



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**PUSHOVER DE UN MARCO DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA Y ANÁLISIS DE 2
TIPOS DE REFORZAMIENTO: FLEJES DE ACERO ESTRUCTURAL Y FLEJES DE
ACERO MÁS ANCLAJES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero e Ingeniera Civil

AUTORES: Evelin Katherine Andrango Sánchez
Edwin Daniel Basantes Quinaluisa
TUTOR: Wilson Ramiro Torres Berni

Quito - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Evelin Katherine Andrango Sánchez con documento de identificación N°1724676703 y Edwin Daniel Basantes Quinaluisa con documento de identificación N°1753510286; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 10 de marzo del 2022

Atentamente,



Evelin Katherine Andrango Sánchez

1724676703



Edwin Daniel Basantes Quinaluisa

1753510286

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Evelin Katherine Andrango Sánchez con documento de identificación N°1724676703 y Edwin Daniel Basantes Quinaluisa con documento de identificación N°1753510286; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de Investigación: “Pushover de un marco de mampostería no reforzada y análisis de 2 tipos de reforzamiento: flejes de acero estructural y flejes de acero más anclajes”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero e Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de marzo del 2022

Atentamente,

Evelin Katherine Andrango Sánchez

Edwin Daniel Basantes Quinaluisa

1724676703

1753510286

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Wilson Ramiro Torres Berni con documento de identificación N°1710259845, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: PUSHOVER DE UN MARCO DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA Y ANÁLISIS DE 2 TIPOS DE REFORZAMIENTO: FLEJES DE ACERO ESTRUCTURAL Y FLEJES DE ACERO MAS ANCLAJES, realizado por Evelin Katherine Andrango Sánchez con documento de identificación N°1724676703 y por Edwin Daniel Basantes Quinaluisa con documento de identificación N°1753510286, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de marzo del 2022

Atentamente,



Ing. Wilson Ramiro Torres Berni , PhD.

1710259845

PUSHOVER DE UN MARCO DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA Y ANÁLISIS DE 2 TIPOS DE REFORZAMIENTO: FLEJES DE ACERO ESTRUCTURAL Y FLEJES DE ACERO MAS ANCLAJES

PUSHOVER OF AN UNREINFORCED MASONRY FRAME AND ANALYSIS OF 2 TYPES OF REINFORCEMENT: STRUCTURAL STEEL PLATES AND STEEL PLATES PLUS ANCHORS

Evelin K. Andrango Sánchez¹, Edwin D. Basantes Quinaluisa²

Resumen

Hoy en día los marcos de mampostería no reforzada con abertura de arco son muy comunes en las estructuras patrimoniales, las cuales no fueron construidas con normativa alguna ni diseño sísmico, tal como se lo lleva a cabo actualmente. El presente trabajo de investigación es una alternativa de reforzamiento para este tipo de estructuras sin tener que dañarlas a gran escala y mejorar su vida útil. Para realizar esta investigación se modeló en los programas de análisis estructural DIANA 10.2 y SAP 2000-V19 realizando un análisis pushover no lineal de la estructura de mampostería. Para el análisis del muro de mampostería se lo consideró como una estructura de un solo material homogéneo e isotrópico, mientras que para los anclajes de acero y flejes se utilizó adicionalmente varillas lisas de acero estructural NCh203 A420- 270 y platina de acero ASTM A-36, los cuales fueron seleccionados a partir del reforzamiento realizado en el Palacio Pereira en Santiago de Chile. Una vez obtenido los resultados se pudo verificar el modelo de Howlander et.al. (2020) y además que la mampostería reforzada con flejes de acero más anclajes tiene mayor resistencia que la mampostería reforzada solo con anclajes, lo cual además de mejorar el comportamiento del muro de mampostería aumenta la resistencia ante posibles movimientos sísmicos.

Palabras Clave: anclajes, carga de precompresión, carga lateral en el plano, flejes de acero, mampostería no reforzada, mampostería reforzada.

Abstract

Nowadays, unreinforced masonry walls with arched openings are very common in heritage structures, which were not built with any regulations or seismic design, as it is currently done. The present research work is an alternative of reinforcement for this type of structures without having to damage them on a large scale and improve their useful life. In order to carry out this research, a nonlinear pushover analysis of the masonry structure was performed using the structural analysis softwares DIANA 10.2 and SAP 2000-V19. For the analysis of the masonry wall, it was considered as a structure of a single homogeneous and isotropic material, while for the steel anchors and straps, we additionally used structural steel smooth rods NCh203 A420-270 and steel plate ASTM A-36, which were selected from the reinforcement carried out in the Pereira Palace in Santiago, Chile. Once the results were obtained, it was possible to verify the model of Howlander et al. (2020) and that masonry reinforced with steel strapping plus anchors has greater strength than masonry reinforced only with anchors, which in addition to improving the behavior of the masonry wall, increases its resistance to possible seismic movements.

Keywords: anchors, pre-compression loading, in-plane lateral loading, steel strapping, unreinforced masonry, reinforced masonry.

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: eandrangos1@est.ups.edu.ec

² Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: ebasantesq@est.ups.edu.ec

1. Introducción

En el Ecuador existen varios tipos de estructuras patrimoniales las cuales con el pasar de los años han sufrido daños provocados por innumerables movimientos sísmicos como fue el último sismo ocurrido en Manabí el 16 de abril del 2016, el cual se sintió en la mayor parte de provincias provocando daños en gran parte de estas estructuras [1].

La mayor parte de estructuras patrimoniales han sido construidas sin ningún tipo de normativa sísmica, lo cual ha provocado con el pasar de los años que se produzcan fisuras, grietas, desplazamientos, etc. [2]. Este tipo de mampostería no reforzada con arco es muy común encontrarla en Ecuador en sus principales ciudades, lo cual para los ingenieros es fundamental conservarlas tratando de emplear técnicas de reforzamientos en sus estructuras sin tener que alterarlas [3], para así poder aumentar su vida útil sin que sufran daños que comprometan su estabilidad.

La presente investigación se basa en replicar un modelo de mampostería no reforzada con abertura en arco llevada a cabo por Howlander et.al. (2020) [4]. El principal problema abordado en esta investigación es el reforzamiento a este dicho muro de mampostería con dos tipos de reforzamiento: flejes de acero en el borde interno de la abertura y posteriormente adicionar barras de anclaje en el contorno de la abertura, para así determinar cómo actúa la mampostería ante este tipo de reforzamientos y cuál es el más efectivo para ser aplicado en el modelo planteado.

En la modelación del muro de mampostería no reforzado se ha replicado el modelo en los programas de análisis estructural: DIANA 10.2 [12] y SAP 2000-V19 [18]. En el desarrollo de esta investigación se propone el tipo de material y propiedades mecánicas utilizadas para el modelamiento, ya que se considera al muro de mampostería como un solo cuerpo de material homogéneo e isotrópico.

A partir de la teoría de Druker-Prager [5] que considera el ángulo de fricción, dilatación y el endurecimiento variable en función de la cohesión [5], se definieron las propiedades mecánicas del muro de mampostería no reforzada. Para los flejes

de acero y los anclajes se aplicó la teoría de Von Mises la cual describe el comportamiento de los aceros asumiendo plasticidad y endurecimiento isotrópico del material [6]. La interfaz entre el muro de mampostería y los anclajes fue modelada a partir del modelo friccional de Mohr Coulomb que asume que el deslizamiento es producido por la fricción de los elementos [7].

Howlander et.al. (2020) plantea originalmente el ensayo de la siguiente manera tanto el peso propio como la carga de precompresión fueron aplicadas constantemente, mientras que para la deformada se aplicó un punto de control por medio de ciclos monótonamente constantes cada 0.08mm hasta llegar a un máximo de 48mm en 600 ciclos, para si poder obtener la curva carga VS desplazamiento o también conocida como pushover [4].

El análisis pushover o también conocido como curva de capacidad en esta presente investigación se basa en aplicar patrones de cargas laterales monótonas, hasta llevar al muro de mampostería no reforzada y reforzada tanto con flejes de acero y anclajes a su máximo rango elástico, para así determinar la carga máxima de resistencia de la estructura [8].

2. Comportamiento de la mampostería

A continuación, se presentarán algunos conceptos fundamentales aplicados en el desarrollo de esta investigación: análisis no lineal, teoría de la plasticidad, homogenización de los materiales y de una parte experimental en donde se establece los softwares utilizados, el tipo de material, características geométricas y cargas aplicadas.

2.1. Análisis no lineal

El análisis no lineal ayuda a determinar la respuesta de una estructura considerando límites de resistencia del material y pérdida progresiva de rigidez. Por lo tanto, se puede apreciar la degradación de la estructura frente a una carga creciente.

2.1.1. Pushover

El pushover o curva de capacidad como se indica en la figura 1, es una técnica de análisis no lineal muy valiosa en el diseño por desempeño, la cual utiliza patrones de carga lateral. Esta técnica ayuda a llevar a las estructuras a su capacidad y deformación máximas [8].

Este método de análisis se basa en que la estructura llegue a su colapso mediante la aplicación de cargas laterales monótonas con control de desplazamiento tomando en cuenta el peso propio de la estructura y las cargas verticales actuantes sobre ella [9].

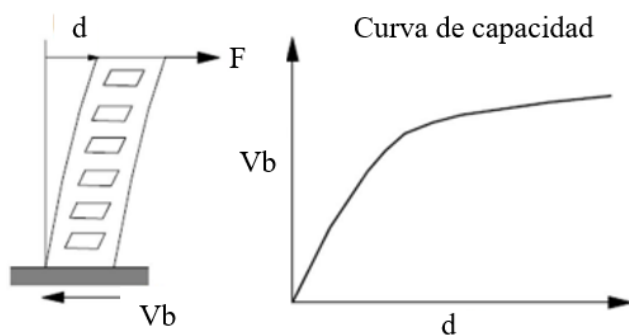


Figura 1. Pushover o curva de capacidad. [8]

Donde:

- Vb= Cortante basal
- d= Desplazamiento lateral
- F= Carga lateral

Como se indica en la gráfica 1, la curva de capacidad o también conocida como pushover, es la relación que existe entre el cortante basal (V_b) y el desplazamiento lateral (μ_N) en un punto de control [10].

2.2. Teoría de la plasticidad

Su fundamento principal esta dado en la relación de la tensión- deformación del material que constituye la estructura y no depende de la velocidad de aplicación de la carga, obteniendo así la curva de capacidad de la estructura completa [11].

En el software DIANA 10.2 [12], existen, entre otros, tres criterios fundamentales de plasticidad que son: Druker Prager, Mohr Coulomb y Von

Mises los cuales se basan en el tipo de material que constituye la estructura, obteniendo así la curva de capacidad mediante la aplicación de cargas continuas monótonas [7].

2.2.1. Modelo de Druker Prager

Se basa en el análisis de los materiales en los cuales participa la fricción, adicionalmente el material posee ablandamiento o endurecimiento isotrópico [13].

El modelo de Druker Prager considera el endurecimiento en función de la deformación y de la misma manera relaciona la tensión plástica (k) versus la cohesión (\bar{c}), estableciendo una dependencia entre variables como se indica en la figura 2 [14], esto permite modelar materiales friccionantes donde exista una primera etapa plástica dada en función del endurecimiento [11].

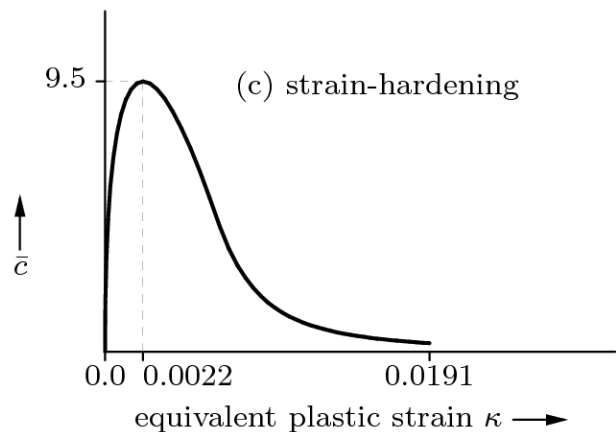


Figura 2: Diagrama de endurecimiento de Druker Prager [12].

Donde:

- \bar{c} = Cohesión
- k = Tensión plástica equivalente

Para la calibración de los parámetros de superficie de fluencia, se tiene 3 en donde se calibra el ángulo de fricción (ϕ_0) a partir de los esfuerzos máximos a compresión (σ_1 y σ_2) y su relación con el esfuerzo máximo de compresión (f_c) [14].

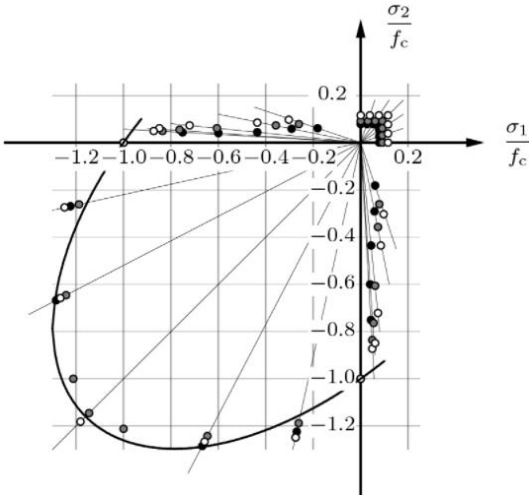


Figura 3: Curva de calibración para el ángulo de fricción [12].

Donde:

σ_1/f_c = Relación entre los esfuerzos máximos: a compresión 1 y de compresión
 σ_2/f_c = Relación entre los esfuerzos máximos: a compresión 2 y de compresión

Con la obtención del ángulo de fricción (ϕ_0) se calcula la cohesión (\bar{c}) con la ecuación 1, la cual se obtiene a partir de la derivación del ángulo de fricción y la resistencia a la compresión uniaxial máxima producida [14].

$$\bar{c} = f_c * \frac{1 - \sin(\phi_0)}{2 * \cos(\phi_0)} \quad (1)$$

El software DIANA 10.2 [12] permite generar la gráfica de endurecimiento en función de la cohesión, y a su vez considera una dependencia no lineal para el ángulo de fricción y dilatación permitiendo obtener así resultados que representan de una manera casi precisa el comportamiento de los muros de mampostería frente a cargas aplicadas [14].

2.2.2. Modelo de Mohr Coulomb

Mohr Coulomb asume que la plasticidad de los materiales se da por el deslizamiento producido por la fricción entre partículas [7], para el análisis de los anclajes se propone una interfaz de fricción entre el muro de mampostería y los anclajes [15]. La figura 4 representa un ensayo triaxial donde se

analiza cómo se comporta el material frente a un esfuerzo cortante (τ) y a la tensión normal (σ), para así obtener una relación entre la cohesión (c) y el ángulo de rotura (α), podemos observar cómo se van incrementando la tensión normal (σ) y el esfuerzo cortante (τ) en todas las direcciones [7].

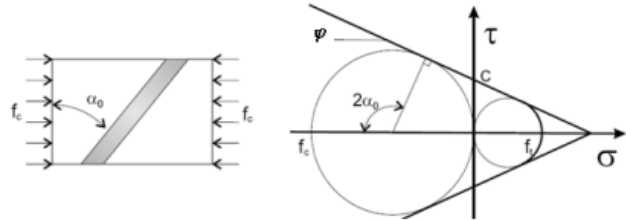


Figura 4: Criterio de Mohr Coulomb [7].

Donde:

τ = Esfuerzo cortante
 σ = Tensión normal
 c = Cohesión
 α = Ángulo de rotura
 f_c = Esfuerzo máximo de compresión
 ϕ = Ángulo de rozamiento

Se asume entonces que el ángulo de fricción será constante durante la aplicación de la carga monótona y a su vez que la tensión normal (σ) y el esfuerzo cortante (τ) van a tener el mismo comportamiento en todas las direcciones, así como en el plano [15].

2.2.3 Modelo de Von Mises

Se utiliza para describir el comportamiento de materiales dúctiles, para esto se supone que va a existir plasticidad en el material y endurecimiento isotrópico [6]. El criterio de Von Mises se basa en que la tensión normal σ_1 y σ_2 se hallan dentro del diagrama mientras que la tensión normal σ_3 es igual a cero como se indica en la figura 5 [16].

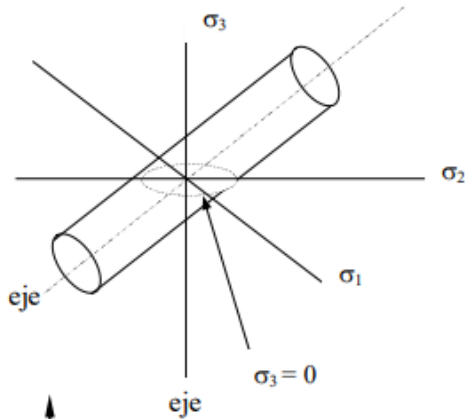


Figura 5: Superficie de falla de Von Mises [16].

Donde:

- σ_1 = Tensión normal 1
- σ_2 = Tensión normal 2
- σ_3 = Tensión normal 3

Se plantea el uso de este modelo para representar los refuerzos: tipo fleje y anclajes, debido a que permite ingresar las propiedades mecánicas del acero obteniendo así el comportamiento del mismo [17].

2.3. Homogenización del material

La homogenización del material se basa en determinar las propiedades del material equivalente que ayude a representar el comportamiento no lineal que ocurre debido a los diferentes modos de falla en el muro de naturaleza heterogénea [7]. En la figura 6 podemos observar homogenización de la mampostería.

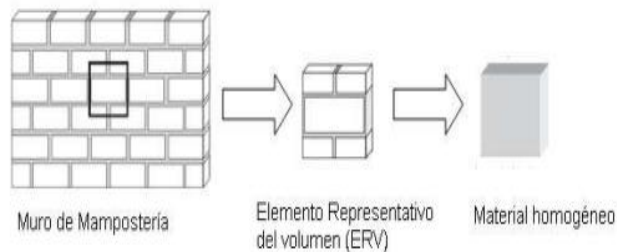


Figura 6: Homogenización del material [7].

Para el modelo consideramos un dominio de un solo material homogéneo e isotrópico, donde se asumieron las propiedades mecánicas de Howlander et.al. (2020) [4], posteriormente se utilizó el método de Drucker Prager en donde se

considera que las propiedades van a ser las mismas en todas las direcciones lo único que cambiará será la cohesión en función del endurecimiento [5].

2.4. Softwares utilizados para la modelación del muro de mampostería

Para el análisis se utilizó 2 softwares, de los cuales se descartó uno debido a que su capacidad no alcanza para el tipo de análisis planteado la modelación del muro de mampostería.

2.4.1. Programa DIANA 10.2

El software DIANA 10.2 es un paquete computacional de códigos de elementos finitos que ayuda al análisis de diferentes tipos de estructuras. Gracias a que es un software versátil ayuda a resolver problemas que requieren modelación y análisis de elementos lineales y no lineales [12].

2.4.2. Programa SAP 2000- V19

Es un programa computacional que ayuda a la modelación y análisis de diferentes tipos de estructuras. Gracias a su sistema versátil y amigable ayuda al usuario a realizar diferentes tipos de estructuras, generar cargas sísmicas, móviles, de viento entre otras entregando resultados confiables, reales y de fácil análisis [18]. La característica y función más importante de SAP2000-V19 [19] respecto del análisis que se quiere llevar a cabo en esta investigación es la posibilidad de realizar un análisis tipo pushover en estructuras reticulares.

2.5. Materiales

Las propiedades mecánicas para el muro de mampostería no reforzada fueron determinadas con base en Howlander et.al. (2020) [4], donde se realizó las respectivas pruebas de ensayo de laboratorio. El módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión fueron obtenidas a través del test de compresión de un prisma de mampostería [20,21], la resistencia a tracción y la energía a la rotura se definieron a partir del ensayo de módulo de rotura [22], para el ángulo de fricción

y cohesión se lo determinó a partir de la prueba de triplete o cizallamiento ya que ambos coeficientes están relacionados [23], mientras que el coeficiente de dilatación fue asumido a partir de lo expuesto por [24].

Para las vigas de acero colocadas para la transmisión de cargas el módulo de Young y el coeficiente de poisson se asumió a partir de Howlander et.al. (2020) [4], mientras que la rigidez normal y a tracción se obtuvieron de la

investigación realizada por Espinoza y Pazmiño (2019) [25] a partir de la normativa ASTM A36.

Para el reforzamiento mediante flejes de acero se utilizó el módulo de Young tomado de [26], y para las varillas lisas se utilizó el módulo de Young basado en la norma chilena NCh203 [30]. Estos tipos de refuerzo fueron seleccionados a partir del reforzamiento realizado en el Palacio Pereira en Santiago de Chile. Todas estas propiedades se hallan descritas en la tabla 1.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para el modelamiento por SAP2000-V19 y DIANA 10.2

Material	Propiedad	Valor	Unidad	Fuente de datos
Mampostería	Módulo de Young	2502	MPa	Test de compresión [20,21]
	Razón de Poisson	0,2	---	Howlander et.al. (2020) [4]
	Resistencia a la compresión	7,1	MPa	Test de compresión [20,21]
	Resistencia a la tracción	0,71	MPa	Ensayo de módulo de rotura [22]
	Densidad de masa	1700	Kg/m3	[37]
	Energía a la rotura	0.025	N/mm	Ensayo de módulo de rotura [22]
	Cohesión	0,285	N/mm2	Prueba de triplete [23]
	Coefficiente de fricción	0,74	rad	Prueba de triplete [23]
	Coefficiente de dilatación	0,5	rad	[24]
Vigas de Acero	Módulo de Young	$2 \cdot 10^5$	MPa	Howlander et.al. (2020) [4]
	Razón de Poisson	0,3	---	Howlander et.al. (2020) [4]
	Rigidez Normal	79.3	N/mm3	[25]
	Rigidez a la tracción	11,5	N/mm3	[25]
Flejes de acero	Módulo de Young	$2 \cdot 10^5$	MPa	ASTM- A36 [26]
Anclajes	Módulo de Young	$2 \cdot 10^5$	MPa	NCh203 [30]

2.6. Características geométricas

El muro de mampostería a modelar es una réplica del muro de mampostería poco profundo (Shallow Spandrel) de Howlander et.al. (2020) [4] y su geometría es como se indica en la figura 7.

Para la modelación, se consideró al muro como un solo material homogéneo e isotrópico.

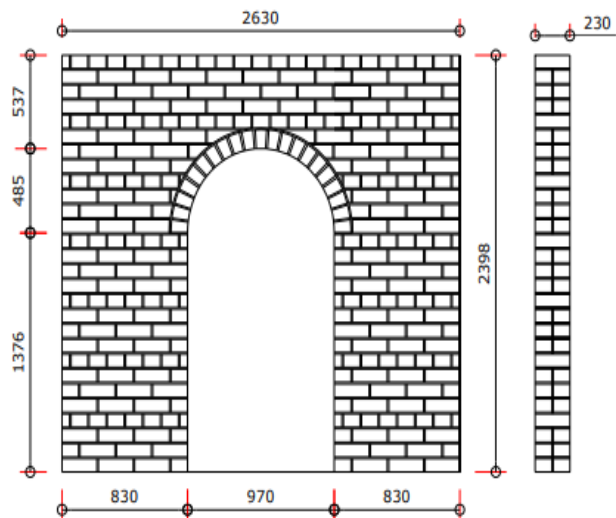


Figura 7. Shallow Spandrel en mm. [4]

2.7. Cargas aplicadas

Para el modelo del muro de mampostería se aplicó tres tipos de cargas que fueron: carga de precompresión vertical (F_y), peso propio (W) y desplazamiento horizontal en el punto de control (dx) como se puede observar en la figura 8 [4].

El peso propio y la carga de precompresión fueron aplicadas de manera constante y en un solo paso [4]. Para la carga de precompresión se realizó dos modelos uno con carga de 0,2MPa y otro con 0,5MPa considerando un área de aplicación de 3045 mm².

Para la deformación horizontal se lo realizó aplicando un punto de control, donde se aplicó un desplazamiento monótonamente creciente empezando desde 0,08mm hasta un máximo de 48mm en 600 pasos constantes [4].

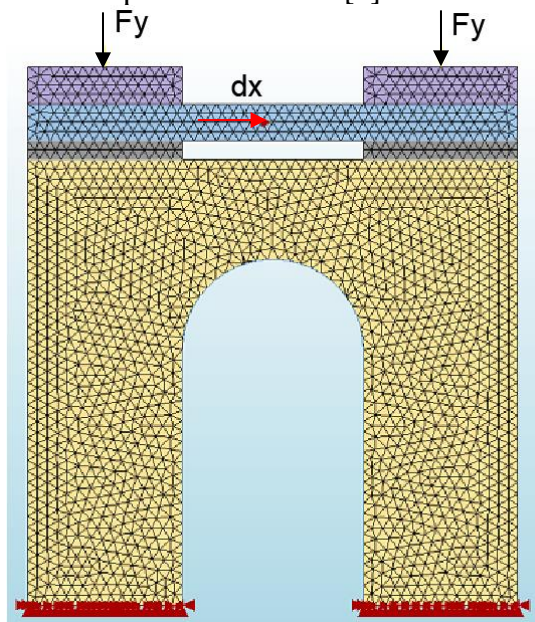


Figura 8. Aplicación de cargas para DIANA10.2. [4]

3. Modelos de mampostería

Los modelos de mampostería fueron realizados a partir de los criterios antes mencionados y utilizando las propiedades mecánicas descritas en la tabla 1, la características geométricas y cargas descritas.

3.1. Mampostería no reforzada

El modelado del muro de mampostería se lo considera como un dominio de un solo material homogéneo e isotrópico. Para crear la geometría establecida como se indica en la figura 7 del muro de mampostería de Howlander et.al. (2020), se utilizó elementos de superficie tipo membrana. El material utilizado fue del grupo de concretos y mampostería basada en la teoría de Druker-Prager. Para que en la base no exista translación se estableció elementos de borde restringiendo el muro tanto en el eje X y Y.

Las vigas PFC-100 y UC200-46,2 con espesor de 162mm y 65,84mm, se colocaron encima del muro de mampostería para la transmisión de cargas como se indica en la figura 9, fueron modeladas con elementos de superficie tipo lamina. El material utilizado fue del grupo de aceros de tipo elástico isotrópico. La carga de precompresión se colocó en las vigas UC200-46,2 y el desplazamiento horizontal fue aplicado en un punto de control establecido en la viga intermedia la cual se restringió por translación en el eje X como se muestra en la figura 9.

Para la conexión entre las vigas y el muro de mampostería como se indica en la figura 9, se lo realizó a través de elementos de interfaz de tipo lineal elástico para así transmitir las cargas antes establecidas. El espesor para la interfaz se consideró para las vigas PFC-100 y UC200-46,2 de 162mm y 65,84mm, mientras que para el muro de mampostería un espesor de interfaz de 230mm. Una vez establecidos todos estos parámetros se creó una malla a partir de elementos triangulares cuadráticos de dimensión 60mm.

El análisis realizado fue no lineal, el cual considera en una primera etapa el peso propio y la carga de precompresión y una segunda etapa en donde se establece el desplazamiento horizontal en el punto de control aplicando un desplazamiento monótonamente creciente desde 0,08mm hasta un máximo de 48mm en 600 pasos constantes.

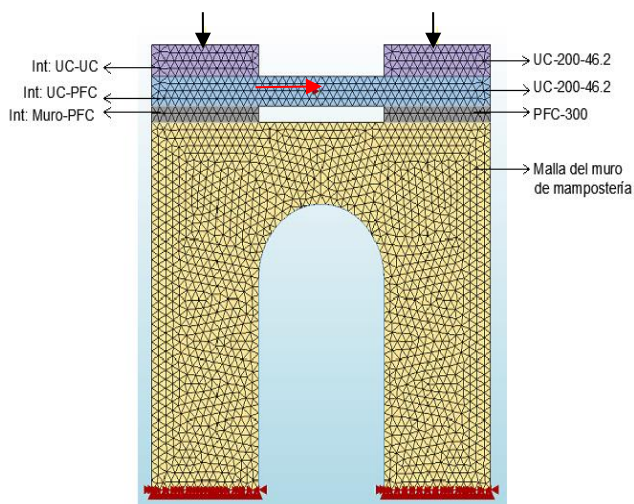


Figura 9. Modelo de mampostería no reforzada.

3.2. Mampostería reforzada con flejes de acero

El modelo de mampostería reforzada con flejes de acero fue modelado a partir del modelo anterior. Para el reforzamiento se insertó una platina de 200*10 de acero ASTM -A36 como se indica en la figura 10, la cual fue ingresada como un elemento tipo Von Mises Plástico.

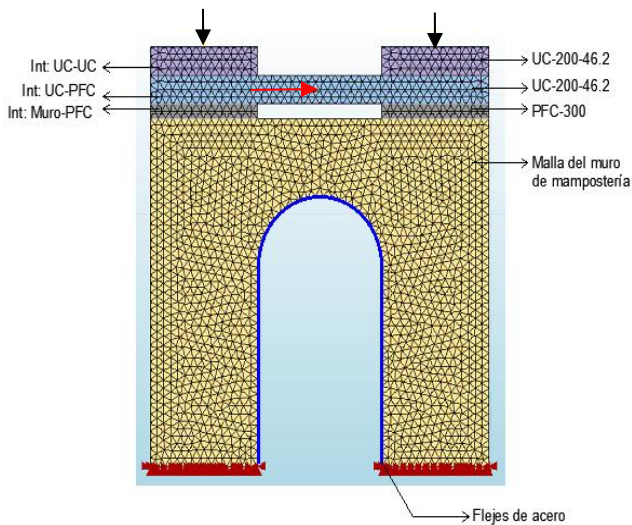


Figura 10. Modelo de mampostería reforzada con flejes de acero.

Para el modelo Von Mises se ingresa la gráfica bilineal de la tensión de la fluencia vs la deformación plástica equivalente como se indica en la figura 11, la cual muestra el comportamiento del acero una vez lograda la fluencia inicial [27].

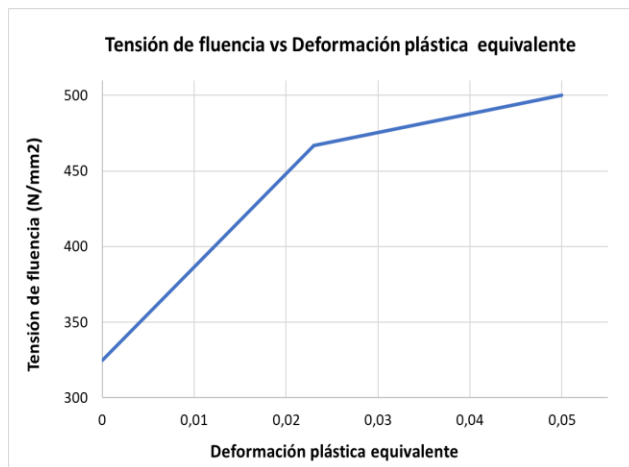


Figura 11. Curva bilineal utilizada.

3.3. Mampostería reforzada con flejes y anclajes

Para este modelo se utilizó el desarrollado en el punto anterior, al cual se le insertó anclajes de varillas lisas de acero estructural NCh203 A420-270 de diámetro de 16mm de longitud de 50cm con un ángulo de inclinación de 9° cada 27.5cm de distancia como se indica en la figura 12. Se modeló los anclajes a partir del criterio Von Mises [16].

La interfaz entre el muro de mampostería y los anclajes se realizó a partir del criterio de fricción de Mohr Coulomb (2.2.2), para esto se considera el ángulo de fricción, dilatación y cohesión igual al del material de la mampostería como se indica en la tabla 1 [15].

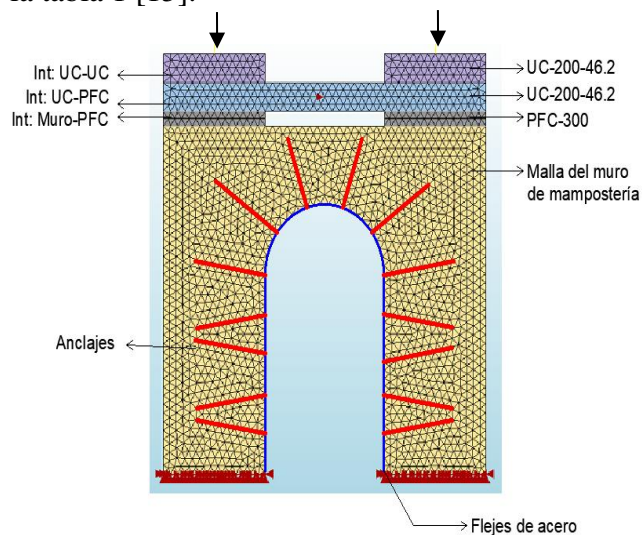


Figura 12. Modelo de mampostería reforzada con flejes y anclajes

3.4. Modelo de SAP2000- V19

La modelación a través del software SAP 2000-V19 se lo realizó mediante elementos tipo Shell layered - NonLinear y su geometría es la que se indica en la figura 7. Para el material se ingresaron las propiedades mecánicas descritas en la tabla 1. La malla utilizada fue generada a través de elementos triangulares cuadráticos de dimensión de 60mm la cual fue generada a través del mismo software. Se colocó la fuerza de precompresión y se estableció un nodo de la malla como punto de control para el desplazamiento horizontal. Se restringió la base en el eje X y Y para que no exista translación como se indica en la figura 13.

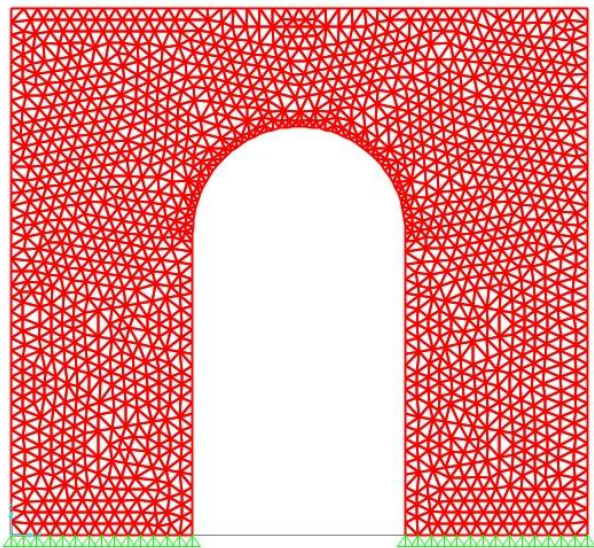


Figura 13. Modelo de mampostería en SAP2000- V19.

La curva de capacidad de una estructura se obtiene aplicando el pushover y la asignación de rótulas plásticas[28]. En esta investigación determinamos que en la mampostería no se pueden definir rótulas como una estructura reticular (compuesta por barras), y a la vez el material al no contar con ningún reforzamiento o confinamiento solo presenta un comportamiento de limite elástico frágil.

Se puede observar que la mampostería tiene una resistencia máxima de 15KN siendo este el límite elástico del análisis lineal estático. Comparando gráficamente con la curva de capacidad de la mampostería obtenida en DIANA

10.2 como se indica en la figura 14, se determinó que ambos limites elásticos alcanzan los 15KN, pero el software SAP2000-V19 no puede llegar a obtener más resultados debido a que no posee la capacidad para mostrar un comportamiento adecuado en el rango no lineal para este tipo de estructuras.

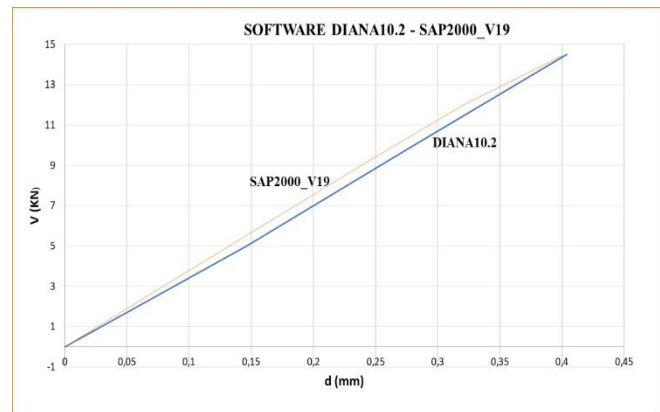


Figura 14. Modelo de mampostería en SAP2000- V19.

4. Resultados y discusión

A partir del modelo de Howlander et.al. (2020) [4], de un marco de mampostería no reforzada con abertura en arco, se realizó el modelo del muro, considerándolo como un solo material homogéneo e isotrópico, se obtuvo la curva de capacidad, la gráfica de deformada del arco para los diferentes casos y cargas propuestas.

4.1. Comportamiento del muro de mampostería no reforzada

La curva de capacidad obtenida a partir del análisis no lineal realizado por el software DIANA 10.2, nos indica la resistencia máxima obtenida tanto para 0,2MPa y 0,5MPa, las cuales se muestran en la tabla 2. En las figuras 15 (a) y (b) se muestra cómo se comporta el modelo y se lo compara con: el modelo de Howlander et.al. (2020) [4], se puede observar gráficamente que poseen la misma rigidez inicial elástica, pero a partir del punto de agrietamiento de la mampostería su comportamiento en la zona pos-elástica es similar.

A partir de la gráfica 15 (a) y (b) nos indican que la resistencia máxima alcanzada comparada con el modelo tanto experimental como en el software DIANA 10.2 [29] de Howlander et.al. (2020) y nuestro modelo simplificado para 0,2MPa y 0,5MPa son casi similares teniendo un porcentaje de error del 2,08 y 1,02 respectivamente.

Tabla 2. Cargas máximas obtenidas del muro de mampostería no reforzada

Muro	Test (KN)	Howard et. al. (KN)	Modelo (KN)	Error %
0,2MPa	41,5	46,6	47,57	2,08
0,5MPa	71,6	75,6	76,37	1,02

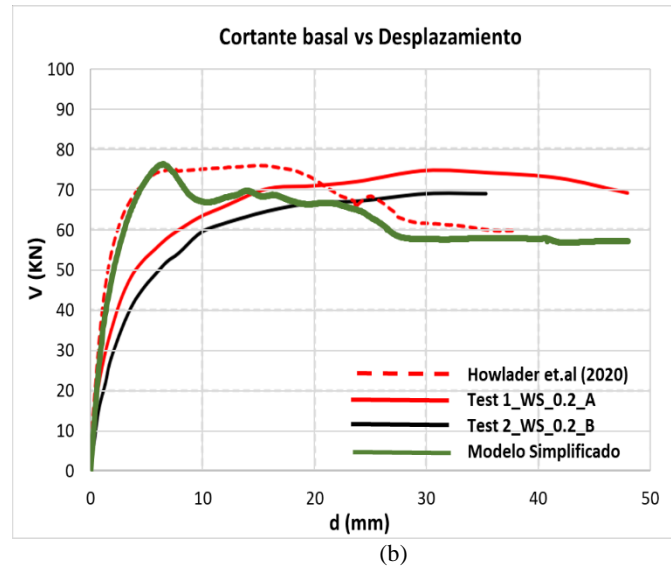
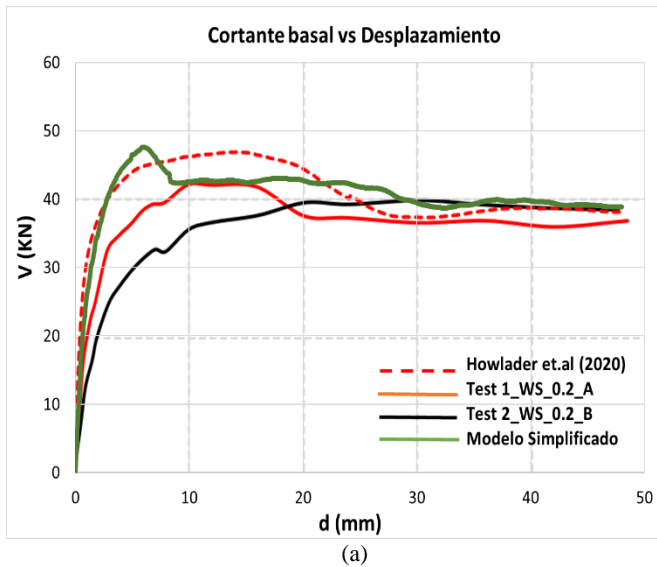


Figura 15. Curva de capacidad para mampostería no reforzada. (a) 0,2MPa (b) 0,5MPa

4.1.1. Deformaciones unitarias del muro de mampostería sin reforzar

Se puede observar en la figura 16 (a) como en el modelo de Howlander et.al. (2020) se producen fisuras por corte diagonal y agrietamiento en las juntas del mortero en la parte del arco y fisuras por flexión en la base provocando deslizamientos horizontales, mientras que en la figura 16 (b) existen igualmente deformaciones grandes a tracción en el eje Y debido a la flexión en la base.

En la gráfica 17 (a) observamos fallas por corte diagonal, agrietamiento de las juntas y fallas por

fricción a cortante en el arco, mientras que en la base existen fisuras por deslizamiento. En la gráfica 17 (b) se observa fallas por deslizamiento y corte diagonal en la parte del arco y fallas por deslizamiento en la base.

A partir de la gráfica de deformación unitaria por corte 16 (c) se observa una pequeña fisura en la parte superior del arco provocada por la compresión diagonal y el aplastamiento, mientras que en la gráfica 17 (c) observamos una fisura por deslizamiento en la base.

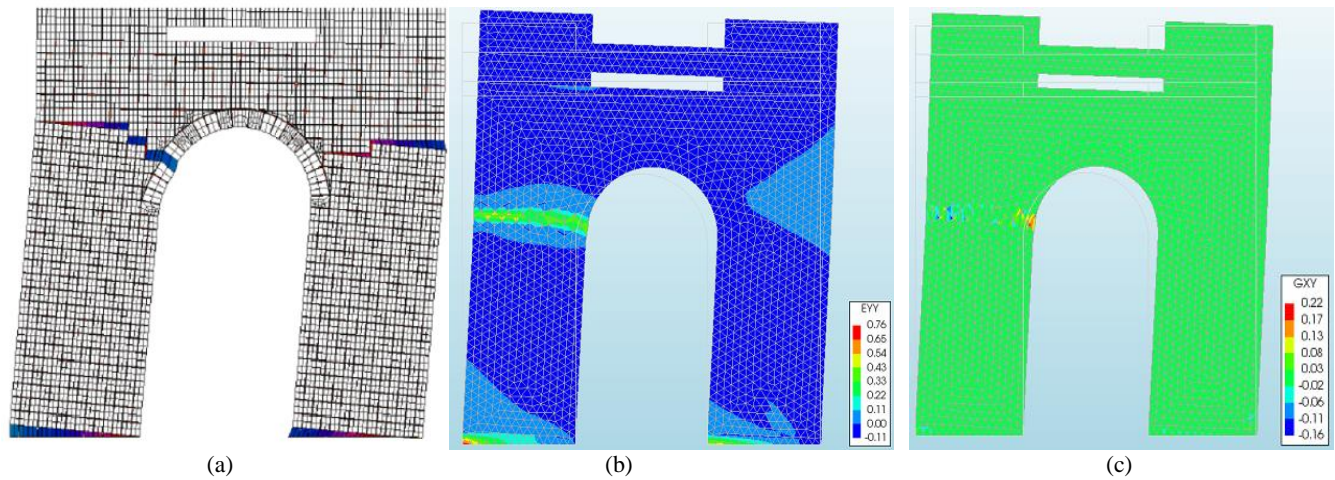


Figura 16. Configuración deformada en el estado final del muro para una carga de 0,2MPa, (a) Modelo fisurado Howlander et.al. (2020), (b) Deformación unitaria en dirección vertical en el modelo simplificado y (c) Deformación por corte en el modelo simplificado.

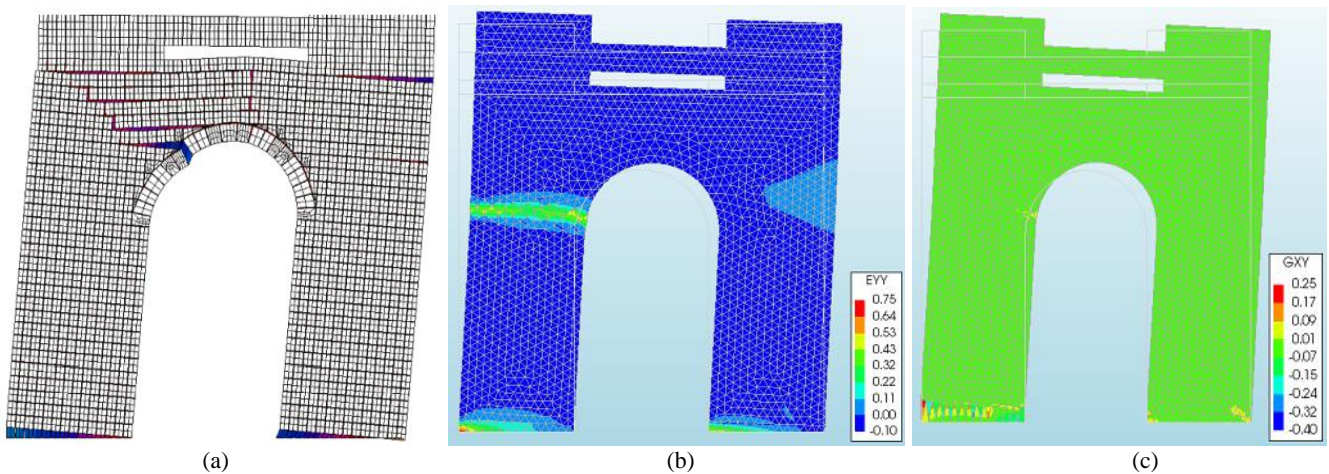


Figura 17. Configuración deformada en el estado final del muro para una carga de 0,5MPa, (a) Modelo fisurado Howlander et.al. (2020), (b) Deformación unitaria en dirección vertical en el modelo simplificado y (c) Deformación por corte en el modelo simplificado.

4.2. Comportamiento del modelo de mampostería reforzada con flejes

Las curvas de capacidad obtenidas nos indican la resistencia máxima tanto para 0,2MPa y 0,5MPa las cuales se indican en la tabla 3. En la figura 18 (a) y (b) se puede observar gráficamente el mejoramiento que presenta la mampostería cuando se le aplica flejes de acero y como su rigidez inicial elástica aumenta.

Tabla 3. Cargas máximas obtenidas del muro de mampostería reforzada con flejes

Muro	Sin Ref. (KN)	Con Flejes (KN)	Mejoramiento (%)
Muro 0,2MPa	47,57	62,51	31,41
Muro 0,5MPa	76,37	90,06	17,93

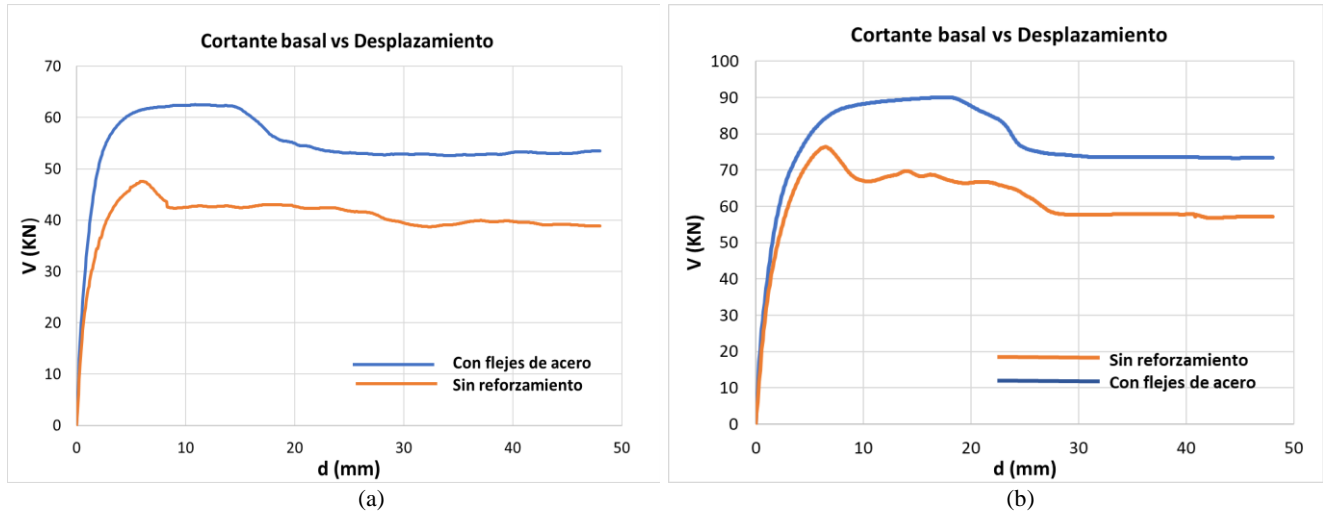


Figura 18. Curva de capacidad para mampostería reforzada con flejes de acero (a) 0,2MPa y (b) 0,5MPa.

4.2.1. Deformación unitaria del muro de mampostería con flejes de acero

En la gráfica 19 (a) y 20 (a) tanto para 0,2MPa como para 0,5MPa se observan mayores deformaciones a compresión en la esquina del muro provocando aplastamientos y deformaciones

concentradas por corte diagonal en el arco del muro.

A partir de las gráficas 19 (b) y 20 (b) de deformación unitaria por corte para 0,2MPa y 0,5MPa se observan fisuras en la parte superior del arco por corte diagonal mientras que en la base del muro observamos fallas a fricción a cortante.

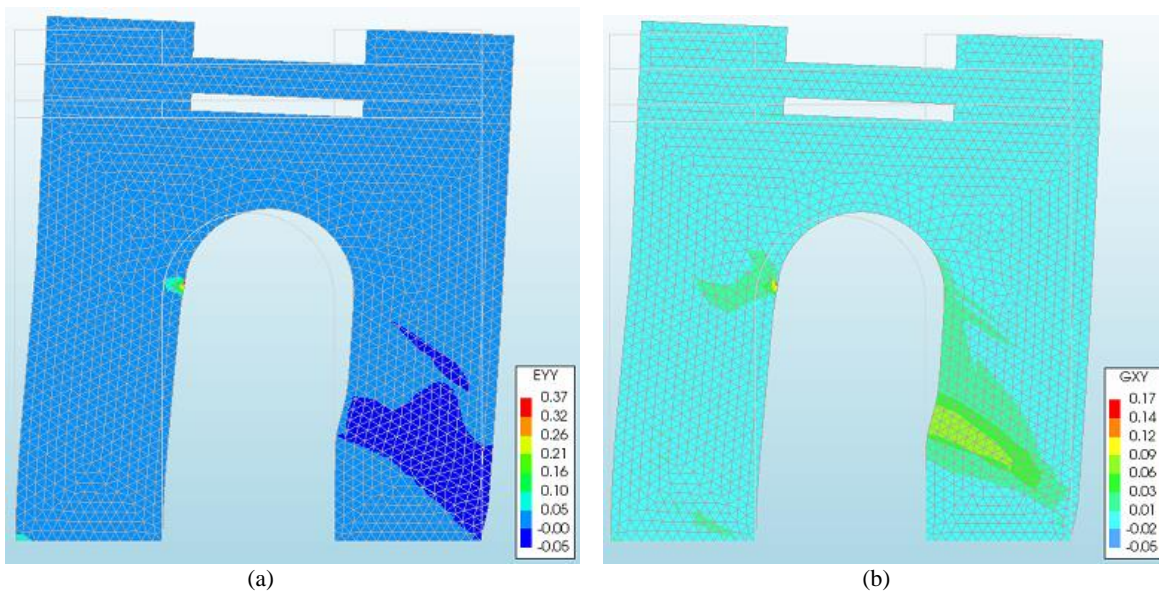


Figura 19. Muro de mampostería reforzado con flejes de acero, para una carga de 0,2MPa. (a) Deformación unitaria en el eje Y. (b) Deformación por cortante.

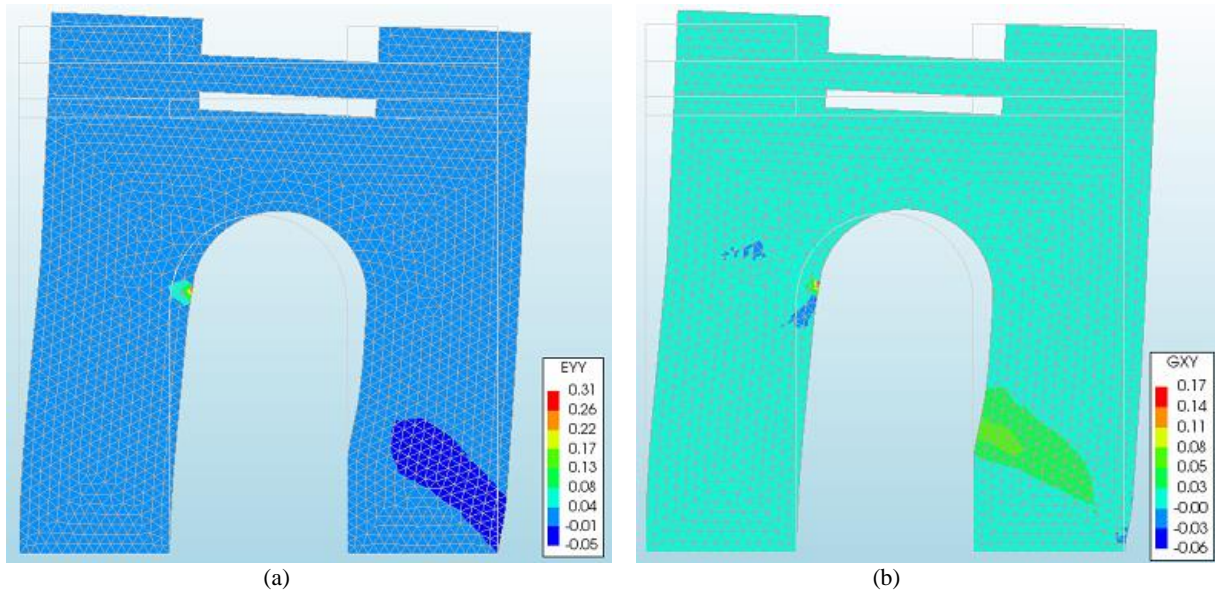


Figura 20. Muro de mampostería reforzado con flejes de acero, para una carga de 0,5MPa. (a) Deformación unitaria en el eje Y. (b) Deformación por cortante

4.3. Comportamiento del modelo de mampostería reforzada con flejes y anclajes

En la tabla 4 se indica la resistencia máxima obtenida para la mampostería reforzada mediante flejes de acero más anclajes tanto para 0,2MPa y 0,5MPa con el porcentaje de mejoramiento respecto a los dos casos anteriores. En la figura 21 (a) y (b) se puede observar gráficamente el mejoramiento que presenta la mampostería cuando se le aplica flejes de acero más anclajes y como su rigidez inicial elástica aumenta.

Tabla 4. Cargas máximas obtenidas del muro de mampostería reforzada con flejes

Muro	Sin Ref. (KN)	Con Flejes más anclajes (KN)	Mejoramiento (%)
Muro 0,2MPa	47,57	68,195	43,36
Muro 0,5MPa	76,37	101,5	32,91

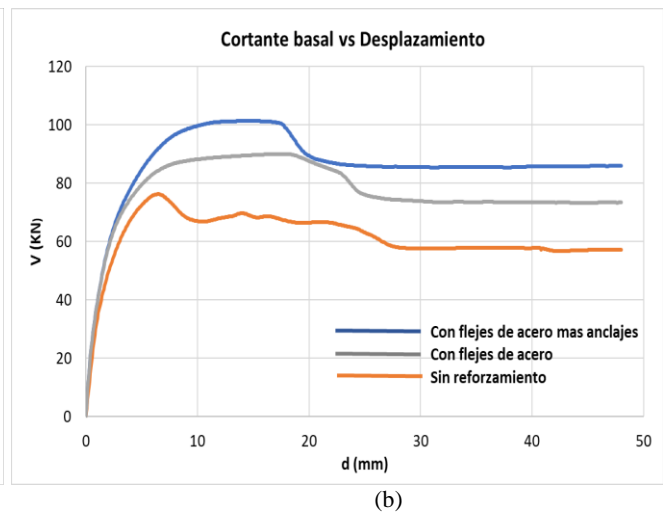
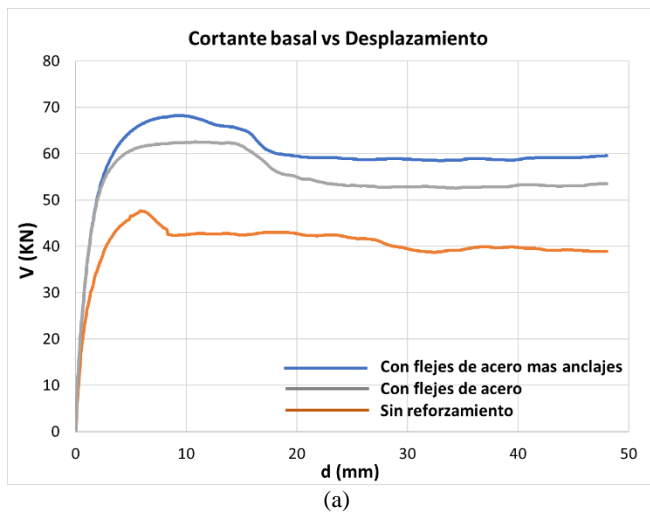


Figura 21. Curva de capacidad para mampostería reforzada con flejes de acero más anclaje (a) 0,2MPa y (b) 0,5MPa.

4.3.1. Deformación del arco de mampostería reforzada con flejes de acero más anclajes

En la gráfica 22 (a) y 23 (a) podemos observar fallas por fricción a cortante en las esquinas del

muro provocando deslizamientos y una pequeña falla por corte diagonal en el arco del muro.

Tanto para la gráfica de deformación unitaria por corte 22 (b) y 23 (b) se puede observar una fisura a corte diagonal en la parte inicial del arco y fisuras por fricción a cortante en la parte inferior del muro provocando así agrietamientos.

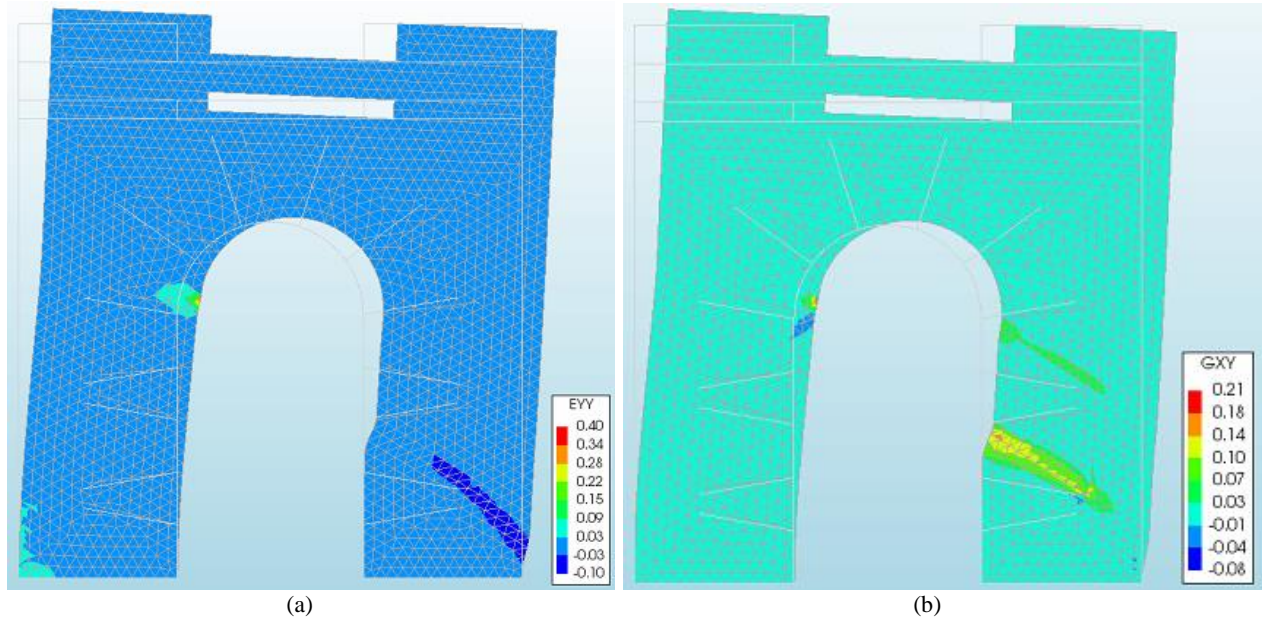


Figura 22. Muro de mampostería reforzado con flejes de acero más anclajes, para una carga de 0,2MPa. (a) Deformación unitaria en el eje Y. (b) Deformación por cortante.

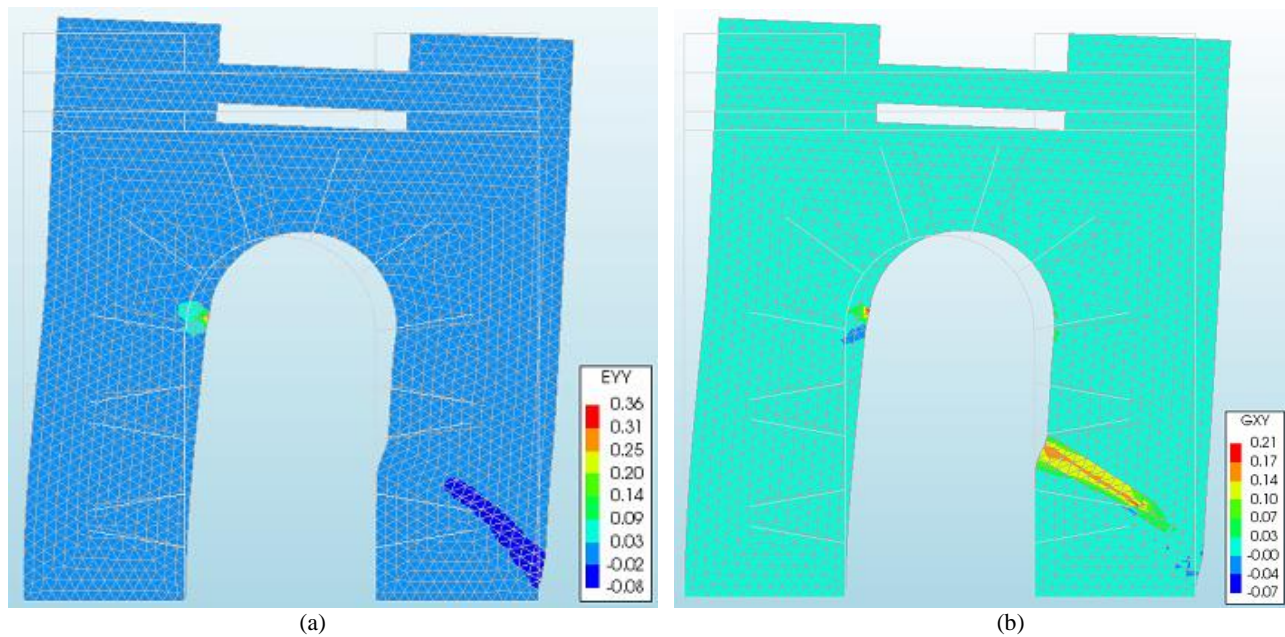


Figura 23. Muro de mampostería reforzado con flejes de acero más anclajes, para una carga de 0,5MPa. (a) Deformación unitaria en el eje Y. (b) Deformación por cortante.

5. Conclusiones

Se concluye que a partir del modelamiento realizado en el software DIANA 10.2 del muro de mampostería de un solo material homogéneo e isotrópico, se logró captar de una manera casi exacta el modelo desarrollado por Howlander et.al. (2020). desde su comportamiento hasta la curva de capacidad del muro.

La modelación mediante el software SAP2000-V19, nos ayudó a determinar que un muro de mampostería no es factible en el rango no lineal.

A partir de los resultados obtenidos de la curva de capacidad para la mampostería no reforzada se obtuvo que entre el modelo de Howlander et.al. (2020) y el modelo homogenizado tanto para la carga de precompresión de 0,2MPa y 0,5MPa se obtuvo un error de 2,08% y 1,02% respecto a la carga máxima obtenida.

Con base a los resultados obtenidos para una carga de precompresión de 0,2MPa y 0,5MPa, se puede argumentar que el reforzamiento más adecuado para este tipo de estructuras es el de flejes de acero más anclajes presentando una mejora en el modelo de 43,36% y 32,91% respectivamente.

Se puede observar a partir de las gráficas obtenidas por medio del software DIANA 10.2 que se logró captar el comportamiento de la mampostería por corte diagonal, aplastamiento y deslizamiento, además podemos observar que en la mampostería con reforzamiento de anclajes de acero mas flejes existe menor daño en la estructura produciendo mínimas fallas frente a cargas de precompresión vertical y desplazamiento horizontal.

Agradecimiento

Queremos agradecer al Profesor Doctor Cristián Sandoval de la Pontifica Universidad Católica de Chile, por el apoyo a esta investigación con la licencia del software DIANA FEA y el acceso al computador del Departamento de Ingeniería

Estructural y Geotécnica, para la realización de los cálculos efectuados.

Referencias

- [1] C. Véliz, "Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Edificios de Hormigón Armado: Aplicación al Área Urbana del Centro Histórico de la Ciudad de Portoviejo", Instituto Politécnico Leiria: Leiria, Sep. 2018.
- [2] P. Coronel, "Análisis de capacidad sismorresistente de edificaciones de mampostería de ladrillo con viga de atado típicas del Centro Histórico de la ciudad de Cuenca"[Tesis grado], Universidad de Cuenca, Cuenca- Ecuador, 2020.
- [3] J. Chacón, «Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta,» *Revista Politécnica,*, vol. 47, n° 1, p. 15, 2020.
- [4] Howlander, Masias y Griffith, «Numerical analysis and parametric study of unreinforced masonry walls,» *Engineering Structures,* vol. 17, n° 110337, pp. 1-15, 2020.
- [5] T. Cordero, «Estudio del cambio en las propiedades dinámicas de las estructuras de mampostería por efecto del deterioro de los materiales [Tesis de grado],» Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes , 2013.
- [6] D. Systemes, «Modelo de plasticidad de Von Mises,» SOLIDWORKS 2010 SP05, 2002. [En línea]. Available: [http://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Material_models/von_Mises_Plasticity_Model_\(Kinematic_Isotropic\).htm](http://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Material_models/von_Mises_Plasticity_Model_(Kinematic_Isotropic).htm). [Último acceso: 31 Enero 2022].
- [7] F. Lizárraga, «Comportamiento de muros de mampostería confinada con distintas configuraciones [Tesis de grado],» Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2011.

- [8] M. Paredes, «Evaluación del desempeño sismorresistente de un edificio destinado a vivienda en la ciudad de Lima aplicando el análisis estático no lineal pushover [Tesis de grado],» Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, 2016.
- [9] Y. Salcedo, «Desempeño sísmico por el método Pushover de un edificio construido en la ciudad de Barranquillabajo la norma NSR-10. [Tesis de grado],» Universidad de la Costa, Barranquilla, 2017.
- [10] A. Z. y. P. Martí, «Modelado y análisis Pushover de la respuesta sísmica de estructuras de acero [Trabajo de Maestría],» Universidad Politecnica de Cartagena, Colombia- Cartagena, 2017.
- [11] N. Aguera y C. F. M. Tornello, «Mampostería no reforzada bajo carga axial y horizontal con desplazamiento controlado,» *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, vol. XXXII, n° 4, pp. 777-791, 2013.
- [12] T. Deft, «DIANA FEA,» 2003. [En línea]. Available: <https://dianafea.com/why-diana>. [Último acceso: 7 Enero 2022].
- [13] M. Puglisi, «Modelo del comportamiento de la mampostería confinada basada en la teoría del daño [Tesis de grado],» Universidad de los Andes , Venezuela, 2007.
- [14] DIANA, «Manual DIANA 10.2 (Druker-Prager),» 2017. [En línea]. Available: <https://dianafea.com/manuals/d102/MatLib/node317.html#58767>. [Último acceso: 24 Enero 2022].
- [15] DIANA, «Manual DIANA 10.2 (Fricción de Coulomb),» 2017. [En línea]. Available: <https://dianafea.com/manuals/d102/MatLib/node418.html>. [Último acceso: 23 Enero 2022].
- [16] D. Rado, «Estabilidad II (Teorías de fallas o de comparación),» Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, 2010.
- [17] V. González, C. Botero, R. Rochel, J. Vidal y M. Álvarez, «Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia,» *Ingeniería y Cienas ISSN*, vol. 1, n° 1, pp. 67-76, 2005.
- [18] CSI, «"CSI SPAIN," SAP 2000,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>. [Último acceso: 7 Enero 2022].
- [19] Software, «"Software Shop",» 2021. [En línea]. Available: <https://www.software-shop.com/producto/sap2000>. [Último acceso: 7 Enero 2022].
- [20] R. Drysdale, A. Hamid y L. Baker, «Estructuras de mampostería: comportamiento y diseño,» Prentice Hall , Prentice Hall 0135620260, 1994.
- [21] Estándar y Australia, «Estructuras de mampostería: Apendice C- Metodo de prueba para compresión,» AS3700 Standards Australia Limited, Australia, 2018.
- [22] Estándar y Australia, «Unidades de mampostería, adoquines y banderines segmentados: metodos de prueba, Metodo 15: Determinación del módulo de ruptura lateral,» AS/ NZS 4456.15, Estandares Australia Limited and Standards Nueva Zelanda, Australia y Nueva Zelanda, 2003.
- [23] Norma_Europea, «Metodos de prueba para mampostería- Parte 3: Determinación de la resistencia a la cizalladura,» Codigo de diseño EN 1052-3, comite Europeo de estandarización, Bruselas Belgica , 2002.
- [24] R. Petersen, «Comportamiento de corte en el plano de paneles de mampostería no reforzados con tiras de polímero reforzado con fibra [Tesis doctoral],» Escuela de Ingeniería Universidad de Newcastle, Australia, 2009.
- [25] K. Espinoza y E. Pazmiño, «Evaluación experimental de las propiedades mecánicas de los aceros estructurales, A-36, A-572 y A-588, para la obtención de los diagramas de esfuerzo- deformación [Tesis de grado],» Pontifica Universidad Católica del Ecuador , Ecuador-Quito, 2019.

- [26] ASTM-A36(America), «Standard Specification for Carbon Structural Steel,» 2017.
- [27] N. López, R. Ugel y R. Indira, «Análisis no lineal de una junta experimental de columna y vigas de concreto armado-columna de acero para pórticos,» *Revista Gaceta Tecnica* , vol. 18, n° 1, pp. 35-52, 2017.
- [28] SAP2000, «SAP2000 Lineal y no lineal Estático y diseño de Estructuras Tridimensionales,» 2006. [En línea]. Available:
https://www.academia.edu/4526431/Linear_and_Nonlinear_Static_and_Dynamic_Analysis_and_Design_of_Three-Dimensional_Structures_GETTING.
[Último acceso: 26 Enero 2022].
- [29] M. Howlader, M. Masia y M. Griffith, «Respuesta en el plano de mampostería perforada no reforzada de muros sometidos a cargas cíclicas: estudio experimental,» *ASCE*, vol. 6, n° 146, pp. 1-18, 2020.
- [30] ICHA, «Alcances normativos, regulatorios y legales del uso del acero estructural según norma NCH203,» Instituto Chileno del Acero, Chile, 2018.