

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ABERTURAS EN
MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA**

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en
Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes que
presenta:

Oscar Jaime Toro Zubieta

Asesor:

Ing. Daniel Roberto Quiun Wong

Lima, 2024


Informe de Similitud

Yo, Daniel Roberto QUIUN WONG, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ABERTURAS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA”, del autor TORO ZUBIETA, OSCAR JAIME, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 06/02/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 11 de abril de 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: QUIUN WONG, Daniel Roberto	
DNI: 07800490	Firma: 
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8906-6783	

RESUMEN

El objetivo principal de la investigación es analizar muros de albañilería confinada con aberturas sin reforzamiento mediante modelamiento de elementos finitos y evaluar la influencia que tienen estas aberturas, tanto en su rigidez como en su resistencia.

Se analizaron muros de albañilería confinada con cinco diferentes relaciones de aspecto (h_m/L_m : 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 y 1.40). Para cada esbeltez de muro se modeló un muro sin aberturas y muros de dimensiones iguales con aberturas con 16 variaciones de dimensiones teniendo en total 80 modelos con aberturas y 5 modelos de muros sin aberturas.

El modelamiento de los materiales de concreto y albañilería se hizo mediante macromodelamiento. El comportamiento no lineal del concreto se basó en el modelo de Hognestad. El comportamiento no lineal de la albañilería se estableció a partir de investigaciones experimentales previas. A cada modelo se empotró en la base y se le aplicó desplazamiento horizontal en la parte superior de los muros hasta alcanzar derivas de 0.007 a 0.008. De este modo se pudo obtener la máxima resistencia al cortante y la rigidez lateral de cada modelo.

Se estableció la relación entre la resistencia de un muro sin aberturas y la resistencia con aberturas ($pR=R_i/R_o$). De igual manera para la relación entre la rigidez de un muro sin aberturas y la rigidez con aberturas ($pK=K_i/K_o$), para cuantificar la influencia de las aberturas.

Procesando los datos se determinó que la relación entre el área de aberturas y el área del muro confinado ($r_a=A_a/A_m$) es el principal parámetro que se relaciona con la reducción de rigidez (pK) y la reducción de resistencia (pR) del muro con aberturas. Si consideramos como insignificante la reducción de la resistencia al corte en un 95%, se pudo concluir que en muros de albañilería confinada con aberturas de áreas menores al 2% del área total del muro no reducen significativamente ni la resistencia ni la rigidez frente a desplazamientos laterales.

ABSTRACT

The main objective of the research is to analyze confined masonry walls with unreinforced openings using finite element modeling and to evaluate the influence of these openings on both their stiffness and strength.

Confined masonry walls with five different aspect ratios (h_m/L_m : 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 and 1.40) were analyzed. For each h_m/L_m ratio a wall without openings and walls of equal dimensions with openings were modeled with 16 variations of dimensions having in total 80 models with openings and 5 models of walls without openings.

The modeling of concrete and masonry materials was done using macromodeling. The nonlinear behavior of concrete was based in Hognestad model. The nonlinear behavior of masonry was established from previous experimental investigations. Each model was fixed at the base and horizontal displacement was applied to the top of the walls until drifts of 0.007 to 0.008 were reached. In this way, the maximum shear strength and lateral stiffness of each model could be obtained.

The ratio between the resistance of a wall without openings and the resistance with openings ($p_R=R_i/R_o$) was established. Similarly for the ratio between the stiffness of a wall without openings and the stiffness with openings ($p_K=K_i/K_o$), to determine the influence of the openings.

Processing the data, it was determined that the ratio between the area of openings and the area of the confined wall ($r_a=A_a/A_m$) is the main parameter related to the stiffness reduction (p_K) and strength reduction (p_R) of the wall with openings. If we consider as negligible the reduction of the shear resistance by 95%, it could be concluded that in confined masonry walls with openings of areas smaller than 2% of the total area of the wall, neither the resistance nor the stiffness against lateral displacements are significantly reduced.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE	5
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	28
2.1 ALBAÑILERÍA CONFINADA	28
2.1.1 DEFINICIÓN	28
2.1.2 ELEMENTOS DE LA ALBAÑILERÍA CONFINADA	29
2.2 RIGIDEZ Y RESISTENCIA EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA	30
2.2.1 RIGIDEZ DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA	30
2.2.2 RESISTENCIA DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA	33
2.2.3 ENSAYOS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA.	34
2.3 ELEMENTOS FINITOS EN EL MODELAMIENTO ANALÍTICO	42
2.3.1 LEYES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES	42
2.3.2 ANÁLISIS LINEAL EN ELEMENTOS FINITOS	45
2.4 MODELAMIENTO DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA	51
2.4.1 MICROMODELAMIENTO	53
2.4.2 MACROMODELAMIENTO	54
2.4.3 MODELAMIENTO SIMPLIFICADO DE COLUMNA ANCHA	55
2.5 MODELAMIENTO NO LINEAL EN ELEMENTOS FINITOS	59
2.5.1 LEY EQUIVALENTE UNIAXIAL PARA EL CONCRETO Y LA ALBAÑILERÍA	59

2.5.2	LEY ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA EL ACERO DE REFUERZO	61
2.5.3	SOLUCIÓN PARA EL ANÁLISIS NO-LINEAL	62
CAPÍTULO III. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS		64
3.1	INTRODUCCIÓN	64
3.2	MODELOS LINEALES	64
3.2.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	64
3.2.2	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	66
3.2.3	DEFINICIÓN DE CARGAS Y CONDICIONES DE BORDE	67
3.2.4	CÁLCULO DE RIGIDEZ LATERAL	68
3.2.5	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS LINEALES	68
3.3	MODELOS NO LINEALES	79
3.3.1	RELACIONES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	79
3.3.2	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS NO LINEAL DE LA ALBAÑILERÍA	81
3.3.3	COMPARACIÓN CON ENSAYO EXPERIMENTAL	82
3.3.4	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	85
3.3.5	DEFINICIÓN DE CARGAS Y CONDICIONES DE BORDE	86
3.3.6	DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LOS MODELOS NO LINEALES	87
3.3.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS NO LINEALES	88
CAPÍTULO IV. COMPARACIÓN DE RESULTADOS		99
4.1	COMPARACIÓN CON INVESTIGACIONES ANTERIORES	99
4.2	COMPARACIÓN CON REGLAMENTOS VIGENTES	101
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS		104
CONCLUSIONES		106

RECOMENDACIONES

108

BIBLIOGRAFÍA

109



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativo de Normas de albañilería, sobre cuándo no se necesita confinar una abertura.	26
Tabla 2. Factor de Corrección por esbeltez.	37
Tabla 3. Variaciones de los parámetros geométricos de los muros para el análisis lineal.	66
Tabla 4. Cantidad de modelos que tuvieron una reducción de rigidez mayor al 95% según ubicación de la abertura	69
Tabla 5. Cantidad de modelos que tuvieron una variación de rigidez mayor al 95% para las ubicaciones extremo y centro	69
Tabla 6. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 0.6.	70
Tabla 7. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 0.8.	71
Tabla 8. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 1.0.	73
Tabla 9. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 1.2.	74
Tabla 10. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 1.4.	75
Tabla 11. Variaciones de los parámetros geométricos de los muros para el análisis no lineal.	85
Tabla 12. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 0.6.	89
Tabla 13. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 0.8.	91
Tabla 14. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 1.0	92
Tabla 15. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 1.2.	94
Tabla 16. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 1.4.	95

Tabla 17. Factores de reducción de Resistencia y rigidez de diferentes Investigaciones. 99

Tabla 18. Normativa de cada país respecto a las aberturas en muros de albañilería confinada con la reducción de rigidez y resistencia que representan según lo planteado en la presente investigación. 102



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Edificaciones con aberturas en muros de albañilería.	15
Figura 2: Refuerzo en el perímetro de aberturas según norma mexicana	24
Figura 3: Muros de albañilerías confinada con “Conexión Dentada” y “Conexión a Ras”.	29
Figura 4: Sección transformada de un muro de albañilería.	31
Figura 5: Idealización de un muro de albañilería como un elemento tipo viga.	31
Figura 6: Esquema del ensayo a Compresión axial.	36
Figura 7: Esquema del ensayo a Compresión diagonal.	38
Figura 8: Esquema de la historia de la carga inducida por el actuador.	41
Figura 9: Diagrama histerético de un muro de albañilería sometido a un ensayo a carga cíclica	41
Figura 10: Curva de capacidad idealizada de un muro de albañilería.	42
Figura 11: Cuerpo en equilibrio bajo fuerzas externas.	43
Figura 12: Discretización de un medio continuo a elementos finitos.	47
Figura 13: Errores en la discretización de elementos finitos.	51
Figura 14: Macromodelamiento y Micromodelamiento de albañilería.	53
Figura 15: Esquema del proceso de homogenización	55
Figura 16: Modelamiento de muros con ventana mediante el uso de columna ancha.	57
Figura 17: Idealización de un muro de albañilería mediante columna ancha con sección agrietada.	58
Figura 18: Diagrama esfuerzo deformación de un material frágil.	60
Figura 19: Esfuerzo deformación del acero elastoplástico	61
Figura 20: Diagrama esfuerzo deformación bilineal.	62
Figura 21: Representación gráfica del Método iterativo de Newton-Raphson	63
Figura 22: Esquema del modelo de muro de albañilería confinada con las dimensiones que se usaron para la variación de parámetros	65
Figura 23: Modelo con las condiciones de borde y la carga horizontal aplicada.	67
Figura 24: Gráfico Variación del parámetro α frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 0.6	71
	10

Figura 25: Gráfico Variación del parámetro α frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 0.8	72
Figura 26: Gráfico Variación del parámetro α frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 1.0	73
Figura 27: Gráfico Variación del parámetro α frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 1.2	75
Figura 28: Gráfico Variación del parámetro α frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 1.4	76
Figura 29: Gráfico de esbeltez h_m/L_m frente al máximo valor del parámetro α con variación de rigidez de $pK=95\%$	76
Figura 30: Gráfico variación del parámetro α frente la variación de rigidez pK , con ecuación propuesta.	77
Figura 31: Comportamiento del concreto según Hognestad para $f'_c=17.2$ Mpa	79
Figura 32: Comportamiento del concreto a tracción.	80
Figura 33. Esquema de elementos tipo Shell con elementos rebar del software Abaqus.	80
Figura 34: Comportamiento post fluencia a compresión de la albañilería asignado al modelo numérico	81
Figura 35: Comportamiento post fluencia a tracción de la albañilería asignado al modelo numérico	82
Figura 36: Gráfico comparativo Fuerza-Desplazamiento del ensayo experimental y el modelo numérico propuesto	83
Figura 37. Gráfico comparativo Fuerza-Desplazamiento del ensayo experimental y el modelo numérico propuesto	84
Figura 38. Modelo no lineal de un muro mediante el Software Abaqus.	86
Figura 39. Deformaciones plásticas de 3 modelos de muros con aberturas de diferentes esbelteces	87
Figura 40: Gráfico Variación del parámetro A_a/A_m frente a la variación de resistencia R_i/R_o para la esbeltez 0.6	90
Figura 41: Gráfico Variación del parámetro A_a/A_m frente a la variación de resistencia R_i/R_o para la esbeltez 0.8	91
Figura 42: Gráfico Variación del parámetro A_a/A_m frente a la variación de resistencia R_i/R_o para la esbeltez 1.0	93

Figura 43: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 1.2	94
Figura 44: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 1.4	96
Figura 45: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para todos los modelos.	97
Figura 46: Gráfico comparativo Variación del parámetro ra frente a la variación de resistencia Ri/Ro , datos y ecuación propuesta	98
Figura 47: Reducción de resistencia propuesta por diferentes investigaciones en comparación a la propuesta para $hm/Lm=1.00$	101
Figura 48: Esquema de muros de albañilería con aberturas máximas sin variar significativamente ni la resistencia ni la rigidez	105
Figura 49: Opciones de estructuración con muros de albañilería de un baño con ventana alta.	107



INTRODUCCIÓN

En nuestro país el uso de la mampostería como elemento de construcción es una de las más populares, incluso hasta antes de 1970 cuando no existía reglamentos de construcción, en nuestro país ya existía construcciones de este material. Estas construcciones, en algunos casos carecían de la densidad necesaria para resistir los efectos del sismo causando colapsos en eventos telúricos y en otros casos exageraban en la densidad de muros haciéndola económicamente elevadas (San Bartolomé, 1994).

En la actualidad el diseño de estructuras de mampostería, por exigencias arquitectónicas y económicas, busca la eficiencia en el uso de este material, mejorando la calidad de los materiales que se utilizan (ladrillos, concreto y acero), buscando aprovechar de la mejor manera la disposición de la mampostería en el proyecto arquitectónico y con el conocimiento necesario sobre los lineamientos sismorresistentes para poder asegurar la seguridad de la vida humana ante eventos sísmicos (San Bartolomé, 1994).

Con estas premisas, en el diseño de la albañilería confinada, se pueden considerar como elementos resistentes a fuerzas laterales los muros que tenga las siguientes características: una sección transversal preferentemente simétrica, continuidad vertical hasta la cimentación, una longitud mayor o igual a 1,20 m, longitudes preferentemente uniformes en cada dirección, según el reglamento de albañilería E.070 (SENCICO, 2006). Esto hace deducir que elementos que no cumplan estas características no deben considerarse dentro del análisis sísmico como elementos que aportan resistencia y rigidez a la estructura. Estos elementos deberán ser considerados como tabiquerías, es decir como elementos que solo aportan peso a la estructura.

Existe entonces la incógnita de los muros que tengan aberturas, deberían ser considerados como elementos tabiquería o como elementos resistentes ante fuerzas laterales. En México, dentro de sus normativas ya consideran este problema resuelto, pues se indica en el reglamento que, si las aberturas no son mayores a los 400 mm, éstas deben considerarse como muros resistentes con aberturas donde ni siquiera es necesario reforzar la abertura en cuestión (NTC-M, 2017). En el reglamento de Argentina, se considera muros portantes con

aberturas y se puede prescindir de columnas en los bordes de la abertura en determinados casos (Inpres-Inti-Cirsoc, 2018).

Las disposiciones en la normativa en estos países están basadas en ensayos e investigaciones con elementos de mampostería con materiales que se usan en dichos países y con dimensiones que se usan en ese país. En el Perú, si bien son parecidas las técnicas de construcción en mampostería confinada a las que se utilizan en México, los materiales que se utilizan son diferentes, empezando por la unidad de albañilería que posee diferentes dimensiones.

En el Perú aún falta trabajo de investigación en este tema, si bien en otros países se ha realizado investigaciones en este tipo con modelamientos analíticos como Tripathy y Singhal, en India (2019), se han basado en experimentos realizados válidos para esos países. En esta investigación se busca utilizar experiencias realizadas en nuestro país con los materiales de construcción que se usan en nuestro medio. Esto busca reflejar resultados más coherentes para nuestra realidad nacional.

JUSTIFICACIÓN:

Es de gran importancia obtener resultados sobre cómo influyen las aberturas en muros de mampostería confinada, dado que ayudaría a establecer de qué dimensiones las aberturas no afectan a la rigidez y a la resistencia de los muros, por consiguiente, poder usar muros con este tipo de aberturas como elementos resistentes dentro de nuestros análisis en estructuras de albañilería confinada y utilizar con mayor eficiencia los muros en armonía con el proyecto arquitectónico. Además, que ya existen muchas edificaciones con estas aberturas, que no se sabe a ciencia cierta si consideraron estas reducciones, como se ve en la Figura 1.

Estos resultados pueden llegar a ser base para posteriores investigaciones y con el tiempo establecer dentro de nuestra normativa peruana de albañilería los lineamientos para la consideración de muros con aberturas.

Como se ha podido exponer en los antecedentes, existen investigaciones y especificaciones normativas al respecto en otros países. En el Perú aún se

requiere realizar investigaciones con información de materiales que se usan en nuestro medio y llegar a conclusiones que sean afines a nuestra realidad, y poder establecer conclusiones que aporten a nuestro conocimiento local.

Figura 1: Edificaciones con aberturas en muros de albañilería.



Nota: Fotografías de construcciones de albañilería, en donde se puede apreciar muros de albañilería que poseen aberturas sin confinar.

OBJETIVOS Y ALCANCES

Objetivo Principal

El objetivo principal de la tesis es analizar muros de albañilería confinada que contengan aberturas sin reforzamiento, a través de modelos numéricos de elementos finitos y evaluar la influencia que tienen estas aberturas de diferentes dimensiones y ubicaciones dentro del muro en análisis.

Objetivo Específicos

- Determinar las diferentes posibilidades que existe de dimensiones de aberturas en muros en edificios de muros de albañilería confinada,
- Establecer las leyes constitutivas de la albañilería, el concreto armado y el acero a través de investigaciones previas de ensayos de fuerza deformación.
- Establecer los criterios de falla de los materiales que intervienen y calibrarlos con ensayos de investigaciones previas.

- Realizar diversos modelos analíticos en base a los comportamientos de fuerza deformación y los criterios de falla, variando las dimensiones y ubicaciones de las aberturas.
- Evaluar la influencia de las diversas variaciones de aberturas comparándolos con un modelo de muro de albañilería confinada sin aberturas, tanto en rigidez como en resistencia.

HIPÓTESIS

Las aberturas de dimensiones pequeñas en muros de albañilería confinada (de hasta 0.50mx0.50m) no presentarán diferencias significativas ni en la resistencia ni en la rigidez en comparación a un muro sin aberturas, por lo cual, para el análisis de edificios de muros de albañilería confinada, los muros que presenten hasta estas dimensiones de aberturas pueden ser considerados como muros sin aberturas.

METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Se comenzará con la investigación y recolección de diversos proyectos de edificios con estructuras de albañilería confinada, para establecer las dimensiones de las aberturas que posean en los muros y la relación que exista con las dimensiones del paño. En cada proyecto se medirán las dimensiones y ubicaciones correspondientes también en los muros que se consideraron tabiques que posean aberturas.

Luego se procederá con la revisión bibliográfica de modelamiento de los materiales que intervienen en la albañilería confinada, la albañilería en sí, el concreto y el acero de refuerzo. Se revisará diferentes investigaciones en donde se muestre la relación de esfuerzo-deformación de cada material para establecer las respectivas leyes constitutivas y establecer los criterios de falla.

En base a la información recolectada se procederá a definir los modelos analíticos. Con la información recolectada de los diversos proyectos se definirá las dimensiones de los paños y las dimensiones de las aberturas. Con la

información de las investigaciones de esfuerzo-deformación se definirá las propiedades de los materiales que intervienen, además de los criterios de falla asociados. Se realizará diversas variaciones de modelos en las dimensiones del paño y las aberturas teniendo como principales variables a tener en cuenta, la dimensión relativa de la abertura y el porcentaje de área que ocupa en el paño. Además, se considerará para cada variación del modelo en dimensiones del paño un modelo con muro lleno (sin aberturas).

Finalmente se procederá al análisis de resultados. Se identificará la resistencia al corte del muro por una fuerza horizontal, la rigidez lateral del muro y la forma de la falla del muro. Los resultados de los modelos con aberturas se compararán al modelo respectivo de muro lleno (de mismas dimensiones de paño). En la comparación se determinará en porcentaje la variación de la resistencia y la rigidez lateral del muro, siendo el punto de comparación los resultados de muro lleno y establecer la influencia de las aberturas. Se establecerá cuál será el porcentaje de variación que se pueda considerar como insignificante para poder determinar en qué modelos se pueda considerar que las aberturas son influyentes o no, y establecer qué dimensiones de abertura o qué porcentajes de área que representan las aberturas en el paño resultan influyentes o no en un muro de albañilería confinada.

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE

Las estructuras de albañilería confinada son reconocidas como un método constructivo menos costoso que otros y que por lo tanto es de un uso común en las construcciones en el Perú. Es por esto también la investigación en este tipo de estructuras en este país es de amplia variedad y de cantidad considerable. Sin embargo, el tema de los muros de albañilería confinada con aberturas no ha tenido mucho estudio en el Perú. De otro lado en el mundo si se han realizado varias investigaciones al respecto, se presentan a continuación las que se consideran más relevantes para la presente investigación. Además, también se muestran algunas normas de albañilería confinada realizadas en Latinoamérica que tienen en cuenta las aberturas en este tipo de estructuras.

- **ESTUDIO ANALÍTICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA CON ABERTURAS.**

ÁLVAREZ, J. J., & ALCOCER, S. M. (2001). En la investigación realizada por Álvarez y Alcocer, realizaron modelos analíticos basados en investigaciones experimentales realizadas en la ciudad de México. Se realizó mediante modelos basados en el método de elementos finitos mediante el software SBETA.

Concluyeron en esta investigación que la disminución de rigidez tenía una relación lineal con el porcentaje de abertura en el muro, además que la posición central de la abertura generaba efectos negativos mayores en comparación a las aberturas ubicadas en las zonas laterales.

- **IN- PLANE AND OUT- OF- PLANE BEHAVIOR OF CONFINED MASONRY WALLS FOR VARIOUS TOOTHING AND OPENINGS DETAILS AND PREDICTION OF THEIR STRENGTH AND STIFFNESS,**

SINGHAL, V., Y RAI, D. C. (2016). Esta investigación consistió en realizar ensayos experimentales de ocho muros de albañilería confinada, cuatro de las cuales eran muros sin aberturas y otras cuatro con aberturas con diferentes configuraciones. Esta investigación buscaba determinar la precisión de diferentes modelos de predicción de las respuestas en muros de albañilería confinada con aberturas.

Dentro de la investigación presentaron investigaciones en las cuales presentan ecuaciones para determinar las variaciones de resistencias y de rigideces de muros de albañilería confinada con aberturas en comparación con muros sin aberturas, determinando que las ecuaciones que presentadas por Rai (2014) presentaron muy buenos resultados.

- **ENSAYE DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA DE LADRILLO CERÁMICO CON ABERTURAS – M. ASTROZA Y O. OGAZ (2005).** En esta investigación trata sobre un estudio experimental de 12 muros de albañilería en escala natural, con un muro patrón sin aberturas y muros con aberturas que simulan ventanas, puertas y las combinaciones de estas. Se evaluó las disposiciones de la norma chilena de cuantía en aberturas, además de las reducciones de rigidez y resistencia ante la presencia de las aberturas.

Ante los resultados de la investigación experimental se concluyó que las aberturas modifican el patrón de aberturas, cambiando la posición crítica a evaluar para la colocación del reforzamiento en las aberturas. Los resultados también confirman la necesidad de confinar las aberturas de tamaño de ventanas o puertas comunes.

- **DAMAGE LIMIT STATES FOR CONFINED MASONRY WALLS BASED ON EXPERIMENTAL TEST – C. ZAVALA, M. DIAZ (2019).** En esta investigación se basa en una data de ensayos experimentales de 33 años y además de un ensayo experimental de una vivienda de mampostería construida a escala natural en el laboratorio del CISMID, con el objetivo de proponer límites de estado de daño para muros de albañilería construidos con muros de ladrillos industriales, ladrillos tubulares y ladrillos artesanales.

En el ensayo experimental de la vivienda en escala natural se dejaron dos aberturas que representan ventanas en una vivienda para poder ver el comportamiento en este tipo de muros con aberturas sin confinar.

Se pudo observar en este tipo de estructuras con aberturas que al no estar confinadas son los principales puntos por donde empiezan las fisuras en los muros, se concentran esfuerzos en los vértices de las aberturas y cuando la estructura estuvo en el límite de estado dado por la norma

peruana de 0.005, estas aberturas que representan ventanas y puertas se deforman tanto de que producirían el rompimiento de cristales de la ventana que pondrían en riesgo la integridad humana y que las puertas se vuelven no funcionales ante tanta deformación.

- **ANALYSIS OF CONFINED MASONRY WITH STRENGTHENING AROUND THE OPENING – I. BUDIWAT, M SUKRAWA, IGAD WIRASUKMA (2022).** Este estudio presenta el análisis de modelos numéricos de muros de albañilería confinada realizados mediante el software SAP2000 con modelos no lineales de los materiales. Dentro de estos modelos se hicieron muros de albañilería confinada completos, muros con aberturas con diferentes tamaños de ventanas y puertas, céntricas y excéntricas. En algunos muros se colocaron refuerzos alrededor de las aberturas y se compararon los resultados.

Concluyeron en la investigación que si bien estos refuerzos alrededor de las aberturas ayudaron a mejorar la rigidez y resistencia de los muros con aberturas (además de que en algunos casos los refuerzos en aberturas excéntricas no ayudaban a mejorar estos aspectos) en aberturas de ciertos tamaños era mejor la opción de reforzarlos mediante elementos de concreto armado (columnetas y vigas), aunque no se definió los límites de los tamaños de las aberturas.

- **BI-DIRECTIONAL COLLAPSE FRAGILITY ASSESSMENT BY DFEM OF UNREINFORCED MASONRY BUILDINGS WITH OPENINGS AND DIFFERENT CONFINEMENT CONFIGURATIONS – D. TRISSA, T. YUEN, D. LEE, R. HALDER, Y. YOU (2021).** La investigación consta de realizar modelos numéricos tridimensional de estructuras de albañilería no reforzada mediante un híbrido del método de elementos finitos FEM y elementos discretos DFEM que incluyen leyes de daño plástico, leyes de tracción-separación, entre otras propiedades, que pueden simular la dinámica compleja del colapso progresivo de la estructura para evaluar la fragilidad de este tipo de estructuras. Dentro de la investigación también se modelan estructuras de albañilería confinada con aberturas que simulan las ventanas y puertas de dichas edificaciones. Compararon los resultados

de los modelos de albañilería confinada y albañilería sin reforzar llegando a la conclusión de que los muros con albañilería confinada tenían una resistencia a las fuerzas laterales en por lo menos 2.5 veces. Se encontró que, en las edificaciones de albañilería confinada, el colapso de estas estructuras empezaba en los vértices de las aberturas generando esfuerzos concentrados en estas zonas y propagándose rápidamente las deformaciones y el agrietamiento hasta llegar al colapso. Además, se observó que colocando una viga de coronación que se encuentra en la zona superior de las aberturas y alrededor de toda la estructura hizo que mejorara notablemente en la resistencia de la edificación, además que produjo un colapso retrasado en comparación a no colocar este elemento.

- **EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF CONFINED MASONRY WALLS WITH WINDOW OPENINGS STRENGTHENED BY USING HYBRID-FIBER MODIFIED REACTIVE POWDER CONCRETE – G. LIU, ET AL. (2022).** En este estudio se realizó el estudio experimental del reforzamiento de aberturas de tipo ventana mediante el uso de concreto de polvos reactivos modificados con híbridos de fibra. La investigación consiste en el ensayo experimental de muros de albañilería con aberturas, 1 sin reforzamiento y las demás con diferentes formas de reforzarlos con el material mencionado. La carga a la que fueron expuestos estos especímenes fue una carga lateral cíclica y con una carga constante vertical. En los resultados de los ensayos se pudo observar que la falla de los muros con aberturas sin reforzamiento se da del tipo de fuerza por compresión diagonal, en donde el agrietamiento se da a partir de los vértices de las aberturas. Sin embargo, los especímenes con el reforzamiento tuvieron una falla de deslizamiento por corte mejorando la resistencia del muro hasta en un 60% más. Además, este reforzamiento aumentó las propiedades mecánicas de carga última, carga de agrietamiento, rigidez y energía disipada en por lo menos 300%.
- **CLASSIFICATION AND SEISMIC FRAGILITY ASSESSMENT OF CONFINED MASONRY SCHOOL BUILDINGS – ABSANA PARAMAL, DINA D'AYALA (2021).** En este estudio se realizaron modelos numéricos de una base de datos de escuelas construidas en el país de la India de muro de albañilería confinada, cuyas características principales fueron

diafragmas flexibles (techos ligeros) y que presentaban diferentes configuraciones de aberturas en los muros, Se evaluaron densidades de muros en las estructuras y la calidad de las conexiones entre elementos, además se realizaron evaluaciones de fragilidad a estas edificaciones. Las estructuras evaluadas se clasificaron según la disposición de las aberturas y la forma de reforzamiento a estas.

- **NORMA DE ALBAÑILERÍA E.070.** En la norma de albañilería actual de nuestro país, en su artículo 21 (SENCICO, 2006), define un muro de albañilería confinada a aquel muro de que cumpla varios requisitos, los más importantes son:
 - Debe estar confinado en sus cuatro bordes por elementos de concreto armado, ya sea mediante columnetas de confinamiento, vigas soleras o la propia cimentación.
 - La distancia entre ejes de columnetas de confinamiento no debe ser mayor a dos veces su altura ni a 5m.

Además, de manera general menciona en su artículo 17, los requisitos que debería tener todo muro portante que se considere como un elemento resistente a las fuerzas sísmicas y de gravedad, entre las más importantes:

- El muro deberá tener continuidad vertical hasta la cimentación.
- Deberá tener por lo menos 1.20m de longitud.
- Juntas de control en alféizar de ventanas.

Pero, en toda la norma no menciona sobre aberturas en los muros, por lo que se entiende que, si hubiera aberturas, estos muros se considerarían como tabiques o alféizar de ventana que no son parte de la estructura y que por lo tanto deberían estar separadas de la estructura principal mediante juntas de control.

- **NORMAS INTERNACIONALES DE ALBAÑILERÍA SOBRE ABERTURAS EN MUROS.** La albañilería confinada como técnica de construcción está muy difundida en Latinoamérica. Perú es un gran aportante en la investigación de esta técnica gracias principalmente al trabajo arduo del ingeniero San Bartolomé, así como también del ingeniero Daniel Quiun y demás investigadores peruanos. Los otros países que usa

mucho esta técnica son México y Chile, en los demás países latinoamericanos también es utilizada pero no en gran magnitud y no posee muchos aportes de investigaciones respecto al tema.

En el mundo, los países de Europa mediterránea han aportado con muchos ensayos e investigaciones de albañilería, donde posteriormente han producido sus normativas correspondientes. En Asia, en algunos países como China e Indonesia consideran a la albañilería confinada como una técnica de construcción estándar. India, es un gran aportante del desarrollo e investigación en la albañilería confinada. Nueva Zelanda usa como técnica la albañilería, pero como pórticos rellenos con albañilería y con albañilería armada, que aporta también al desarrollo de la investigación de la albañilería.

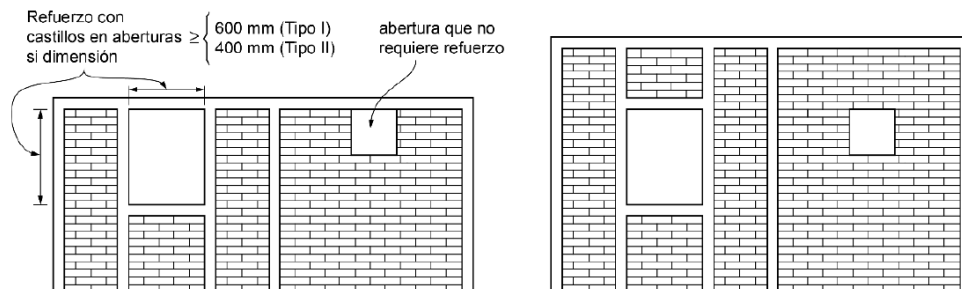
De todos estos países se ha resaltado las siguientes cuatro normas que permiten aberturas en muros de albañilería confinada. En estas normas definen las dimensiones máximas de la abertura en las cuales no es necesario confinar dichas aberturas, sobrepasando estas aberturas indican el refuerzo necesario. Los parámetros que toman para determinar esto, son: las dimensiones de la abertura (ya sea como longitud absoluta o como longitud relativa al paño), la ubicación de las aberturas respecto al paño y el área de la abertura relativa respecto al paño. En el presente trabajo se tomarán también estos parámetros. Además, en estas normas sugieren al ingeniero las maneras de modelamiento de las aberturas.

- a) **NORMA NTC MÉXICO 2017.** En la normativa técnica de construcción de albañilería de México (2017), en el apartado de muros de mampostería confinada, hablan sobre aberturas dentro de estos muros. Se indican que para aberturas de tamaños que no superen los 400mm y los 600mm, dependiendo de si es una estructura tipo I o tipo II respectivamente, no necesitan confinarlas. Es decir, la norma mexicana acepta aberturas en muros portantes de albañilería confinada e incluso sin necesidad de confinarlas.

En el apéndice B, en el modelamiento de las estructuras de mampostería, en el método de columna ancha, consideran los alfeizar de ventanas como

parte de la estructura resistente y las modelan tipo viga con la sección correspondiente. En el caso de aberturas, se entiende que deba ser modelado mediante elementos finitos, ver Figura 2.

Figura 2: Refuerzo en el perímetro de aberturas según norma mexicana



Nota: Gráfico explicativo de cuándo no es necesario el refuerzo en aberturas según normativa mexicana. Reproducido de "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", 2017.

b) NORMA CHILENA DE ALBAÑILERÍA CONFINADA NCH2123.OF1997 MODIFICADA 2003.

En la norma chilena, también hacen un apartado para hablar sobre aberturas en la albañilería confinada, aceptando de igual manera aberturas dentro de estos muros. En esta parte de la norma menciona cuándo no es necesario poner refuerzos en dichas aberturas. Ellos ponen dos casos en los cuales se puede prescindir de los refuerzos en las aberturas:

- Cuando la abertura tiene los lados con una longitud menor a 20cm. En este caso no importará la ubicación en la que se encuentre con respecto al paño
- Cuando la abertura tiene los lados con una longitud menor a 60cm, pero en este caso la abertura deberá encontrarse dentro de la zona superior central. Para asegurar la ubicación se debe cumplir todos los requisitos siguientes a la vez:
 - ✓ El área de la abertura es menor o igual a 5% del área del paño.
 - ✓ La distancia desde la columneta al borde de la abertura tiene que ser menor a 25% de la longitud del paño.

- ✓ La distancia entre los bordes inferiores de la abertura y del paño debe ser mayor a dos tercios de la altura del paño.

c) **REGLAMENTO ARGENTINO PARA CONSTRUCCIONES SISMORRESISTENTES (2018)**. En Argentina, dentro de su reglamento para estructuras de albañilería, también hablan sobre aberturas dentro de muros portantes de albañilería confinada (Muros con encadenados simples). De la misma manera, consideran dos casos donde no es necesario colocar confinamiento en las aberturas. Estos dos casos se dividen principalmente por la ubicación de la abertura respecto al paño, pero también llevan muy en cuenta el porcentaje de área que representa la abertura.

Es decir, cuando la abertura se encuentra centrada respecto al paño se debe cumplir que:

- ✓ El área de la abertura tiene que ser menor o igual al 10% del área del paño.
- ✓ Las dimensiones de la abertura tienen que ser menores al 35% de las dimensiones del paño.

Para poder afirmar que la abertura se encuentra centrada, los bordes de la abertura deberán estar alejados por lo menos un 25% de la dimensión correspondiente del paño, como mínimo 900mm en la dirección horizontal y 600mm en dirección vertical

Y cuando la abertura no se encuentre centrada respecto al paño se debe cumplir que:

- ✓ El área de la abertura tiene que ser menor o igual al 5% del área del paño
- ✓ Las dimensiones de la abertura tienen que ser menores al 25% de las dimensiones del paño

d) **NORMA NEOZELANDESA “ASSESSMENT AND IMPROVEMENT OF THE STRUCTURAL PERFORMANCE OF BUILDINGS IN EARTHQUAKES” – 2006**. En Nueva Zelanda las construcciones de albañilería de ladrillo por lo general son de albañilería simple o con armadura interior. Su investigación por lo general va dedicada a la

mampostería rellena, en su mayoría por unidades de concreto, en pórticos de concreto armado.

Si bien el presente trabajo se centra en el sistema estructural de mampostería confinada, las investigaciones de pórticos de concreto armado rellenos de albañilería nos aportan datos para el entendimiento en cómo afecta las aberturas tanto en resistencia como rigidez a los muros de albañilería en general.

La normativa neozelandesa nos dice que cuando haya aberturas lo mejor es analizarlo mediante el uso de bielas y tirantes, proporciona el factor de reducción de rigidez y de resistencia. Este factor $\lambda_{opening}$, está basado en el trabajo de Dawe y Seah (1988) se basa en la relación de la longitud de la abertura con la del paño de albañilería, que está expresada por $\lambda_{opening} = 1 - 1.5 L_{opening}/L_{inf}$. Se puede deducir de la fórmula que, si la abertura tiene una dimensión mayor a los dos tercios de la longitud efectiva del paño de la abertura, el muro de albañilería no aporta rigidez alguna al sistema estructural.

- **COMPARACIÓN ENTRE LAS NORMAS DE ALBAÑILERÍA**

Tabla 1. Comparativo de Normas de albañilería, sobre cuándo no se necesita confinar una abertura.

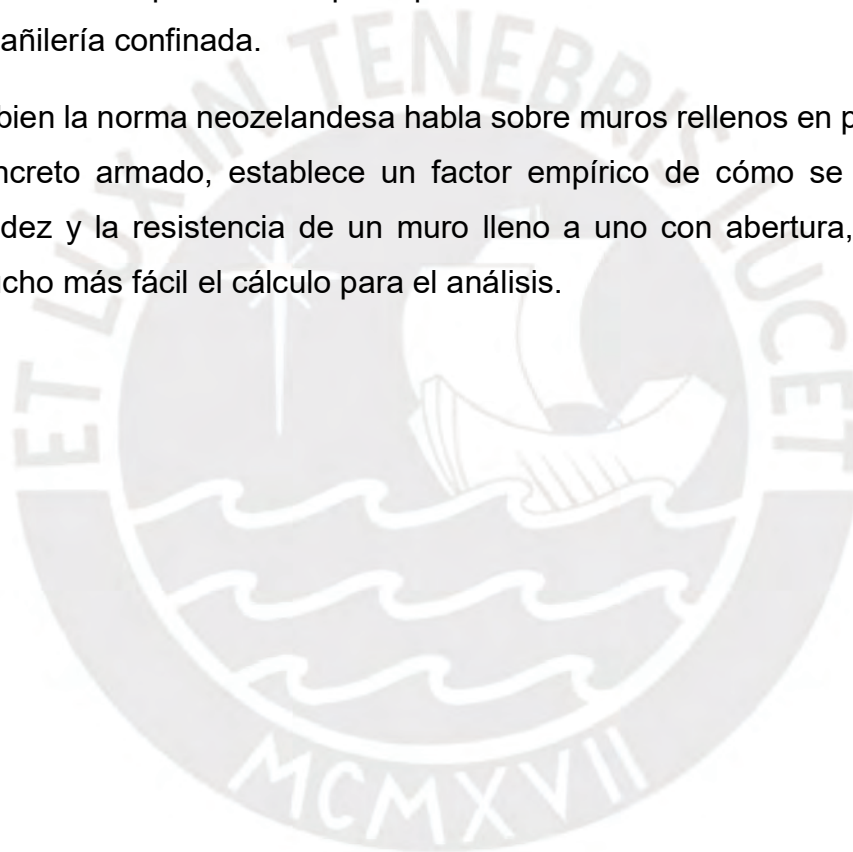
Norma	Longitud Máxima de abertura	Posición de la abertura respecto al paño	%área máxima de la abertura respecto al paño
<i>NTC MEXICO 2017</i>	Tipo I: $L_{m\acute{a}x}=600\text{mm}$ Tipo II: $L_{m\acute{a}x}=400\text{mm}$	Sin restricción	Sin restricción
NCH2123	$L_{m\acute{a}x}=20\text{cm}$	Sin restricción	Sin restricción
CHILE 2003	$L_{m\acute{a}x}=60\text{cm}$	Centrada	$A_{m\acute{a}x}=5\%$
INPRES-INTI-	$L_{m\acute{a}x}= 35\%*L_{pa\tilde{n}o}$	Centrada	$A_{m\acute{a}x}=10\%$
CIRSOC - ARGENTINA	$L_{m\acute{a}x}= 25\%*L_{pa\tilde{n}o}$	Sin restricción	$A_{m\acute{a}x}=5\%$

Nota: Comparación de las normas de albañilería de México, Chile y Argentina respecto a la aceptación de aberturas en muros de albañilería confinada y las restricciones de dimensiones y ubicación. Elaboración propia.

Como se muestra en la Tabla 1. Dentro de todas estas normativas proponen de diferentes maneras como tratar las aberturas dentro de los

muros de albañilería confinada, pero tienen en consenso el de aceptar aberturas en los muros de albañilería confinada. En el Perú, la normativa aún no dedica especificaciones sobre este tema, más aún según la norma E.070 establece que el muro de albañilería confinada debe estar confinada en todo su perímetro, esto deja como prohibición las aberturas sin confinar en este tipo de muros. Sin embargo, se puede ver por los estudios realizados en otros países que posteriormente concluyeron en su normativa correspondiente, que estas aberturas sin confinar son aceptables y debería de establecerse dentro de la norma de albañilería peruana los parámetros para permitir aberturas dentro de muros de albañilería confinada.

Si bien la norma neozelandesa habla sobre muros rellenos en pórticos de concreto armado, establece un factor empírico de cómo se reduce la rigidez y la resistencia de un muro lleno a uno con abertura, haciendo mucho más fácil el cálculo para el análisis.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

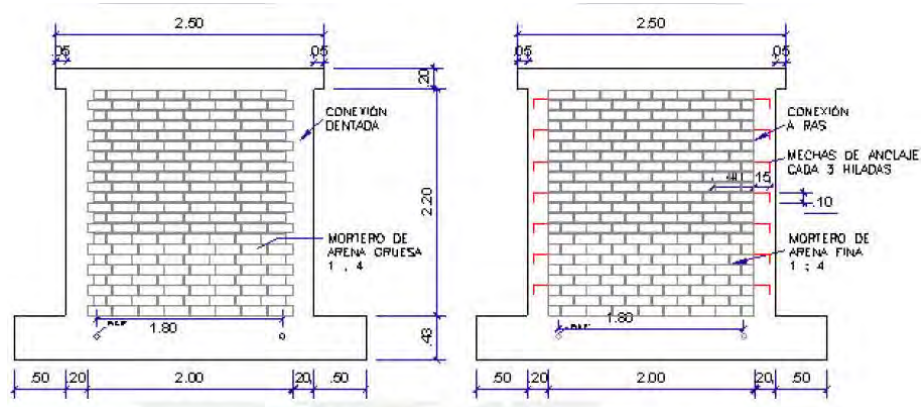
2.1 ALBAÑILERÍA CONFINADA

2.1.1 DEFINICIÓN

La albañilería es definida como el conjunto de unidades, como pueden ser piedras, adobes, tapias, ladrillos de arcilla, bloques de cemento, etc., apiladas y unidas mediante un material adherente, como yeso, cal, mortero de barro, mortero de cemento, etc., con el fin de construir muros como elemento estructural o elemento de tabiquería. En la presente tesis se hablará de la albañilería como la unión de las unidades de ladrillos de arcilla unidas mediante el elemento adherente de mortero de concreto.

La albañilería confinada es la técnica de construcción en la que un muro de albañilería se confina mediante elementos de concreto armado en su perímetro. En esta técnica de construcción se busca un comportamiento estructural en conjunto de la albañilería con los elementos de confinamiento, esto se logra construyendo primero el muro de albañilería y luego los elementos de confinamiento. Además, en los extremos laterales de los muros se deja un dentado para que el concreto y la albañilería tengan una mejor unión, denominada “Conexión Dentada”. Pero, el dentado puede traer ciertos problemas, como la cangrejera que se puede ocasionar por un dentado muy grande o por la poca fluidez del concreto, ocasionando la pérdida de confinamiento de los elementos de concreto armado. Se puede optar por otra solución en la que la unión de la albañilería y los elementos de confinamiento se hace mediante mechas de anclaje dejadas cada cierto número de hiladas de la albañilería para que estos anclajes queden dentro de los elementos de concreto armado sin necesidad de dejar un dentado, a esta unión se le denomina “Conexión a Ras”. Ambas conexiones se pueden observar en la Figura 3.

Figura 3: Muros de albañilerías confinada con “Conexión Dentada” y “Conexión a Ras”.



Nota: Esquema de las conexiones dentadas y conexiones a ras en muros de albañilería confinada. Reproducido de “Control de la trituración de los ladrillos huecos en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica” Paredes J. (2009).

2.1.2 ELEMENTOS DE LA ALBAÑILERÍA CONFINADA

La albañilería confinada, como se definió, está compuesta por la albañilería y los elementos de confinamiento. Individualmente los elementos que componen a la albañilería confinada son:

- **Ladrillos:** En Perú, las unidades de albañilería más usadas son los ladrillos de arcilla cocidos. En este medio existen los ladrillos de arcilla fabricados industrialmente y artesanalmente.

La norma E.070 de Albañilería, dicta que para fines estructurales solo están permitidos los ladrillos sólidos industriales y unidades alveolares con las celdas rellenas totalmente con grout.

Por lo general las dimensiones de los ladrillos sólidos industriales son de 23 cm de largo, 13 cm de ancho y 9 cm de alto. Dependerá de la disposición en el apilamiento de los ladrillos el espesor del muro, es así que cuando el apilamiento es en soga el espesor del muro es de 13cm y si el apilamiento es de cabeza el espesor del muro será de 23cm.

En la presente investigación, el muro de albañilería confinada en estudio estará conformado por unidades de albañilería de ladrillos sólidos industriales dispuestos en soga.

- **Mortero:** El material adherente que une los ladrillos en este caso será el mortero. Este material está constituido por la mezcla de agregados finos con cemento. El agregado fino es arena gruesa cuyo módulo de fineza debe estar comprendido entre 1.6 y 2.5. La proporción entre el cemento y el agregado está delimitada por la norma E.070 para muros portantes de la proporción de 1:3 hasta 1:5.
- **Vigas y Columnas de confinamiento:** Los elementos de confinamiento, vigas y columnas, son de concreto armado. El concreto usado para estos elementos, según norma E.070, deberá tener una resistencia mínima a la compresión $f'_c=175 \text{ kg/cm}^2$. Debido a que la función principal de las columnas de confinamiento no es la de soportar grandes cargas axiales, en la presente investigación se usará la resistencia mínima $f'_c=175 \text{ kg/cm}^2$. El acero estructural usado serán barras corrugadas que tendrán una resistencia a la tracción de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$. Se colocará en los elementos de confinamiento por lo menos 4 barras longitudinales que estarán debidamente estribadas. Los elementos de confinamiento tendrán el mismo espesor del muro, es decir 13cm.

2.2 RIGIDEZ Y RESISTENCIA EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

2.2.1 RIGIDEZ DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

Un muro de albañilería confinada es un sistema compuesto de materiales compuestos a su vez, la albañilería y el concreto armado. Por simplicidad de análisis estos materiales compuestos son definidos como un material homogéneo. Cada uno de estos materiales individualmente tienen sus propiedades mecánicas, módulo de elasticidad, módulo de corte, coeficiente de poisson, etc. Que aportan en el cálculo de la rigidez de un muro de albañilería confinada.

Suponiendo un muro de albañilería confinada, para el cálculo de rigidez la sección del muro en análisis se puede uniformizar el material mediante

la relación de módulos de elasticidad entre el concreto armado y la albañilería “n”. Teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad del concreto armado es mayor al de la albañilería, esta relación n multiplicará área de las columnas de confinamiento y a estas columnas aumentadas se les asignará las propiedades de la albañilería, teniendo así una sección transformada. Es decir, de albañilería confinada con materiales compuestos lo transformamos en una sección de un solo material homogéneo, ver la Figura 4.

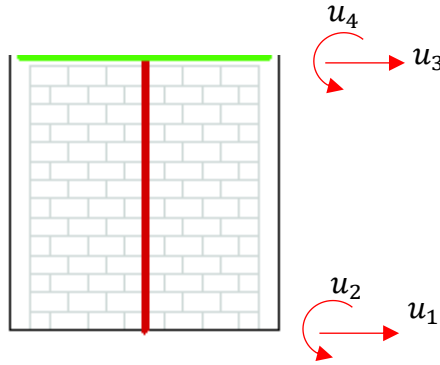
Figura 4: Sección transformada de un muro de albañilería.



Nota: se muestra esquemáticamente la transformación de una sección de albañilería confinada, se uniformiza a un solo material multiplicando el valor n por el área de las columnas de confinamiento. Elaboración propia.

Teniendo esta consideración, para hallar la rigidez al desplazamiento lateral de un muro de albañilería en comportamiento lineal se simplifica a un modelo de una viga considerando deformaciones de flexión y deformaciones por corte, es decir una viga que considera las deformaciones de corte. Esta viga tiene 4 grados de libertad, 2 de desplazamiento y 2 de giro en los extremos como se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Idealización de un muro de albañilería como un elemento tipo viga.



Nota: Se muestra el modelamiento de un muro de albañilería confinada mediante una viga que considera las deformaciones de corte con los 4 grados de libertad respectivos. Los grados de libertad de desplazamiento u_1 , u_3 y los grados de libertad de giro u_2 , u_4 ; a partir de estos se podrá hallar su matriz de rigidez correspondiente. Adaptado de “Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Comité de Mampostería, 2012.

El muro con sección transformada, con estos grados de libertad tiene la siguiente matriz de rigideces:

$$K_a = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3(1+\Phi)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} & -\frac{12EI}{L^3(1+\Phi)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} \\ \frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} & \frac{(4+\Phi)EI}{(1+\Phi)L} & -\frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} & \frac{(2-\Phi)EI}{(1+\Phi)L} \\ -\frac{12EI}{L^3(1+\Phi)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} & \frac{12EI}{L^3(1+\Phi)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} \\ \frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} & \frac{(2-\Phi)EI}{(1+\Phi)L} & -\frac{6EI}{L^2(1+\Phi)} & \frac{(4+\Phi)EI}{(1+\Phi)L} \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \frac{12EI}{GA_s L^2}$$

En donde:

E : Módulo de elasticidad de albañilería.

I : Inercia de la sección transformada.

G : Módulo de Corte de albañilería.

A_s : Área de corte (área de la sección por un factor de forma)

L : Longitud del elemento (altura de muro).

Para hallar la rigidez solamente al desplazamiento lateral del muro tendremos que condensar estáticamente al grado de libertad número 3.

Un caso particular es si consideramos que el muro está en voladizo esto sucede si restringimos los GDL 1 y 2. Podemos hallar de manera más simple la rigidez a desplazamiento lateral. Será la suma en serie de la rigidez por flexión y la rigidez por corte teniendo así:

$$K = \frac{1}{\frac{L^3}{3EI} + \frac{L}{GA_s}}$$

2.2.2 RESISTENCIA DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

El cálculo de la resistencia de un muro de albañilería confinada, tiene en Perú mucha investigación experimental que derivó en las expresiones dictadas por las normas peruanas a lo largo del tiempo. Es la norma técnica E.070 de Albañilería quien estipula estas expresiones, como por ejemplo las características mecánicas de este tipo de muros, tales como el módulo de elasticidad y módulo de corte de la siguiente manera:

Unidades de arcilla: $E_m = 500 f'm$

Unidades Sílico-calcáreas: $E_m = 600 f'm$

Unidades de concreto vibrado: $E_m = 700 f'm$

Y Para todo tipo de unidad: $G_m = 0.4 E_m$

Donde:

E_m : Módulo de elasticidad de la albañilería

G_m : Módulo de corte de la albañilería

$f'm$: Resistencia característica a la compresión de la albañilería

En este reglamento se establece la resistencia máxima al agrietamiento diagonal, que viene dado por la siguiente expresión:

$$V_m = 0.5 v'm . a . t . L + 0.23 . P_g$$

Donde:

$v'm$:	Resistencia característica al corte de la albañilería
t, L	:	Espesor y largo del muro de albañilería
Pg	:	Carga gravitacional sobre el muro
α	:	Factor de reducción por esbeltez

Además, la norma E.070 también acepta que las características mecánicas se pueden establecer mediante ensayos experimentales. El módulo de elasticidad del muro de albañilería se puede establecer mediante el ensayo de la resistencia a la compresión de pilas de albañilería. El módulo de corte de los muros de albañilería se puede determinar a través del ensayo de tracción diagonal de muretes de albañilería simple. Estos ensayos se describen a continuación

2.2.3 ENSAYOS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA.

Para determinar las propiedades mecánicas de la albañilería confinada y también para verificar la calidad de sus materiales, la norma E.070 de albañilería dispone varios ensayos.

Para las unidades de ladrillo de arcilla se determinan sus características para clasificarlas para fines estructurales. Estas características son la “Variación de la Dimensión”, “Alabeo” y “Resistencia característica a la compresión”. La resistencia característica a la compresión nos da una propiedad mecánica de la albañilería por lo cual se prestará mayor atención a esta. Para determinar esta propiedad se realiza el ensayo de la resistencia a la compresión.

Para determinar el comportamiento de la albañilería, es decir el comportamiento en conjunto de las unidades de albañilería y el mortero existe los ensayos de pilas y de muretes.

El comportamiento global de un muro de albañilería confinada puede ser comprendido a través de ensayos de carga, ya sea un ensayo cuasiestático o un ensayo cíclico de carga lateral.

2.2.3.1 Resistencia Característica a la Compresión de la unidad de albañilería ($f'b$)

El ensayo para determinar la resistencia a la compresión de una unidad está regido por la norma técnica peruana NTP 399.613.

Esta norma indica que la unidad debe ser refrentada, ya sea con yeso, mortero o azufre, en la superficie de contacto para distribuir uniformemente la fuerza. Luego se procederá a que el cabezal de la maquinaria empiece a aplicar la fuerza hasta que se produzca la falla en la unidad. La resistencia a la compresión será determinada mediante la siguiente ecuación:

$$fb = \frac{P}{A}$$

Donde:

fb : Resistencia a la compresión.

P : Carga en la que se produce la falla.

A ; Área bruta del ladrillo sobre la cual se aplicó la carga.

La resistencia característica será determinada después de hacer un conjunto de ensayos y será determinado por:

$$f'b = \bar{x}_{fb} - \sigma_{fb}$$

Donde:

$f'b$: Resistencia característica a la compresión.

\bar{x}_{fb} : Media de la resistencia a la compresión del conjunto de ensayos.

σ_{fb} : Desviación estándar de la resistencia a la compresión del conjunto de ensayos.

2.2.3.2 Resistencia Característica de la Albañilería a la Compresión Axial ($f'm$)

Para determinar la resistencia característica de la albañilería a la compresión axial se tiene que seguir lo dispuesto por la norma técnica peruana NTP 399.605, ver Figura 6.

Figura 6: Esquema del ensayo a Compresión axial.



Nota: Se muestra el esquema del ensayo a compresión axial, donde una vez construida la pila se rellena la base y la parte superior de la pila para que la carga se distribuya uniformemente. Elaboración propia

En esta norma se indica que la muestra a la cual se hará el ensayo es un prisma de albañilería construido por el apilamiento de las unidades de albañilería, una sobre otra, unidas por el mortero. La relación de altura y espesor deberá estar entre 1.3 y 5.0. A estos prismas se les hará el respectivo refrentado para crear un área de contacto uniforme en donde se aplicará la carga. La maquinaria aplicará la carga a la pila hasta conseguir la falla de esta.

La resistencia a la compresión será determinada mediante la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde:

f_m : Resistencia a la compresión.

P : Carga en la que se produce la falla.

A ; Área neta del ladrillo sobre la cual se aplicó la carga.

A esta resistencia a la compresión se le multiplicará un factor de corrección por esbeltez, determinado por la Tabla 2, donde la esbeltez es determinada por la relación entre la altura del prisma y la medida lateral menor del prisma h_p/t_p .

Tabla 2. Factor de Corrección por esbeltez.

hp/tp	2.00	2.50	3.00	4.00	4.50	5.00
Factor de Corrección	0.75	0.80	0.91	0.95	0.98	1.00

Nota: La tabla muestra la corrección a la resistencia del ladrillo determinada por la esbeltez. La esbeltez se determina por la relación de la altura de la pila entre la menor dimensión de la base. Adaptado de "Norma Técnica E.070 Albañilería", SENCICO, 2006.

La resistencia característica será determinada después de hacer un conjunto de ensayos y será determinado por:

$$f'm = \bar{x}_{fm} - \sigma_{fm}$$

Donde:

$f'm$: Resistencia característica a la compresión.

\bar{x}_{fm} : Media de la resistencia a la compresión del conjunto de ensayos.

σ_{fm} : Desviación estándar de la resistencia a la compresión del conjunto de ensayos.

Mediante este ensayo se puede hallar el Módulo de elasticidad de la albañilería. Para esto es necesario medir las deformaciones durante el ensayo. Así el módulo de la elasticidad se podrá hallar mediante:

$$E_m = \frac{\Delta f_m}{\Delta \varepsilon_v}$$

Donde:

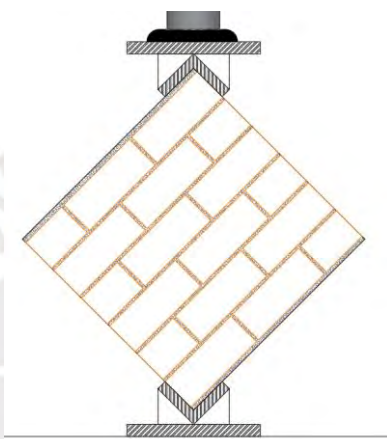
Δf_m : Diferencia entre el esfuerzo de compresión entre el 10% y 50% del esfuerzo f_m máximo.

$\Delta \varepsilon_v$: Diferencia entre la deformación unitaria cuando la resistencia el esfuerzo de compresión está entre el 10% y 50% del esfuerzo f_m máximo.

2.2.3.3 Resistencia Característica de la Albañilería a la Compresión Diagonal ($v'm$)

Para este ensayo las muestras serán muretes de albañilería cuadrados de 600mmx600mm donde por lo menos habrá 2 unidades de albañilería en cada hilada, ver Figura 7.

Figura 7: Esquema del ensayo a Compresión diagonal.



Nota: Se muestra el esquema del ensayo a compresión diagonal, Se construye previamente el murete, luego se coloca de manera diagonal para someterlo a una carga vertical. Elaboración propia

La norma que rige este ensayo es la norma técnica peruana NTP 399.621. En este ensayo es necesario refrentar dos vértices opuestos del murete, en uno irá sobre el apoyo y en el otro se le aplicará la carga. Es decir, la carga es aplicada diagonalmente al murete.

La resistencia a la compresión diagonal será determinada mediante la siguiente ecuación:

$$v_m = \frac{0.707P}{Ab}$$

Donde:

f_b : Resistencia a la compresión.

P : Carga en la que se produce la falla.

A ; Área bruta del espécimen.

El área se deberá calcular mediante:

$$Ab = \frac{l + h}{2} \cdot t$$

Donde:

- l : Largo del murete
 h : Altura del murete.
 t ; Espesor del murete.

La resistencia característica a compresión diagonal será determinada después de hacer un conjunto de ensayos y será determinado por:

$$v'm = \bar{x}_{vm} - \sigma_{vm}$$

Donde:

- $v'm$: Resistencia característica a la compresión diagonal.
 \bar{x}_{vm} : Media de la resistencia a la compresión diagonal del conjunto de ensayos.
 σ_{vm} : Desviación estándar de la resistencia a la compresión diagonal del conjunto de ensayos.

Mediante este ensayo también se puede hallar el Módulo de Corte de la albañilería. Para esto es necesario medir las deformaciones verticales y horizontales durante el ensayo. Así el módulo de la corte se podrá hallar mediante:

$$Gm = \frac{\Delta vm}{\Delta \gamma}$$

Donde:

- Δvm : Diferencia del esfuerzo de corte entre el 10% y 50% del esfuerzo vm máximo.
 $\Delta \gamma$: Diferencia entre la deformación angular cuando la resistencia el esfuerzo de compresión diagonal está entre el 10% y 50% del esfuerzo vm máximo.

2.2.3.4 Ensayo cuasiestático de desplazamiento Incremental

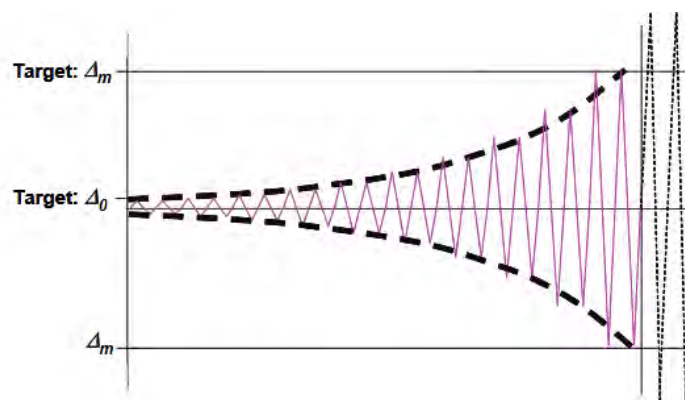
Este tipo de ensayo se realiza para elementos estructurales que se encuentran en zonas de alta sismicidad, como es en el caso del Perú.

La técnica de ensayo está guiada por las recomendaciones del FEMA 461, en la cual describe el procedimiento, materiales, equipo, etc. Que se debe tener en cuenta durante la aplicación de este ensayo. La muestra de ensayo, en este caso, es un muro de albañilería confinada, construida según lo determinado para este tipo de estructura, a escala natural. Sobre este muro se colocará transductores de deformación (LVDT) ubicados estratégicamente para poder obtener diversa información, como:

- Desplazamientos.
- Deformaciones.
- Diagramas histeréticos.
- Determinación del inicio de las diversas etapas de deformación del muro (Primera grieta, Agrietamiento diagonal, Deformación máxima, deformación última).

Una vez construido el muro y colocado los instrumentos de medición, este muro es sometido a una carga lateral cíclica en el plano mediante un actuador dinámico a la altura de la viga solera del muro con un desplazamiento controlado en ambos sentidos que va aumentando por etapas. Teniendo así una carga lateral cíclica que va aumentando con el tiempo, en la Figura 8 se muestra cómo sería la variación de la carga en el tiempo que dura el ensayo.

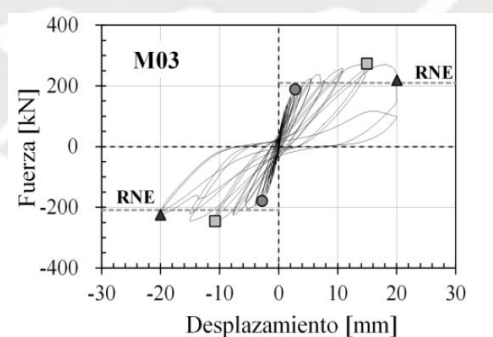
Figura 8: Esquema de la historia de la carga inducida por el actuador.



Nota: Se muestra la historia de desplazamiento que realizará el actuador durante el ensayo, en el eje de abscisas el tiempo, en el eje de las ordenas el desplazamiento. Reproducido de “Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components”, FEMA 461 (2007).

Mediante el registro de los LVDT's se puede graficar en el eje de las abscisas las deriva que tiene el muro y en el eje de las coordenadas la fuerza aplicada, esto para cada ciclo así obtener los diagramas histeréticos del muro. Finalmente graficar sobre los diagramas histeréticos la envolvente del comportamiento histerético del muro, ver Figura 9.

Figura 9: Diagrama histerético de un muro de albañilería sometido a un ensayo a carga cíclica

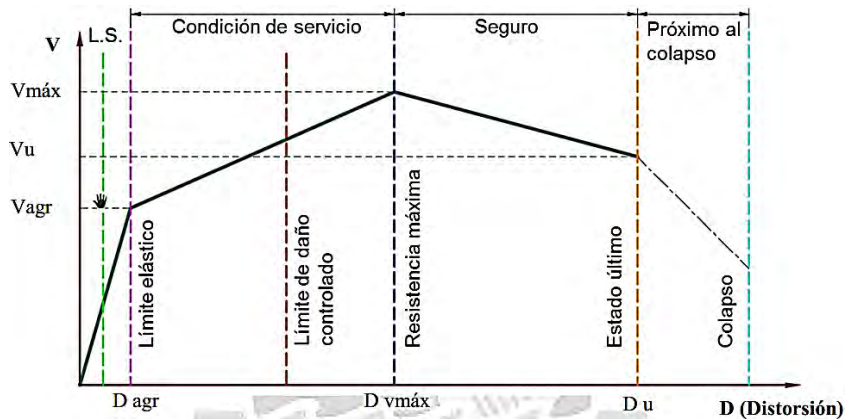


Nota: Se muestra la histéresis realizada para un muro de albañilería confinada por carga cíclica, se marcan los puntos de comportamiento elástico, resistencia máxima, estado último. Tomado de “Análisis experimental de muros de albañilería confinada en viviendas de baja altura en Lima, Perú”, Pari, S. (2017).

La curva de capacidad de la albañilería se puede definir como la envolvente del comportamiento histerético del muro. Es así que, Alcocer, S. (2013) a partir de la envolvente del comportamiento histerético de los

muros de albañilería en México genera la curva de capacidad idealizada en donde a partir de los parámetros de las derivas y cortantes del muro define etapas del comportamiento estructural del muro, como se explica en la Figura 10.

Figura 10: Curva de capacidad idealizada de un muro de albañilería.



Nota: Se muestra el gráfico del comportamiento idealizado de un muro de albañilería confinada, definiendo las etapas de comportamiento estructural. Tomado de "Envoltura de resistencia lateral de piso para estructuras de mampostería confinada", Alcocer M. 2013.

En esta curva idealizada se puede apreciar tres etapas del muro bien definidas las cuales son:

- Comportamiento Elástico.
- Degradación de la rigidez.
- Degradación de la rigidez y la resistencia.

Estas etapas están determinadas por límites que están asociados a determinado comportamiento del muro:

- Límite elástico: En el muro aparece la primera grieta diagonal
- Carga máxima: El muro alcanza el pico de resistencia
- Carga última: El muro pierde resistencia y está próxima al colapso.

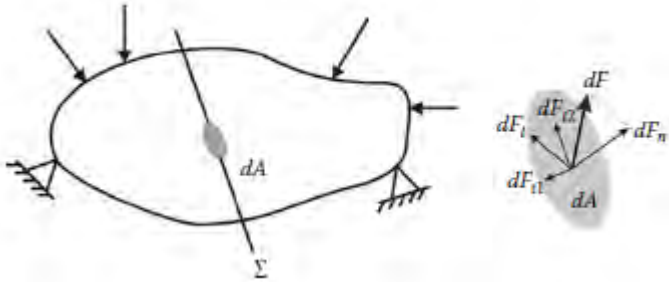
2.3 ELEMENTOS FINITOS EN EL MODELAMIENTO ANALÍTICO

2.3.1 LEYES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES

Si tenemos un cuerpo cualquiera que está sometido bajo fuerzas externas y que está en equilibrio como la Figura 11 y le hacemos un corte en un plano aleatorio, y de este plano tomamos un elemento infinitesimal dA ,

sobre la cual se está ejerciendo una fuerza dF , que tiene componentes normales y tangenciales.

Figura 11: Cuerpo en equilibrio bajo fuerzas externas.



Nota: Se muestra un cuerpo cualquiera en equilibrio bajo fuerza externas, en donde se toma un elemento infinitesimal en donde se descomponen las fuerzas que resultan en este elemento. Reproducido de "Introduction to Finite Element Analysis Using Matlab and Abaqus", Amar Khennane, 2013.

Los esfuerzos tangenciales y normales se pueden expresar como:

$$\sigma_n = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{d\vec{F}_n}{dA}$$

$$\sigma_t = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{d\vec{F}_t}{dA}$$

Si además consideramos que la fuerza tangencial tiene 2 componentes en el plano, se puede decir que tiene 3 esfuerzos, uno normal y 2 tangenciales. Sin embargo, dada las infinitas posibilidades de planos que pasa por un determinado punto tendríamos, infinitas componentes del esfuerzo. Pero si elegimos tres planos perpendiculares entre sí, las tensiones se pueden expresar matricialmente de la siguiente manera:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Haciendo equilibrio de fuerzas en dicho paralelepípedo, se puede afirmar que $\sigma_{12} = \sigma_{21}$, $\sigma_{13} = \sigma_{31}$, $\sigma_{23} = \sigma_{32}$. Teniendo así el tensor de esfuerzos:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Mediante la ley generalizada de Hooke, el tensor de esfuerzos está relacionado con el tensor de deformaciones a través de:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij}$$

Donde:

D_{ijkl} : Tensor de rigidez de cuarto orden con 81 componentes.

Pero para un material isotrópico de propiedades elásticas (es decir que son las mismas en cualquier dirección, por lo tanto, no dependen de la elección del sistema de coordenadas), el tensor de rigidez puede reducir la cantidad de elementos que tiene y se puede expresar de la siguiente manera:

$$D = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ D_{1122} & D_{1111} & D_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ D_{1122} & D_{1122} & D_{1111} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(D_{1111} - D_{1122}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(D_{1111} - D_{1122}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(D_{1111} - D_{1122}) \end{bmatrix}$$

Estos elementos pueden ser expresados a través de términos del módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson del material, resultando la ecuación generalizada de Hooke de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}$$

El problema a resolver en la presente investigación es un problema de esfuerzo plano, por lo tanto, los componentes de tensión σ_{33} , σ_{13} y σ_{23} se puede suponer razonablemente que son iguales cero en todo el grosor del elemento, y los otros componentes de esfuerzo σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} permanecen prácticamente constantes. Por tanto, tendríamos la ecuación de hooke para un problema de esfuerzos planos de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

2.3.2 ANÁLISIS LINEAL EN ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos resulta de gran ayuda en la investigación en la ingeniería estructural, ya que este método puede contribuir a disminuir en gran cantidad los ensayos experimentales que se tenga que hacer, por ende, reducción de costos en la construcción de ellos, mejora la precisión en los resultados, mejora la visibilidad en los resultados de los ensayos y reduce el tiempo de investigación.

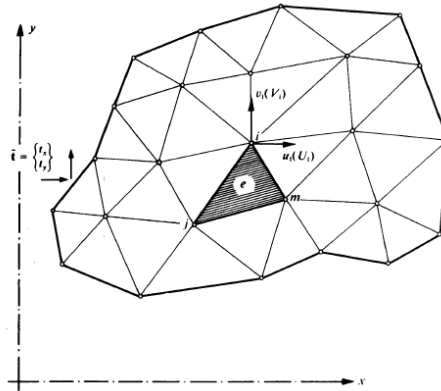
El método de elementos finitos permite la optimización de recursos para la construcción de elementos que se desean ensayar, ya que mediante el método de elementos finitos se pueden hacer muchos ensayos de prueba y error en un modelo virtual y obtener un elemento más óptimo que se pueda ensayar. Además, se pueden obtener resultados muy precisos con el avance que ha tenido el método. Otra ventaja del método de elementos finitos es que se pueden reducir los tiempos de la investigación, dado que si se quiere modificar algo al modelo virtual no requerirá mucho tiempo

hacer dicha modificación y no se tendrá que usarse recursos adicionales, como si lo sería en un modelo físico, dando más tiempo a los investigadores a la innovación técnica y optimización.

Según E. Oñate (2009), el método de elementos finitos es un procedimiento para la solución numérica de las ecuaciones que rigen los problemas encontrados en la naturaleza. Por lo general, el comportamiento de la naturaleza puede describirse mediante ecuaciones expresadas en forma de ecuaciones diferenciales o integrales. Por esta razón, el método de elementos finitos se entiende como una técnica numérica para resolver ecuaciones diferenciales o integrales parciales. Cuando se hace referencia al análisis de estructuras, el método de elementos finitos es un poderoso método para calcular los desplazamientos, fuerzas y deformaciones en una estructura que está sometido bajo un conjunto de cargas.

También E. Oñate (2009) menciona que un elemento finito se puede entender como una pequeña parte de un continuo. La denominación finito indica esa parte de los elementos infinitesimales del cálculo diferencial. La geometría del continuo se puede representar mediante el ensamblaje de una un grupo de partes (denominada elementos finitos) no superpuestos con geometría simple. Estos elementos, generalmente se escogen triángulos y cuadriláteros en dos dimensiones o tetraedros y hexaedros en tres dimensiones para representar los elementos. Se suele decir, que una malla de estos elementos discretiza el continuo. La variación de los desplazamientos de una estructura es expresada dentro de cada elemento mediante una expresión polinómica. Dado que la variación analítica exacta de dichos desplazamientos es mucho más compleja y generalmente desconocida (sobre todo a partir de elementos bidimensionales), el método de elementos finitos solo proporciona una aproximación a la solución exacta.

Figura 12: Discretización de un medio continuo a elementos finitos.



Notas: Se muestra la representación de un medio continuo discretizado mediante elementos triangulares, donde se muestra los nodos con sus respectivos desplazamientos (u_i, v_i). Reproducido de "The finite element method, Vol. 1" O. C. Zienkiewicz, 2000.

2.3.2.1 Formulación de elementos finitos para problemas planos

Las relaciones de desplazamiento con la deformación infinitesimal para un sistema de coordenadas (X,Y) se pueden expresar como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = L \cdot U$$

Donde:

u, v : Funciones del desplazamiento del cuerpo.

Consideraremos una de aproximación de elementos finitos para las funciones desconocidas u y v . El cuerpo continuo lo dividiremos en elementos que tienen "n" nodos, los desplazamientos desconocidos se interpolan usando aproximaciones nodales como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots & 0 & N_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$U = N \cdot a$$

Donde:

u_i, v_i : Desplazamientos nodales.

N_i : Funciones de interpolación de los desplazamientos entre nudos.

Reemplazando en la ecuación anterior:

$$\varepsilon = B \cdot a$$

Donde:

$$B = L \cdot N$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} & \frac{\partial N_n}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Para derivar la relación matricial entre las cargas que actúan sobre el elemento y sus desplazamientos nodales, utilizaremos el principio del trabajo virtual,

Para un determinado elemento finito, el principio del trabajo virtual se escribe como:

$$\int_V \delta \cdot \varepsilon^T \cdot \sigma \cdot dV = \int_V \delta \cdot U^T \cdot b \cdot dV + \int_S \delta \cdot U^T \cdot T \cdot dS + \sum \delta \cdot U^T \cdot P$$

Donde:

ε : Vector de deformaciones.

σ : Vector de esfuerzos.

b : Vector de fuerzas de cuerpo.

T : Vector de fuerzas de tracción en la superficie del cuerpo

P : Vector de fuerzas concentradas.

V ; Volumen del cuerpo

S : Contorno del cuerpo

La variación de las deformaciones y de los desplazamientos se puede reemplazar con las expresiones antes determinadas:

$$\delta . \varepsilon = B . \delta a$$

$$\delta . \varepsilon = B . \delta a$$

Además, el vector de esfuerzos:

$$\sigma = D . \varepsilon$$

$$\sigma = D . B . a$$

Reemplazando en la ecuación:

$$\begin{aligned} & \int_V \delta . a^T . B^T . D . B . a . dV \\ & = \int_V \delta . a^T . N^T . b . dV + \int_S \delta . a^T . N^T . T . dS + \sum \delta . a^T . N^T . P \end{aligned}$$

En la consideración para un elemento plano, el volumen dV y el contorno dS pueden escribirse respectivamente como:

$$dV = t . dA$$

$$dS = t . dl$$

Donde:

t : Espesor del elemento

dA : Diferencial de área

dS : Diferencial longitudinal del borde del elemento plano

Considerando que $\delta \cdot a$ es una variación en los valores nodales, por lo tanto, independiente de las coordenadas espaciales, puede cancelarse reduciendo la ecuación anterior:

$$\left(\int_A B^T \cdot D \cdot B \cdot t \cdot dA \right) \cdot a = \int_A N^T \cdot b \cdot t \cdot dA + \int_l N^T \cdot T \cdot t \cdot dl + \sum N^T \cdot P$$

La ecuación puede reescribirse en forma de matriz como:

$$K_e \cdot a = F_e$$

Donde:

$$K_e = \int_A B^T \cdot D \cdot B \cdot t \cdot dA$$

$$F_e = \int_A N^T \cdot b \cdot t \cdot dA + \int_l N^T \cdot T \cdot t \cdot dl + \sum N^T \cdot P$$

K_e : Matriz de rigidez del elemento finito.

F_e : Fuerzas aplicadas en los nudos del elemento finito

a : Desplazamientos nodales.

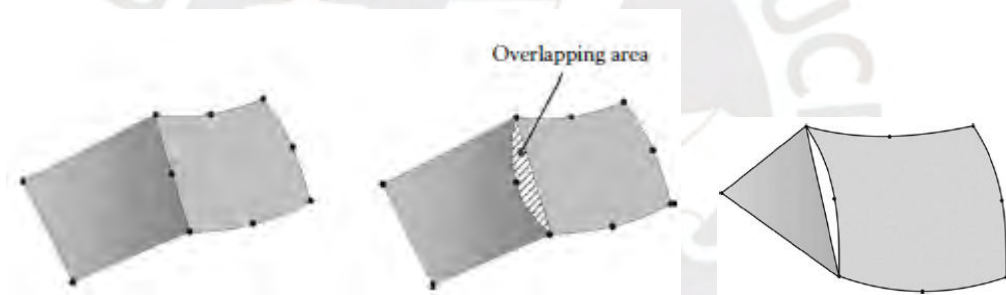
Donde termina siendo equivalente a un problema de Fuerza Desplazamiento.

2.3.2.2 Discretización de los medios continuos

Para iniciar el análisis de elementos finitos, se empieza por la partición del medio continuo en una malla adecuada de elementos finitos. Según Amar Khennane (2013) se debe tener las siguientes consideraciones:

- Dos elementos distintos solo pueden tener nudos en común si tienen límites en común. Esto para evitar cualquier superposición entre dos o más elementos.
- La malla de elementos finitos debe parecerse lo más posible al medio continuo.
- Los espacios entre elementos no están permitidos, a menos que estos espacios existan físicamente.
- Deben evitarse los elementos alargados o muy sesgados, ya que resultan en una menor precisión.
- Cuando se usan elementos con límites curvos, es inevitable un error de discretización geométrica. Sin embargo, este problema se puede reducir refinando la malla o utilizando elementos de orden superior.

Figura 13: Errores en la discretización de elementos finitos.



Nota: se muestra errores comunes al momento de realizar la discretización de un medio continuo mediante elementos finitos. La figura de la izquierda muestra el error de dos elementos finitos que no tienen nudos en común en el lado que tiene en común. La figura central muestra el error de superposición de elementos. La figura de la derecha muestra el error de que existe espacios entre los elementos. Reproducido de "Introduction to Finite Element Analysis Using Matlab and Abaqus", Amar Khennane, 2013.

2.4 MODELAMIENTO DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

Si bien en Perú la albañilería es un sistema muy utilizado en la construcción de edificios, se tiene menos conocimiento del comportamiento de la albañilería como material compuesto en comparación al concreto o al acero, a pesar de que la investigación en este país sobre la albañilería viene de muchos años atrás. Sobre todo, el comportamiento no lineal de la albañilería como material compuesto. Esto puede ser debido a que su

comportamiento mecánico es muy complejo puesto que existe muchas variables a tomar en cuenta. Incluso hay variables muy importantes que se tiene muy poco o nada de estudio, como por ejemplo la interacción del mortero con las unidades de albañilería.

Para poder solucionar esto se tendría que realizar mayor cantidad de ensayos experimentales, pero esto conlleva un alto costo. Una alternativa sería la elaboración de modelos analíticos y numéricos adecuadamente calibrados, para poder simular ensayos experimentales y dar pie a investigaciones experimentales con una idea mayor con la información recopilada de las simulaciones. Esto resultaría en un gasto de ensayos experimentales con mayor eficiencia.

Con esta idea, en la presente investigación se busca realizar una simulación de un ensayo con carga monótona de un muro de albañilería confinada. Para lo cual se necesita definir un modelo de albañilería. Actualmente, el desarrollo computacional ha dado paso a que se desarrolle el método de elementos finitos como una herramienta muy potente para modelar elementos estructurales de todo tipo. En este caso, para resolver un problema de esfuerzos planos.

La albañilería al ser un material compuesto de unidades de albañilería y el mortero que une dichas unidades, el modelamiento se podría hacer como dos materiales diferentes además de tener las debidas consideraciones de la interacción entre ambos materiales, a este tipo de modelamiento se le denomina micromodelamiento.

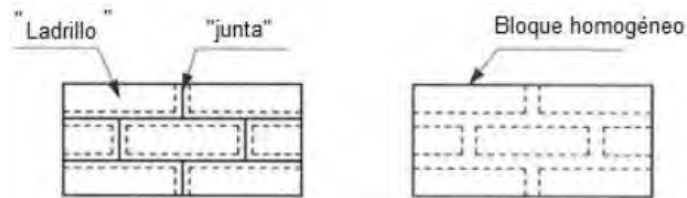
Otra forma de modelar la albañilería, sería considerar a toda la albañilería como un material homogéneo y poder definir sus características mecánicas teniendo esta consideración. Esta forma de modelar se le denomina macromodelamiento, ver Figura 14.

Hay una simplificación aún mayor en donde el elemento bidimensional lo podemos modelar como un elemento unidimensional con una sección equivalente. A este modelamiento se le denomina Modelo de Columna ancha. El comportamiento no lineal se puede asumir como el análisis de una columna con sección agrietada. Este tipo de modelo da resultados

aceptables en el rango lineal. En el rango no lineal se puede volver muy complejo las expresiones que describen este comportamiento.

Estos tipos de modelamiento se explican en los siguientes subcapítulos.

Figura 14: Macromodelamiento y Micromodelamiento de albañilería.



Nota: Se muestra dos tipos de modelamiento de la albañilería. En la izquierda, micromodelamiento donde se modela las unidades de ladrillo y el mortero por separado además de la interacción entre ellos. En la derecha, macromodelamiento, se modela considerando que la albañilería es un material homogéneo. Adoptado de "Computational strategies for masonry structures: multi-scale modelling, dynamics, engineering applications and other challenges" P. Lourenço, 2013.

2.4.1 MICROMODELAMIENTO

El micromodelamiento es la técnica de simulación en albañilería con mayor aproximación para describir su comportamiento. Pues trata de simular el comportamiento por separado de las unidades de albañilería y el mortero (el material que los une) además de la interacción entre ellos, que comparado a las otras técnicas se acerca a la realidad. Para esto se tendrá que definir las propiedades mecánicas de estos materiales mediante ensayos experimentales para luego ser usadas en el modelo.

Según J. López (1998), un micromodelamiento detallado debe poder describir los mecanismos de falla básicos de la albañilería, como la fisuración de juntas, el deslizamiento de las unidades con respecto al mortero, la falla diagonal por tracción, etc. Además, se tiene que considerar en estos modelos la falla del mortero. El modelo del mortero se deberá tener una relación esfuerzo deformación no lineal, con una fuerte resistencia a la compresión y poca resistencia a la tracción. Luego, ante la falla por tracción de la junta entre el mortero y las unidades de albañilería, estas deberán poder deslizarse independientemente al mortero.

Este tipo de modelamiento requiere un gasto computacional muy fuerte, debido al detallado complejo que tiene. Es por esto que existe una simplificación del micromodelamiento en que solo se modelan las unidades de albañilería como elementos homogéneos por separado unidos por una interconexión que representa al mortero (Lourenço, 2013).

Pero como se mencionó anteriormente, la investigación realizada específicamente en la interacción de mortero y albañilería en nuestro país es casi nula, por lo cual resulta imposible poder usar esta técnica para la presente investigación.

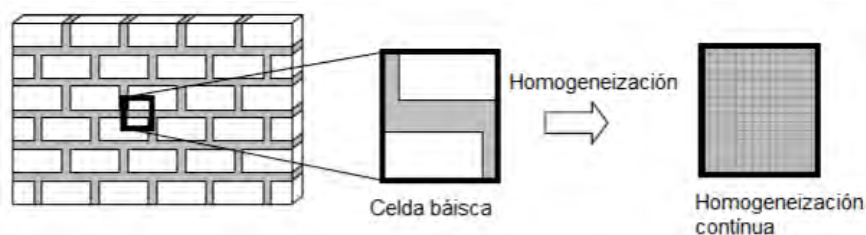
2.4.2 MACROMODELAMIENTO

A diferencia del micromodelamiento, en el macromodelamiento en donde se busca modelar cada componente de la albañilería (unidades de albañilería y mortero) en el macromodelamiento se busca modelar a la albañilería como si fuera un material único y no tuviera componentes y más bien sería un material homogéneo. Se podría decir que es una simplificación mayor al micromodelamiento.

Según R. Valledor (2016) lo complicado de esta técnica es la homogenización del material compuesto a un material homogéneo y definir sus respectivas propiedades mecánicas. Se puede reducir el problema definiendo una geometría simple que se repita en el arreglo de las unidades de albañilería en el muro como se muestra en la Figura 15. Para esto se tendría que asumir dos cosas:

- La adherencia entre el mortero y las unidades de albañilería es perfecta.
- La disposición de las unidades de albañilería está perfectamente alineada tanto horizontal y verticalmente.

Figura 15: Esquema del proceso de homogenización



Nota: Se muestra cómo se realizaría la homogenización de un muro de albañilería. Se toma una geometría que se repite en el muro denominada celda básica, y esta será la muestra típica que se usará para definir el material homogéneo de la albañilería. Reproducido de "Análisis sísmico lineal y simulación numérica del daño sísmico acumulado de una estructura patrimonial de albañilería simple" R. Valledor, 2016.

Además, Lourenço (2013) refiere que el macromodelamiento consiste en homogeneizar el material compuesto de unidades de albañilería y mortero, en un solo material continuo. Las características mecánicas y ecuaciones constitutivas de este material homogéneo será el promedio del material compuesto. Esta forma de modelamiento es aplicable cuando la estructura es mucho mayor al tamaño de las unidades que los componen ya que se puede asumir que el recorrido de las tensiones y fallas a lo largo de esta estructura se considere uniforme.

En la presente investigación resulta aceptable esta consideración en muros de albañilería confinada pues las dimensiones del muro son mucho mayores a las dimensiones de las unidades de albañilería, y por lo observado en ensayos experimentales pasados se puede asumir que las fallas y tensiones se desarrollan uniformemente a lo largo del muro de albañilería.

2.4.3 MODELAMIENTO SIMPLIFICADO DE COLUMNA ANCHA

Este es el método más simple de muros de albañilería confinada y también es el más usado por la comunidad ingenieril. Básicamente, es la idealización de un muro de albañilería confinada en una columna ancha de sección equivalente a la del muro, esta columna incluirá las deformaciones por flexión y por corte, considerando que esta columna está conformada por un material homogéneo e isotrópico.

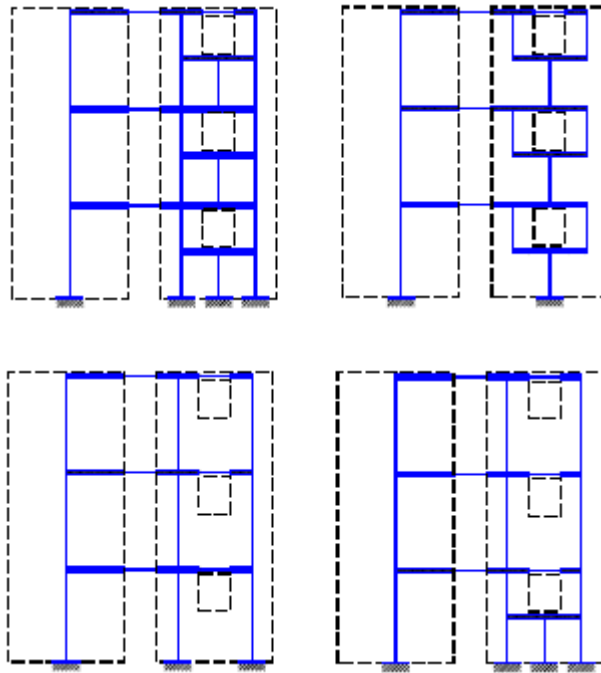
Esta idealización es muy lejana de la realidad ya que la albañilería no es un material isotrópico ni mucho menos homogéneo, pero teniendo ciertas consideraciones se puede tener resultados cercanos a la realidad. Es por esto y por la simplicidad para el modelamiento de un muro, que el uso de este tipo de modelos es popular sobre todo en análisis lineales de muros de albañilería confinada, incluso es fácilmente acoplables a software de cálculo estructural.

Tena (2010), menciona que el método consiste en básicamente modelar el muro de albañilería mediante barras prismáticas (Elementos tipo Frame) y que su sección transversal sea la sección transformada de la albañilería confinada (transformando las columnas de confinamiento en albañilería). Pero para esto se debe tener las siguientes consideraciones:

- Los muros se modelan como elementos viga que considera deformaciones por corte.
- La sección transversal de la columna ancha será la sección transversal del muro de albañilería. Es decir, después de transformar el material de las columnas de confinamiento en albañilería.
- Las propiedades mecánicas del muro serán centroidales.

J. Perez (2011), menciona que en el caso de modelar muros de albañilería con aberturas se puede realizar un artificio, que se trata de dividir el muro en secciones, siendo estas secciones otros muros de albañilería que se pueden modelar mediante la columna ancha. Como por ejemplo, si al tener un muro de albañilería con una abertura central, este muro se puede dividir en cuatro secciones, dos secciones que se encuentran a cada lado de la abertura, otra sección encima de la abertura y la última sección la que se encuentra por debajo de la abertura, siendo modelado cada una de estas secciones mediante elementos de columna ancha unidas mediante elementos rígidos. Podría hacerse diferentes divisiones del muro siguiendo este proceso, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16: Modelamiento de muros con ventana mediante el uso de columna ancha.



Nota: Se muestra cuatro posibles variaciones en el modelamiento mediante columna ancha de un muro de albañilería confinada con abertura usando el artificio de dividir el muro en secciones que estas a su vez serán columnas anchas. Reproducido de “Análisis Lineal de Estructuras de Mampostería” J. J. Pérez, 2011

Para el análisis no lineal mediante este tipo de modelamiento Tena (2010) realizó un modelo de columna ancha suponiendo una sección agrietada como se muestra en la Figura 17. Para esto se basó en estudios de investigación experimentales en muros de albañilería confinada en los años 70's en el país México. Las propiedades de esta columna ancha agrietada equivalente están dadas por las siguientes expresiones:

$$I_{eq} = \frac{A_c \cdot b^2}{2}$$

$$A_{c.eq} = (0.37 - 0.12\zeta + 0.023\lambda)(A_m + 2A_c)$$

Donde:

$$\zeta = \frac{b}{H}$$

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m}$$

I_{eq} : Inercia equivalente de la sección

A_{eq} : Área transversal equivalente de la sección

b : Distancia entre los ejes de las columnas de confinamiento

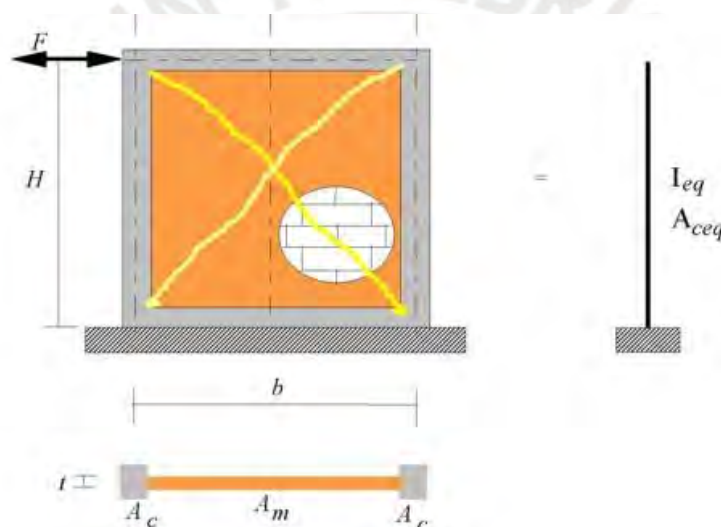
A_c : Área de la sección de las columnas de confinamiento

A_m : Área solo de la zona de albañilería.

E_c : Módulo de concreto de las columnas de confinamiento

G_m : Módulo de corte de la albañilería

Figura 17: Idealización de un muro de albañilería mediante columna ancha con sección agrietada.



Nota: se muestra un muro de albañilería confinada con su sección transversal, parte inferior, y su modelo equivalente con las inercias y áreas equivalente de sección agrietada (A_{ceq} , I_{eq}), en la derecha. Reproducido de "Revisión y actualización del método simplificado de análisis de estructuras de mampostería de los reglamentos de diseño sísmico de México", A. Tena, 2010.

Si bien estas expresiones de columna agrietada fueron revisadas mediante ensayos experimentales a muros de albañilería confinada por Bazán y Meli en los años 90's, donde se obtuvo aceptables resultados, se complica cuando se asume una ley constitutiva, relación esfuerzo deformación, no lineal.

Al comparar los tres tipos de modelamiento se puede concluir que el macromodelo resulta el más conveniente para ser usado. Si bien el micromodelamiento ofrece resultados más precisos, presenta la dificultad

de la nula cantidad de datos en nuestro país de la interacción del ladrillo con el mortero, y demás propiedades que se requieren para poder modelar mediante esta técnica. El modelo simplificado no ofrece una exactitud en resultados, si se deseara hacer más precisa esta técnica se tendría que recurrir a expresiones muy complejas y de poca practicidad. Por tanto en la presente investigación se usará el macromodelamiento.

2.5 MODELAMIENTO NO LINEAL EN ELEMENTOS FINITOS

Es realmente complicado definir las propiedades no lineales para los modelos numéricos del concreto y la albañilería que tiene un comportamiento tipo frágil, sobre todo por lo difícil que resulta determinar los parámetros de estos materiales mediante ensayos experimentales, y resulta aún más complejo en la albañilería que existe menos investigación experimental en estos temas en específico (J. Alvarez 2001).

Para definir un modelo de comportamiento no lineal de estos materiales se buscó que tengan: Inicialmente un comportamiento lineal, el ablandamiento posterior a un determinado esfuerzo de compresión, ablandamiento posterior al agrietamiento por tensión, reducción de rigidez posterior a las resistencias máximas de compresión y tracción de cada uno de los materiales.

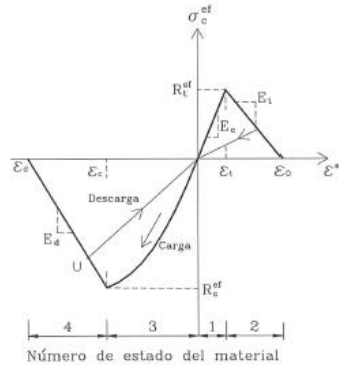
Dado que, en la presente investigación se realizará un modelo de esfuerzos planos, tanto el comportamiento no lineal del concreto como la albañilería en el estado biaxial de esfuerzos se expresará mediante la ley equivalente uniaxial.

2.5.1 LEY EQUIVALENTE UNIAXIAL PARA EL CONCRETO Y LA ALBAÑILERÍA

Como se mencionó anteriormente, el comportamiento en el estado biaxial de esfuerzos se formuló mediante el esfuerzo efectivo, que se relaciona con la deformación uniaxial equivalente uniaxial (J. Alvarez, 2001). Uno de los modelos es el propuesto por Cervenka y Pukl (1995). En este

modelo la relación esfuerzo deformación tendrá cuatro etapas mostradas en la Figura 18 y que son descritas a continuación:

Figura 18: Diagrama esfuerzo deformación de un material frágil.



Nota: Se muestra el diagrama esfuerzo deformación, en donde se define como R_c^{ef} , el esfuerzo máximo a compresión, R_t^{ef} como el esfuerzo máximo a Tracción. Reproducido de “Estudio Analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de albañilería confinada con aberturas”, J. Alvarez, 2001.

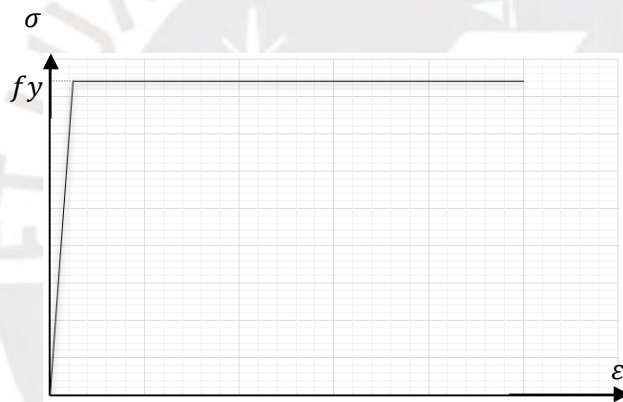
- Etapa 1: Esfuerzo (Tanto en tracción como en compresión) y Deformación lineal elástica. En esta etapa se cumple el análisis elástico en donde $\sigma_c^{ef} = E_c \cdot \varepsilon^{eq}$, siendo σ_c^{ef} el esfuerzo efectivo, E_c el módulo de elasticidad del material y ε^{eq} deformación equivalente uniaxial
- Etapa 2: Ablandamiento posterior al agrietamiento del material por esfuerzo a tracción en donde el esfuerzo efectivo se definiría como $\sigma_c^{ef} = E_i \cdot \varepsilon^{eq} + R_t^{ef} (1 - E_i/E_c)$, en donde R_t^{ef} es el esfuerzo a tracción máxima, E_i se define como el módulo de ablandamiento que es la pendiente de la recta de ablandamiento por tracción.
- Etapa 3: Comportamiento inelástico parabólico debido a la compresión. En esta etapa el esfuerzo efectivo tendrá una función parabólica cuyo valor dependiente será la deformación equivalente de la siguiente manera $\sigma_c^{ef} = R_c^{ef} (2x - x^2)$, para $x = \varepsilon^{eq} E_c / (2 \cdot R_c^{ef})$ en donde R_c^{ef} es el esfuerzo máximo a compresión.
- Etapa 4: Ablandamiento final por compresión. En esta etapa se considera lineal, en donde el esfuerzo efectivo será $\sigma_c^{ef} = E_d \cdot (\varepsilon^{eq} - \varepsilon_d)$, para $\varepsilon_d = (R_c^{ef}/E_c) (2 - E_c/E_d)$, en donde E_d se puede definir como el módulo de ablandamiento de la compresión

que es la pendiente de la recta de la zona de ablandamiento por compresión.

2.5.2 LEY ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA EL ACERO DE REFUERZO

El acero de refuerzo para los elementos de confinamiento se modeló como elemento uniaxial. Además, se consideró que no existe desplazamiento relativo del acero de refuerzo con los elementos de concreto. Para el comportamiento no lineal del acero existe diversos modelos, el más usado es el modelo elastoplástico, en donde se tiene el comportamiento lineal hasta llegar al esfuerzo de fluencia, posterior a la deformación correspondiente el esfuerzo no aumenta hasta llegar a la deformación de rotura como se muestra en la Figura 19.

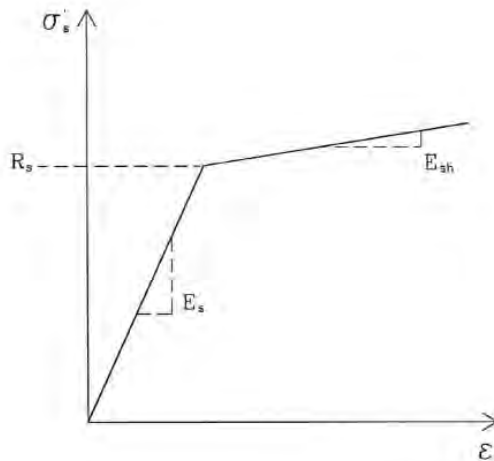
Figura 19: Esfuerzo deformación del acero elastoplástico



Nota: Se muestra el diagrama esfuerzo deformación de un modelo elastoplástico, en donde el máximo esfuerzo es el esfuerzo de fluencia, y posterior a la fluencia, las deformaciones aumentan con el mismo valor de esfuerzo. Elaboración propia

Otro modelo muy utilizado para el acero es el modelo bilineal como se muestra en la figura. El modelo bilineal considera el endurecimiento del acero como se muestra en la Figura 20. El primer tramo lineal es el tramo elástico, con pendiente con el módulo de elasticidad E_s . El segundo tramo de línea representa la plasticidad del acero en conjunto con el endurecimiento del material, con pendiente E_{sh} , definido como el módulo de endurecimiento. Para el modelo elastoplástico se podría tener como un modelo bilineal con un módulo de endurecimiento nulo.

Figura 20: Diagrama esfuerzo deformación bilineal.



Nota: Se muestra el diagrama esfuerzo deformación bilineal, en donde el máximo esfuerzo es R_s , posterior a este valor se da la etapa de endurecimiento. Reproducido de "Estudio Analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de albañilería confinada con aberturas", J. Alvarez, 2001.

2.5.3 SOLUCIÓN PARA EL ANÁLISIS NO-LINEAL

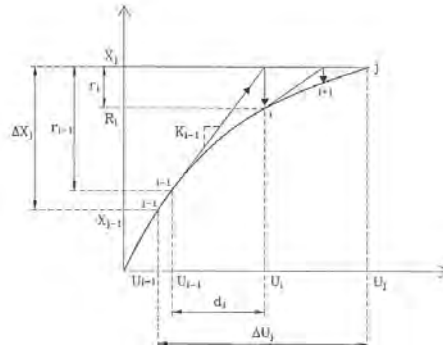
Para poder resolver análisis no lineales, se usa diferentes métodos numéricos, en la presente investigación se utiliza el método Newton-Raphson para obtener soluciones para problemas no lineales.

En un análisis no lineal, la solución generalmente no se puede calcular resolviendo un solo sistema de ecuaciones, como se haría en un problema lineal. En cambio, la solución se encuentra aplicando las cargas especificadas gradualmente e incrementalmente trabajando hacia la solución final. Por lo tanto, el análisis se divide en varios incrementos de carga y encuentra la configuración de equilibrio aproximada al final de cada incremento de carga.

Para esto se requiere varias iteraciones para determinar una solución aceptable para un incremento de carga determinado. La suma de todas las respuestas incrementales es la solución aproximada para el análisis no lineal.

La solución iterativa basada en el procedimiento de Newton-Raphson, se ilustra para un ejemplo de un sistema de un grado de libertad en la Figura 21.

Figura 21: Representación gráfica del Método iterativo de Newton-Raphson



Nota: Se muestra el proceso iterativo del Método Newton-Raphson en donde se interpola varias veces linealmente hasta reproducir la curva que se busca hasta una aproximación adecuada. Reproducido de "Estudio Analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de albañilería confinada con aberturas", J. Alvarez, 2001.

Este puede describirse con las siguientes ecuaciones:

$$x_j - R_i = r_i$$

$$K_{i-1} \cdot d_i = r_{i-1}$$

$$U_i = U_{i+1} + d_i$$

Donde

R_i : Vector de fuerzas.

r_i : Vector de fuerzas no equilibradas.

K_{i-1} : Matriz de rigidez tangente de la iteración anterior,"

d_i : Vector del incremento de desplazamiento.

U_i : Vector del desplazamiento total.

La iteración se repite hasta que las fuerzas no equilibradas r ; sean suficientemente pequeñas.

La solución no lineal se aproxima mediante la ecuación lineal de equilibrio basada en la matriz de rigidez tangente. Debido a la no linealidad las fuerzas no equilibradas se detectan y se aplican para corregir la respuesta del desplazamiento.

CAPÍTULO III. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis numérico que se realizó en la presente investigación consta de dos partes. La primera parte son modelos numéricos de muros de albañilería confinada con propiedades mecánicas elásticas lineales, en la cual se comparó muros de albañilería confinada completos (sin aberturas) con muros de las mismas características geométricas y mecánicas que poseen aberturas, para poder obtener la variación de la rigidez a desplazamiento lateral. La segunda parte son modelos numéricos de albañilería confinada con propiedades mecánicas no lineales, en la que se emula un ensayo a desplazamiento lateral con carga monótona, en la que se comparó muros completos (sin aberturas) con muros de las mismas características con aberturas de diferentes tamaños.

3.2 MODELOS LINEALES

3.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Para el análisis numérico lineal de los muros se estableció los siguientes parámetros que se iban a tomar en cuenta:

- hm/Lm : Esbeltez del muro.
- $rL=La/Lm$: Relación de longitud de la abertura y la longitud del muro
- $rh=ha/hm$: Relación de altura de la abertura y la altura del muro
- $rd=ha/La$: Relación de dimensiones de la abertura
- $ra=Aa/Am$: Relación del área de la abertura y el área del muro
- Ubic: Ubicación de la abertura,

Donde:

hm : altura total del muro.

Lm : Longitud total del muro.

ha : altura de la abertura.

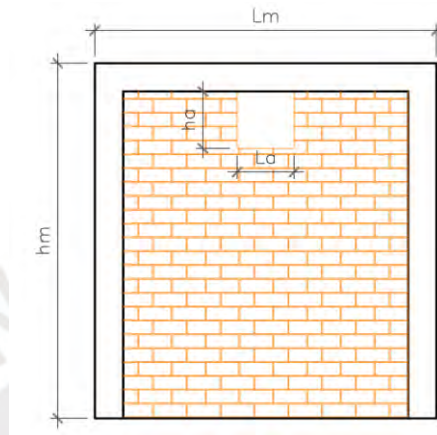
La : Longitud de la abertura.

Aa: área de la abertura.

Am: Área total del muro.

Estos parámetros se exponen en la Figura 22.

Figura 22: Esquema del modelo de muro de albañilería confinada con las dimensiones que se usaron para la variación de parámetros



Nota: se muestran los parámetros que se consideraron en el modelo del muro de albañilería.

Teniendo estos parámetros definidos se procedió definir las medidas y variaciones de estas propiedades. Se estableció que la altura del muro iba a ser constante, y de una medida que en general tienen los muros en edificaciones de albañilería confinada.

$$hm = 2.52m$$

Además, se escogió esta medida de altura por facilidad de cálculo para los demás parámetros. Se escogieron 5 variaciones del parámetro de esbeltez de muro, 4 variaciones de las relaciones de longitud y altura de las aberturas respecto a las dimensiones de muro ("rh" y "rL") y 3 variaciones para el parámetro de Ubicación de la abertura que se muestran en la Tabla 3. Las variaciones de los parámetros de relación de área de abertura con respecto al muro y la relación de dimensiones de la abertura ("ra" y "rd") serán producto de las variaciones de "rh" y "rL".

Tabla 3. Variaciones de los parámetros geométricos de los muros para el análisis lineal.

hm/Lm	rh=ha/hm	rL=La/Lm	Ubic.
0.60	0.05	0.05	Extr. Derecha
0.80	0.10	0.10	Centro
1.00	0.15	0.15	Extr. Izquierda
1.20	0.20	0.20	
1.40			

Nota: la primera columna muestra las variaciones de esbeltez, la segunda columna la relación de altura de abertura y altura de muro, la tercera columna la relación, largo de abertura y largo de muro y en la última las ubicaciones consideradas.

Para cada esbeltez de muro escogida, se hizo un modelo de albañilería confinada completo (sin aberturas), y muros con aberturas con las variaciones de los parámetros “rh”, “rL” y “Ubic.”, por lo tanto, para cada esbeltez de muro se hicieron 49 modelos (1 modelo sin aberturas y 48 modelos con abertura). Teniendo en total 245 modelos numéricos de albañilería confinada con propiedades elásticas lineales

3.2.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Para el concreto armado se tomó como referencia la calidad de concreto que se usa por lo general en este tipo de estructuras ($f'_c=175\text{kg/cm}^2$). Además, para esta parte de la investigación, el concreto armado se consideró como un solo material.

Para concreto armado:

- Módulo de Elasticidad: $E_c = 1984313 \text{ Ton/m}^2$
- Módulo de Corte: $G_c = 862745 \text{ Ton/m}^2$
- Módulo de Poisson: $\nu = 0.15$

Para la caracterización mecánica lineal de la albañilería se tomaron en cuenta ensayos de albañilería realizados en Perú. Concretamente, de cuatro investigaciones realizadas en la PUCP, entre los años 2017 y 2018:

1. Análisis Experimental de M. de Alb. Conf. en Viv. de Baja Altura, Pari Sonia, 2017.

2. Ensayos Cíclicos en M. de Alb. Conf. Construidos con Ladrillos King Kong de Fabricación Industrial, Coral Melissa, 2017.

3. Macromodelación Numérica de Ensayo de Alba. de Arcilla, Ruiz María, 2017.

4. Reforzamiento de los M. de Alb. Conf. con Mallas de Acero, Luján Martin, 2018

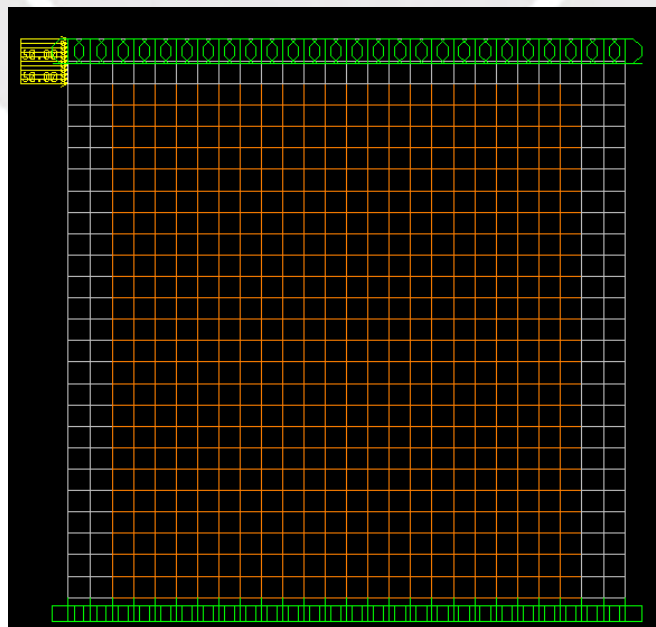
De estos estudios, se determinaron valores promedio de las características mecánicas de la albañilería:

- Módulo de Elasticidad: $E_m = 582660 \text{ Ton/m}^2$
- Módulo de Corte: $G_m = 233060 \text{ Ton/m}^2$
- Módulo de Poisson: $\nu = 0.25$

3.2.3 DEFINICIÓN DE CARGAS Y CONDICIONES DE BORDE

Para todos los modelos numéricos se establecieron las siguientes condiciones de borde: Empotrado en la base y simplemente apoyado en la parte superior del muro. Considerando así solo el desplazamiento horizontal del muro sin aplicación de carga vertical y evitando deformaciones en esa dirección, ver Figura 23.

Figura 23: Modelo con las condiciones de borde y la carga horizontal aplicada.



Nota: se muestra el modelo con la división de elementos (mesh), los apoyos tipo rodillo en la parte superior del muro y apoyos tipo empotramiento en la parte inferior. También se muestra la carga aplicada en la zona izquierda superior.

Se definió que las cargas horizontales aplicadas fueran las cargas cercanas que produzcan la primera grieta del muro que es hasta, donde se puede definir el rango elástico de un muro de albañilería confinada.

Por lo tanto, se definieron las siguientes cargas para cada longitud de muro:

$$Fh = \left\{ \begin{array}{l} Lm = 1.80m: \quad 7 \text{ Ton} \\ Lm = 2.10m: \quad 8 \text{ Ton} \\ Lm = 2.52m: \quad 10 \text{ Ton} \\ Lm = 3.15m: \quad 12 \text{ Ton} \\ Lm = 4.20m: \quad 14 \text{ Ton} \end{array} \right.$$

3.2.4 CÁLCULO DE RIGIDEZ LATERAL

Para cada muro se halló el desplazamiento horizontal producido por la carga y estos se dividieron entre la fuerza horizontal para calcular la rigidez a desplazamiento horizontal, $K = F/d$.

Para los muros sin aberturas se le denominó a la rigidez lateral como **Ko** y para los muros con aberturas se les denotó como **Ki**.

De esta manera, para cada muro con aberturas se comparó como variaba la rigidez lateral frente a un muro sin aberturas de las mismas dimensiones. Se definió como factor de disminución de rigidez a **pK=Ki/Ko**

Además, se consideró que cuando el factor de disminución de rigidez **pK** sea mayor al 95%, las rigideces a desplazamiento horizontal de muros con aberturas son prácticamente iguales a los muros llenos correspondientes, por lo tanto, lo podemos considerar a los muros con aberturas que obtengan un valor mayor al 95%, de que dichas aberturas en estos muros no afectan en la rigidez.

3.2.5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS LINEALES

Para cada esbeltez de muro, se hallaron los factores de disminución de rigidez **pK** para los muros con abertura, comparándolos con el respectivo

muro sin abertura. Se trató de relacionar este valor con los parámetros antes definidos.

3.2.5.1 Parámetros rL, rh y rd

Para los parámetros de relación de longitud de la abertura respecto a la longitud de muro (rL), relación de altura de la abertura respecto a la altura de muro (rh) y la relación de dimensiones de la abertura (rd), se halló que el coeficiente de correlación con la reducción de rigidez fue de $r < 0.5$. Por lo tanto, la reducción de rigidez en muros con aberturas se consideró, no relacionables a estos parámetros.

3.2.5.2 Parámetro de Ubicación

Se analizó los resultados obtenidos considerando solo el parámetro de ubicación de la abertura. En total los muros con aberturas fueron 240, 80 modelos para cada ubicación. Para cada ubicación se calculó la cantidad de muros con aberturas que tenían un factor de reducción $pK > 95\%$ y el porcentaje que representan respecto a la cantidad total y se obtuvo los resultados indicados en la Tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de modelos que tuvieron una reducción de rigidez mayor al 95% según ubicación de la abertura

Ubicación	Npk>95%	%
Ext. Derecha	50	63%
Ext. Izquierda	73	91%
Centro	47	59%

Se puede deducir de la Tabla 4 que la ubicación más desfavorable es la extrema izquierda. Esto tal vez se puede explicar por el efecto de la ubicación de la carga que se aplicó al muro, dado que este no debería ser un factor que influya en los resultados se descartarán los datos de extrema izquierda, y solo se considerará la ubicación Extremo (Derecha) y Centro, esto se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidad de modelos que tuvieron una variación de rigidez mayor al 95% para las ubicaciones extremo y centro

Ubicación	Npk>95%	%
Extremo	50	63%
Centro	47	59%

De la Tabla 5 se puede observar que se tiene casi el mismo porcentaje cuando la abertura se encuentra en el extremo derecho o en el centro por lo tanto podemos decir que la ubicación de la abertura no es un parámetro considerar en el análisis lineal elástico.

3.2.5.3 Parámetro ra

Para el parámetro de la Relación de Área de abertura y Área del muro “ra”, se analizaron los datos considerando diferentes esbelteces de muro con la posición de la abertura en el centro

3.2.5.3.1 Esbeltez $hm/lm=0.6$

Para la relación de esbeltez de 0.6, se obtuvo 16 datos que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 0.6.

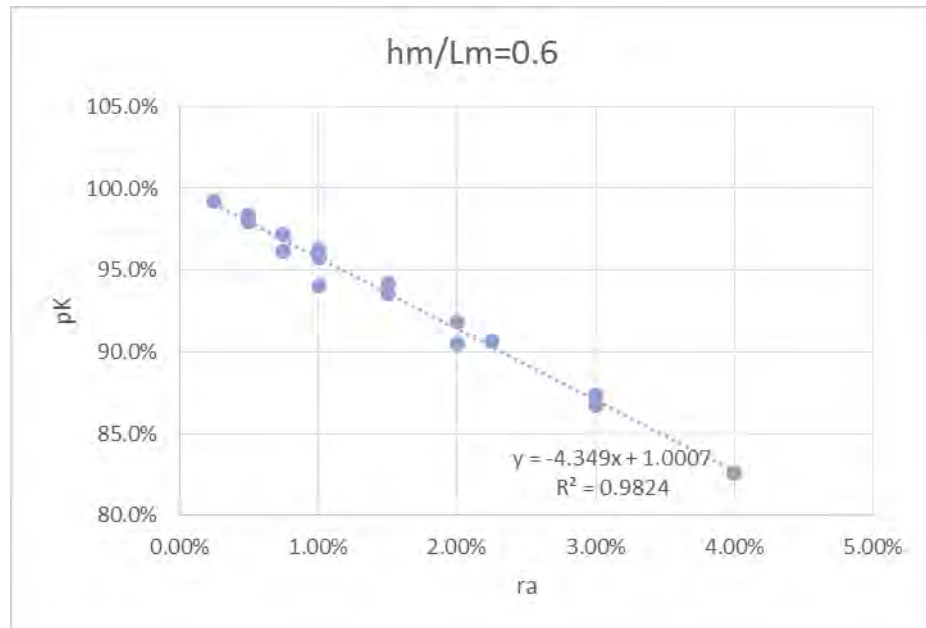
hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	hm/Lm	Aa (m ²)	Am (m ²)	ra=Aa/Am	pk=Ki/K0
2.52	4.20	0.126	0.210	0.60	0.03	10.58	0.25%	0.992
2.52	4.20	0.126	0.420	0.60	0.05	10.58	0.50%	0.979
2.52	4.20	0.126	0.630	0.60	0.08	10.58	0.75%	0.962
2.52	4.20	0.126	0.840	0.60	0.11	10.58	1.00%	0.940
2.52	4.20	0.252	0.210	0.60	0.05	10.58	0.50%	0.983
2.52	4.20	0.252	0.420	0.60	0.11	10.58	1.00%	0.962
2.52	4.20	0.252	0.630	0.60	0.16	10.58	1.50%	0.936
2.52	4.20	0.252	0.840	0.60	0.21	10.58	2.00%	0.905
2.52	4.20	0.378	0.210	0.60	0.08	10.58	0.75%	0.972
2.52	4.20	0.378	0.420	0.60	0.16	10.58	1.50%	0.942
2.52	4.20	0.378	0.630	0.60	0.24	10.58	2.25%	0.907
2.52	4.20	0.378	0.840	0.60	0.32	10.58	3.00%	0.867
2.52	4.20	0.504	0.210	0.60	0.11	10.58	1.00%	0.957
2.52	4.20	0.504	0.420	0.60	0.21	10.58	2.00%	0.918
2.52	4.20	0.504	0.630	0.60	0.32	10.58	3.00%	0.874
2.52	4.20	0.504	0.840	0.60	0.42	10.58	4.00%	0.826

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre la relación de áreas y la reducción de rigidez:

$$r = -0.99$$

Lo cual indica que se tiene una correlación lineal negativa alta ($r > 0.80$). Entonces podemos hacer una regresión lineal a partir de los datos que se muestran en el siguiente gráfico de la Figura 24.

Figura 24: Gráfico Variación del parámetro ra frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 0.6



Teniendo en cuenta la función de regresión lineal podemos afirmar que para tener una reducción de rigidez mayor del 95%, se tiene que tener relaciones de área:

$$ra < 1.166\%$$

3.2.5.3.2 Esbeltez $hm/lm=0.8$

Para la relación de esbeltez de 0.8, se obtuvo 16 datos que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 0.8.

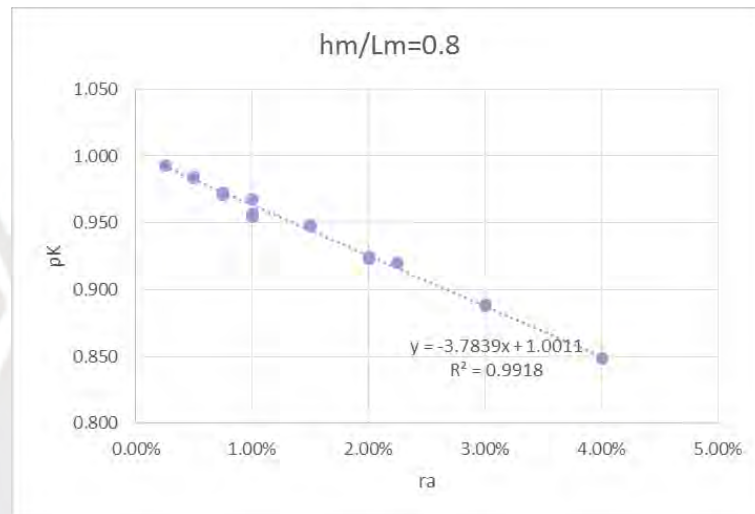
hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	hm/Lm	Aa (m ²)	Am (m ²)	ra=Aa/Am	pk=Ki/K0
2.52	3.15	0.126	0.158	0.80	0.02	7.94	0.25%	0.993
2.52	3.15	0.126	0.315	0.80	0.04	7.94	0.50%	0.984
2.52	3.15	0.126	0.473	0.80	0.06	7.94	0.75%	0.971
2.52	3.15	0.126	0.630	0.80	0.08	7.94	1.00%	0.955
2.52	3.15	0.252	0.158	0.80	0.04	7.94	0.50%	0.985
2.52	3.15	0.252	0.315	0.80	0.08	7.94	1.00%	0.968
2.52	3.15	0.252	0.473	0.80	0.12	7.94	1.50%	0.947
2.52	3.15	0.252	0.630	0.80	0.16	7.94	2.00%	0.923
2.52	3.15	0.378	0.158	0.80	0.06	7.94	0.75%	0.972
2.52	3.15	0.378	0.315	0.80	0.12	7.94	1.50%	0.948
2.52	3.15	0.378	0.473	0.80	0.18	7.94	2.25%	0.920
2.52	3.15	0.378	0.630	0.80	0.24	7.94	3.00%	0.888
2.52	3.15	0.504	0.158	0.80	0.08	7.94	1.00%	0.957
2.52	3.15	0.504	0.315	0.80	0.16	7.94	2.00%	0.925
2.52	3.15	0.504	0.473	0.80	0.24	7.94	3.00%	0.888
2.52	3.15	0.504	0.630	0.80	0.32	7.94	4.00%	0.848

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre la relación de áreas y la reducción de rigidez:

$$r = -0.995$$

Lo cual indica que se tiene una correlación lineal negativa alta ($r > 0.80$). Entonces se hizo una regresión lineal a partir de los datos que se muestran en el siguiente gráfico de la Figura 25.

Figura 25: Gráfico Variación del parámetro ra frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 0.8



Teniendo en cuenta la función de regresión lineal podemos afirmar que para tener una reducción de rigidez mayor del 95%, se tiene que tener una relación de área:

$$ra < 1.35\%$$

3.2.5.3.3 Esbeltez $hm/lm=1.0$

Para la relación de esbeltez de 1.0, se obtuvo 16 casos que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 1.0.

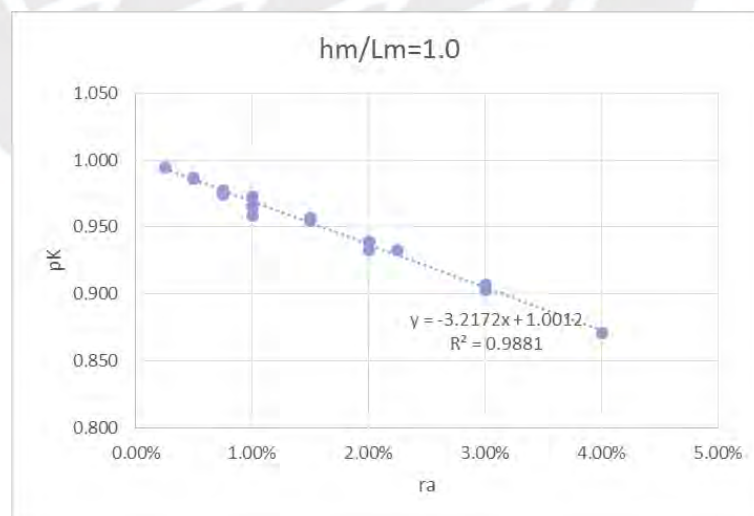
hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	hm/Lm	Aa (m ²)	Am (m ²)	ra=Aa/Am	pk=Ki/K0
2.52	2.52	0.126	0.126	1.00	0.02	6.35	0.25%	0.994
2.52	2.52	0.126	0.252	1.00	0.03	6.35	0.50%	0.987
2.52	2.52	0.126	0.378	1.00	0.05	6.35	0.75%	0.978
2.52	2.52	0.126	0.504	1.00	0.06	6.35	1.00%	0.966
2.52	2.52	0.252	0.126	1.00	0.03	6.35	0.50%	0.986
2.52	2.52	0.252	0.252	1.00	0.06	6.35	1.00%	0.973
2.52	2.52	0.252	0.378	1.00	0.10	6.35	1.50%	0.957
2.52	2.52	0.252	0.504	1.00	0.13	6.35	2.00%	0.939
2.52	2.52	0.378	0.126	1.00	0.05	6.35	0.75%	0.974
2.52	2.52	0.378	0.252	1.00	0.10	6.35	1.50%	0.955
2.52	2.52	0.378	0.378	1.00	0.14	6.35	2.25%	0.933
2.52	2.52	0.378	0.504	1.00	0.19	6.35	3.00%	0.907
2.52	2.52	0.504	0.126	1.00	0.06	6.35	1.00%	0.959
2.52	2.52	0.504	0.252	1.00	0.13	6.35	2.00%	0.933
2.52	2.52	0.504	0.378	1.00	0.19	6.35	3.00%	0.903
2.52	2.52	0.504	0.504	1.00	0.25	6.35	4.00%	0.871

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre la relación de áreas y la reducción de rigidez:

$$r = -0.99$$

Lo cual indica que se tiene una correlación lineal negativa alta ($r > 0.80$). Entonces podemos hacer una regresión lineal a partir de los datos que se muestran en el siguiente gráfico de la Figura 26.

Figura 26: Gráfico Variación del parámetro ra frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 1.0



Teniendo en cuenta la función de regresión lineal podemos afirmar que para tener una reducción de rigidez sea mayor del 95%, se tiene que tener unas relaciones de área:

$$ra < 1.591\%$$

3.2.5.3.4 Esbeltez $hm/lm=1.2$

Para la relación de esbeltez de 1.2, se obtuvo 16 casos que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 1.2.

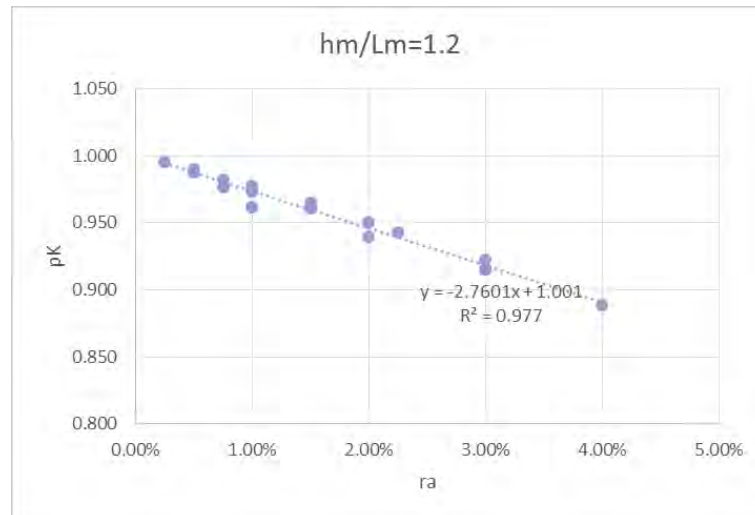
hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	hm/Lm	Aa (m ²)	Am (m ²)	ra=Aa/Am	pk=Ki/K0
2.52	2.10	0.126	0.105	1.20	0.01	5.29	0.25%	0.995
2.52	2.10	0.126	0.210	1.20	0.03	5.29	0.50%	0.990
2.52	2.10	0.126	0.315	1.20	0.04	5.29	0.75%	0.982
2.52	2.10	0.126	0.420	1.20	0.05	5.29	1.00%	0.974
2.52	2.10	0.252	0.105	1.20	0.03	5.29	0.50%	0.988
2.52	2.10	0.252	0.210	1.20	0.05	5.29	1.00%	0.977
2.52	2.10	0.252	0.315	1.20	0.08	5.29	1.50%	0.965
2.52	2.10	0.252	0.420	1.20	0.11	5.29	2.00%	0.950
2.52	2.10	0.378	0.105	1.20	0.04	5.29	0.75%	0.976
2.52	2.10	0.378	0.210	1.20	0.08	5.29	1.50%	0.961
2.52	2.10	0.378	0.315	1.20	0.12	5.29	2.25%	0.942
2.52	2.10	0.378	0.420	1.20	0.16	5.29	3.00%	0.922
2.52	2.10	0.504	0.105	1.20	0.05	5.29	1.00%	0.961
2.52	2.10	0.504	0.210	1.20	0.11	5.29	2.00%	0.940
2.52	2.10	0.504	0.315	1.20	0.16	5.29	3.00%	0.915
2.52	2.10	0.504	0.420	1.20	0.21	5.29	4.00%	0.889

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre la relación de áreas y la reducción de rigidez:

$$r = -0.99$$

Lo cual indica que se tiene una correlación lineal negativa alta ($r > 0.80$). Entonces podemos hacer una regresión lineal a partir de los datos que se muestran en el siguiente gráfico de la Figura 27.

Figura 27: Gráfico Variación del parámetro ra frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 1.2



Teniendo en cuenta la función de regresión lineal podemos afirmar que para tener una reducción de rigidez mayor del 95%, se tiene que tener una relación de área:

$$ra < 1.848\%$$

3.2.5.3.5 Esbeltez $hm/lm=1.4$

Para la relación de esbeltez de 1.4, se obtuvo 16 casos que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Variación de rigidez según el parámetro de relación de área de abertura y área de muro para esbeltez de 1.4.

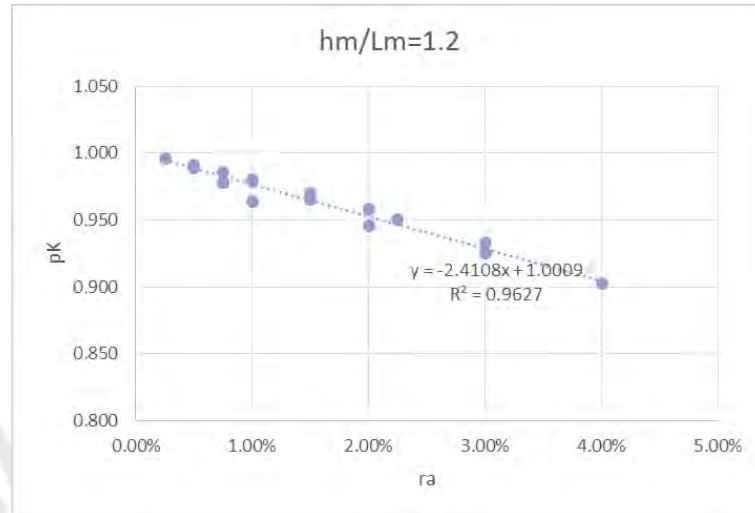
hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	hm/Lm	Aa (m ²)	Am (m ²)	ra=Aa/Am	pk=Ki/K0
2.52	1.80	0.126	0.090	1.40	0.01	4.54	0.25%	0.996
2.52	1.80	0.126	0.180	1.40	0.02	4.54	0.50%	0.991
2.52	1.80	0.126	0.270	1.40	0.03	4.54	0.75%	0.986
2.52	1.80	0.126	0.360	1.40	0.05	4.54	1.00%	0.979
2.52	1.80	0.252	0.090	1.40	0.02	4.54	0.50%	0.989
2.52	1.80	0.252	0.180	1.40	0.05	4.54	1.00%	0.980
2.52	1.80	0.252	0.270	1.40	0.07	4.54	1.50%	0.970
2.52	1.80	0.252	0.360	1.40	0.09	4.54	2.00%	0.959
2.52	1.80	0.378	0.090	1.40	0.03	4.54	0.75%	0.978
2.52	1.80	0.378	0.180	1.40	0.07	4.54	1.50%	0.965
2.52	1.80	0.378	0.270	1.40	0.10	4.54	2.25%	0.950
2.52	1.80	0.378	0.360	1.40	0.14	4.54	3.00%	0.933
2.52	1.80	0.504	0.090	1.40	0.05	4.54	1.00%	0.964
2.52	1.80	0.504	0.180	1.40	0.09	4.54	2.00%	0.945
2.52	1.80	0.504	0.270	1.40	0.14	4.54	3.00%	0.925
2.52	1.80	0.504	0.360	1.40	0.18	4.54	4.00%	0.902

Se obtuvo el coeficiente de correlación entre la relación de áreas y la reducción de rigidez:

$$r = -0.98$$

Lo cual indica que se tiene una correlación lineal negativa alta ($r > 0.80$). Entonces podemos hacer una regresión lineal a partir de los datos que se muestran en la Figura 28.

Figura 28: Gráfico Variación del parámetro ra frente a la variación de rigidez pK para la esbeltez 1.4

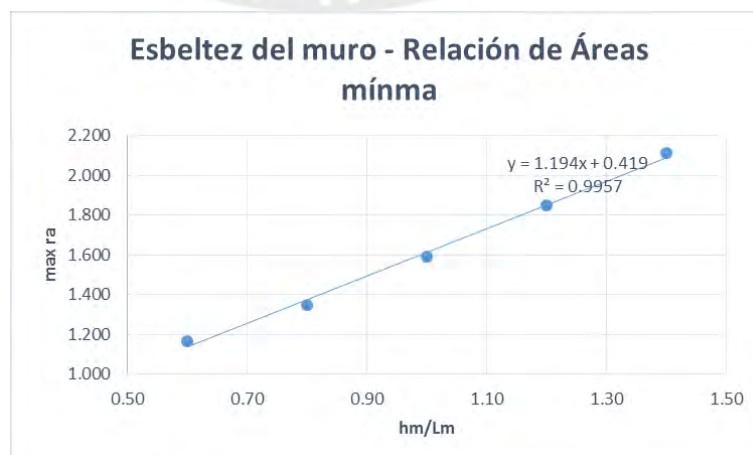


Teniendo en cuenta la función de regresión lineal podemos afirmar que para tener una reducción de rigidez mayor del 95%, se tiene que tener una relación de área:

$$ra < 2.111\%$$

Además, si tabulamos los valores de relación de áreas de aberturas y muros para cada valor de relación de esbelteces del muro podríamos sacar una relación entre estos como se muestra en la Figura 29.

Figura 29: Gráfico de esbeltez hm/Lm frente al máximo valor del parámetro ra con variación de rigidez de $pK=95\%$



Se podría determinar la relación mínima del área de abertura y el área del muro para cualquier esbeltez de muro, para considerar que dicha abertura no influya significativamente en la reducción de rigidez del muro:

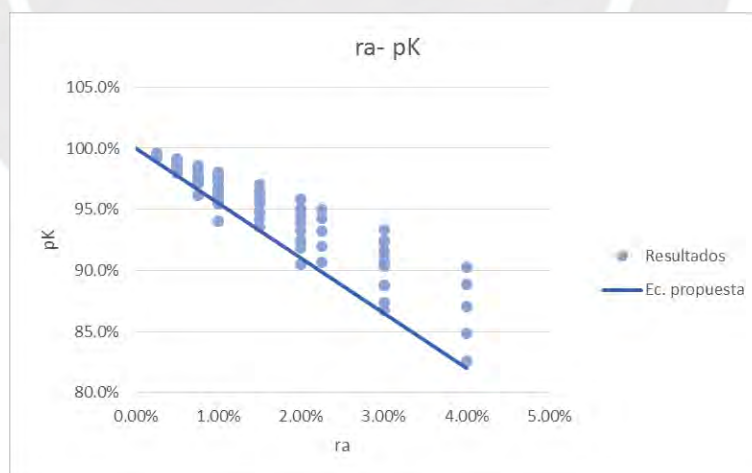
$$\max ra = \frac{hm}{Lm} * 1.194 + 0.419$$

Para efectos prácticos podemos decir que la máxima relación de áreas para poder decir que una abertura no afecta en la rigidez de muro:

$$\% \max ra = \begin{cases} 1.0\%, & hm/Lm < 1 \\ 1.5\%, & hm/Lm \geq 1 \end{cases}$$

Finalmente, si juntamos todos los valores obtenidos sin separarlos por la relación de esbeltez obtendremos el gráfico de la Figura 30 donde se muestra el factor de reducción de rigidez versus la relación de áreas de abertura y muro.

Figura 30: Gráfico variación del parámetro ra frente la variación de rigidez pK, con ecuación propuesta.



Se puede ver los resultados que se ponen más dispersos mientras el área de abertura crece. Por esto es que se debe tener en cuenta la esbeltez de muro dentro de la ecuación de reducción de rigidez.

Si no tenemos en cuenta la relación de esbeltez del muro, se propone una ecuación lineal de manera conservadora que relaciona la reducción de rigidez con la relación de áreas de abertura y muro de manera lineal de tal manera de que los valores obtenidos no sean menores a la relación establecida.

$$pK = 1 - 4.5ra$$



3.3 MODELOS NO LINEALES

3.3.1 RELACIONES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

3.3.1.1 Acero de Refuerzo

El acero de refuerzo que se coloca en los elementos de confinamiento del muro, se definió como un elemento uniaxial, que trabaja a tracción y compresión. Se definió como un material elastoplástico, es decir una vez llegue al esfuerzo de fluencia, se deformará sin aumento de esfuerzo.

3.3.1.2 Concreto

Para el comportamiento no lineal del concreto se hizo uso de la ley equivalente uniaxial. El modelo no lineal para la zona de compresión se usó el modelo Hognestad (E. Hognestad, 1955) para la resistencia compresión de $f'_c=17.2$ Mpa, como se muestra en la Figura 31. Para el comportamiento en tracción se asumió que la máxima resistencia al esfuerzo de tracción será el 10% del f'_c y una súbita pérdida de resistencia a la tracción como es característico en un material frágil, ver la Figura 32.

Figura 31: Comportamiento del concreto según Hognestad para $f'_c=17.2$ Mpa

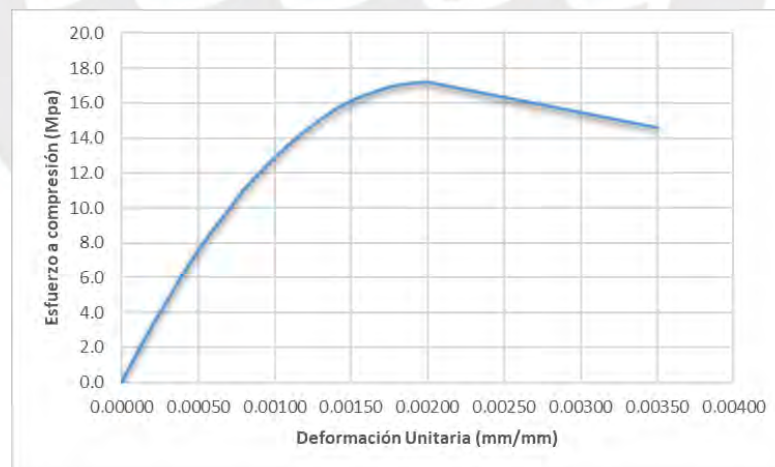
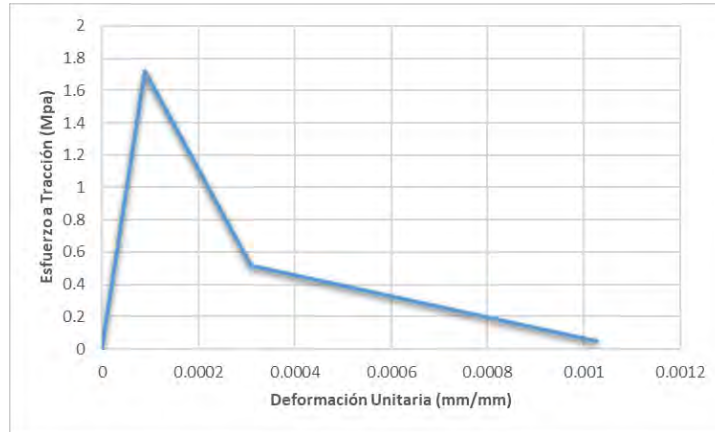


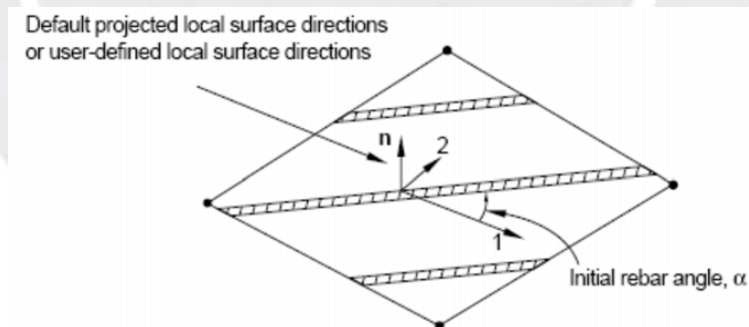
Figura 32: Comportamiento del concreto a tracción.



3.3.1.3 Elementos de Concreto Armado

Definidos ya el comportamiento no lineal de cada uno de los materiales componentes de los elementos de concreto armado, el acero y el concreto, para poder modelar los elementos de confinamiento, las columnas de amarre y las vigas soleras, se usó los elementos tipo Shell con elementos rebar que ofrece el software Abaqus, Figura 33.

Figura 33. Esquema de elementos tipo Shell con elementos rebar del software Abaqus.



Se hizo un artificio de tal manera que los elementos rebar verticales simulen los aceros longitudinales de los elementos de confinamiento, y los elementos rebar horizontales simulen ser los estribos.

3.3.1.4 Albañilería

En esta investigación, y siguiendo recomendaciones de otras investigaciones como la de Lourenço (2013), se usó un modelo similar

al modelo utilizado para el concreto debido a que las fallas de ambos como materiales compuestos son similares.

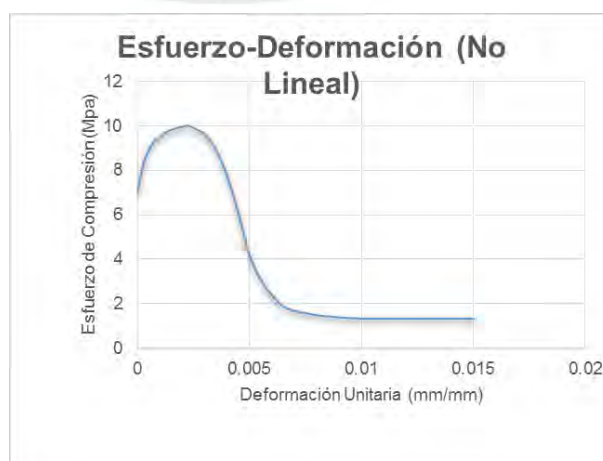
3.3.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS NO LINEAL DE LA ALBAÑILERÍA

Para el análisis no lineal numérico de los muros de albañilería confinada se hizo uso del método del macromodelamiento para modelar la albañilería y los elementos de confinamiento que son de concreto armado. Para esto se usó la ley equivalente uniaxial de esfuerzos que expresa el estado biaxial de los elementos mediante una relación de esfuerzo principal y la deformación uniaxial equivalente.

En esta investigación no se consideró la no linealidad geométrica, tan solo la no lineal del material.

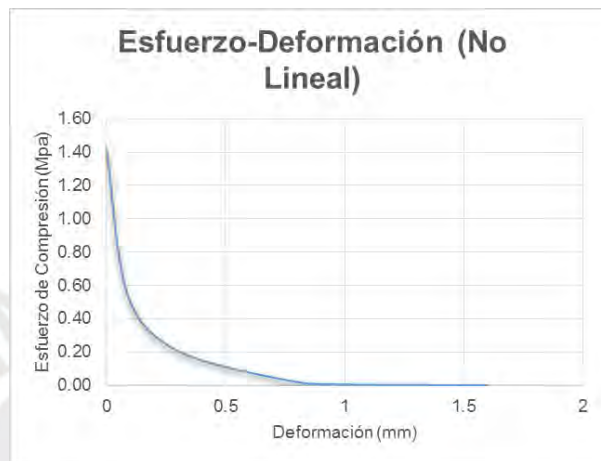
El modelo numérico se hizo mediante el software Abaqus Student Edition 2019, los modelos numéricos no lineales se corrieron en una Laptop ASUS, de placa Intel core i7, cuyo procesador era de 2.4 GHz, Memoria RAM de 8MB, y cada modelo numérico no lineal demoró en terminar de procesar el cálculo 30 minutos en promedio. El modelo no lineal que se usó fue el “Concrete damaged plasticity” (Lee, J., & Fenves, G. L., 1998. “Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures”). Se asignó la relación esfuerzo de compresión deformación post fluencia para la albañilería. En base a los valores del ensayo de pilas a compresión axial, el esfuerzo de fluencia considerado fue de 7 Mpa y el esfuerzo máximo 10 Mpa como se muestra en la Figura 34.

Figura 34: Comportamiento post fluencia a compresión de la albañilería asignado al modelo numérico



También se asignó la relación esfuerzo de tracción deformación post fluencia, el esfuerzo de fluencia considerado fue de 1.4 Mpa basado en un esfuerzo admisible de 0.15 Mpa de tracción por flexión como se muestra en la Figura 35.

Figura 35: Comportamiento post fluencia a tracción de la albañilería asignado al modelo numérico



3.3.3 COMPARACIÓN CON ENSAYO EXPERIMENTAL

Para la validación de los modelos utilizados y la asunción del comportamiento no lineal de los materiales, se elaboró un modelo numérico de un ensayo experimental realizado con anterioridad en la tesis “Comparación Comportamiento Carga Lateral Cíclica Muro Conf. con Ladrillos Concreto y otro con Ladrillos Arcilla” realizada por Paola Angles con la asesoría del ingeniero Ángel San Bartolomé,

En dicha investigación se realizó el ensayo experimental de dos muros de albañilería confinada (un muro con unidades de arcilla y otro muro con unidades de concreto) mediante una carga cíclica horizontal. Se elaboró el modelo numérico con las propiedades obtenidas de los ensayos en esta investigación:

Para la albañilería (de unidades albañilería):

- Módulo de Elasticidad: $E_m = 5805.6 \text{ Mpa}$
- Esfuerzo máximo a compresión: $f'_m = 10.26 \text{ Mpa}$
- Módulo de Corte: $G_m = 2322.2 \text{ Mpa}$
- Módulo de Poisson: $\nu = 0.25$

Para el concreto:

- Módulo de Elasticidad: $E_c = 19771.7 \text{ Mpa}$
- Esfuerzo máximo a compresión: $f'_c = 17.5 \text{ Mpa}$
- Módulo de Corte: $G_c = 8596.4 \text{ Mpa}$
- Módulo de Poisson: $\nu = 0.15$

Para el Acero:

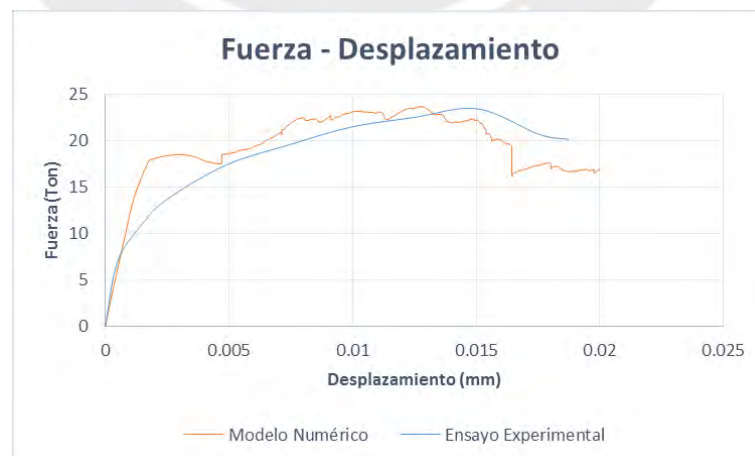
- Módulo de Elasticidad: $E_c = 200000 \text{ Mpa}$
- Esfuerzo de fluencia: $f_y = 420 \text{ Mpa}$

Las características geométricas de este muro confinado son:

- Longitud de Muro: $L_m = 2.40 \text{ m}$ (Incluido las columnas de confinamiento)
- Altura de Muro: $h_m = 2.50 \text{ m}$ (Incluida la viga solera)

Con estas características se le aplicó una carga constante (de desplazamiento) en la parte superior del muro hasta llegar a un desplazamiento máximo lateral de 2 cm. En el gráfico mostrado en la Figura 36 se plotean los valores obtenidos por el modelo numérico superpuesto con los resultados obtenidos en dicha investigación.

Figura 36: Gráfico comparativo Fuerza-Desplazamiento del ensayo experimental y el modelo numérico propuesto

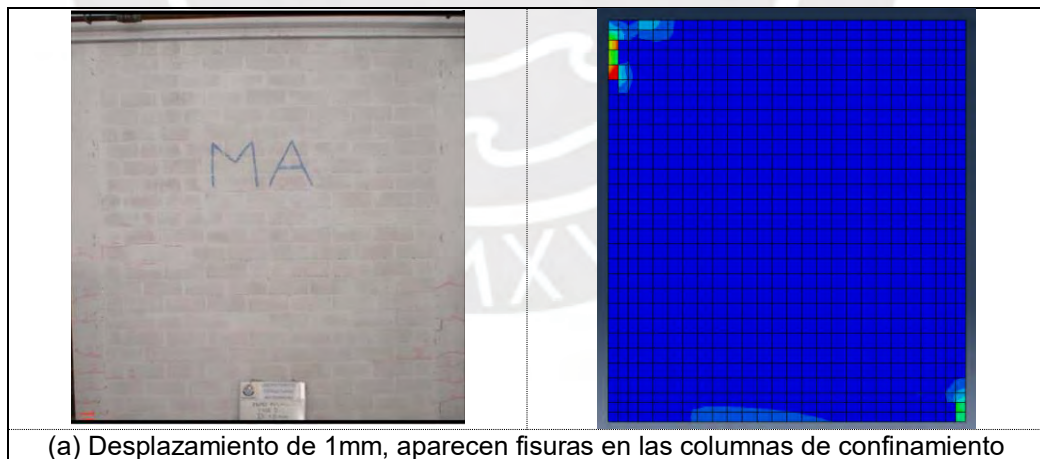


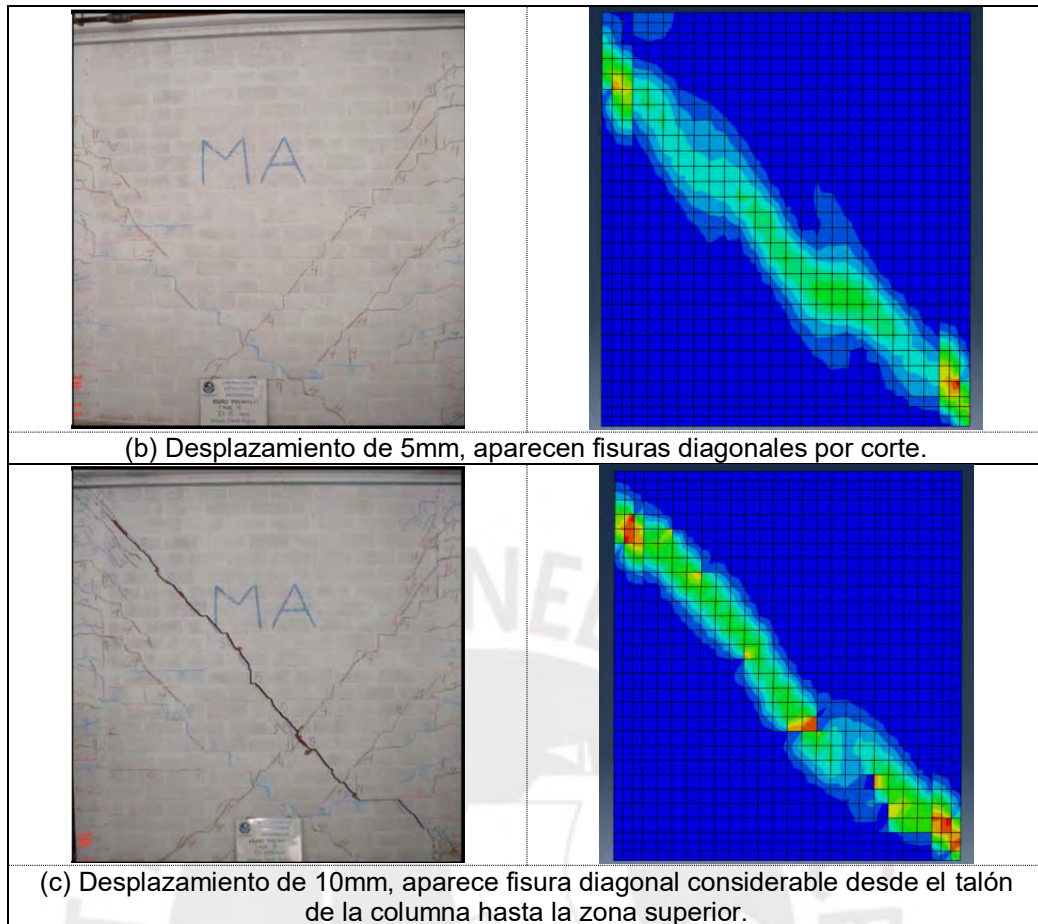
Se puede apreciar cierto parecido entre el modelo numérico propuesto y el ensayo experimental realizado en la investigación mencionada.

También se aprecia una variación desde el desplazamiento nulo hasta el punto de fluencia entre el modelo numérico y el ensayo experimental. Esta diferencia puede ser debida al tipo de ensayo realizado, en el ensayo experimental fue un ensayo con carga cíclica y el gráfico es el resultado de la envolvente del comportamiento histerético del muro. En cambio, el modelo numérico fue por una carga monótona de desplazamiento. Mediante la carga monótona se llega a un punto de fluencia mucho mayor, esta diferencia puede ser debida a que en la carga cíclica puede reducir en mayor grado la rigidez lateral inicial del muro y de manera más rápida. Debido a que los valores que se tomarán de estos modelos son las resistencias máximas, la zona inicial no tiene relevancia. Además, se presenta en la Figura 37 un comparativo entre el ensayo experimental y el modelo no lineal que muestra como hay mucha similitud entre el patrón de fisuras del ensayo experimental con el daño del material del modelo no lineal.

Finalmente, los resultados pueden declararse muy similares que por lo tanto ofrece un buen grado de confianza al modelo numérico.

Figura 37. Gráfico comparativo Fuerza-Desplazamiento del ensayo experimental y el modelo numérico propuesto





3.3.4 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Al igual que los análisis elásticos de los muros de albañilería confinada, se realizó los análisis a muros con características geométricas diferentes de manera parametrizada. Para el análisis no lineal se consideraron como parámetros variables la relación de esbeltez de muros y la relación de dimensiones de la abertura con respecto a las dimensiones de los muros y esta vez solo se consideró la posición de la abertura en la parte central del muro, resultando tener 85 modelos de muros diferentes. Estas variaciones geométricas se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Variaciones de los parámetros geométricos de los muros para el análisis no lineal.

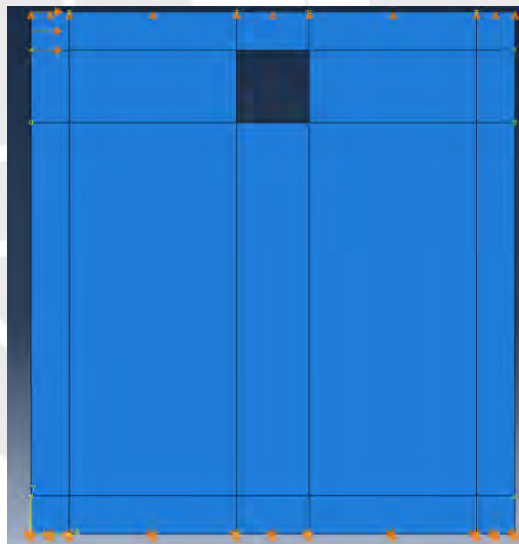
hm/Lm	ha/hm	La/Lm
0.60	0.05	0.05
0.80	0.10	0.10
1.00	0.15	0.15
1.20	0.20	0.20
1.40		

3.3.5 DEFINICIÓN DE CARGAS Y CONDICIONES DE BORDE

En el modelo numérico se consideró la base está restringida al desplazamiento a través de apoyos fijos y en la parte superior del muro se restringió el desplazamiento vertical mediante apoyos de rodillo.

La carga que se va a aplicar será un desplazamiento horizontal en la parte superior del muro. En este caso, a diferencia del modelo lineal, se usa la carga de desplazamiento en lugar de una carga de fuerza pues al incremento de la fuerza posterior a la máxima resistencia del muro no se obtendrán más datos, en lugar de eso al incremento de desplazamiento de la máxima resistencia se obtendrán los datos fuerza para mayores desplazamientos respecto a este punto. Como se muestra en la Figura 38, el modelo presenta apoyos empotrados en la base, apoyos tipo rodillo en la zona superior y desplazamiento lateral en la zona de la viga de confinamiento.

Figura 38. Modelo no lineal de un muro mediante el Software Abaqus.



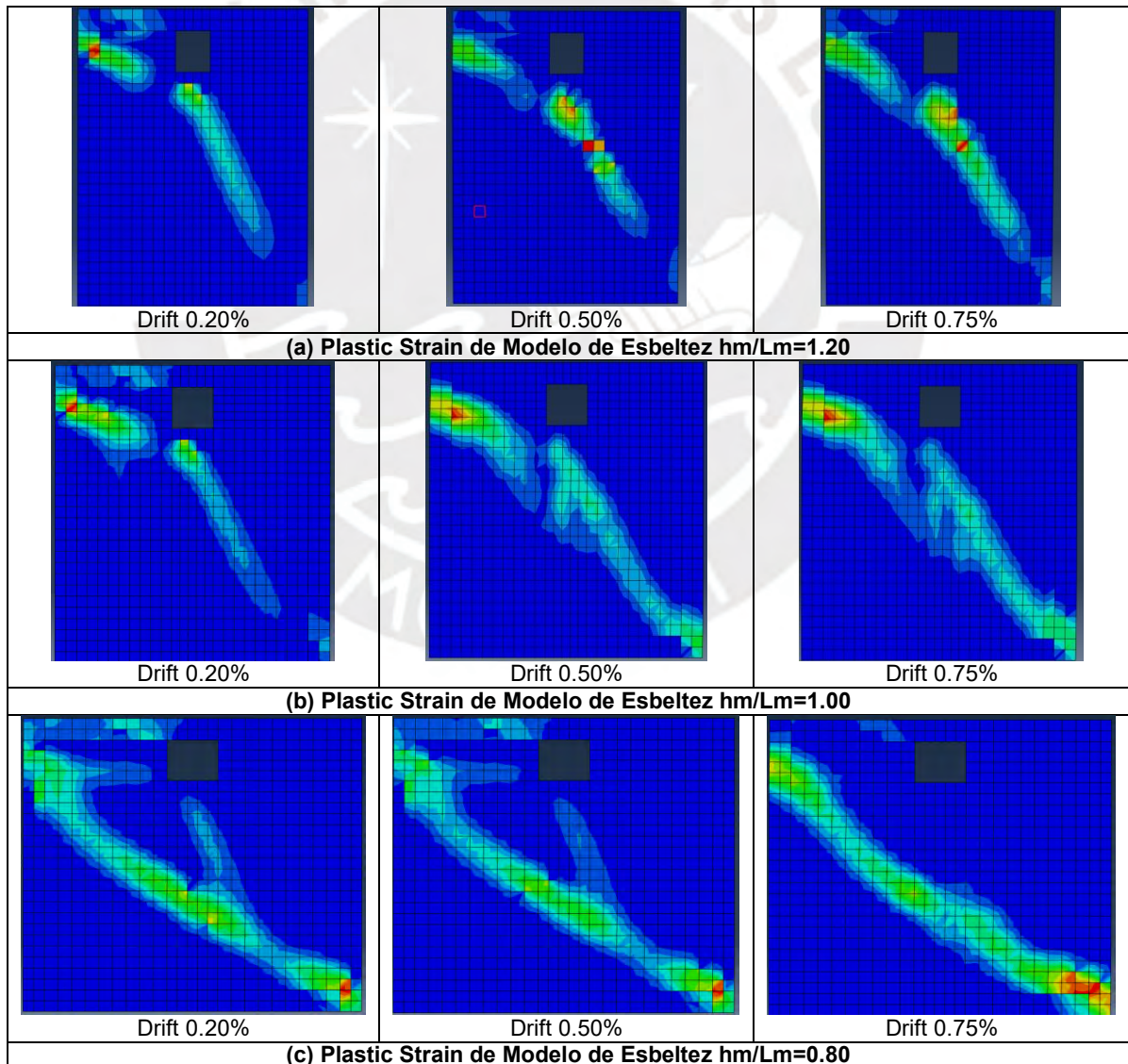
Este desplazamiento se hará en tramos de tiempos que coinciden con los pasos del proceso del cálculo no lineal que divide la carga para cada paso y va aumentando hasta llegar a la carga completa. El máximo desplazamiento será de 20 mm correspondiente en este caso a una distorsión angular (drift) de 0.79 %. Nótese que se está llevando a una deriva mayor a la permisible por la norma para poder observar el comportamiento de la albañilería pasado este límite.

La resistencia máxima obtenida para los muros sin aberturas se le denominó “**Ro**” y las resistencias máximas de los muros con aberturas se les denominaron “**Ri**”. Estas resistencias de los muros con aberturas se compararon a las resistencias de los sin aberturas con dimensiones iguales, por lo tanto, se definió el factor de reducción de rigidez como $pR=Ro/Ri$.

3.3.6 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LOS MODELOS NO LINEALES

La Figura 39 muestra las deformaciones plásticas de 3 modelos, a modo de ejemplo, de muros de albañilería con abertura con diferentes desplazamientos laterales de la parte superior.

Figura 39. Deformaciones plásticas de 3 modelos de muros con aberturas de diferentes esbelteces



Se puede ver en el modelo de esbeltez de $h_m/L_m=1.20$ que con un drift de 0.20% el agrietamiento comienza por la parte superior de las columnas de confinamiento en conjunto con la parte del muro que se encuentra a los costados de la abertura, así mismo la deformación plástica se dio en la parte inferior a la abertura de manera diagonal hasta la zona inferior de las columnas de confinamiento. Con un drift de 0.50% las mayores deformaciones se dan en la zona inferior de la abertura. En el drift de 0.75% aumentan las deformaciones con el mismo patrón en las etapas anteriores.

En el modelo de esbeltez de $h_m/L_m=1.00$ tiene bastante similitud con el comportamiento presentado con el modelo de esbeltez de $h_m/L_m=1.20$, salvo diferencia que las mayores deformaciones se presentan en la zona del muro que está a los costados de las aberturas.

En el modelo de esbeltez de $h_m/L_m=0.80$, en el drift de 0.20% se presenta deformaciones en la zona del muro a los costados de la abertura y también en la parte inferior de la abertura de manera diagonal hacia la zona inferior de la columna de confinamiento, pero además, presenta deformaciones de manera diagonal a lo largo de todo el muro. En el drift de 0.50%, la deformación diagonal a lo largo de todo el muro se vuelve de mayor importancia. Finalmente, en el drift de 0.75%, prácticamente las deformaciones plásticas, se parecen mucho a un muro que no posee aberturas.

3.3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS NO LINEALES

Para el análisis de resultados se tomó como parámetro de comparación de los muros sin abertura y los muros con abertura la resistencia máxima alcanzada durante el análisis no lineal realizado. Para cada relación de esbeltez de muro se obtuvo la relación de la disminución de la resistencia máxima de los muros con abertura con respecto al muro completo.

3.3.7.1 Esbeltez $h_m/L_m=0.60$

Teniendo como constante la altura de $h_m=2.52\text{m}$, la longitud de muro se consideró de $L_m=4.20\text{m}$. Por lo tanto, las dimensiones de las aberturas en largo L_a , y alto h_a , se consideraron $L_a= (0.210\text{m}, 0.420\text{m}, 0.630\text{m}$ y

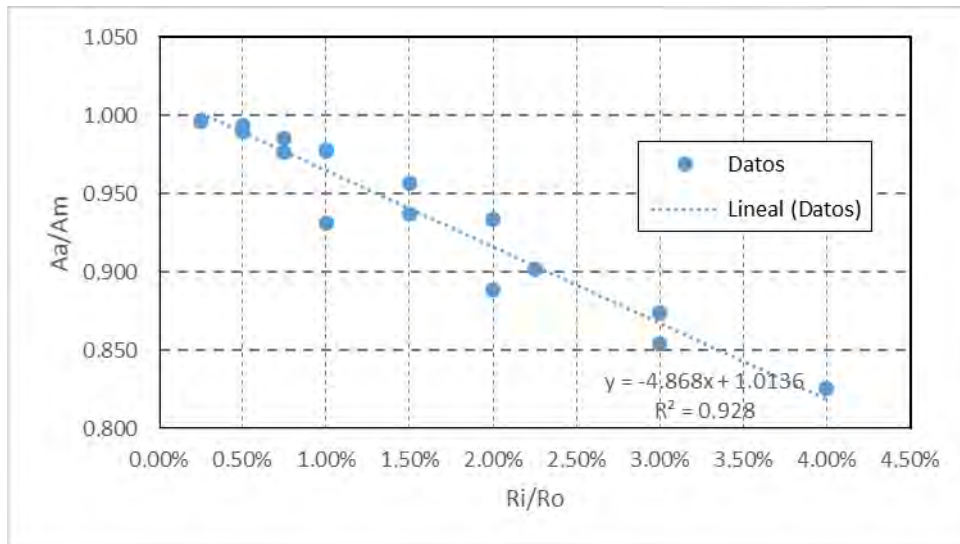
0.840m) y $h_a = (0.126\text{m}, 0.252\text{m}, 0.378\text{m} \text{ y } 0.504\text{m})$. Los resultados de resistencias máximas y demás parámetros considerados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 0.6.

hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	Aa (m ²)	hm/Lm	Am (m ²)	ra=Aa/Am	Ri/R0
2.52	4.20	0.126	0.210	0.03	0.60	10.58	0.25%	0.996
2.52	4.20	0.126	0.420	0.05	0.60	10.58	0.50%	0.994
2.52	4.20	0.126	0.630	0.08	0.60	10.58	0.75%	0.985
2.52	4.20	0.126	0.840	0.11	0.60	10.58	1.00%	0.978
2.52	4.20	0.252	0.210	0.05	0.60	10.58	0.50%	0.990
2.52	4.20	0.252	0.420	0.11	0.60	10.58	1.00%	0.978
2.52	4.20	0.252	0.630	0.16	0.60	10.58	1.50%	0.957
2.52	4.20	0.252	0.840	0.21	0.60	10.58	2.00%	0.934
2.52	4.20	0.378	0.210	0.08	0.60	10.58	0.75%	0.976
2.52	4.20	0.378	0.420	0.16	0.60	10.58	1.50%	0.937
2.52	4.20	0.378	0.630	0.24	0.60	10.58	2.25%	0.902
2.52	4.20	0.378	0.840	0.32	0.60	10.58	3.00%	0.874
2.52	4.20	0.504	0.210	0.11	0.60	10.58	1.00%	0.932
2.52	4.20	0.504	0.420	0.21	0.60	10.58	2.00%	0.889
2.52	4.20	0.504	0.630	0.32	0.60	10.58	3.00%	0.854
2.52	4.20	0.504	0.840	0.42	0.60	10.58	4.00%	0.825

Se consideró como parámetro a relacionar la relación del área de abertura y el área de muro “Aa/Am” con la reducción de la resistencia máxima del muro. Se graficó entonces esta relación que se muestra en la Figura 40.

Figura 40: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 0.6



Se pudo relacionar el parámetro “ra” con la reducción de resistencia “pR” mediante un ajuste de regresión lineal con un factor de correlación $R=0.96$ lo cual indica un alto grado de correlación.

Para una disminución de la resistencia en un $pR > 95\%$ de un muro con aberturas frente a un muro sin ninguna abertura, con este ajuste de curva, el parámetro ra tiene que ser:

$$ra < 1.29\%$$

3.3.7.2 Esbeltez $hm/Lm=0.80$

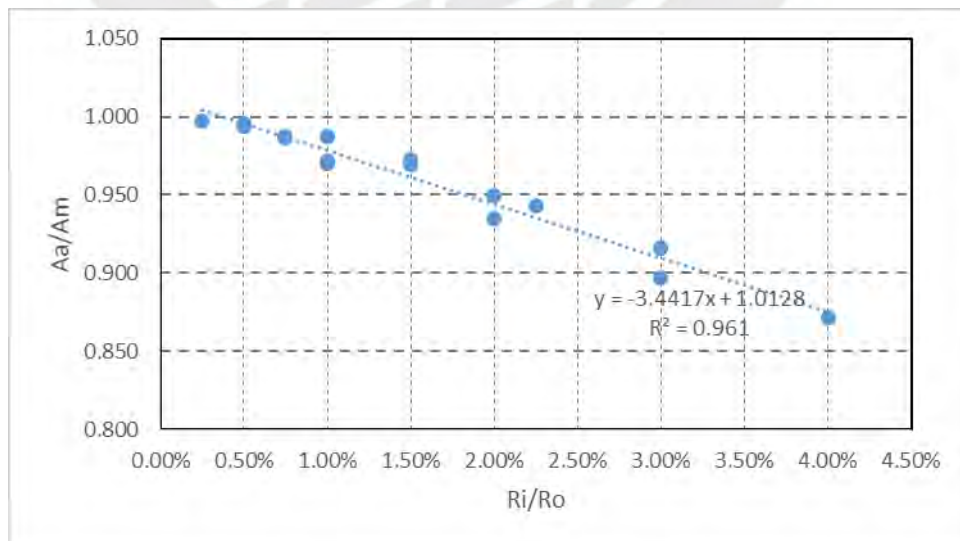
Teniendo como constante la altura de $hm=2.52m$, la longitud de muro se consideró de $Lm=3.15m$. Por lo tanto, las dimensiones de las aberturas en largo La , y alto ha , se consideraron $La= (0.158m, 0.315m, 0.473m$ y $0.630m)$ y $ha= (0.126m, 0.252m, 0.378m$ y $0.504m)$. Los resultados de resistencias máximas y demás parámetros considerados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 0.8.

hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	Aa (m ²)	hm/Lm	Am (m ²)	ra=Aa/Am	Ri/R0
2.52	3.15	0.126	0.158	0.02	0.80	7.94	0.25%	0.997
2.52	3.15	0.126	0.315	0.04	0.80	7.94	0.50%	0.994
2.52	3.15	0.126	0.473	0.06	0.80	7.94	0.75%	0.987
2.52	3.15	0.126	0.630	0.08	0.80	7.94	1.00%	0.972
2.52	3.15	0.252	0.158	0.04	0.80	7.94	0.50%	0.996
2.52	3.15	0.252	0.315	0.08	0.80	7.94	1.00%	0.987
2.52	3.15	0.252	0.473	0.12	0.80	7.94	1.50%	0.973
2.52	3.15	0.252	0.630	0.16	0.80	7.94	2.00%	0.949
2.52	3.15	0.378	0.158	0.06	0.80	7.94	0.75%	0.986
2.52	3.15	0.378	0.315	0.12	0.80	7.94	1.50%	0.970
2.52	3.15	0.378	0.473	0.18	0.80	7.94	2.25%	0.943
2.52	3.15	0.378	0.630	0.24	0.80	7.94	3.00%	0.916
2.52	3.15	0.504	0.158	0.08	0.80	7.94	1.00%	0.970
2.52	3.15	0.504	0.315	0.16	0.80	7.94	2.00%	0.935
2.52	3.15	0.504	0.473	0.24	0.80	7.94	3.00%	0.897
2.52	3.15	0.504	0.630	0.32	0.80	7.94	4.00%	0.872

Se consideró como parámetro a relacionar con la reducción de la resistencia máxima del muro, la relación del área de abertura y el área de muro "Aa/Am". Se graficó entonces esta relación que se muestra en la Figura 41.

Figura 41: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 0.8



Se pudo relacionar el parámetro “ra” con la reducción de resistencia “pR” mediante un ajuste a una regresión lineal con un factor de correlación R=0.96 lo cual indica un alto grado de correlación.

Para una disminución de la resistencia en un pR > 95% de un muro con aberturas frente a un muro sin ninguna abertura, con este ajuste de curva, el parámetro ra tiene que ser:

$$ra < 1.82\%$$

3.3.7.3 Esbeltez hm/Lm=1.00

Teniendo como constante la altura de hm=2.52m, la longitud de muro se consideró de Lm=2.52m. Por lo tanto, las dimensiones de las aberturas en largo La, y alto ha, se consideraron La= (0.158m, 0.315m, 0.473m y 0.630m) y ha= (0.126m, 0.252m, 0.378m y 0.504m). Los resultados de resistencias máximas y demás parámetros considerados se presentan en la Tabla 14.

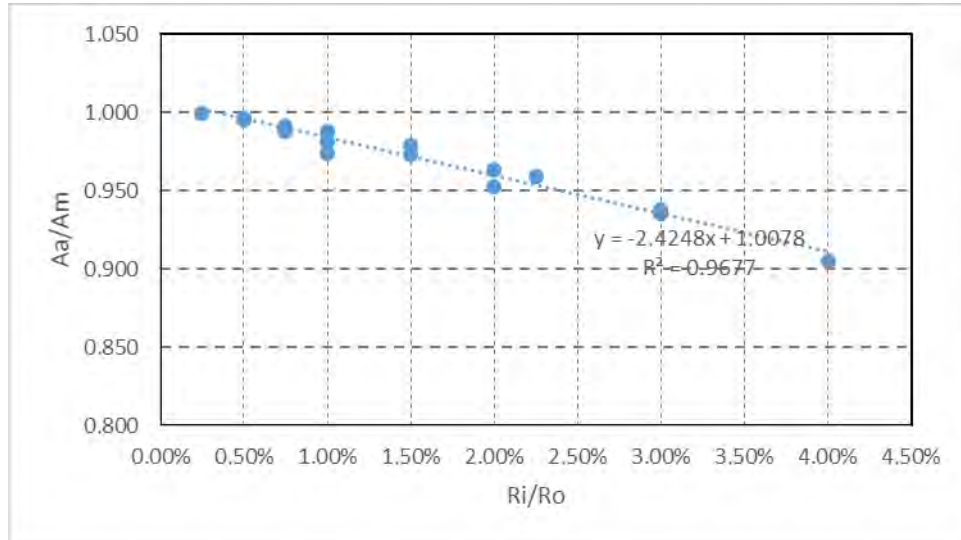
Tabla 14. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 1.0

hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	Aa (m ²)	hm/Lm	Am (m ²)	ra=Aa/Am	Ri/R0
2.52	2.52	0.126	0.126	0.02	1.00	6.35	0.25%	1.000
2.52	2.52	0.126	0.252	0.03	1.00	6.35	0.50%	0.996
2.52	2.52	0.126	0.378	0.05	1.00	6.35	0.75%	0.988
2.52	2.52	0.126	0.504	0.06	1.00	6.35	1.00%	0.974
2.52	2.52	0.252	0.126	0.03	1.00	6.35	0.50%	0.995
2.52	2.52	0.252	0.252	0.06	1.00	6.35	1.00%	0.988
2.52	2.52	0.252	0.378	0.10	1.00	6.35	1.50%	0.973
2.52	2.52	0.252	0.504	0.13	1.00	6.35	2.00%	0.952
2.52	2.52	0.378	0.126	0.05	1.00	6.35	0.75%	0.991
2.52	2.52	0.378	0.252	0.10	1.00	6.35	1.50%	0.979
2.52	2.52	0.378	0.378	0.14	1.00	6.35	2.25%	0.959
2.52	2.52	0.378	0.504	0.19	1.00	6.35	3.00%	0.935
2.52	2.52	0.504	0.126	0.06	1.00	6.35	1.00%	0.981
2.52	2.52	0.504	0.252	0.13	1.00	6.35	2.00%	0.963
2.52	2.52	0.504	0.378	0.19	1.00	6.35	3.00%	0.938
2.52	2.52	0.504	0.504	0.25	1.00	6.35	4.00%	0.905

Se consideró como parámetro a relacionar con la reducción de la resistencia máxima del muro, la relación del área de abertura y el área

de muro “ra”. Se graficó entonces esta relación que se muestra en la Figura 42.

Figura 42: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 1.0



Se pudo relacionar el parámetro “ra” con la reducción de resistencia “pR” mediante un ajuste a una regresión lineal con un factor de correlación $R=0.98$ lo cual indica un alto grado de correlación.

Para una disminución de la resistencia en un $pR > 95\%$ de un muro con aberturas frente a un muro sin ninguna abertura, con este ajuste de curva, el parámetro ra tiene que ser:

$$ra < 2.38\%$$

3.3.7.4 Esbeltez $hm/Lm=1.20$

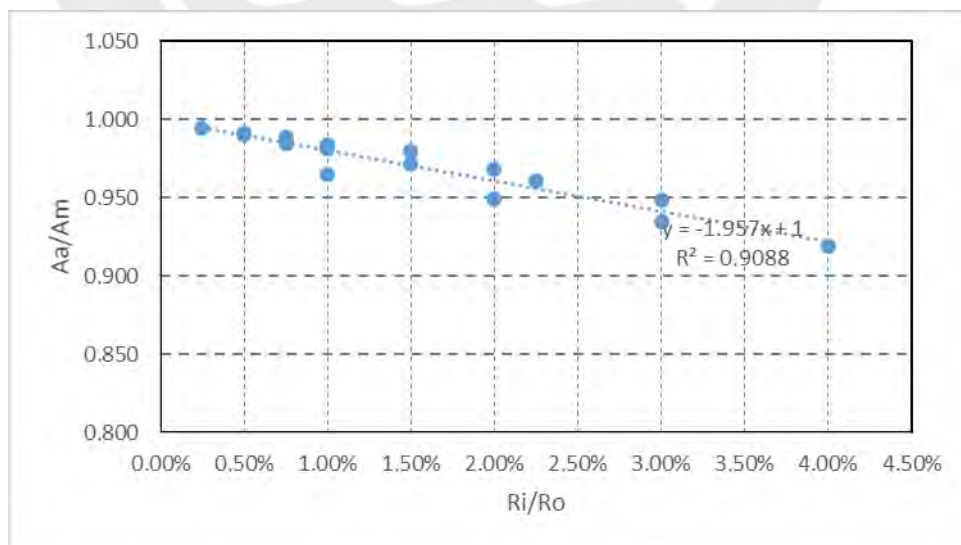
Teniendo como constante la altura de $hm=2.52m$, la longitud de muro se consideró de $Lm=2.10m$. Por lo tanto, las dimensiones de las aberturas en largo La , y alto ha , se consideraron $La= (0.105m, 0.210m, 0.315m$ y $0.420m)$ y $ha= (0.126m, 0.252m, 0.378m$ y $0.504m)$. Los resultados de resistencias máximas y demás parámetros considerados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 1.2.

hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	Aa (m ²)	hm/Lm	Am (m ²)	ra=Aa/Am	Ri/R0
2.52	2.10	0.126	0.105	0.01	1.20	5.29	0.25%	0.994
2.52	2.10	0.126	0.210	0.03	1.20	5.29	0.50%	0.991
2.52	2.10	0.126	0.315	0.04	1.20	5.29	0.75%	0.985
2.52	2.10	0.126	0.420	0.05	1.20	5.29	1.00%	0.965
2.52	2.10	0.252	0.105	0.03	1.20	5.29	0.50%	0.990
2.52	2.10	0.252	0.210	0.05	1.20	5.29	1.00%	0.984
2.52	2.10	0.252	0.315	0.08	1.20	5.29	1.50%	0.972
2.52	2.10	0.252	0.420	0.11	1.20	5.29	2.00%	0.950
2.52	2.10	0.378	0.105	0.04	1.20	5.29	0.75%	0.989
2.52	2.10	0.378	0.210	0.08	1.20	5.29	1.50%	0.980
2.52	2.10	0.378	0.315	0.12	1.20	5.29	2.25%	0.961
2.52	2.10	0.378	0.420	0.16	1.20	5.29	3.00%	0.935
2.52	2.10	0.504	0.105	0.05	1.20	5.29	1.00%	0.981
2.52	2.10	0.504	0.210	0.11	1.20	5.29	2.00%	0.968
2.52	2.10	0.504	0.315	0.16	1.20	5.29	3.00%	0.949
2.52	2.10	0.504	0.420	0.21	1.20	5.29	4.00%	0.919

Se consideró como parámetro a relacionar con la reducción de la resistencia máxima del muro, la relación del área de abertura y el área de muro "Aa/Am". Se graficó entonces esta relación que se muestra en la Figura 43.

Figura 43: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 1.2



Se pudo relacionar el parámetro “ra” con la reducción de resistencia “pR” mediante un ajuste a una regresión lineal con un factor de correlación R=0.96 lo cual indica un alto grado de correlación.

Para una disminución de la resistencia en un pR > 95% de un muro con aberturas frente a un muro sin ninguna abertura, con este ajuste de curva, el parámetro ra tiene que ser:

$$ra < 2.55\%$$

3.3.7.5 Esbeltez hm/Lm=1.40

Teniendo como constante la altura de hm=2.52m, la longitud de muro se consideró de Lm=1.80m. Por lo tanto, las dimensiones de las aberturas en largo La, y alto ha, se consideraron La= (0.090m, 0.180m, 0.270m y 0.360m) y ha= (0.126m, 0.252m, 0.378m y 0.504m). Los resultados de resistencias máximas y demás parámetros considerados se presentan en la Tabla 16.

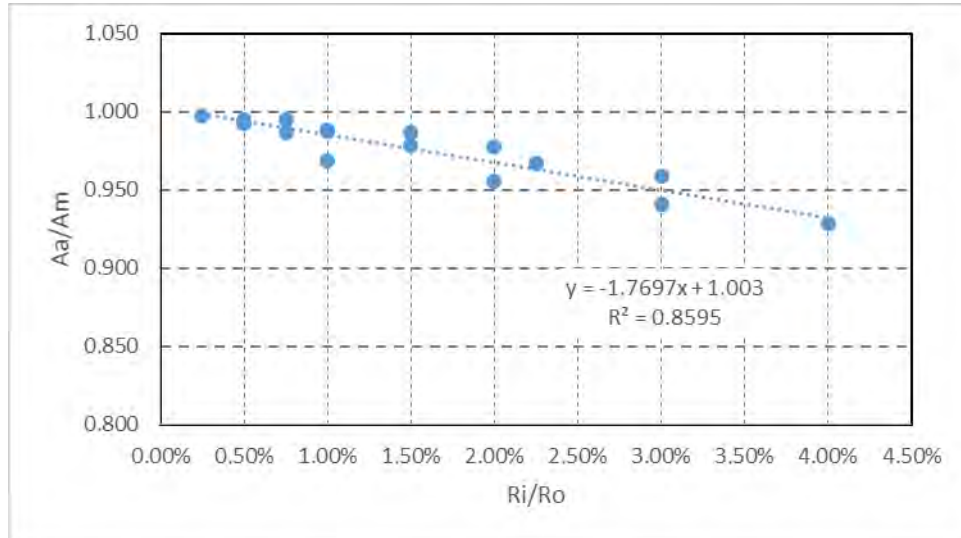
Tabla 16. Variación de resistencia para diferentes tamaños de aberturas para la esbeltez de 1.4.

hm (m)	Lm (m)	ha (m)	La (m)	Aa (m ²)	hm/Lm	Am (m ²)	ra=Aa/Am	Ri/R0
2.52	1.80	0.126	0.090	0.01	1.40	4.54	0.25%	0.997
2.52	1.80	0.126	0.180	0.02	1.40	4.54	0.50%	0.995
2.52	1.80	0.126	0.270	0.03	1.40	4.54	0.75%	0.987
2.52	1.80	0.126	0.360	0.05	1.40	4.54	1.00%	0.969
2.52	1.80	0.252	0.090	0.02	1.40	4.54	0.50%	0.992
2.52	1.80	0.252	0.180	0.05	1.40	4.54	1.00%	0.988
2.52	1.80	0.252	0.270	0.07	1.40	4.54	1.50%	0.978
2.52	1.80	0.252	0.360	0.09	1.40	4.54	2.00%	0.956
2.52	1.80	0.378	0.090	0.03	1.40	4.54	0.75%	0.995
2.52	1.80	0.378	0.180	0.07	1.40	4.54	1.50%	0.987
2.52	1.80	0.378	0.270	0.10	1.40	4.54	2.25%	0.967
2.52	1.80	0.378	0.360	0.14	1.40	4.54	3.00%	0.941
2.52	1.80	0.504	0.090	0.05	1.40	4.54	1.00%	0.988
2.52	1.80	0.504	0.180	0.09	1.40	4.54	2.00%	0.978
2.52	1.80	0.504	0.270	0.14	1.40	4.54	3.00%	0.959
2.52	1.80	0.504	0.360	0.18	1.40	4.54	4.00%	0.929

Se consideró como parámetro a relacionar con la reducción de la resistencia máxima del muro, la relación del área de abertura y el área

de muro "ra". Se graficó entonces esta relación que se muestra en la Figura 44.

Figura 44: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para la esbeltez 1.4



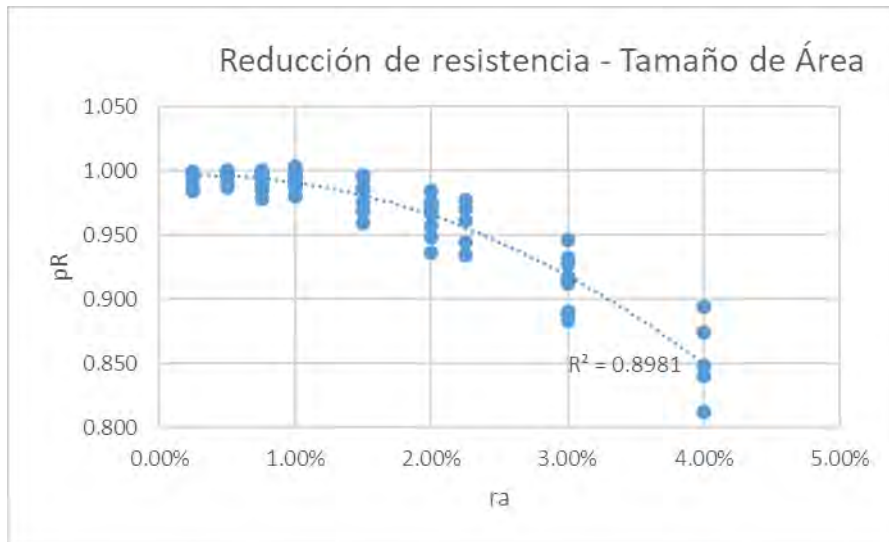
Se pudo relacionar el parámetro "ra" con la reducción de resistencia "pR" mediante un ajuste a una regresión lineal con un factor de correlación $R=0.96$ lo cual indica un alto grado de correlación.

Para una disminución de la resistencia en un $pR > 95\%$ de un muro con aberturas frente a un muro sin ninguna abertura, con este ajuste de curva, el parámetro ra tiene que ser:

$$ra < 2.99\%$$

Finalmente, si juntamos todos los datos obtenidos sin importar la relación de esbeltez de muro obtendremos la Figura 44.

Figura 45: Gráfico Variación del parámetro Aa/Am frente a la variación de resistencia Ri/Ro para todos los modelos.



Se puede observar que al igual que en el caso de la reducción de resistencia también se en este caso la dispersión de los datos se hace mayor mientras se aumenta el tamaño de la abertura.

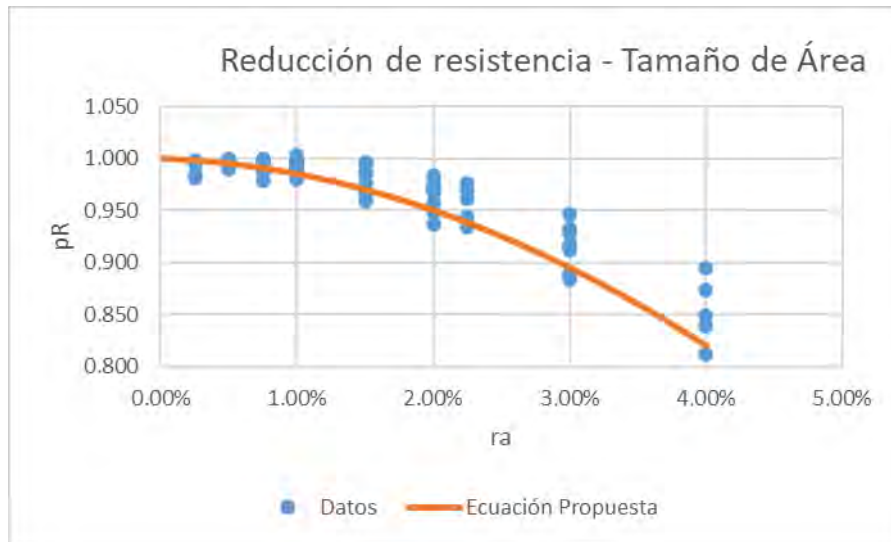
En este caso se presenta en el gráfico la regresión cuadrática de los datos en conjunto, teniendo un factor de correlación mucho menor que los presentados ($r=0.89$) cuando estos se separaban por esbeltez de muro.

Se propone una ecuación cuadrática que es conservadora haciendo de esta manera que la mayoría de los datos queden por encima de la curva.

$$pR = -100ra^2 + 0.5ra + 1$$

Los datos obtenidos se plotearon en conjunto con la ecuación propuesta que se muestra en la Figura 46.

Figura 46: Gráfico comparativo Variación del parámetro p_R frente a la variación de resistencia R_i/R_o , datos y ecuación propuesta



Como se pudo observar en los resultados obtenidos, la reducción de rigidez en comparación al área relativa de la abertura tuvo una relación lineal, mientras que con la reducción de resistencia del muro fue una relación cuadrática. Para aberturas de áreas relativas grandes la resistencia se reducirá más rápidamente que la rigidez. Por lo tanto, al momento de establecer límites habrá que tener en cuenta más como afecta estas aberturas a la resistencia del muro. Además, cuando se haga un análisis de estructuras de muros de albañilería confinada con aberturas frente a fuerzas o desplazamientos horizontales, tener en cuenta que, aunque el muro pueda cumplir con algún requisito de rigidez, es probable que en exigencias de resistencia no sea el mismo caso.

CAPÍTULO IV. COMPARACIÓN RESULTADOS

DE

4.1 COMPARACIÓN CON INVESTIGACIONES ANTERIORES

La investigación publicada por Vaibhav Singhal y Durgesh C. Rai en el año 2016 realiza un recopilatorio de las investigaciones que estudian los efectos de las aberturas en muros de albañilería confinada. En esta investigación muestran que las investigaciones ven enfocados sus estudios en cómo afecta las aberturas en la rigidez y en la resistencia del muro de albañilería confinada. Se presenta en la

las expresiones de factores de reducción de la resistencia (FR) y la rigidez (FK) de los muros de albañilería confinada con aberturas que dichas investigaciones propusieron.

Tabla 17. Factores de reducción de Resistencia y rigidez de diferentes Investigaciones.

Autor de la Investigación	Ecuación	Observación
Al-Chaar et al. (2002)	$FR = 0.6(A_r)^2 - 1.6(A_r) + 1$	$A_r =$ Ratio del área de la abertura y el muro
	$FK = 0.6(A_r)^2 - 1.6(A_r) + 1$	
New Zealand Society for Earthquake Engineering (2006)	$FR = 1 - 1.5 \frac{L_o}{L_w}$	$L_o =$ Longitud de la abertura $L_w =$ Longitud del muro en la dirección correspondiente
	$FK = 1 - 1.5 \frac{L_o}{L_w}$	
Mondal y Jain (2006)	FR: No presenta	-
	$FK = 1 - 1.26(A_r)$	Válido solo para aberturas ubicadas en la zona central del muro
Riahi et al (2009)	$FR = 1 - 2.2(A_r)$	$A_r =$ Ratio del área de la abertura y el muro
	FK: No presenta	-
Tasnimi y Mohebkah (2011)	$FR = 1.49(A_r)^2 - 2.238(A_r) + 1$	Para $A_r > 0.4, FR = 0$
	FK: No presenta	-
Asteris et al (2011)	FR: No presenta	-
	$FK = 1 - 2(A_r)^{0.54} + (A_r)^{1.14}$	-
Mohammadi y Nikfar (2013)	$FR = -1.085(A_r) + 1$	Válido para $A_r \leq 0.4$
	$FK = 1.186(A_r)^2 - 1.687(A_r) + 1$	Válido para $A_r \leq 0.4$

Nota: Adaptado de "In-plane and out-of-plane behavior of confined masonry walls for various toothing and openings details and prediction of their strength and stiffness", Singhal, V., y Rai, D. C. (2016).

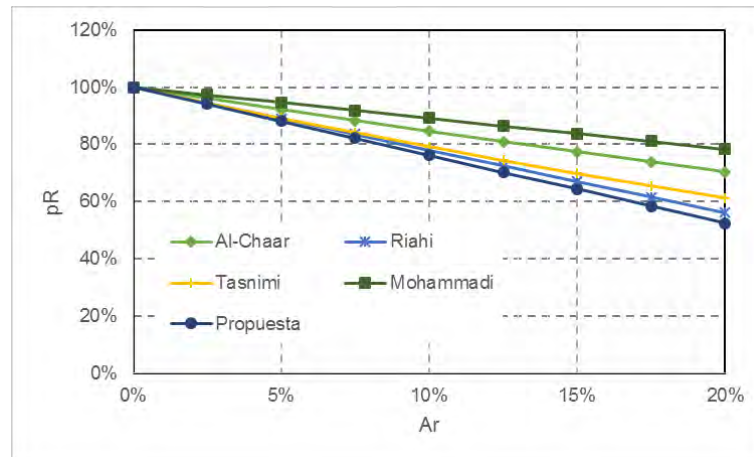
En la Tabla 17. Factores de reducción de Resistencia y rigidez de diferentes Investigaciones., existen investigaciones que son referentes a pórticos de concreto armado rellenos de albañilería, estas nos servirán tan solo como referencia para poder comparar los resultados obtenidos.

Se puede observar que la gran mayoría coincide en relacionar la reducción de rigidez y la reducción de resistencia del muro con el ratio del área de abertura entre el área de muro. En la presente investigación también se pudo llegar a relacionar con el parámetro del ratio de área de abertura y área de muro con un alto factor de correlación.

También, en la presente investigación se relacionó el factor de reducción de la resistencia con el ratio de área de abertura entre el área del muro mediante una ecuación cuadrática, que coincide con las investigaciones de Al Chaar et. Al. (2002) y de Tasnimi y Bohebkah (2011). De la misma manera, en la presente investigación se relacionó el factor de reducción de la rigidez con el ratio de área de abertura entre el área del muro mediante una ecuación lineal, que coincide con la investigación de Mondai y Jain (2006).

La Norma Neozelandesa sin embargo propone que tanto la reducción de rigidez y la reducción de la resistencia, está relacionada de manera lineal al ratio de la dimensión horizontal de la abertura frente al ancho del muro, dejando de lado la influencia la otra dimensión y el ratio del área de la abertura y el área de muro. Se puede observar también que si el ancho de esta abertura es mayor a dos tercios el factor de reducción se hace cero poniendo de esta manera un límite al tamaño de la abertura en un 66.7% del ancho de muro.

Figura 47: Reducción de resistencia propuesta por diferentes investigaciones en comparación a la propuesta para $h_m/L_m=1.00$



Se puede apreciar en la Figura 47 que la ecuación propuesta en esta investigación da resultados muy parecidos a las investigaciones mencionadas teniendo a la investigación de Riahi (2009) y la investigación de Tasnimi (2011). La investigación de Riahi et al (2009) si enfoca su investigación en muros de albañilería confinada, pero presenta solamente una ecuación para la reducción de resistencia. La ecuación propuesta es lineal. Si comparamos la ecuación propuesta por Riahi y la propuesta en esta investigación para una esbeltez de $h_m/L_m=1.00$, obtenemos valores similares para ratios de tamaños de abertura menores a 2.7%. Para valores mayores la ecuación propuesta en la presente investigación genera valores de reducción de resistencia mucho menores a lo propuesto por Riahi, por lo cual resulta más conservadora.

4.2 COMPARACIÓN CON REGLAMENTOS VIGENTES

Actualmente, como se mencionó en el capítulo 2 Estado del arte, en Latinoamérica ya existe normativa sobre muros de albañilería confinada con aberturas. En este acápite se muestra las reducciones de rigideces y resistencias mediante la ecuación propuesta que estas normativas permiten.

En la Tabla 18 se presenta el resumen de las normas de México, Chile y Argentina respecto a muros de albañilería confinada con aberturas.

Tabla 18. Normativa de cada país respecto a las aberturas en muros de albañilería confinada con la reducción de rigidez y resistencia que representan según lo planteado en la presente investigación.

País	Ubicación	Máxima dimensión de abertura	Máxima área de abertura	pR para muros de hm/Lm=1.00	pK para muros de hm/Lm=1.00
México	Indistinta	Máx La =0.40m, para estructuras tipo I	Indistinta	pR máx=85%	pK máx=80%
		Máx La =0.60m, para estructuras tipo II		pR máx=66%	pK máx=55%
Chile	Central	Max La=0.60m	Indistinta	pR máx=66%	pK máx=55%
	Extremo	Max La=0.20m	Máx Aa=5%*Am	pR=88%	pK=88%
Argentina	Central	Max La=35%*Lm	Máx Aa=10%*Am	pR=77%	pK=68%
	Extremo	Max La=20%*Lm	Máx Aa=5%*Am	pR=88%	pK=84%

En la tabla se puede apreciar qué tamaños de aberturas se pueden aceptar en los muros de albañilería confinada, pero no mencionan de qué manera y ni en qué cantidad estas aberturas afectan a la resistencia y a la rigidez de los muros. En la norma mexicana sí coloca un apartado dentro de su normativa como sugerencia en la manera de modelar estas aberturas. Estos métodos son mediante columnas anchas de rigidez equivalente y mediante elementos finitos. Es decir, las normas indican el tamaño máximo de aberturas en los que se permite y queda al criterio del ingeniero estructural el cálculo de la influencia de las aberturas en la resistencia y rigidez del muro.

Se puede apreciar que la normativa de México, permite dimensiones de aberturas absolutas no importando el tamaño del muro. Además, no pone importancia al tamaño en área de la abertura respecto al área del muro. En nuestro país la longitud mínima de un muro para considerarlo estructural, según la norma E.070, es de Lm=1.20m y por lo general la altura de este muro está en el rango de 2.30m a 3.00m, por lo tanto, podríamos tener un muro de albañilería confinada de 1.20m x 2.30m. Siguiendo la normativa mexicana, podríamos tener una abertura de .60mx.60m. Esto significa que se podría tener hasta el 50% de una dimensión del muro como abertura. En área el tamaño de la abertura tendría 0.36m² y el área del muro tendría 2.76m², por lo tanto, se tendría un tamaño de abertura de 13.3% del área.

Este tamaño en área relativa supera a lo dispuesto en las normativas de la norma chilena y Argentina.

La norma chilena de igual manera propone límites con dimensiones absolutas de las aberturas, sin embargo, pone un límite de área relativa en el caso de aberturas que se ubican en los extremos del muro. Pero al igual que en el caso de la norma mexicana, con estos límites en Perú tendríamos aberturas excesivas refiriéndonos en tamaños relativos.

La norma argentina propone dimensiones relativas a las dimensiones de los muros evitando de esta manera aberturas de proporciones relativas grandes en muros pequeños.



CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Respecto a los análisis lineales de los modelos de muros de albañilería confinada se llegaron a las siguientes conclusiones:

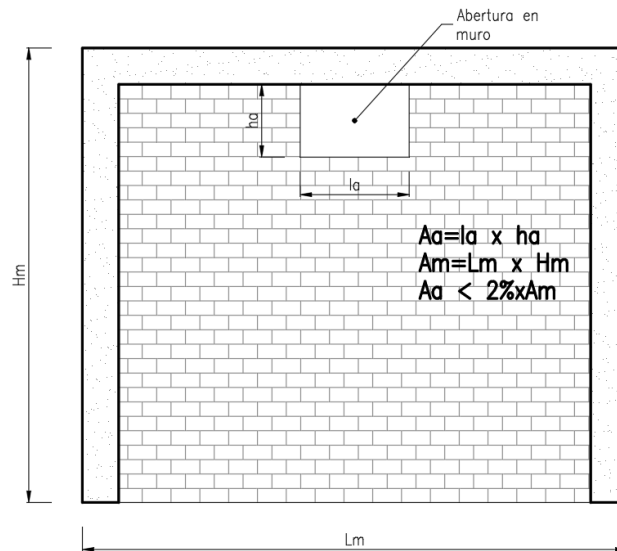
- Se puede determinar la relación de área mínima de abertura respecto al área del muro para que no reduzca menos del 95% de la rigidez de un muro lleno mediante una regresión Lineal para cada relación de esbeltez de muro. Además de manera práctica se estableció una relación de área mínima de abertura respecto al área del muro para rangos de esbelteces de muros.
- El parámetro de la ubicación de la abertura tampoco era determinante. Aunque se observó que cuando la abertura se encontraba en la zona central frente a cuando se encontraba en la zona extrema presentaba una mayor reducción de rigidez, pero también la diferencia era muy poca.
- Para los parámetros de relación de dimensiones de abertura y muro respectivamente, el coeficiente de correlación se tuvo un $r < 0.5$, por lo cual no se pudo relacionar estos parámetros con la pérdida de rigidez de un muro con aberturas respecto a muros llenos.

Y referente a los análisis no lineales de los muros de albañilería confinada, las conclusiones fueron las siguientes:

- Se pudo observar que un tamaño pequeño en área de las aberturas en muros de albañilería confinada no produce cambios en su comportamiento, incluso no modifica significativamente la resistencia al desplazamiento lateral.
- Si consideramos como insignificante la reducción de la resistencia al corte en un 95% podemos afirmar que en muros de albañilería confinada con aberturas de áreas menores al 2% del área total del muro no reducen significativamente su resistencia frente a desplazamientos laterales, como se puede ver en la Figura 48.
- Para tamaños mayores de aberturas en área del 2% del área total del muro se tendría que confinar dicha abertura para evitar reducir la

resistencia del muro, convirtiendo este muro de un solo paño en 3 paños con columnas de confinamiento internas.

Figura 48: Esquema de muros de albañilería con aberturas máximas sin variar significativamente ni la resistencia ni la rigidez

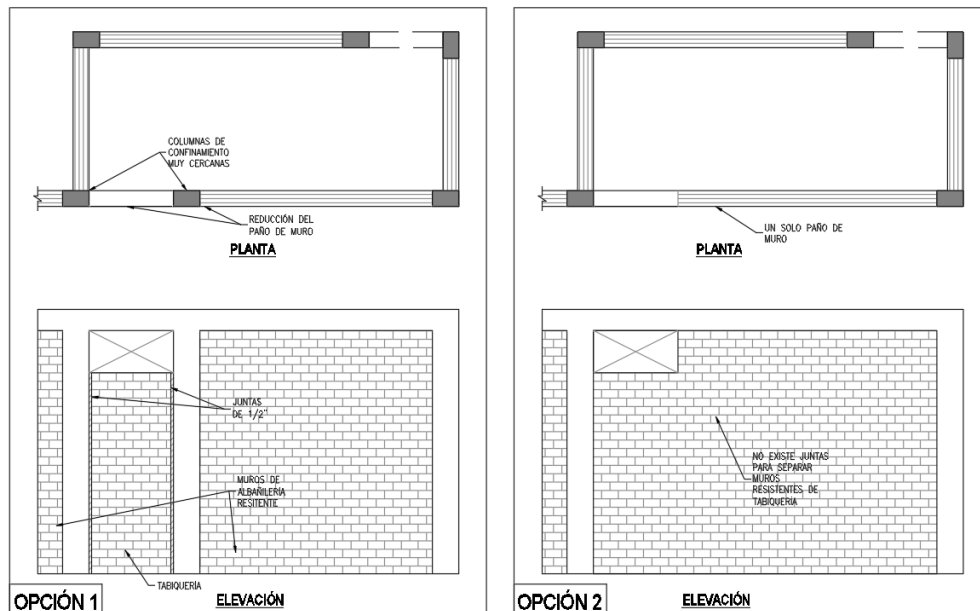


Nota: Se muestra en el esquema de un muro con aberturas. Se estableció que el área abertura tendría que ser menor al 2% del área total del muro para no influir significativamente ni en la rigidez ni en la resistencia del muro.

CONCLUSIONES

- Después de analizar los modelos numéricos de las diferentes variaciones de muros de albañilería con abertura se estableció que las aberturas influyen tanto en la resistencia y la rigidez de los muros de albañilería confinada a partir de un ratio de 2% en área. Esto implica que teniendo dimensiones de la abertura en largo y alto de hasta 15% de las medidas de los muros no llegaría a influir ni en la resistencia y ni en la rigidez, por lo tanto, se podría permitir estas aberturas en muros de albañilería confinada. A futuro esto podría tomarse en cuenta para los reglamentos de albañilería confinada para poder permitir aberturas en muros, ya que aún la norma peruana vigente E.070 no permite esto a diferencia de otros países de la región, como México, Chile y Argentina, en que ya las aberturas en muros de albañilería confinada están permitidas y ya está reglamentado.
- Durante la investigación se obtuvo información de diversos proyectos arquitectónicos de edificios en los cuales poseían muros con ventanas altas, ya sea para baños o algunos depósitos, que se pudieron utilizar como muros estructurales, pero no tuvieron este uso justamente por la ventana que significa una abertura en el muro de albañilería confinada que reglamentariamente en Perú aún no es permitido. Como ejemplo de esto se muestra en la , en la opción 1 se grafica lo que debiera ser la estructuración de un muro cuando tiene ventanas, se separan las ventanas del muro con las columnas de confinamiento y se las aíslan mediante juntas; en la opción 2 se gráfica lo que podría ser la estructuración del mismo ambiente si la norma permitiera aberturas en muros de albañilería confinada. De esta figura, en la opción 2 a comparación de la opción 1, se podría reducir la cantidad de materiales y procesos constructivos para la construcción del ambiente, además de aumentar la rigidez de la edificación.

Figura 49: Opciones de estructuración con muros de albañilería de un baño con ventana alta.



Nota: En la opción 1 se muestra la estructuración que debe realizarse con la norma E.070 actual cuando existe ventanas en un muro, separar el alféizer mediante columnas de confinamiento y aislarlas mediante juntas. En la opción 2 se muestra cual podría ser la estructuración del mismo ambiente si se permitiera aberturas en muros de albañilería confinada.

- Las leyes constitutivas de la albañilería en la actualidad tienen poco estudio por el momento, todavía es incierto el comportamiento de esfuerzo deformación en la parte no lineal. Sin embargo, lo propuesto por Lourenço en el comportamiento de la albañilería como un material frágil nos da buenas estimaciones con las cuales podemos hacer simulaciones mediante el macromodelamiento de este material y poder realizar mayores investigaciones simuladas para posteriormente verificarlos con una investigación experimental, haciendo de este modo una investigación de manera más efectiva en lo que respecta en lo económico.
- El modelamiento numérico del muro de albañilería confinada se calibró con un ensayo experimental pasado, para lo cual se tuvo que variar las propiedades que controlan el comportamiento no lineal de la albañilería en el modelo de falla Concrete Damaged Plasticity, estos parámetros fueron el coeficiente de viscosidad y el ángulo de dilatación. Con estos

ajustes se tuvo resultados similares al ensayo experimental, con la diferencia de que, en la zona inicial, en el modelo numérico presenta una mayor rigidez y resistencia. Esto es posiblemente debido a que el modelo numérico está afectado mediante una carga estática y el ensayo experimental mediante una carga cíclica haciendo que en el ensayo experimental ya tenga pérdida de rigidez en la zona inicial.

- Se estableció que el principal parámetro que tenía relación con la variación de la rigidez y la resistencia de las aberturas fue el ratio del área de abertura respecto al área del muro. Sin embargo, en normativas de otros países colocan como parámetro la longitud de una de las dimensiones de la abertura en medida absoluta como parámetro. Esto es riesgoso debido a que usar un límite máximo de longitud absoluta puede traer una gran pérdida de resistencia y rigidez en muros de dimensiones pequeñas y límites exagerados en muros de dimensiones mayores.

RECOMENDACIONES

- La investigación mediante elementos finitos y modelamiento numérico resulta eficiente económicamente. Se recomienda realizar investigaciones experimentales para conocer mejor el comportamiento no lineal de la albañilería para poder traducirlo en un modelo numérico más eficiente.
- Se recomienda poder ahondar en la investigación de la influencia de las aberturas en muros de albañilería confinada mediante ensayos experimentales que puedan confirmar o no los resultados en la presente investigación
- La investigación trata de dar pie para que en el futuro los reglamentos correspondientes tengan en cuenta las aberturas en albañilería confinada. Por ende, se recomienda en futuras ocasiones poder revisar la norma el hecho de permitir aberturas en muros de albañilería confinada con determinados límites.

- Se recomienda la investigación de aberturas confinadas en muros de albañilería confinada, para evaluar su comportamiento y determinar el requerimiento de los elementos que confinan la abertura (cuantía de acero y dimensiones de los elementos de confinamiento).
- Se recomienda investigar la interacción mortero-unidad de albañilería de manera experimental para en un futuro sea posible investigaciones mediante modelos numéricos con un micromodelamiento que pueda dar resultados más cercanos a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer, S., Hernández, H., & Sandoval, H. (2013). "Envolvente de resistencia lateral de piso para estructuras de mampostería confinada. Ingeniería sísmica", Revista de Ingeniería Sísmica, Ciudad de México, México.
- Álvarez, J. J., & Alcocer, S. M. (2001). "Estudio analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de mampostería confinada con aberturas". Monograph Series in Earthquake Engineering. México, México.
- Angles Pari, P. D. (2008). "Comparación del comportamiento a carga lateral cíclica de un muro confinado con ladrillos de concreto y otro con ladrillos de arcilla". Tesis, Facultad de Ciencias e Ingeniería, PUCP, Lima, Perú.
- Astroza, M., & Ogaz, O. (2005). Ensayo de Muros de Albañilería Confinada de Ladrillo cerámico con Aberturas. Memorias del Congreso Chileno de Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas, Concepción, Chile.
- Budiwati, I. A. M., Sukrawa, M., & Wirasukma, I. G. A. D. (2022, December). Analysis of confined masonry with strengthening around the opening, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1117, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
- Cervenka, V., Pukl, R., Ozbolt, J., & Eligehausen, R. (1995). "Mesh sensitivity effects in smeared finite element analysis of concrete structures".

Proceedings of the 2nd International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures–FraMCoS.

Chandrupatla, T. R., Belegundu, A. D., Ramesh, T., & Ray, C. (2002). "Introduction to finite elements in engineering" (Vol. 10). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

D. Tripathy y V. Singhal (2019), "Estimation of in-plane shear capacity of confined masonry walls with and without openings using strut-and-tie analysis". Engineering Structure, vol. 188, pp. 290-304.

Deb, T., Yuen, T. Y., Lee, D., Halder, R., & You, Y. C. (2021). Bi-directional collapse fragility assessment by DFEM of unreinforced masonry buildings with openings and different confinement configurations. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 50(15), 4097-4120.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2007). "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components", Report No. FEMA-461. Washington DC, Estados Unidos.

INPRES-INTI-CIRSOC (2018) "Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes – Parte III Construcciones de Mampostería", Buenos Aires, Argentina.

Instituto Nacional de Normalización (2003) "Norma chilena de albañilería confinada NCH2123.of1997", Santiago de Chile, Chile.

Khennane, A. (2013). "Introduction to finite element analysis using MATLAB® and Abaqus". CRC Press.

Lee, J., & Fenves, G. L. (1998). "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures". Journal of engineering mechanics, 124(8), 892-900.

Liu, G. A., Wang, X., Yang, Z., Wang, L. Y., Zhou, Y. W., & Chen, G. B. (2022). Experimental Study on Seismic Performance of Confined Masonry

Walls with Window Openings Strengthened by Using Hybrid-Fiber Modified Reactive Powder Concrete. *Frontiers in Materials*, 9, 5.

Lopez, J., & Oller Martínez, S. H. (1998). "Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos". International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Barcelona, España.

Lourenço, P. B. (1996). "A user/programmer guide for the micro-modelling of masonry structures". Report 03.21. 1.31. 35. Delft University of Technology, The Netherlands.

Lourenço, P. B. (2013). "Computational strategies for masonry structures: multi-scale modeling, dynamics, engineering applications and other challenges". Bilbao, España.

New Zealand Society for Earthquake Engineering (2014). "Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes: Prioritisation, Initial Evaluation, Detailed Assessment, Improvement Measures: Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings". New Zealand Society for Earthquake Engineering.

NTC-M (2017), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gobierno del distrito Federal, México.

Oñate, E. (2013). "Structural analysis with the finite element method. Linear statics: volume 1: Basis and Solids". Springer Science & Business Media.

Parammal Vatteri, A., & D'Ayala, D. (2021). Classification and seismic fragility assessment of confined masonry school buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2213-2263.

Paredes Castro, J. G., & Caycho Pérez, D. J. (2009). "Control de la trituración de los ladrillos huecos en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica.", Tesis, Facultad de Ciencias e Ingeniería, PUCP, Lima, Perú.

- Pari Quispe, S. E., & Manchego Meza, J. A. (2017). "Análisis experimental de muros de albañilería confinada en viviendas de baja altura en Lima, Perú.", Tesis, Facultad de Ciencias e Ingeniería, PUCP, Lima, Perú.
- Pérez Gavilán J. J. (2011). "Análisis Lineal de Estructuras de Mampostería" en Séptimo Simposio Nacional sobre Estructural en Viviendas. Ciudad de México, México.
- Ruiz Salinas, M. C. (2017). "Macromodelación numérica de ensayos en pilas y muretes de albañilería de arcilla" Tesis, Facultad de Ciencias e Ingeniería, PUCP, Lima, Perú.
- San Bartolomé, Á. (1994). "Construcciones de Albañilería". Fondo Editorial, Pontificia Universidad Católica, Lima, Perú.
- SENCICO (2006), "Norma Técnica E.070 Albañilería", Lima, Perú.
- Singhal, V., y Rai, D. C. (2016). In-plane and out-of-plane behavior of confined masonry walls for various tothing and openings details and prediction of their strength and stiffness. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(15), 2551-2569.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural Comité de Mampostería (2012). "Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería". Ciudad de México, México.
- Valledor Barrientos, R. I. (2016). "Análisis sísmico lineal y simulación numérica del daño sísmico acumulado de una estructura patrimonial de albañilería simple: el caso del Palacio Pereira". Santiago de Chile, Chile.
- Zavala, C., Diaz, M., Flores, E., & Cardenas, L. (2019). Damage limit states for confined masonry walls based on experimental test. *Tecnia*, 29 (2), 135-141.
- Zienkiewicz, O. C. (2010). "El método de los elementos finitos". Reverté.