

MODELACIÓN DE MUROS DE ALBAÑILERÍA NO REFORZADA Y ALBAÑILERÍA REFORZADA CON CFRP EN CONFIGURACION VERTICAL MEDIANTE ANSYS

L. Erices Illanes¹, F. Sanhueza Espinoza², C. Oyarzo Vera³.

RESUMEN:

En este documento se presenta la modelación de muros de albañilería no reforzada y reforzada con un Polímero a base de Fibra de Carbono (CFRP) mediante ANSYS 2021 R1, utilizando el Modelo de Zona Cohesiva (CZM), siendo esta la fase previa para un futuro desarrollo en laboratorio y posible implementación en métodos constructivos. El principal objetivo de este estudio es la modelación en 3D de muros, mediante la técnica de micro-modelado en elementos finitos. Para desarrollar el modelo numérico, se representan cada uno de los materiales principales que constituyen el muro, i.e. ladrillo y mortero, considerando sus diferentes propiedades reales, usando para ello elementos tridimensionales. La representación de la interfaz entre las distintas superficies ha sido modelada utilizando el CZM lo que permite el efecto de delaminación entre superficies en contacto. El modelo final consiste en dos muros de albañilería simple de 2.4 m x 1.8 m y 0.15 m de espesor, estando uno de ellos reforzado en disposición vertical con CFRP. El ladrillo es de tipo macizo compuesto por arcilla y mortero en base a cemento. Este muro se encuentra apoyado sobre una base de concreto, empotrado al suelo y confinado únicamente, en la zona superior, por una viga de concreto de 2.4 m x 0.25 m x 0.25 m, la cual permite la aplicación de distintas fuerzas. El proceso de modelación logró ajustarse mediante diversas pruebas permitiendo así la obtención de un modelo final representando al muro de albañilería ya sometido a cargas y con resultados de deformación hasta la falla incipiente, además de sus principales frecuencias modales con el propósito de correlacionarlo con el comportamiento de la rigidez o resistencia del muro.

PALABRAS CLAVES: ANSYS, Albañilería, CFRP, Elementos Finitos.

ABSTRACT:

This document presents the modeling of non-reinforced and reinforced masonry walls with a Carbon Fiber-based Polymer (CFRP) through ANSYS 2021 R1, using the Cohesive Zone Model (CZM), this being the preliminary phase for a future laboratory development and possible implementation in construction methods. The main objective of this study is the 3D modeling of walls, using the finite element micro-modeling technique. To develop the numerical model, each of the main materials that make up the wall are represented, i.e. brick and mortar, considering their different real properties, using three-dimensional elements. The representation of the interface between the different surfaces has been modeled using the CZM, which allows the effect of delamination between surfaces in contact. The final model consists of two simple masonry walls measuring 2.4 m x 1.8 m and 0.15 m thick, one of which is vertically reinforced with CFRP. The brick is a solid type made up of clay and cement-based mortar. This wall is supported by a concrete base, embedded in the ground and confined only, in the upper area, by a concrete beam of 2.4 m x 0.25 m x 0.25 m, which allows the application of different forces. The modeling process was adjusted through various tests, thus allowing a final model to be obtained representing the masonry wall already subjected to loads and with deformation results up to incipient failure, in addition to its main modal frequencies with the purpose of correlating it with behavior of the stiffness or strength of the wall.

KEYWORDS: ANSYS, Masonry, CFRP, Finite Elements

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, lerices@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, franksanhueza@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyartzov@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La albañilería es un material heterogéneo compuesto por ladrillos y mortero. Este material continúa siendo una de las técnicas de construcción más utilizada a nivel mundial, debido a que, entre muchos otros factores, los materiales que la componen son de muy fácil acceso y fabricación, entregando una clara ventaja sobre otras técnicas constructivas modernas como el caso del concreto reforzado o el acero.

La implementación de la albañilería en construcciones chilenas ha sobrevivido durante casi 300 años, empleándose principalmente en estructuras de uso público, también ha sido implementada en construcciones de viviendas sociales financiadas por el Estado. En relación con esto, aunque las cifras más actuales datan del censo de 2017, se tiene que un 44,6% del parque nacional de edificios clasifica como este tipo de construcción. De la misma manera, a principios del siglo XXI un 42% de estos proyectos se habían construido en albañilería y un sorprendente 50% habían sido edificados como híbridos entre albañilería y hormigón armado (Gómez 2001).

A consecuencia de la masiva introducción del hormigón armado y el acero como materiales de construcción claves durante el último siglo, el conocimiento del comportamiento mecánico de la albañilería se ha visto fuertemente limitada dado que los diseñadores estructurales modernos han demostrado una clara preferencia hacia el hormigón y acero (Estadísticas de Edificación año 2002-2019, 2021).

Dependiendo del grado de detalle en la modelación, las metodologías se pueden categorizar en los enfoques de macro-, meso- y micro-modelado, siendo esta última la modelación más detallada de todas (Gisbert, et al, 2018). En el micro-modelado cada una de las piezas de albañilería, las respectivas juntas de pega y las secciones de mortero, se modelan en detalle utilizando principalmente el método de los elementos finitos (FEM por su sigla en inglés). Modelar muros de albañilería utilizando micro-modelado por medio de los FEM, requiere un alto gasto computacional, especialmente en muros de gran tamaño. Sin embargo, en los últimos años, con la mejora constante de sistemas computacionales y con la aparición de numerosos softwares de modelado como ABAQUS y ANSYS, ha sido posible obtener modelos que sean capaces de representar fielmente el verdadero comportamiento estructural de dichos muros sometidos a cargas o desplazamientos.

Como el comportamiento mecánico de la albañilería depende de su composición heterogénea en todas las direcciones, han sido varias las propuestas de estudio que evalúan ese comportamiento. Lourenço (2014) desarrolló la representación numérica de la albañilería por medio de técnicas de homogeneización, con especial énfasis en las juntas entre ladrillo y mortero, estableciendo estas como planos de debilidad. A su vez, otros estudios emplearon directamente ANSYS en modelaciones de comportamiento uniaxial y diagonal en muestras de ladrillos, utilizando para ello elementos finitos por medio de micro-modelado (Gisbert, 2018). En la misma línea, Campbell (2017) representó en ANSYS el comportamiento estructural no lineal de muros de albañilería empleando una nueva propuesta basada en la interfaz ladrillo-mortero, estableciendo para ello resortes no lineales, simulando así las posibles fallas en la zona de junta (Campbell & Duran, 2017).

En este estudio se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en ANSYS, utilizando los elementos tipo *solid185* y *solid186* para representar tanto el ladrillo como el mortero (Figura 1). El primer tipo de elemento (*solid185*) queda definido por ocho nodos y tres grados de libertad en cada uno. El segundo tipo de elemento (*solid186*) es algo más detallado, con 20 nodos y tres grados de libertad. Ambos elementos son adecuados para representar plasticidad, hiperelasticidad, endurecimiento por tensión, fluencia, deflexión y deformación (ANSYS, 2022).

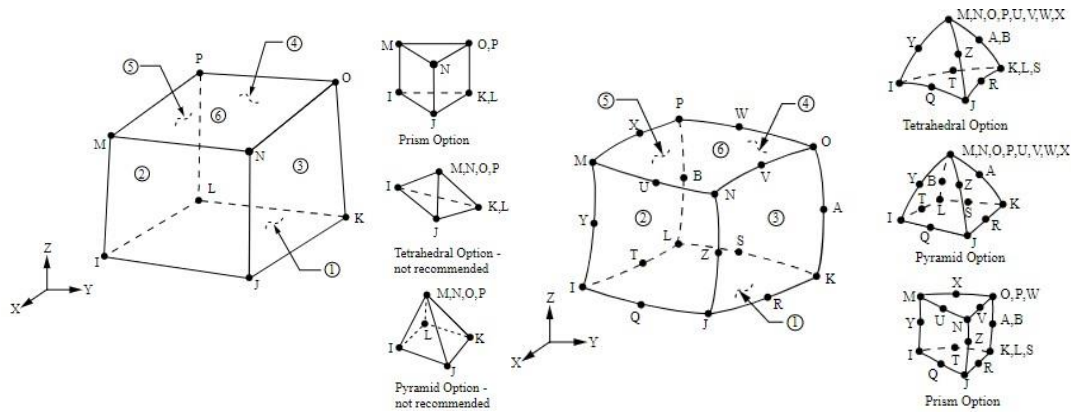


Figura 1. Elementos finitos tipo solid 185 y solid186 (Fuente: ANSYS)

Una de las etapas más importantes en la modelación de albañilería utilizando elementos finitos es la de representar la interfaz ladrillo-mortero, zona que ha sido descubierta como la responsable de generar planos de debilidad y cuya mejor representación puede llevarse a cabo mediante las técnicas de micro-modelado, aplicando, como en el presente caso, y luego de sucesivos modelos previos, el método de Modelo de Zona Cohesiva o CZM (Bernat, Gil, & Roca, 2015), el cual es capaz de representar la complejidad de la interfaz por medio de algunos parámetros mecánicos obtenidos según experiencias previas en laboratorios.

La búsqueda de un modelo final que represente el real comportamiento mecánico de la albañilería como un conjunto ha sido posible obtenerlo mediante el ajuste de sucesivos otros modelos precursores basados principalmente en los contactos, surgiendo así los modelos de tipo *bonded* y de tipo *frictional*, los que sentaron las bases para llegar finalmente al modelo basado en el uso de CZM. (Rivas, 2021; Seron, 2021)

2. DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS

Las estructuras estudiadas corresponden a dos muros de ladrillos de arcilla con mortero. Sus dimensiones son 240 cm x 180 cm x 15 cm, con disposición de los ladrillos según aparejo a sogas y espesor de 2 cm para el mortero. Un muro se encuentra reforzado con CFRP en configuración vertical, correspondiente a 2 láminas de 25 cm de ancho y 1,67 mm de espesor. Cada muro descansa sobre una base de concreto reforzado de 60 cm x 60 cm x 360 cm, la cual a su vez se encuentra empotrada al suelo. Para ser sometido a las diversas cargas y para que estas no afecten directamente a los elementos componentes del muro, este presenta una viga de concreto reforzado que lo confina superiormente, de 25 cm x 25 cm x 240 cm (Figura 2 y Figura 3).

Sobre este muro se aplicó una carga horizontal en dirección longitudinal al muro en la viga de coronamiento. Esta carga fue aumentando progresivamente desde los 0 a los 50000 N. Al mismo tiempo, el muro fue sometido a una carga vertical constante distribuida sobre toda la longitud de la viga, con el fin de simular la carga gravitacional de pisos superiores (32700 Pa).

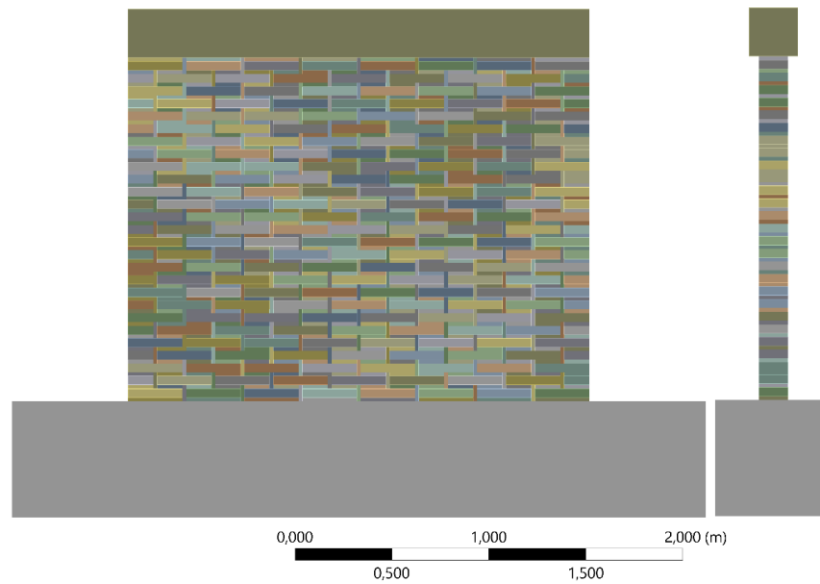


Figura 2. Modelo del muro no reforzado en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

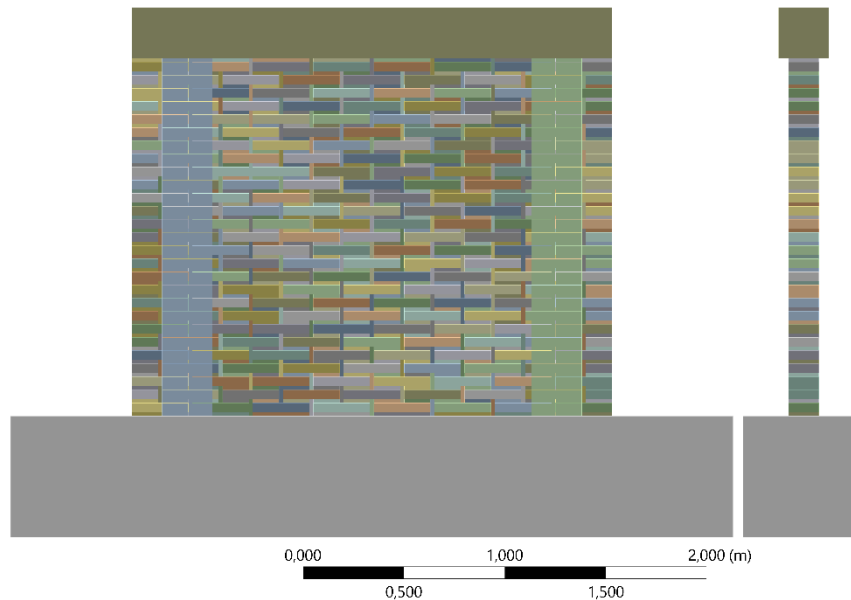


Figura 3. Modelo del muro reforzado en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

3. MATERIALES:

El diseño del muro aquí presentado se encuentra basado en lo establecido por Chávez (2012), el cual utiliza dos materiales. Por un lado, el mortero es caracterizado como un material elástico y, por otro lado, el ladrillo es caracterizado como material inelástico.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los materiales utilizados en estos modelos, donde los datos del ladrillo y mortero fueron obtenidos en ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad Católica de la

Santísima Concepción. Además, la información utilizada para el CFRP es la proporcionada por su fabricante (Sika, 2022) y los datos del concreto son proporcionados por defecto por ANSYS.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales

Tipo Material	Módulo de Young [MPa]	Densidad [Kg/m ³]	Módulo de Poisson	f ^c [MPa]	f ^t [MPa]
Ladrillo	1200	1500	0,15	2,88	0,865
Mortero	886	1100	0,20	5,15	1,544
CFRP	230000	1820	0,40	0,00	4000,000
Concreto	30000	2300	0,18	41,00	5,000

3.1 Ladrillos

Los ladrillos varían según la calidad de la arcilla que los componen y de su fabricación, presentando un comportamiento mecánico del tipo isotrópico. Los ladrillos se caracterizan con ensayos en distintas direcciones mediante pruebas de compresión obteniéndose curvas tensión-deformación únicas asociada a la dirección de la carga aplicada, la deformación medida y la resistencia a la compresión característica. De igual manera con los ensayos de tracción por división, tensión uniaxial simple, resistencia a tracción por flexión y resistencia a tracción uniaxial, es posible obtener finalmente la resistencia a la tracción de los ladrillos. Por simplificación las unidades de ladrillos se modelarán de manera lineal cuyas propiedades mecánicas han sido extraídas según lo presentado por Chávez (2012).

3.2 Mortero

El mortero es un material compuesto por agua, cemento, arena y otros conglomerados (cal, yeso, etc.). Su función es la de servir como conector adherente entre las unidades de ladrillos, evitando así su despegue y aumentando la resistencia de toda la sección de albañilería.

Diversos ensayos han sido capaces de caracterizar el comportamiento del mortero como un material elástico - frágil, siendo el más común el de resistencia a la compresión simple. De este, es posible obtener la curva de tensión deformación respectiva, así como la resistencia a la compresión característica (f_m'). En cuanto a resistencia a la tracción, es posible implementar pruebas de resistencia a la tracción uniaxial, pruebas de tracción por división y de resistencia a la tracción por flexión (Lourenço, 1996; Grabowski, 2005; Bergami, 2015; Charry, 2010).

En el modelo aquí presentado el mortero se caracterizó como un material elástico-frágil, del tipo no lineal, según los datos presentados por Chávez (2012). A partir de los resultados obtenidos de resistencia a la tensión máxima es posible generar una curva aproximada del mortero del caso de estudio. El procedimiento para obtener la curva de fuerza compresiva de un cubo de mortero está basado según lo presentado por ASTM C109 / C109M-99 (ASTM, 2001) y IS2250 (IS, 1981). Kaushik et al (2007) obtuvo las curvas de morteros de 3 grados diferentes (cemento: cal: arena) por volumen, los cuales en términos de proporciones fueron; 1:0:6 (débil), 1:0:3 (fuerte), y 1:0.5:4.5 (intermedio) (Figura 4). El mortero seleccionado para esta investigación corresponde al mortero de tipo débil, debido a que sus grados por volumen son similares a los del mortero utilizado por

Chávez (2012), los que están compuestos solo por cemento y áridos, tal como se ha utilizado anteriormente por Seron (2021) en proyectos relacionados.

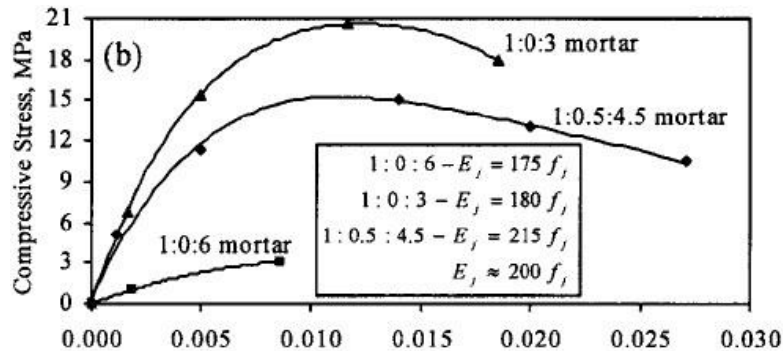


Figura 4. Curvas de mortero propuestas por Kaushik (Fuente: Kaushik et al, 2007)

Utilizando como base la expresión analítica propuesta por Hognestad (1951), se adecuó la ecuación de la curva del mortero, cambiando para ello los coeficientes que la componen, logrando así caracterizar la curva de mortero débil en proporciones 1:0:6 presentada por Kaushik et al. (2007), extrapolando su forma al mortero establecido con 5 MPa de resistencia a compresión, tal y como se muestra en la Figura 4. mientras que la relación entre ellas queda representada por las Ec.1 y Ec.2.

$$f_c(x) = f'_c \left[\frac{2,022\epsilon_c}{0,011} - \left(\frac{1,011\epsilon_c}{0,011} \right)^2 \right] \quad \text{Si } \epsilon_c \leq 11 \text{ mm} \quad \text{Ec.1}$$

$$f_c(x) = 0,42\epsilon_c + 30,71 \quad \text{Si } 11\text{mm} < \epsilon_c \quad \text{Ec.2}$$

En la Figura 5 se muestra la curva del mortero utilizado para la deformación plástica, por lo que la curva no comienza desde el origen. Esto significa que ya se alcanzó el límite elástico, el cual es lineal desde el origen hasta el límite elástico.

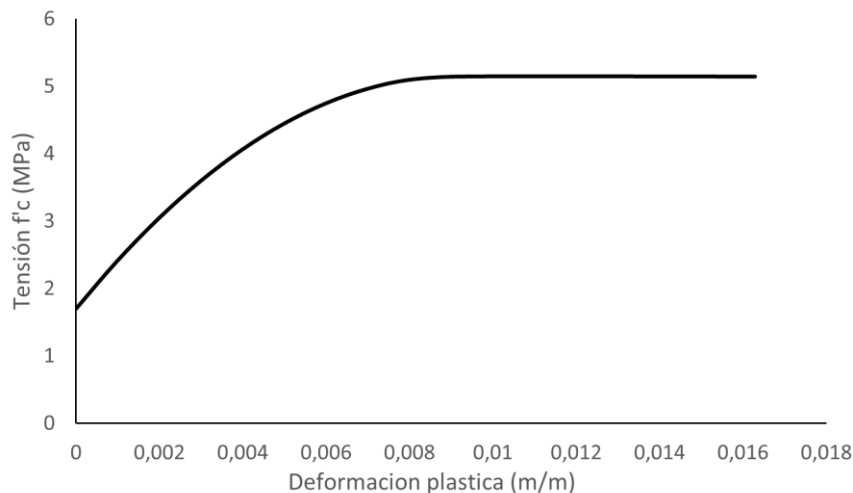


Figura 5. Curva del mortero utilizado en el modelo (Fuente: Elaboración propia)

3.3 CFRP (Carbon Fiber Reinforce Polymer)

Este material se utiliza para sistemas de fortalecimiento estructural confiable y de alto rendimiento.

El material de refuerzo es el polímero reforzado con fibras de carbono Sika Wrap 300C junto con Sikadur-300. El tejido de fibra de carbono tiene una resistencia a la tracción de la fibra seca de 4 kN/mm² y un módulo de elasticidad en tracción de la fibra seca de 230 kN/mm².

En la modelación se considera como un elemento tipo *Shell* con contacto *bonded*, además de solo considerar resistencia a la tracción.

4. MODELACIÓN

La modelación en ANSYS consiste en diferentes etapas que van definiendo el modelo y ajustándolo, por lo que, para obtener un resultado, primero hay que detallar cada una de estas etapas.

En micro-modelación es posible caracterizar en las siguientes etapas relevantes:

- (i) La definición de los materiales en Engineering Data (*Workbench*); donde se establece la diferencia entre los elementos lineales (ladrillo y concreto) y los no lineales (mortero), y como estos se relacionan entre sí.
- (ii) El dibujado de los elementos en 3D, mediante *SpaceClaim*.
- (iii) Definición de los contactos CZM.
- (iv) El mallado diferenciado para cada tipo de elemento en *Mechanical*.
- (v) Agregar las condiciones de borde, tales como las cargas y empotramiento.
- (vi) La solución y el post procesado de la información del modelo.

Para todos los modelos previos, así como para el definitivo se emplean los elementos tridimensionales *solid185* y *solid186*, incorporados en ANSYS 2021 R1. Para representar el muro por medio de técnicas de micro-modelado se ha trabajado con elementos hexaédricos *Hex20* (ANSYS, 2022), cada uno de diferente tamaño, dependiendo del elemento mallado; 20 mm para el mortero, 45 mm para el ladrillo, 50 mm para el CFRP, 150 mm para la viga y para la base (Figura 7 y Figura 8).

Para asegurar el correcto funcionamiento de *Mechanical* se han aplicado las opciones de control *Element Quality* y *Aspect Ratio* utilizadas como control de calidad sobre la generación de los elementos; teniéndose un 100% de los elementos del mallado sobre el 0,89 de relación de aspecto, ANSYS recomienda usar sólo elementos con una relación de aspecto mayor a 0,8 y lo más cercano a 1.

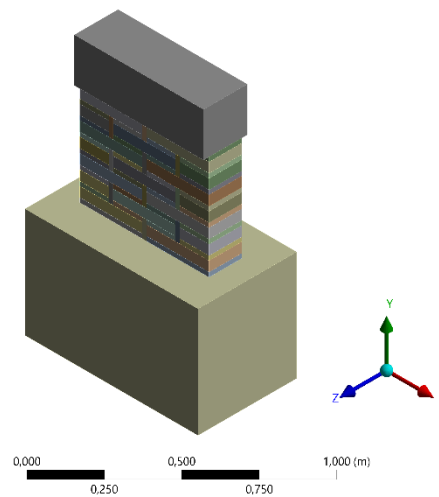
Para este estudio se desarrollaron dos modelos caracterizados por contactos definidos por un modelo de zona cohesiva (CZM), el que permite modelar tensión y corte entre ladrillo y mortero, definiendo una superficie de fractura la cual admite una falla frágil del contacto reflejada por medio de despegue o deslizamiento. Este modelado simplifica las reales y complejas condiciones de contacto dadas entre los distintos materiales que componen una estructura, empleando para ello parámetros tales como la resistencia a la tracción (f_{xt}) y la energía crítica del primer modo de fractura ($G_f I$), ambos para definir el desprendimiento y la apertura, así como también el esfuerzo cortante máximo (τ_{max}) y la energía crítica del segundo modo de fractura ($G_f II$) para definir la falla generada por deslizamiento, tal y como se indica en la Tabla 2. Los modelos han sido desarrollados manteniendo los contactos de tipo *bonded*, pero agregando propiedades mecánicas a la interfaz existente entre el ladrillo y el mortero, definiendo ahora la zona de ruptura o CZM, de espesor cero, responsable de generar deslizamientos o despegues entre los materiales. Los parámetros ingresados en ANSYS y utilizados para desarrollar el modelado CZM (Bernat, 2015) son;

Tabla 2. Parámetros definidos en el modelo CZM

Tipo de contacto	Fxt [MPa]	Gf [N/m]	Tmax [MPa]	Gf [N/m]
Unión	0,23	9,7	0,36	13

Además, al no tener datos propios obtenidos en laboratorio, se realizó un análisis paramétrico de sensibilidad de las variables para ver la incidencia de cada una de estas en la solución.

Para este análisis se decidió tomar un modelo análogo al de los muros de albañilería, pero en tamaño escala como se muestra en la Figura 6, siendo más pequeño y así más sencillo de reproducir. En el modelo se realizó una variación de los parámetros en $\pm 25\%$ y luego se comparan los resultados obtenidos con los datos presentados en la Tabla 2. La comparación de los resultados se realiza en función de los primeros 3 modos de vibración y la carga máxima que soporta la estructura.


Figura 6. Modelo de muro a escala para análisis de sensibilidad (Fuente: Elaboración propia)

Para los modelos se utiliza la opción Static Structural, pues la rapidez de la aplicación de la carga permite considerarlo como cuasiestático. Luego se consideraron condiciones de contorno apropiadas para representar la física del problema las que se describen a continuación: En la base se estableció un fixed support para evitar desplazamientos y en la viga superior se estableció una presión constante en el sentido de la gravedad correspondiente a 32000 Pa, la cual otorga estabilidad, evita el volcamiento y es replicable en laboratorio.

Además, en la viga superior se aplicó una carga progresiva en sentido horizontal al lateral del muro, la cual comienza en 0 hasta 50000 N con aumento de carga constante.

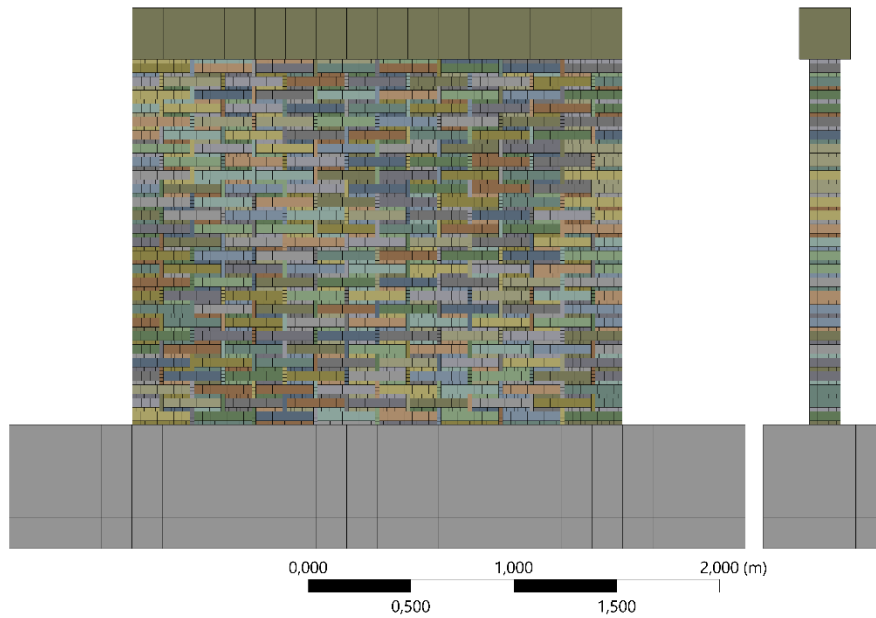


Figura 7. Mallado de muro no reforzado en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

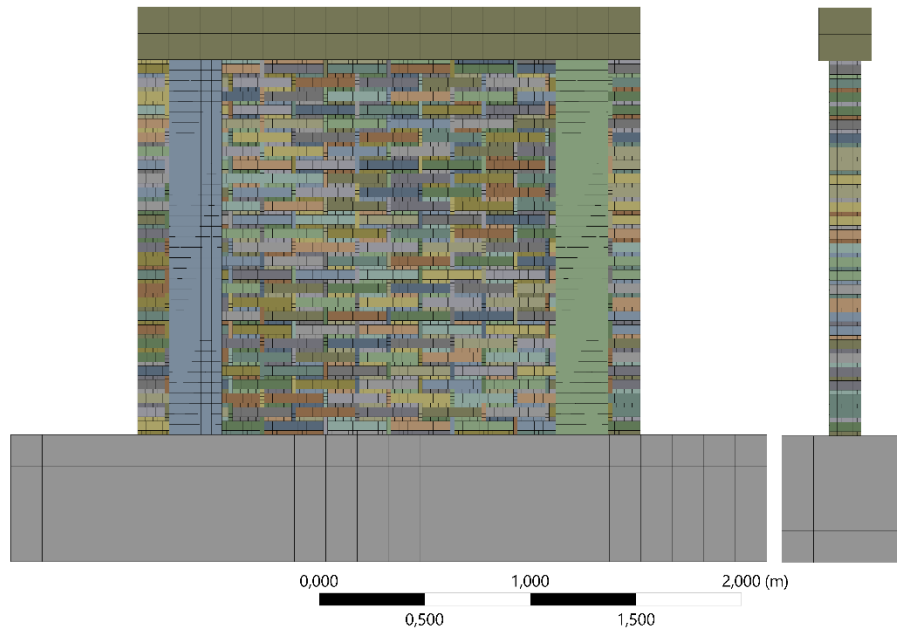


Figura 8. Mallado de muro reforzado en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

5. RESULTADOS

Como vemos en la Figura 9, el muro se encuentra cargado lateralmente con una carga progresiva que le provoca un efecto de volcamiento. Además, cuenta con una presión constante en la parte superior de la viga en dirección y sentido de la gravedad que carga el muro, pero que también ayuda a evitar el volcamiento. Esta configuración de cargas aplica tanto para el muro no reforzado como para el muro reforzado.

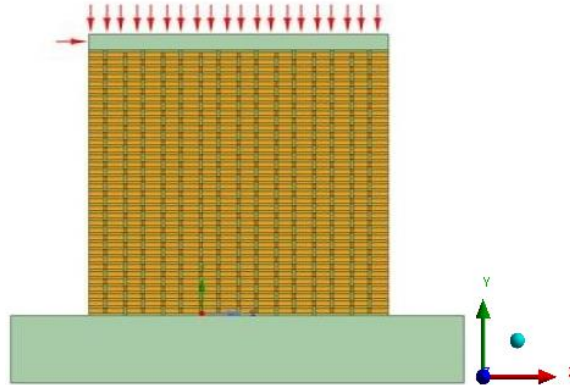


Figura 9. Muro con carga lateral y presión aplicada (Fuente: Elaboración propia)

5.1 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad de los datos del CZM, se realizaron 9 modelos, en donde el “modelo original” es el modelo a escala con los datos proporcionados por Bernat (2015). Con la Tabla 3 podemos ver que la variable a la cual el modelo es más sensible a los cambios es el esfuerzo de contacto normal máximo (Maximum Normal Contact Stress), que corresponde al modo 1 (fuerzas normales), lo cual es congruente dado que la falla en este tipo de ensayos es producida por la separación de los elementos.

En cuanto a las frecuencias modales, correspondientes a Modal 1, Modal 2 y Modal 3, la variación de los parámetros del CZM no tiene gran incidencia, manteniéndose aproximadamente iguales.

Tabla 3. Resultados de análisis de sensibilidad del CZM (Fuente: Elaboración propia)

Modelo Original		Carga Max (N)	Deformación Max (mm)	Modal 1 (Hz)	Modal 2 (Hz)	Modal 3 (Hz)	Diff % Carga max
		4073,25	0,25	32,74	97,40	99,40	0,0%
Critical Fracture Energy for Normal Separation (Gf F)	-25%	4200,50	0,27	32,74	97,39	99,37	-3,1%
	+25%	4200,50	0,27	32,74	97,41	99,42	-3,1%
Critical Fracture Energy for Tangential Slip (Gf T)	-25%	4073,95	0,25	32,74	97,41	99,42	0,0%
	+25%	4070,10	0,25	32,74	97,39	99,38	0,1%
Maximum Equivalent Tangential Contact Stress (Tmax)	-25%	4057,25	0,25	32,74	97,37	99,34	0,4%
	+25%	4078,05	0,24	32,74	97,42	99,43	-0,1%
Maximum Normal Contact Stress (Fxt)	-25%	3336,10	0,21	32,74	97,42	99,44	18,1%
	+25%	4954,15	0,30	32,74	97,38	99,35	-21,6%

5.2 Frecuencias modales

En cuanto a las frecuencias modales, se han analizado para el modelo de muro no reforzado y el muro reforzado, las 3 primeras formas modales mostradas en la Figura 10, que serían las más importantes para la estructura al lograr un alto grado de participación modal.

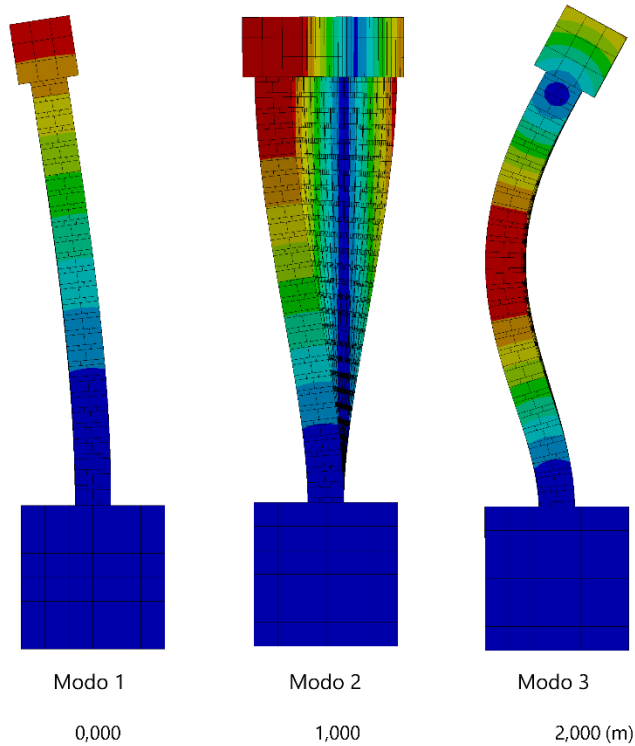


Figura 10. Formas modales (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos ver en la Tabla 4, el muro reforzado con el material CFRP en configuración vertical presenta mayores frecuencias modales.

Tabla 4. Frecuencias modales de ambos modelos en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

Modos	Muro no reforzado (1) [Hz]	Muro reforzado con CFRP (2) [Hz]	$\Delta_{(2)/(1)}$
1	3,9	5,3	+35,9%
2	10,7	13,5	+26,2%
3	28,2	35,7	+26,6%

5.3 Deformación en eje vertical

Para ver la acción del refuerzo en el muro estudiamos 3 puntos representativos indicados en la Figura 11, en los que hacemos una comparación de carga horizontal vs deformación en el eje vertical para ambos modelos. Debido a que por esta deformación se provoca la falla diagonal esperada en estos ensayos, resultando así que la pendiente de la curva es menor en el muro con refuerzo, lo que indica que se deforma menos bajo las cargas aplicadas.

El Punto 1 corresponde a la zona local donde se espera la falla, el Punto 2 es un punto intermedio del muro y el Punto 3 es el punto donde el software nos indica la mayor deformación vertical. Estos puntos se encuentran en el lado donde se aplica la carga dado que ahí se producen las mayores deformaciones por la tracción entre los elementos.

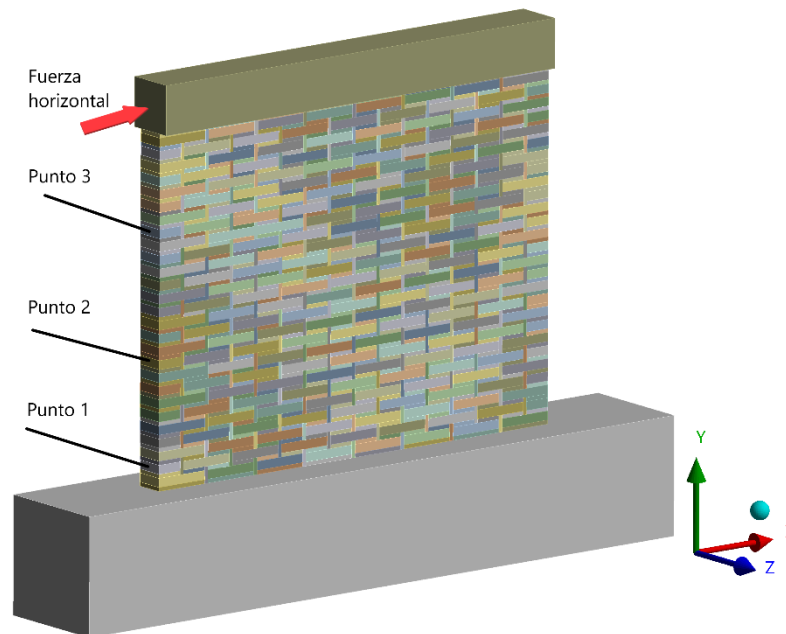


Figura 11. Puntos de estudio para realizar comparación entre ambos muros (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 12, Figura 13 y Figura 14 podemos ver que las deformaciones en el eje vertical en el muro sin refuerzo son mayores que en el muro reforzado, para cada uno de los puntos estudiados.

También se aprecia que las curvas no son de la misma longitud, esto es debido a que el modelo reforzado se detiene antes por no cumplimiento de los criterios del software para resolver las ecuaciones. Esta detención se produce en los 18000 N de carga horizontal aproximadamente, en cambio, en el modelo no reforzado, el modelo llega a los 20000 N de carga horizontal aproximadamente.

Esto implica que el modelo solo desarrolla la falla incipiente, pero no puede representar la falla generalizada. En la Figura 12 vemos que las curvas comienzan a aumentar de forma exponencial luego de una carga de 16000 N aproximadamente, esto se debe a que el punto 1 se encuentra en la zona donde ocurre la falla incipiente y debido a esto es que el software se detiene.

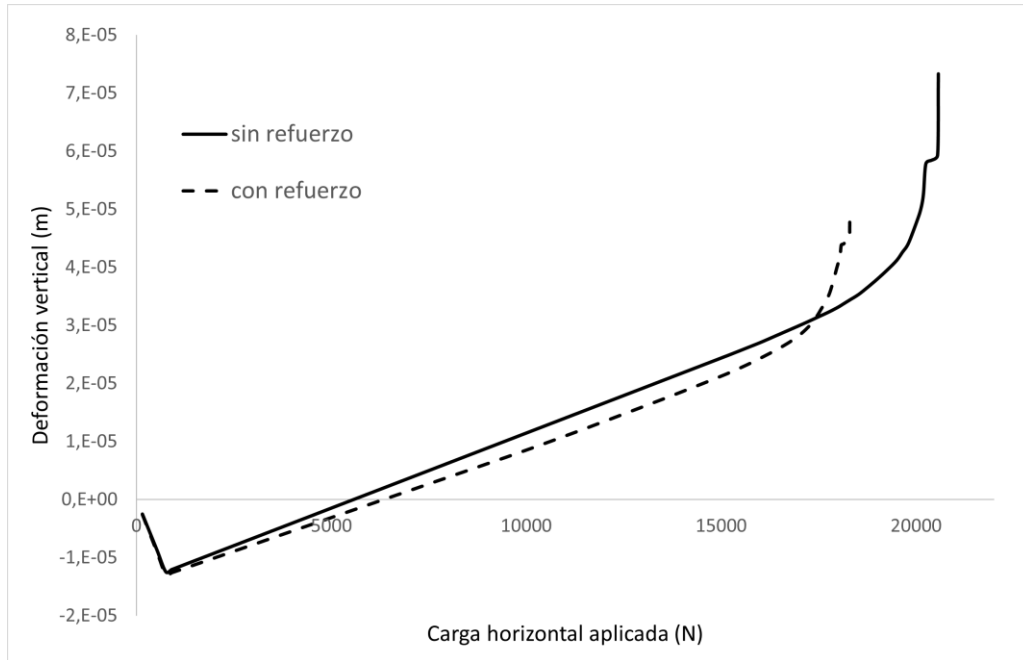


Figura 12. Gráfico Punto 1 carga horizontal aplicada vs deformación vertical (Fuente: Elaboración propia)

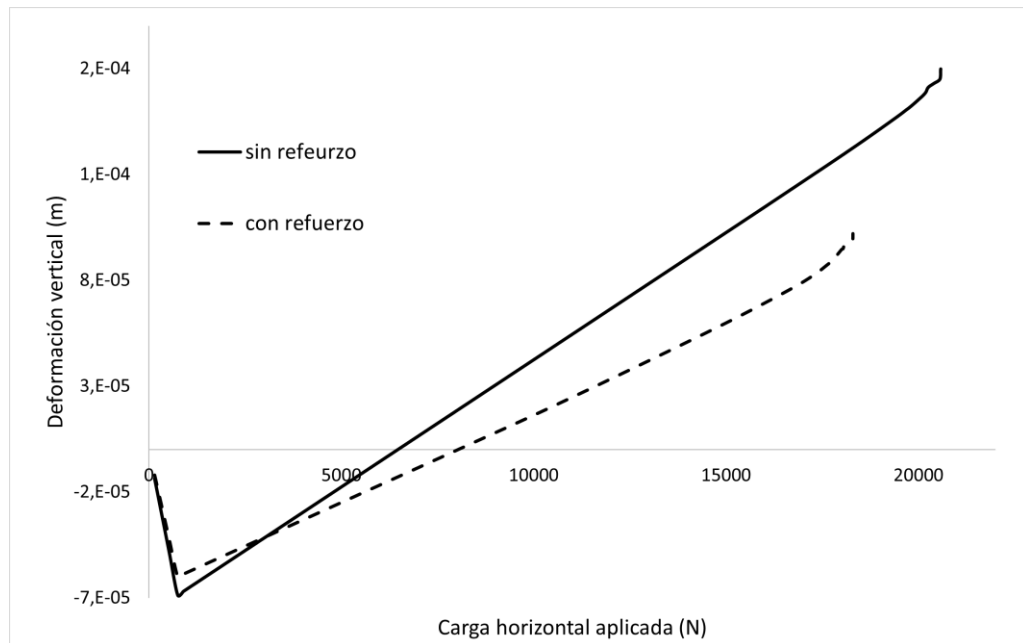


Figura 12. Gráfico Punto 2 carga horizontal aplicada vs deformación vertical (Fuente: Elaboración propia)

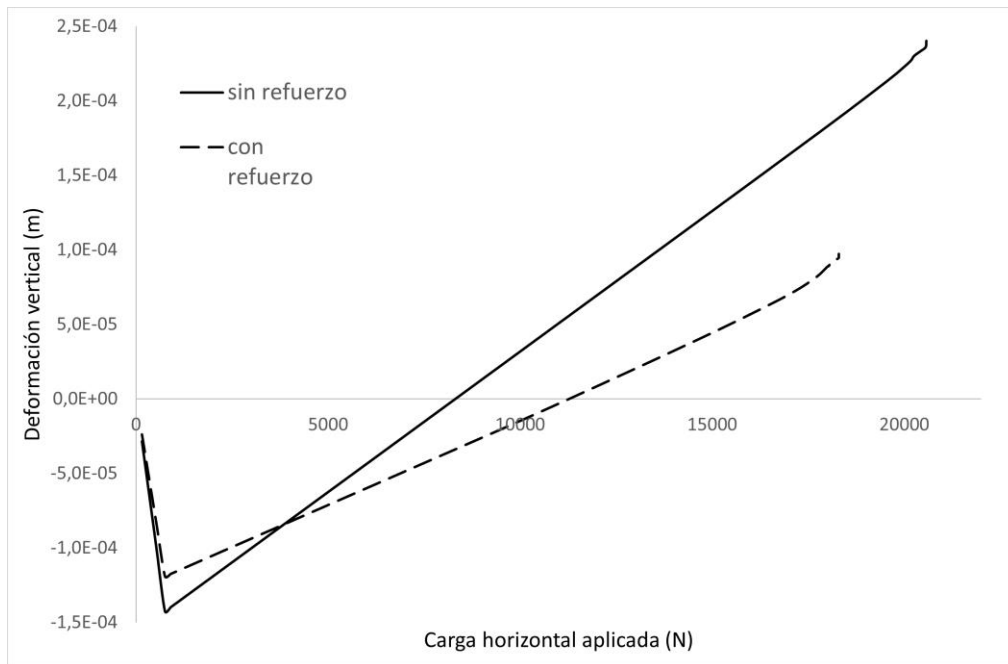


Figura 13. Gráfico Punto 3 carga horizontal aplicada vs deformación vertical (Fuente: Elaboración propia)

5.4 Deformación total

En cuanto a la deformación total de la estructura, hay un efecto de torsión y flexión simultánea en el muro con refuerzo que se provoca por la asimetría de la rigidez, dado que, por motivos constructivos, el refuerzo se aplica en un solo lado del muro. Esto resulta en que un lado del muro es más rígido que el otro y al aplicar una carga horizontal, ésta provoca distintas deformaciones en ambos lados, generando que el muro se flexione hacia el lado contrario de los refuerzos aplicados, como se ve en la Figura 15.

Además, el efecto de torsión en el muro, creemos que se produce tal como el fenómeno de una viga metálica con rigidez asimétrica en el eje longitudinal, que tiene un centro de cortante excéntrico. Esto se observa en varios modelos, cambiando las configuraciones, pero no percibido en un muro con refuerzo de CFRP por ambos lados (Popov, 2000)

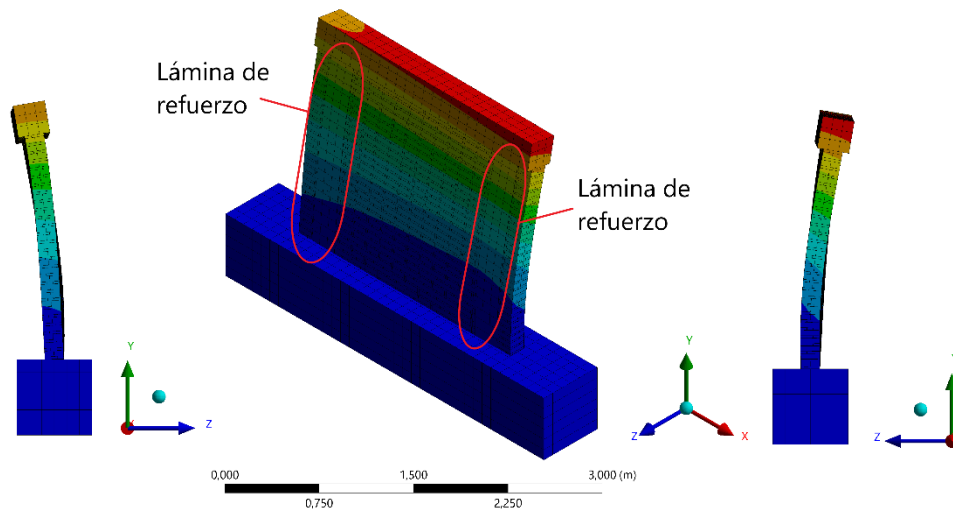


Figura 15. Deformación de muro reforzado (Fuente: Elaboración propia)

A diferencia del modelo del muro reforzado y como se muestra en la Figura 16, el muro sin refuerzo solo presenta deformaciones en el plano XY.

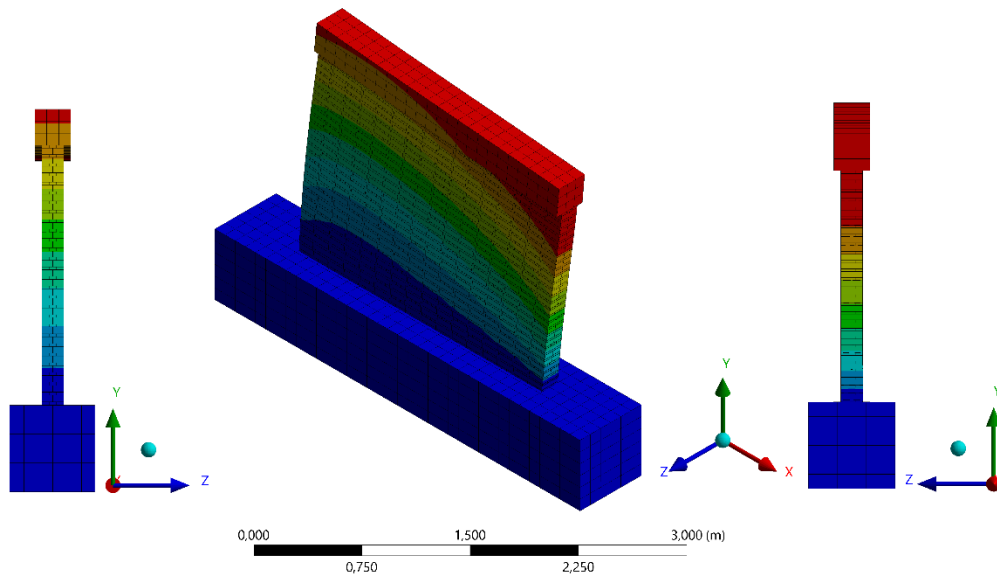


Figura 16. Deformación de muro no reforzado (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 17 se muestra la falla incipiente, donde se aprecia el despegue entre los ladrillos y morteros en el comienzo de la diagonal del muro, lo cual es el comienzo de una falla escalonada. Este es el comportamiento de delaminación, el cual es característico en este tipo de ensayos y que avanza a los siguientes elementos de la diagonal, lo que generaría la falla generalizada, que este modelo no es capaz de representar.

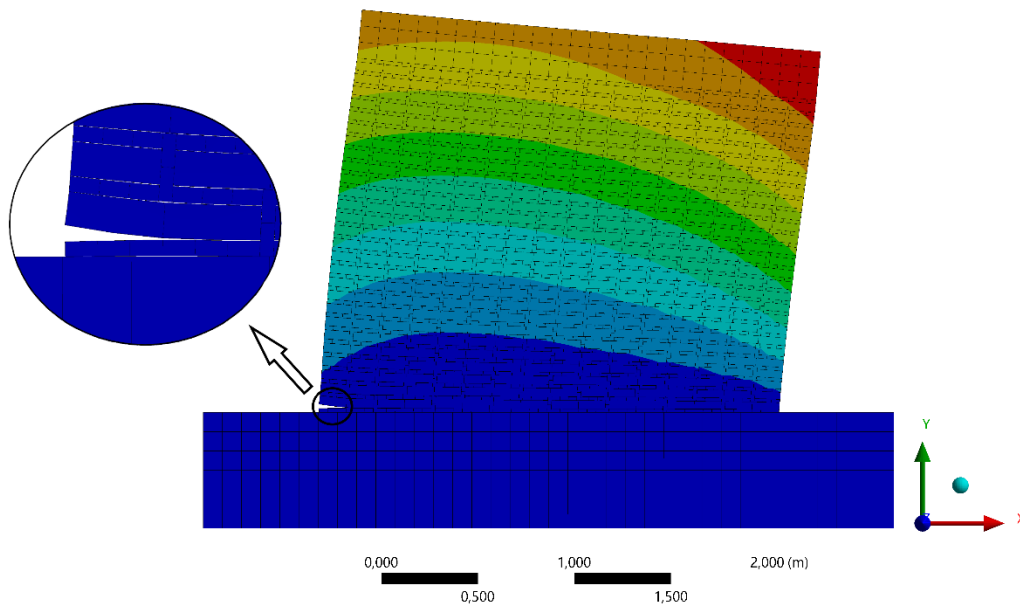


Figura 17. Falla incipiente en muro no reforzado (Fuente: Elaboración propia)

6. PROBLEMAS DE MODELACIÓN

Para futuras modelaciones, sería interesante considerar realizar ensayos reales en laboratorio para ajustar los valores del modelo CZM, ya que este material de sacrificio tiene relación directa y muy relevante con los resultados obtenidos.

En cuanto a los refuerzos de CFRP, se recomienda profundizar en la modelación de la unión entre el material de refuerzo y la albañilería, dado que en este proyecto se ha considerado la unión como contacto *bonded*. Aunque sabemos que en la realidad los materiales se despegan antes de alcanzar la resistencia límite de los materiales, por lo que, para mejorar esta modelación, se tendría que realizar ensayos que determinen cuanto resiste la adherencia de la unión del material al muro, para luego poder buscar una forma de representar esto en un modelo numérico.

7. CONCLUSIÓN

La modelación de un muro no reforzado y un muro reforzado con CFRP fue presentada en este documento, donde para llegar al modelo final se hizo un recorrido por muchos modelos alternativos, probando distintas configuraciones y analizando la incidencia de los cambios, para así aproximarse cada vez más a la realidad y que el modelo sea lo más representativo posible.

En la modelación realizada en el presente documento se ha utilizado el Modelo de Zona Cohesiva (CZM), con resultados representativos del comportamiento en la realidad, provocando la tendencia de separar los ladrillos del mortero. Este es el comportamiento esperado en el modelo, dado que en laboratorio los muros sometidos a este tipo de ensayos suelen tener una falla escalonada, por la separación de los elementos en la diagonal del muro.

Además, se ha presentado un análisis de sensibilidad de los parámetros del CZM, del cual se concluye que el modelo es más sensible al esfuerzo de contacto normal máximo, dado que este parámetro incide fuertemente en la carga máxima aplicada.

Con las condiciones aplicadas en el modelo, se logra apreciar en los resultados que al añadir un refuerzo con el material CFRP aumenta la frecuencia modal de la estructura, con lo que podemos decir que la modelación es capaz de mostrar que la estructura aumenta su rigidez al ser reforzado. Esto es debido a que las frecuencias modales están directamente relacionadas con la rigidez y la masa, por lo tanto, a mayor frecuencia modal, mayor es la rigidez, es así como entonces la estructura es más resistente a deformaciones.

Los resultados de la modelación del muro reforzado nos indican que la estructura muestra una tendencia a la torsión y a la vez una flexión hacia el lado contrario de donde se encuentran las láminas de refuerzo. Esto se le puede atribuir a una excentricidad en el centro de corte, dado que hay una diferencia de rigidez entre cada lado del muro paralelo a la carga aplicada.

Aunque las configuraciones utilizadas en esta modelación nos permiten representar el comportamiento de la estructura, no se debe considerar completamente representativo, esto es más bien una fase en una modelación integral. Para complementar de mejor forma la modelación, se recomienda profundizar en el estudio y modelación de mecánica de contactos. Dado que mediante esta modelación no podemos representar la falla generalizada y solo apreciamos la falla incipiente de la estructura.

8. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por ANID/CONICYT en el marco del proyecto FONDECYT Iniciación 11200117.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS. (11 de Marzo de 2022). *ansys*. Recuperado el 11 de Marzo de 2022, de <http://www.ansyshelp.com>
- Bergami, A., & Nuti, C. (2015). *Compression test on masonry walls realized with a single or double masonry panel*. Universidad de Roma, Italia.
- Bernat, E., Gil, L., & Roca, P. (2015). *Numerical analysis of the load-bearing capacity of brick masonry walls strengthened with textile reinforced mortar and subjected to eccentric compressive loading*.
- Campbell, J., & Duran, M. (2017). *Numerical model for nonlinear analysis of masonry walls*. Revista de la construcción.
- Charry, J. (2010). *Experimental study of the behavior of brick walls under lateral loads*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Chávez, M. (2013). "Caracterización de las propiedades mecánicas de la albañilería basada en ensayos vibratorios no destructivos". *memoria de título*. Universidad de la Santísima Concepción, Concepción.
- (2021). *Estadísticas de Edificación año 2002-2019*. Centro UC de innovación en Madera.
- Gisbert, J., Bru, D., González, A., . . . S. (2018). *"Masonry micromodels using high order 3D elements"*. Universidad de Alicante, España.
- Gómez, C. (2001). Caracterización de sistemas estructurales usados en las viviendas de hormigón armado y albañilería reforzada en Chile. *memoria de título*. Universidad de Chile, Santiago.
- Grabowski, S. (2005). *Material properties for the tests in WP 7 and 8 and the verification of the design model of WP 4*. Universidad de Munich, Alemania.
- Hognestad, E. (1951). *A Study of Combined Bending and Axial Load in reinforced Concrete*. Universidad de Illinois.
- Kaushik, H, B., Rai, D, C., Jain, & S, K. (2007). *"Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Compression"*. Revista de materiales en Ingeniería Civil, PP. 728-739.
- Lourenco, P. (1996). *"Computational strategy for masonry Structures"*. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto, Portugal.
- Lourenco, P. (2015). *"Masonry modeling"*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Minho, ISISE, Portugal.
- Popov, E. P. (2000). *Macánica de Sólidos* (Segunda edición ed.). Pearson Educación.
- Rivas, V. (2021). *Modelación de muros de albañilería no reforzada mediante ANSYS utilizando el modelo de zona cohesiva (CZM)*.
- Seron, D. (2021). *Modelacion de muros de albañilería no reforzada mediante ansys utilizando el modelo de resorte*.
- Sika. (13 de junio de 2022). *Sika CL*. Obtenido de <https://chl.sika.com/es/construccion/refuerzo-estructural/placas-y-tejidosfrp/sikawrap-300-c.html>