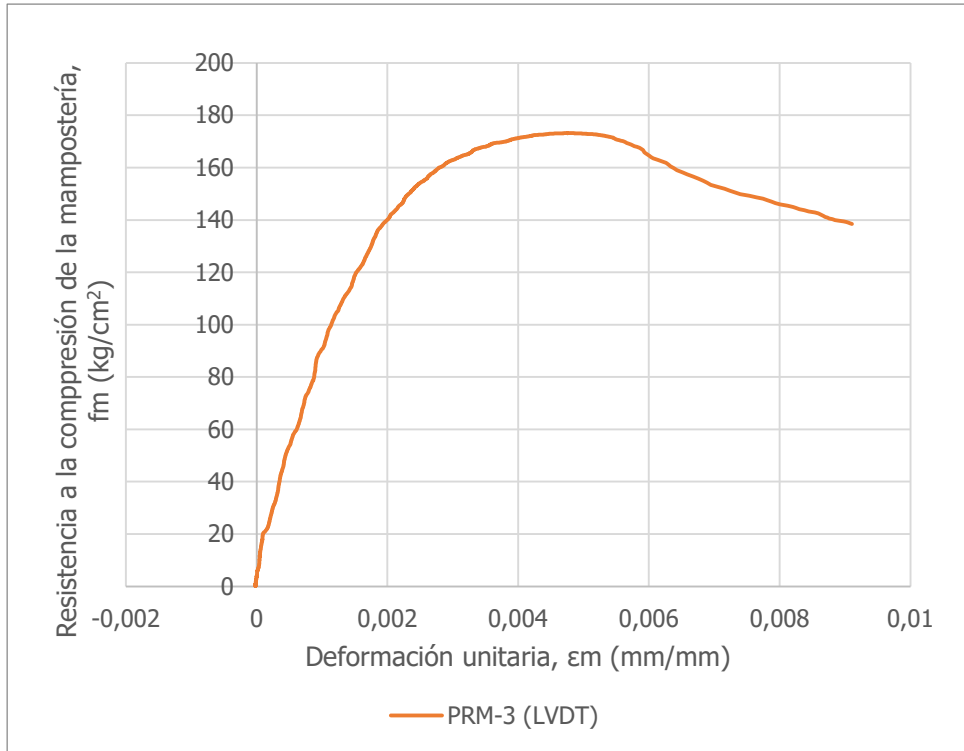
## **Apéndice I. Curvas esfuerzo-deformación**



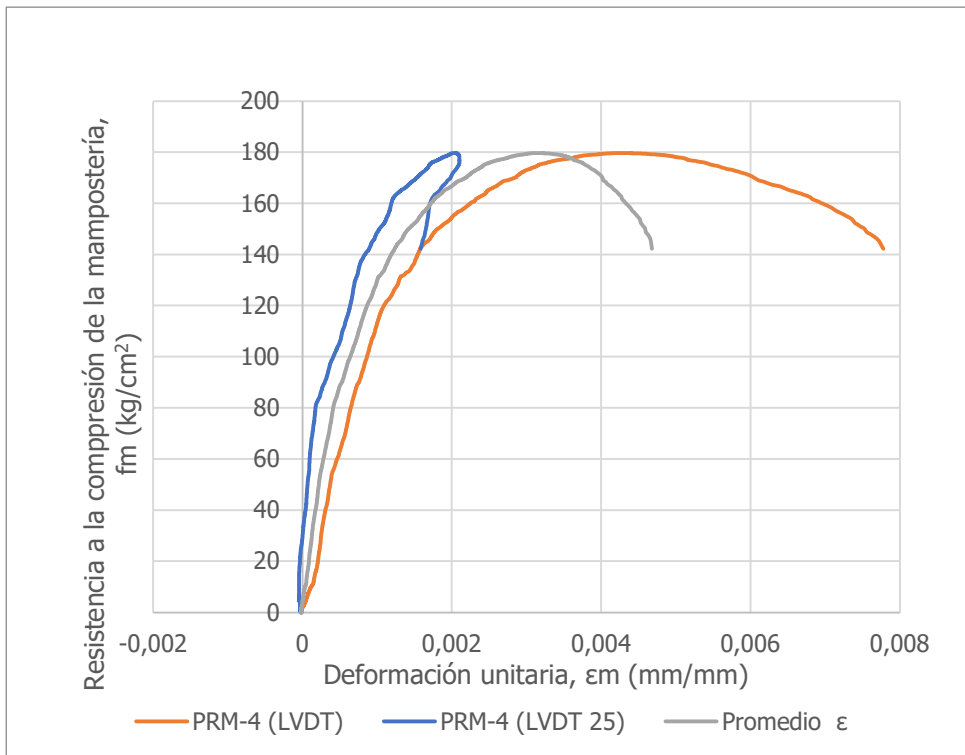
**Figura I 1.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRM-1



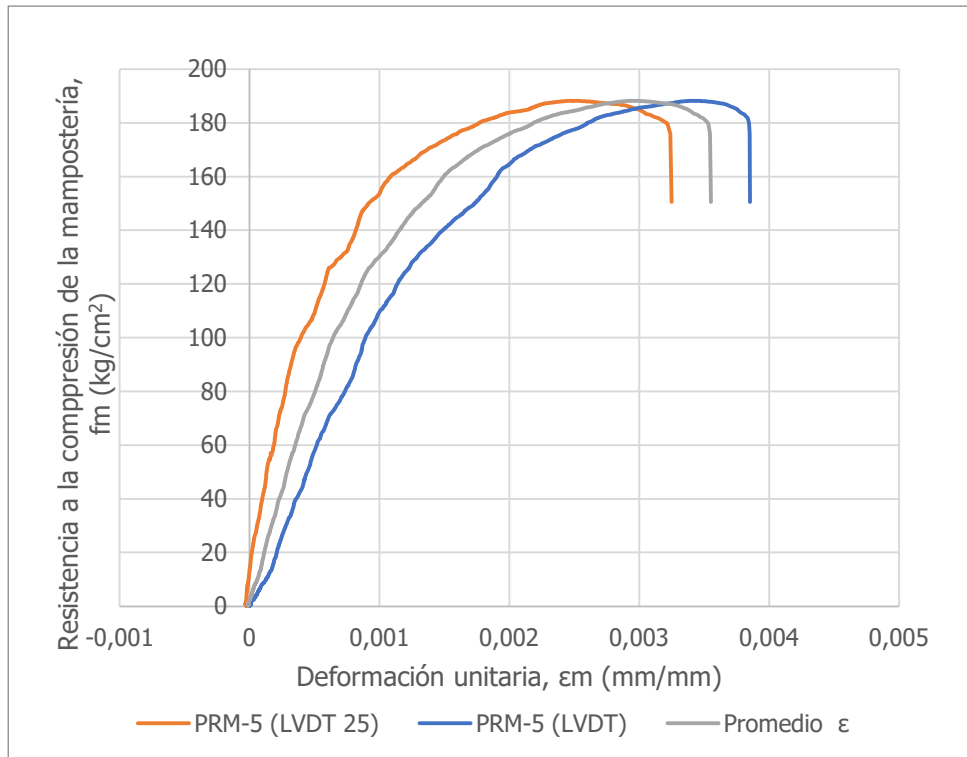
**Figura I 2.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRM-2



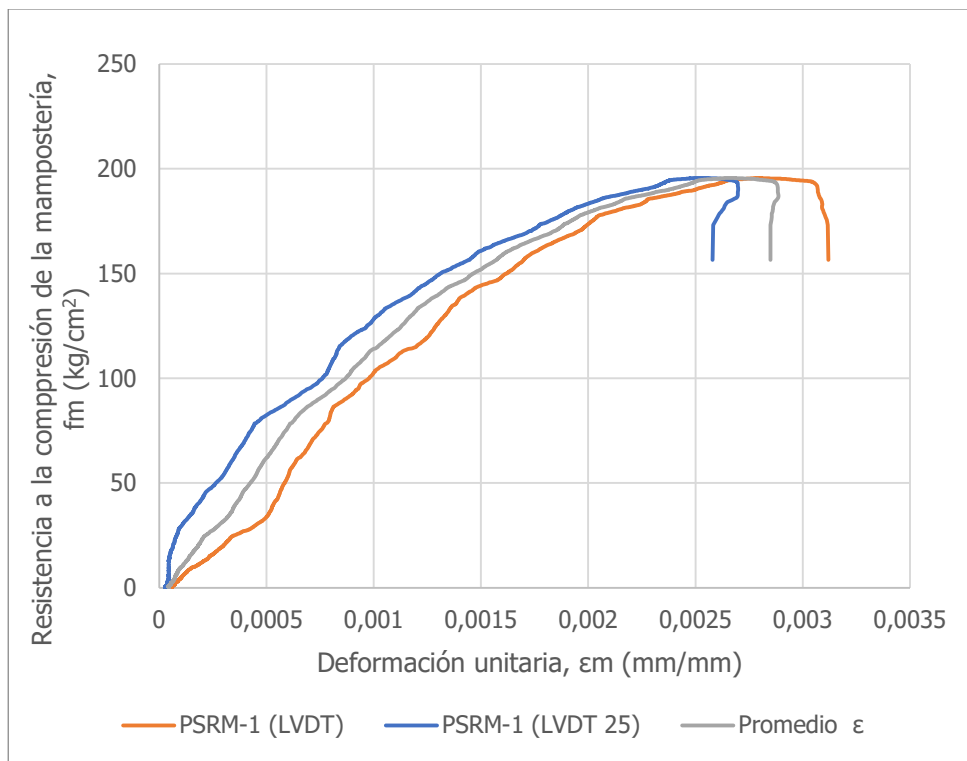
**Figura I 3.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRM-3



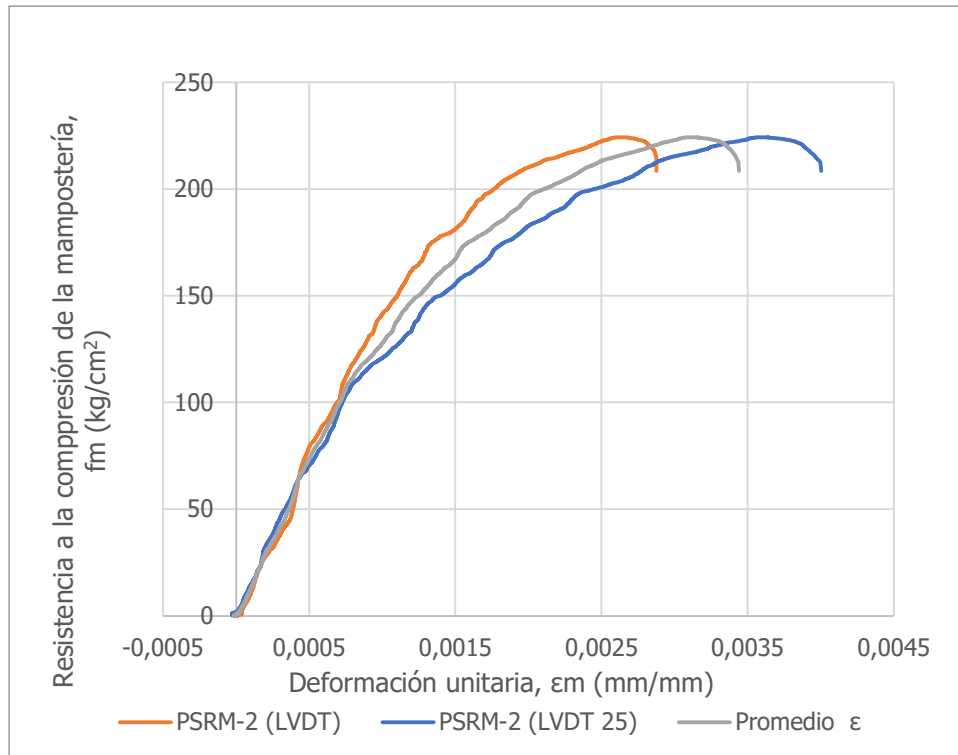
**Figura I 4.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRM-4



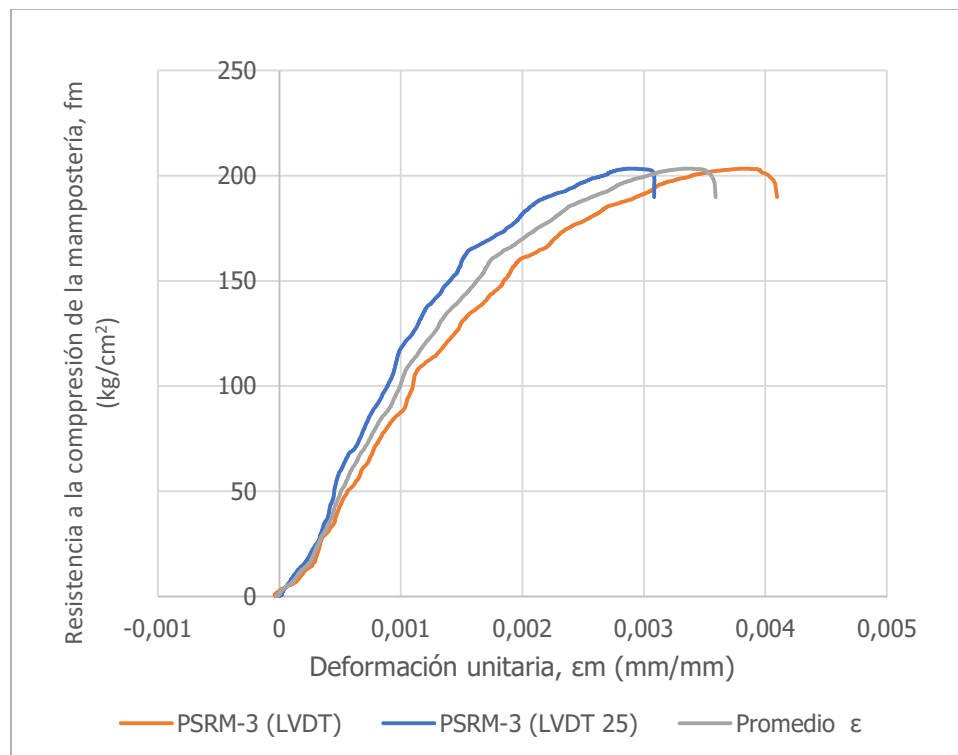
**Figura I 5.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRM-5



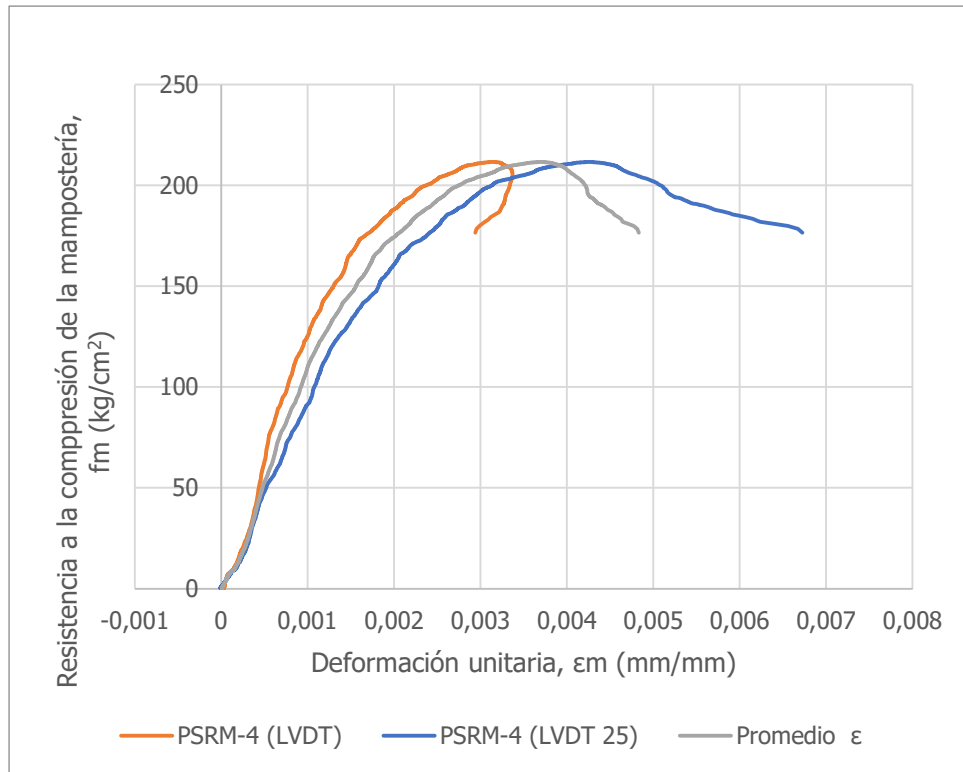
**Figura I 6.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRM-1



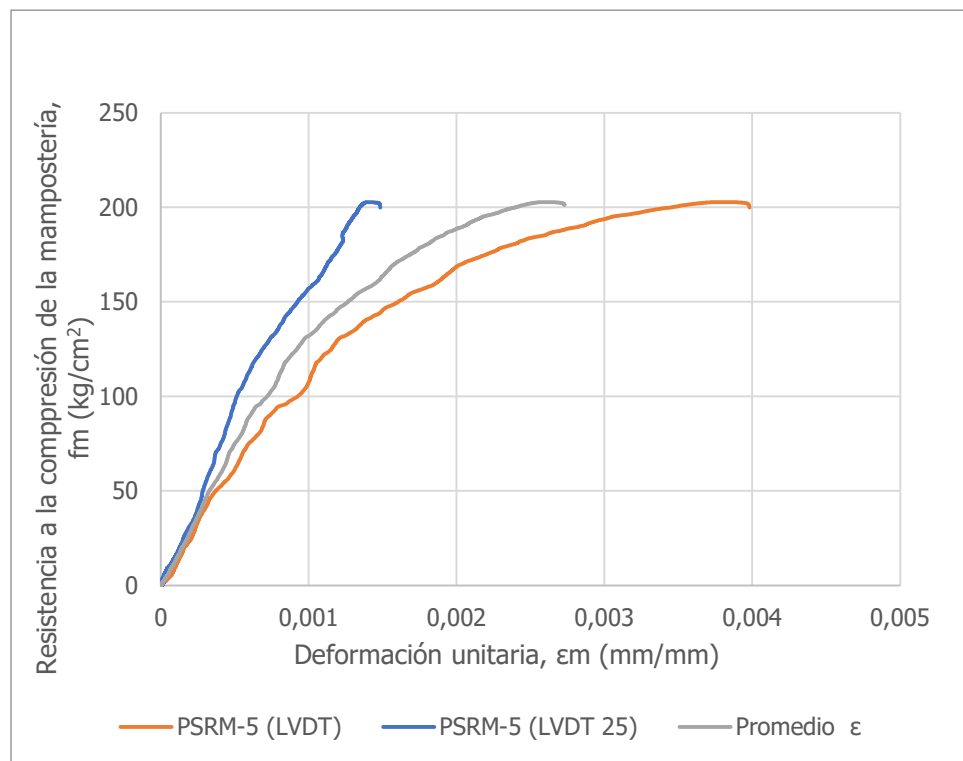
**Figura I 7.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRM-2



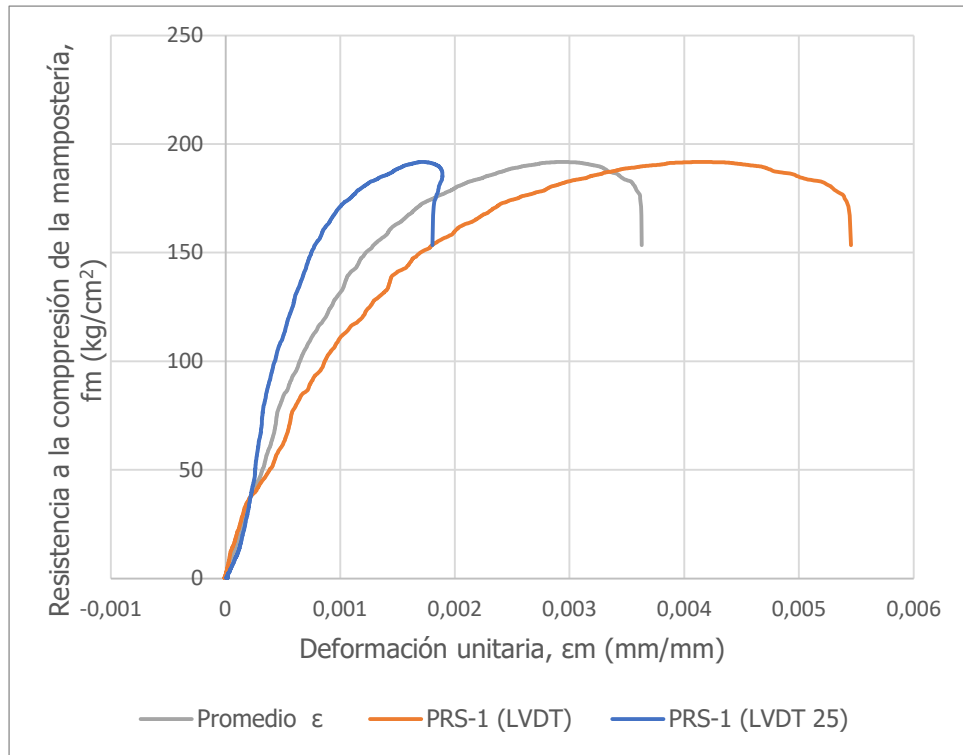
**Figura I 8.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRM-3



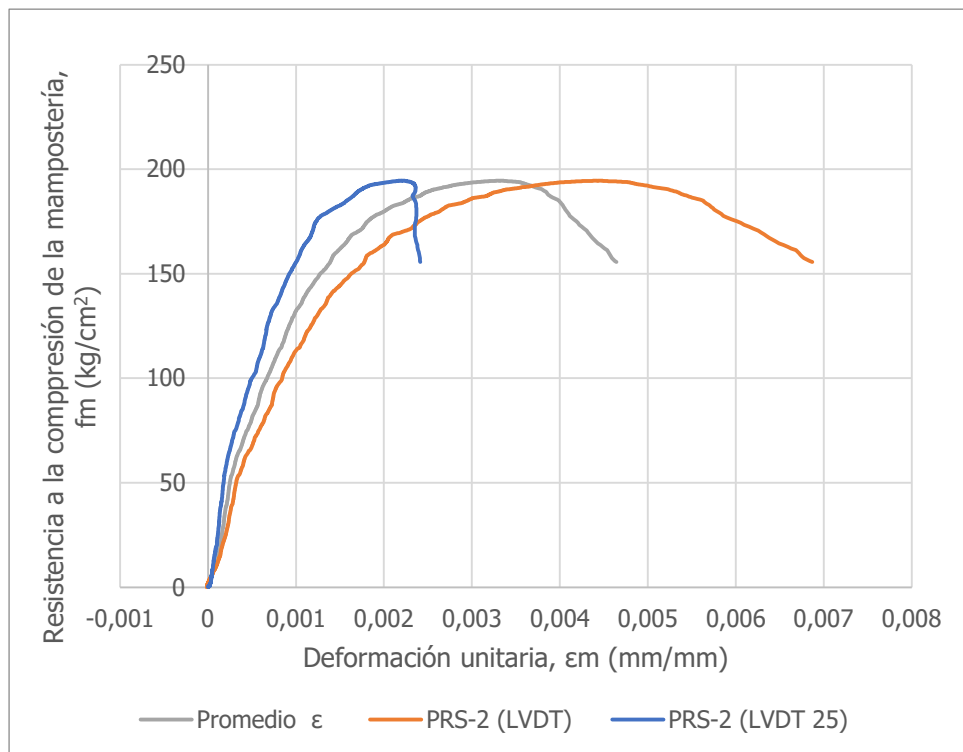
**Figura I 9.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRM-4



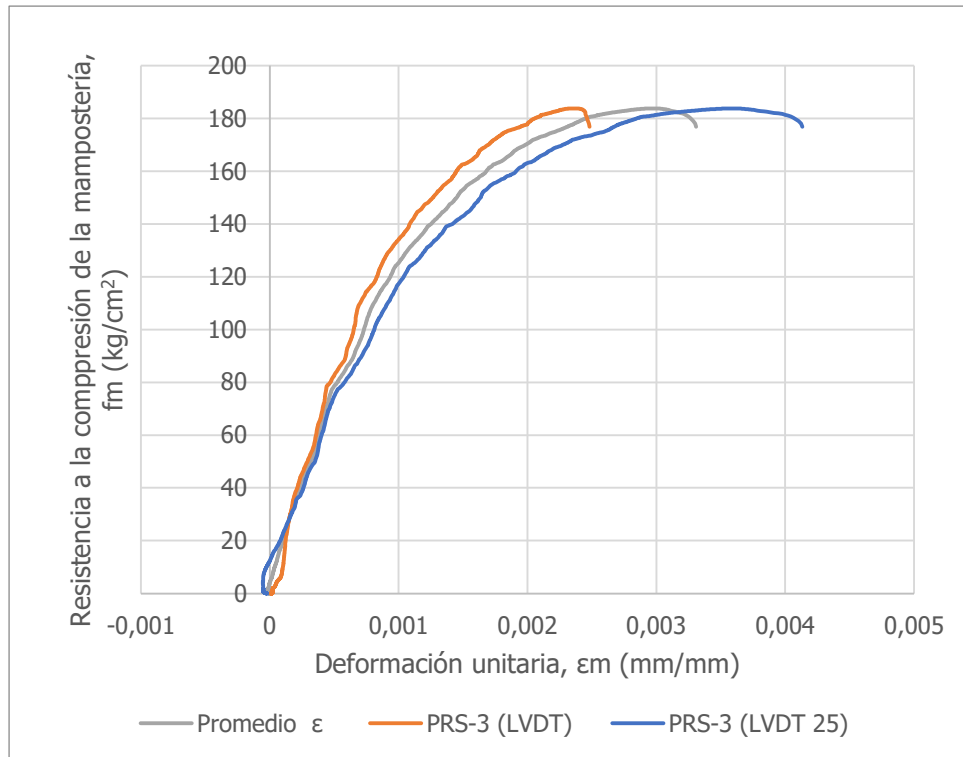
**Figura I 10.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRM-5



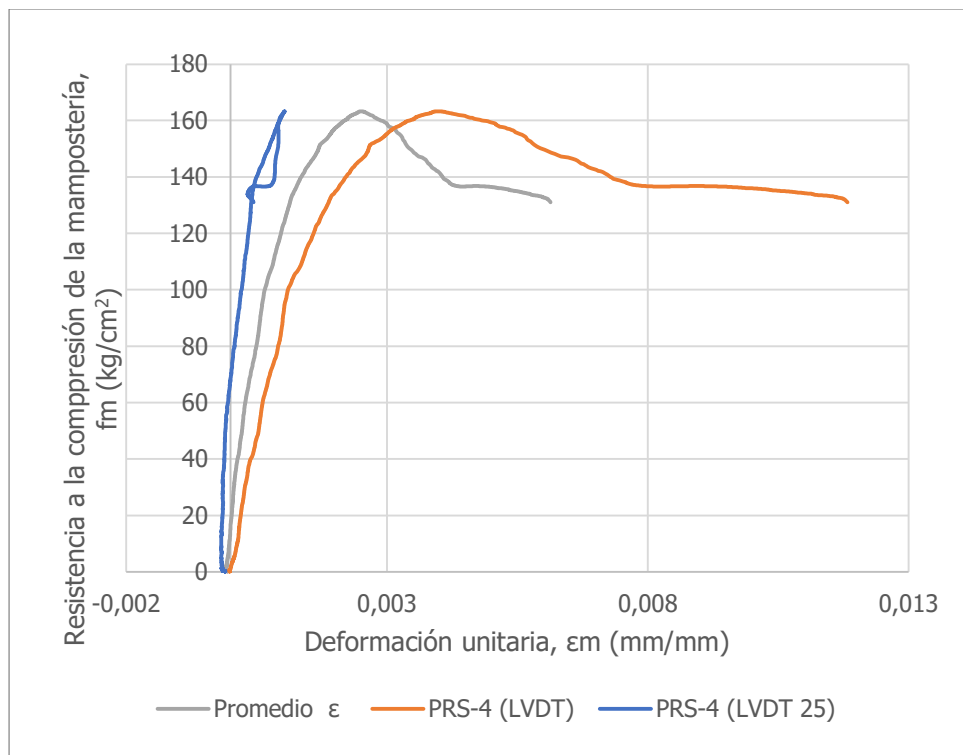
**Figura I 11.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRS-1



**Figura I 12.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRS-2

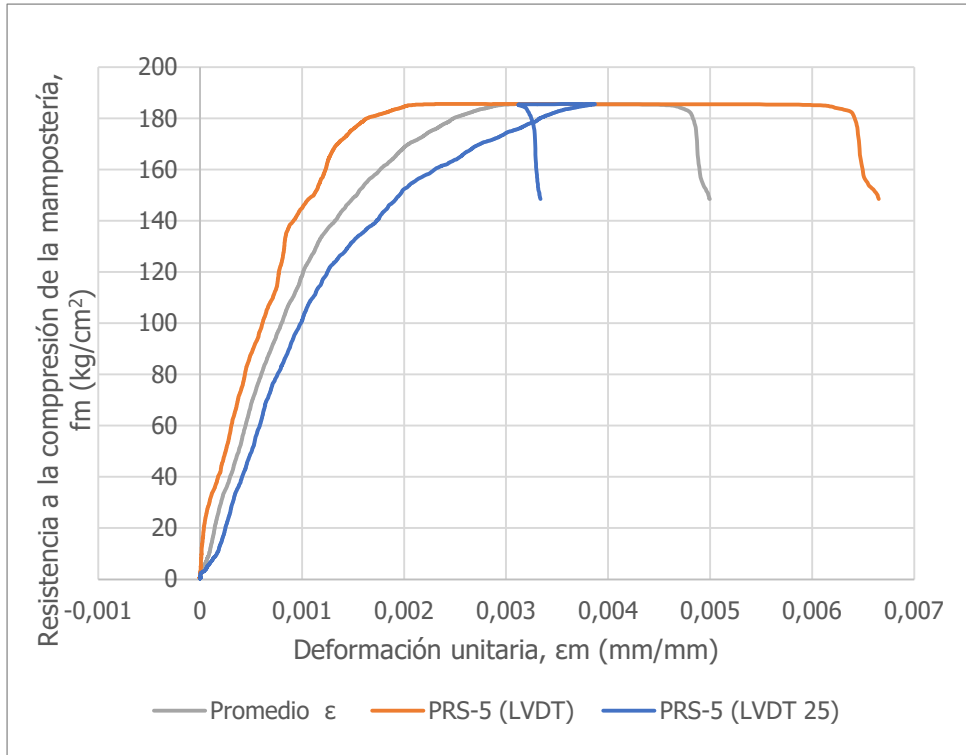


**Figura I 13.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRS-3

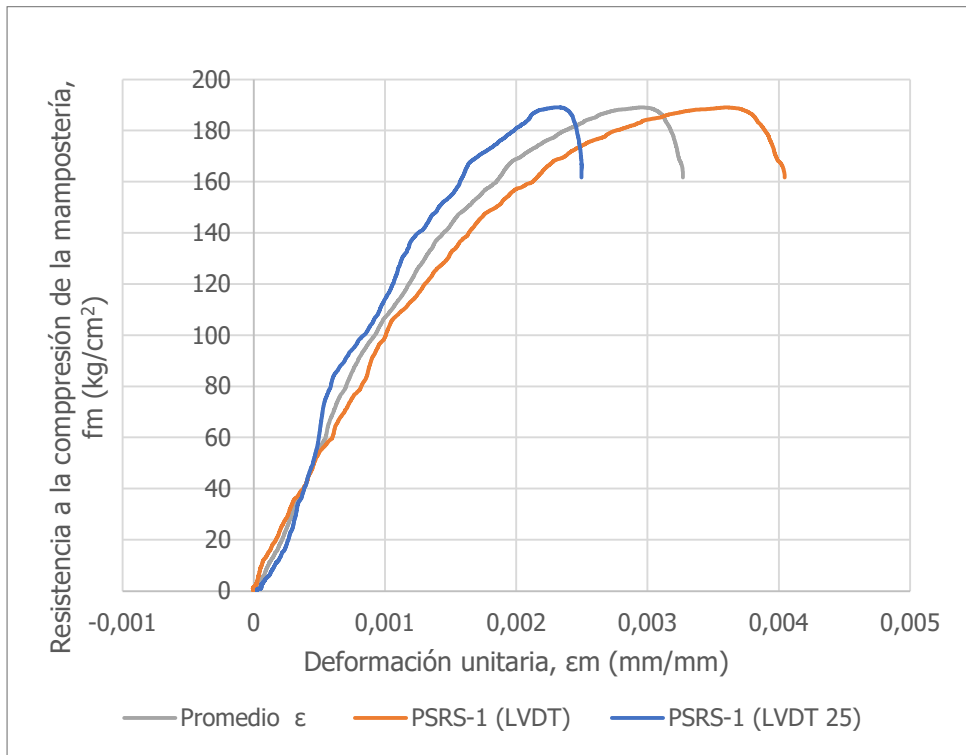


**Figura I 14.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRS-4

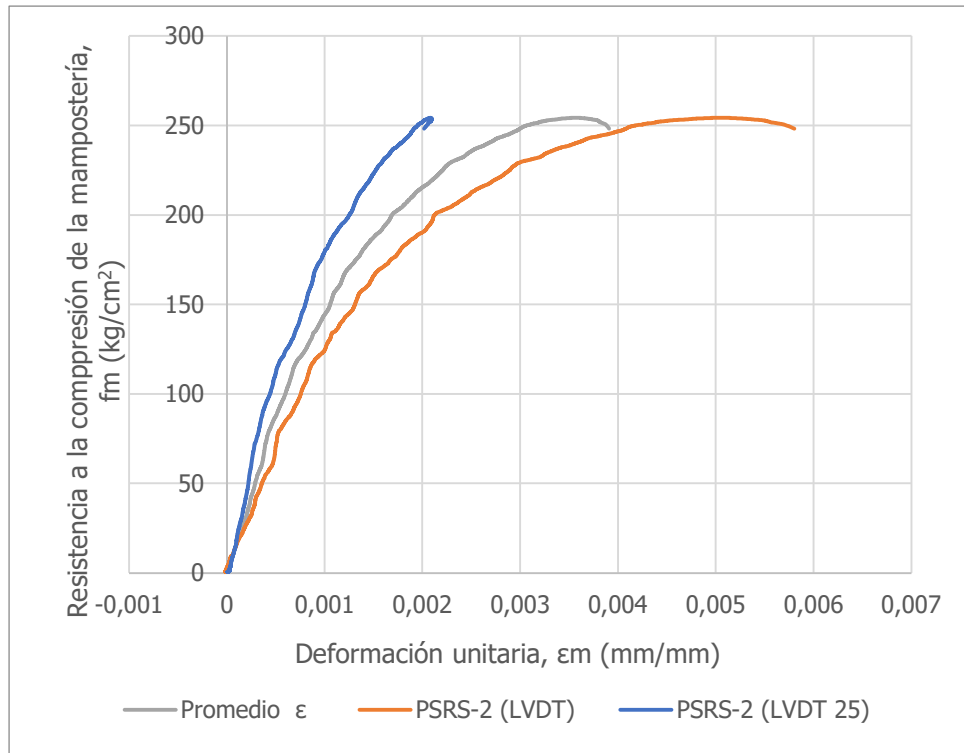




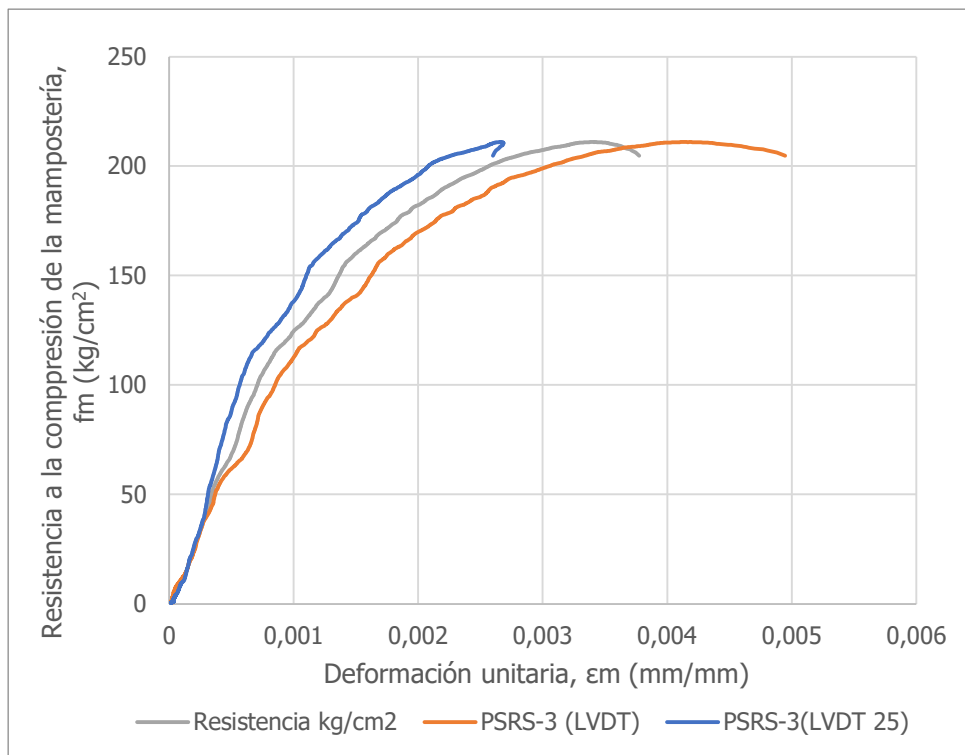
**Figura I 15.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRS-5



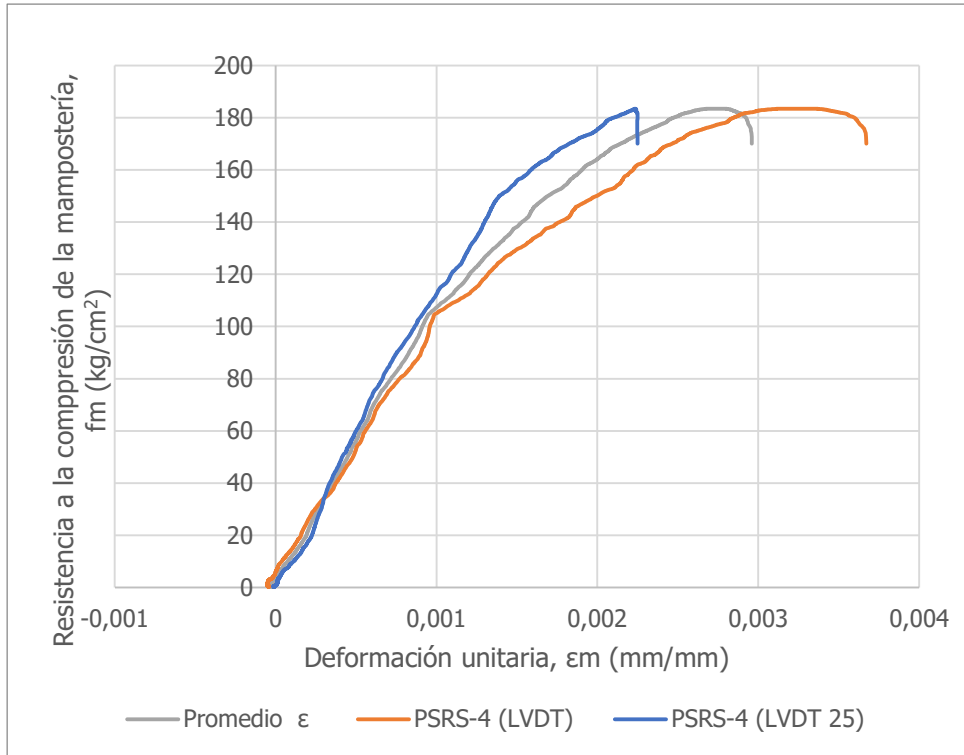
**Figura I 16.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRS-1



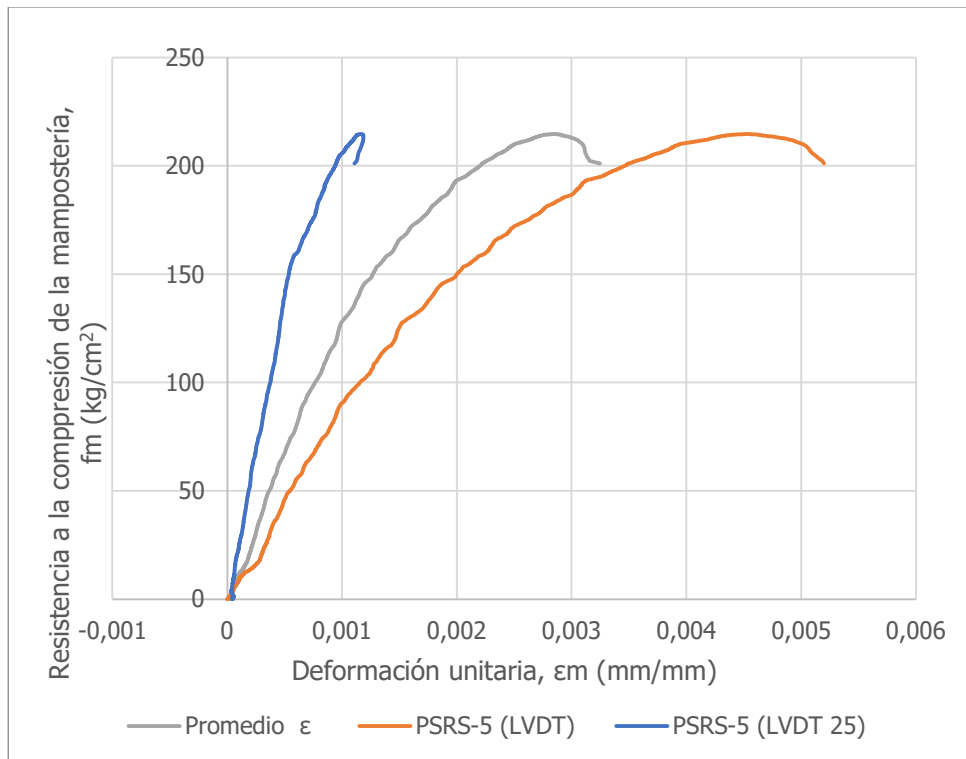
**Figura I 17.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRS-2



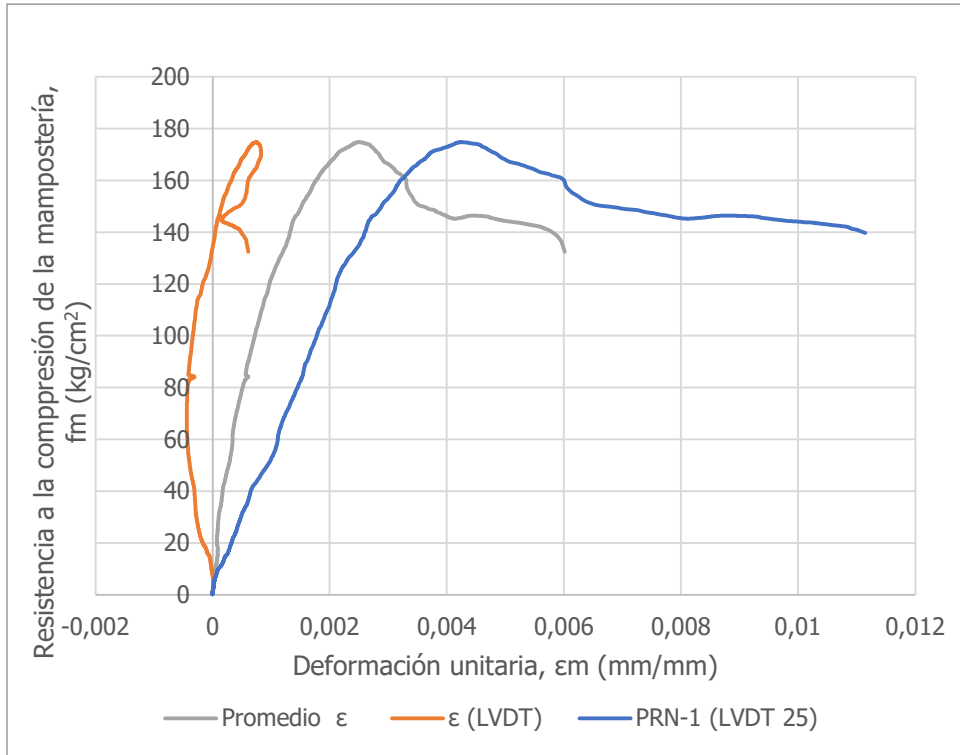
**Figura I 18.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRS-3



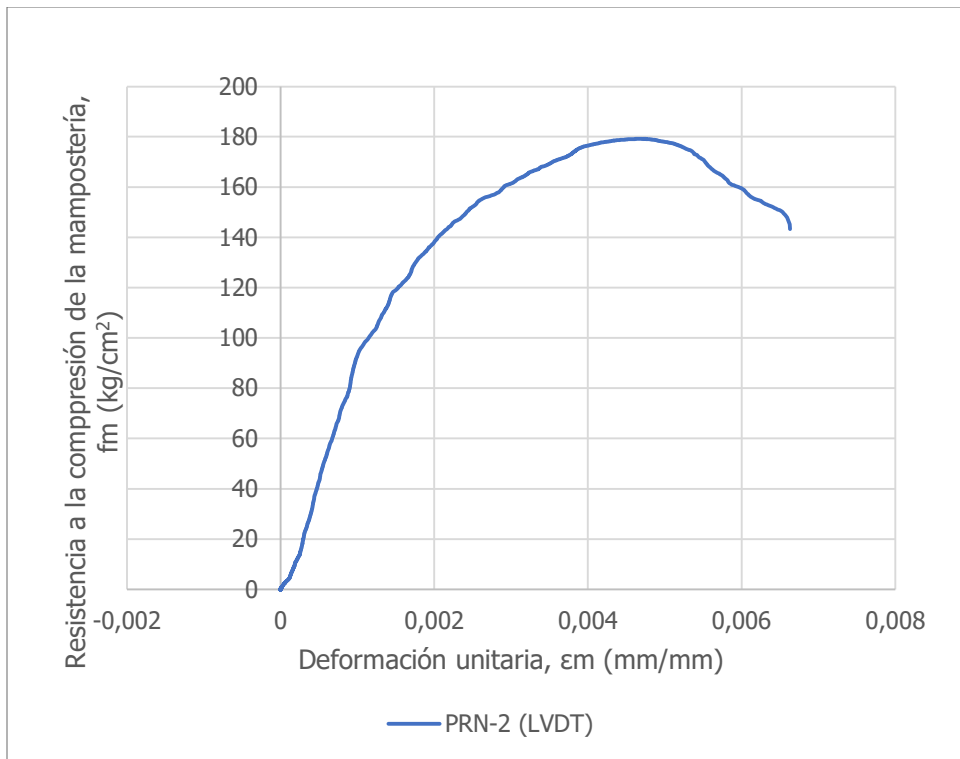
**Figura I 19.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRS-4



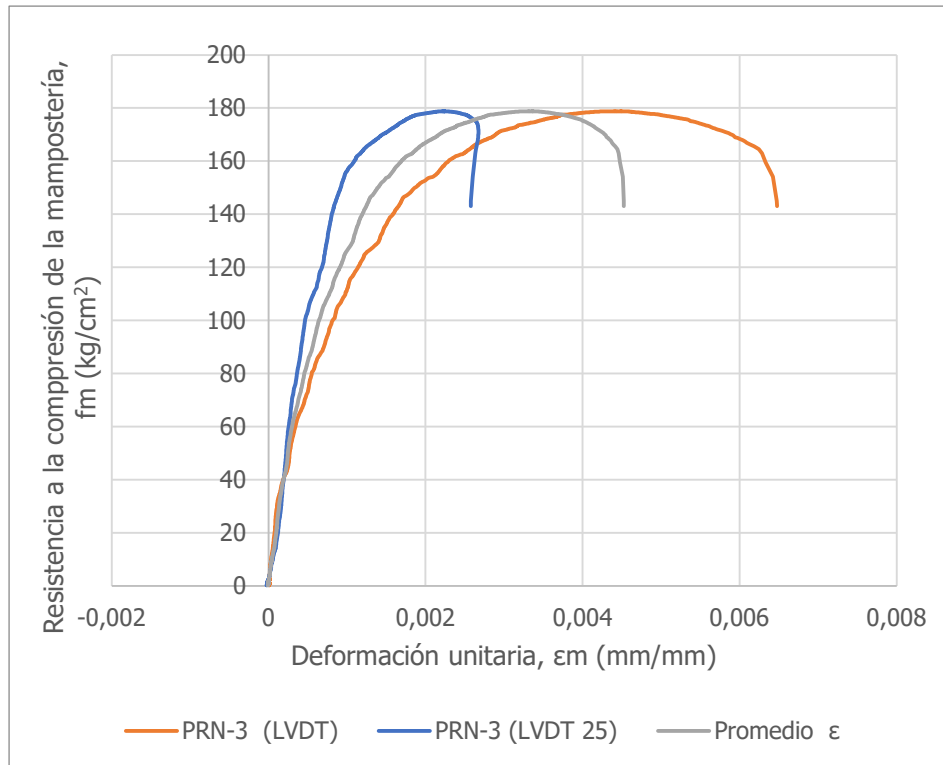
**Figura I 20.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRS-5



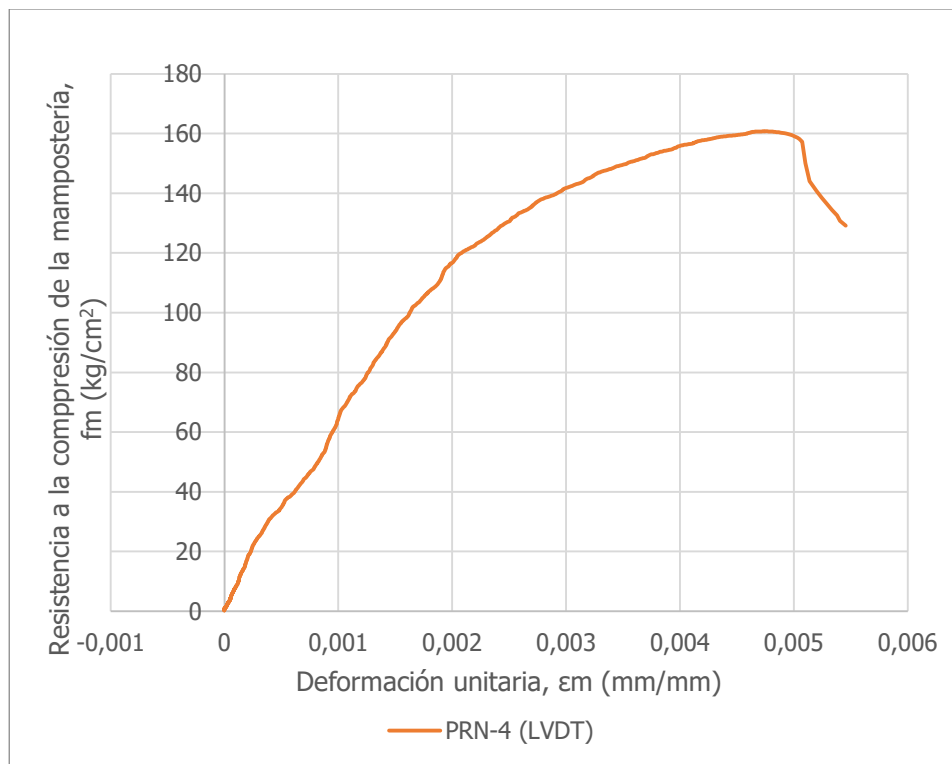
**Figura I 21.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRN-1



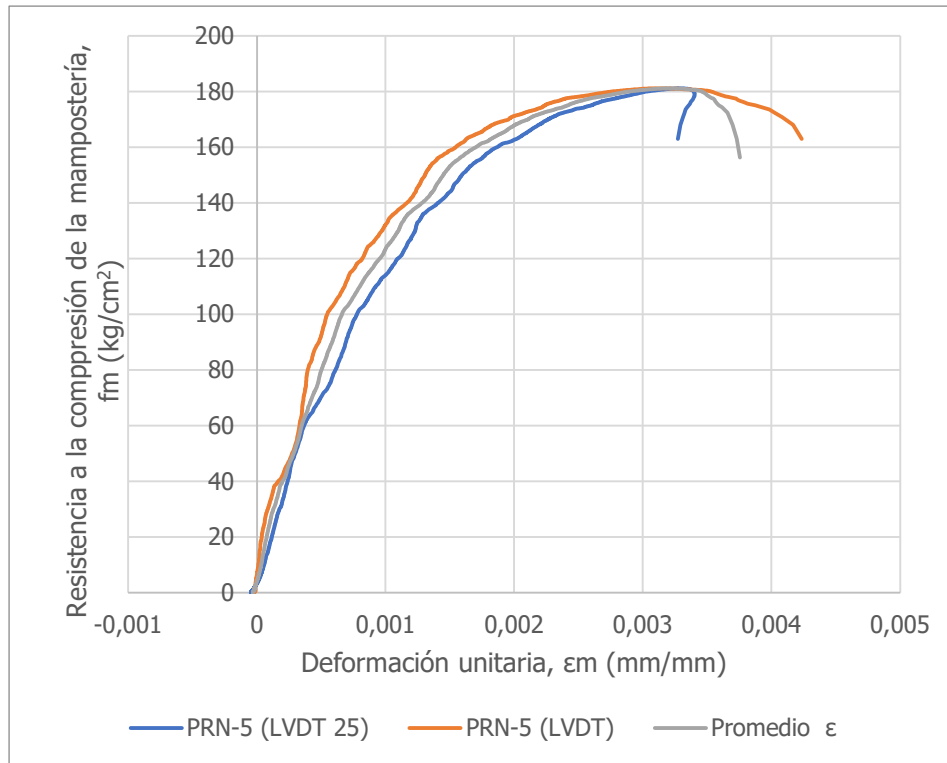
**Figura I 22.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRN-2



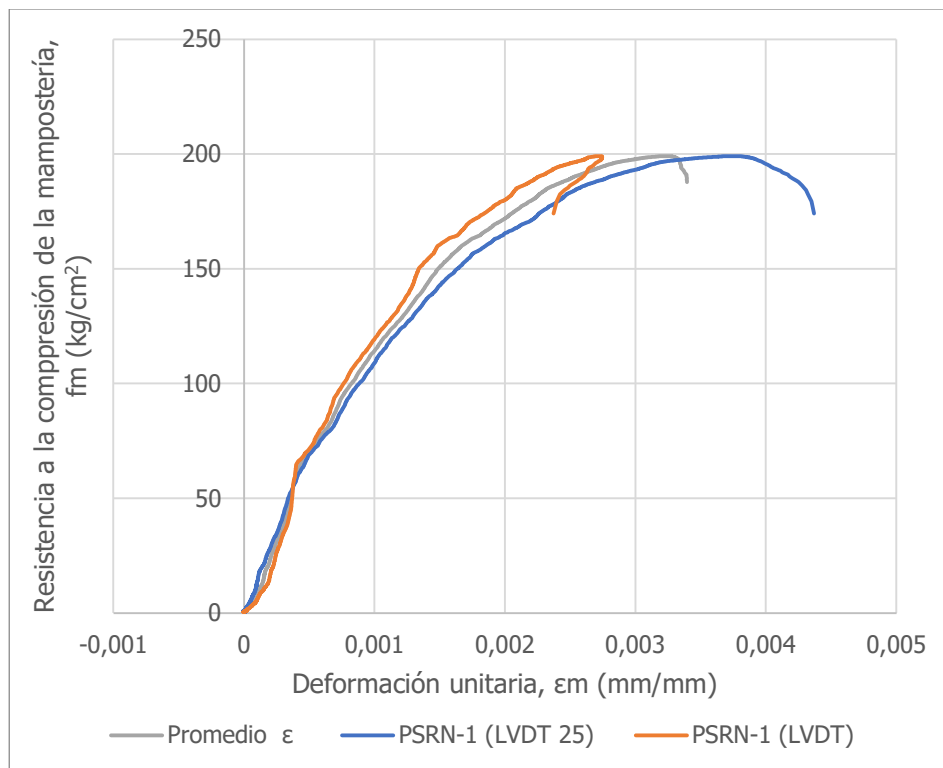
**Figura I 23.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRN-3



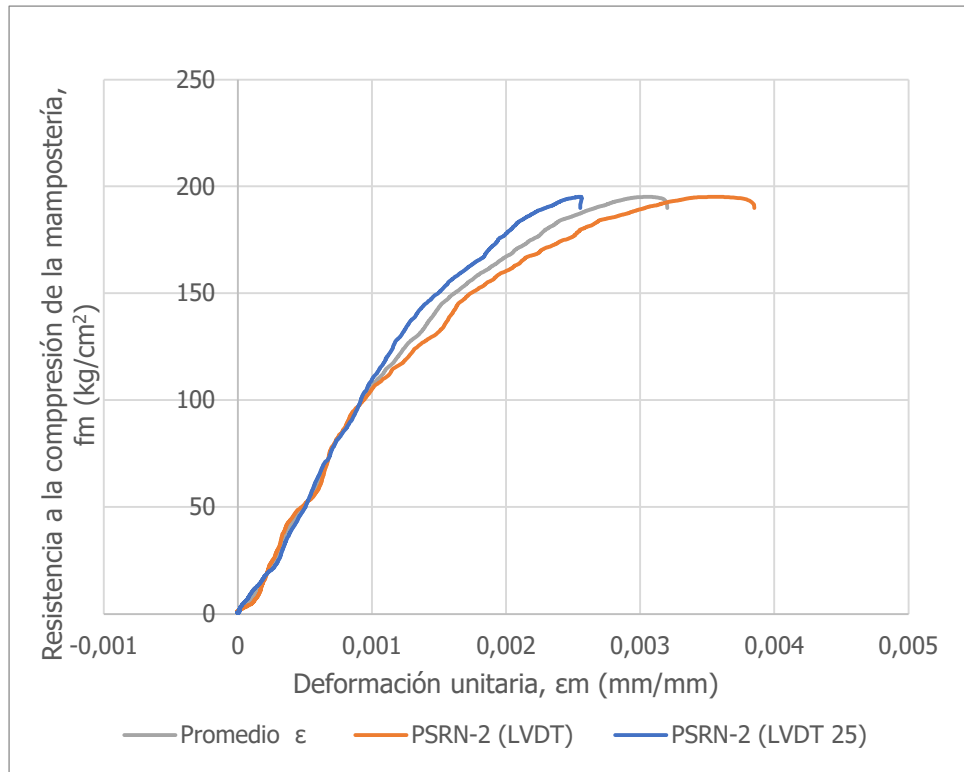
**Figura I 24.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRN-4



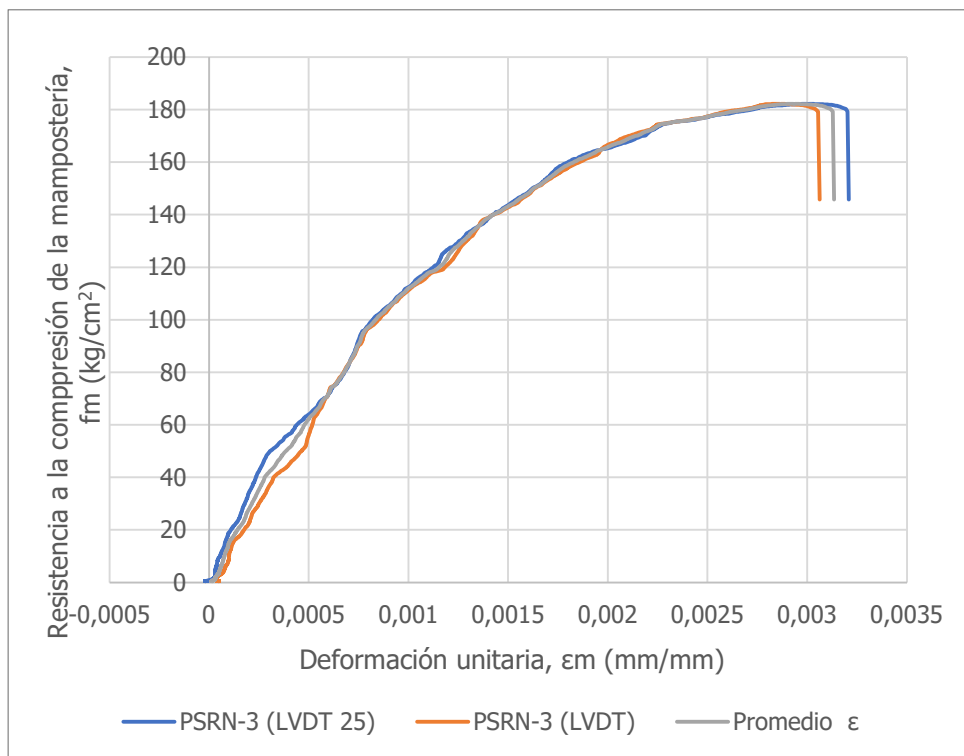
**Figura I 25.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PRN-5



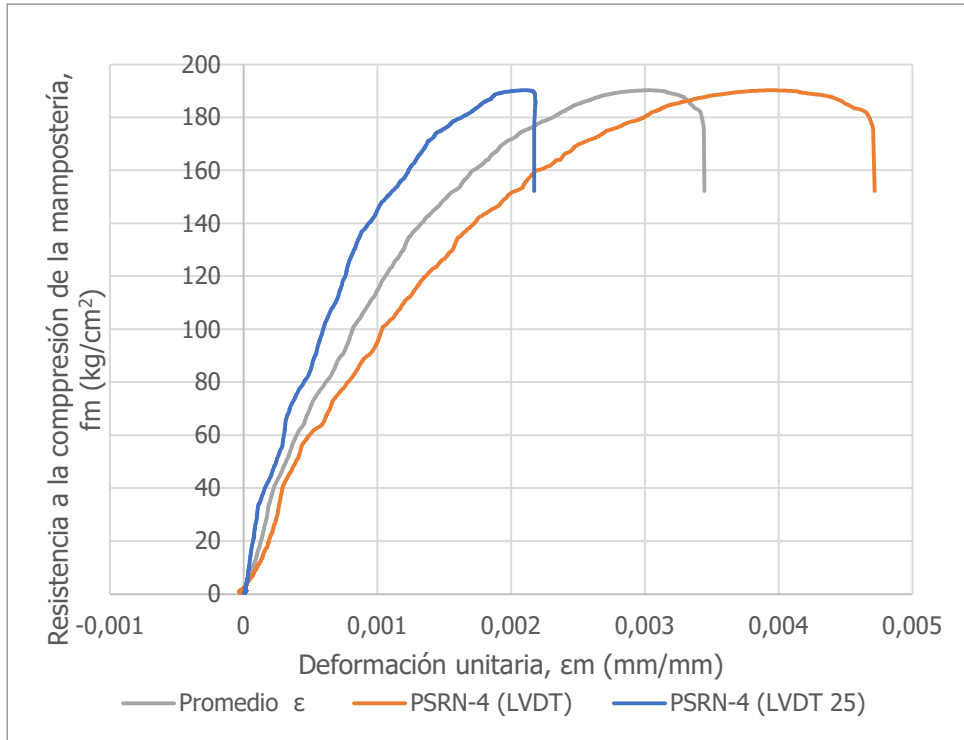
**Figura I 26.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRN-1



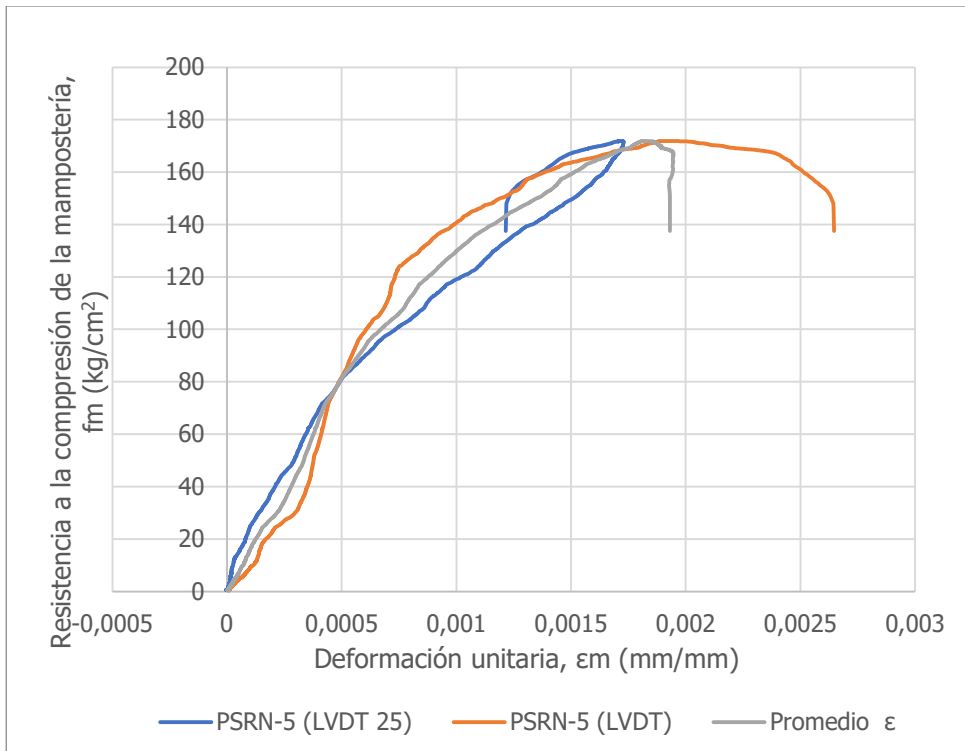
**Figura I 27.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRN-2



**Figura I 28.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRN-3



**Figura I 29.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRN-4



**Figura I 30.** Curva esfuerzo-deformación del prisma PSRN-5