

## MODELACIÓN Y ANÁLISIS MODAL CON ELEMENTOS SÓLIDOS EN SAP2000 DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA SIN REFORZAR.

*C. Isla Vallejos*<sup>1</sup>, *M. Nozaki Uribe*<sup>2</sup> y *C. Oyarzo Vera*<sup>3</sup>

### RESUMEN:

La albañilería desde la antigüedad ha sido uno de los elementos estructurales más empleados debido a la durabilidad de este tipo de estructura. Actualmente, este material es utilizado en muchas construcciones debido a esta característica. Sin embargo, muchas veces los ingenieros estructurales poseen un conocimiento limitado en cuanto al comportamiento de este sistema estructural bajo la acción de solicitaciones extremas. En este estudio se observó el comportamiento modal de un muro de albañilería sin reforzar utilizando el software SAP2000 con el objetivo de evaluar la efectividad de diferentes elementos (*shell* y *solid*) para modelar el comportamiento de este material. Esto se realizó mediante la comparación de los parámetros modales numéricos con los experimentales y el análisis de las tensiones y esfuerzos. Los resultados obtenidos mediante el software no se logran ajustar adecuadamente a las frecuencias identificadas experimentalmente, encontrándose en cambio una similitud significativa al modelarlo con resortes axiales en su base. De esta manera, se prueba que el apoyo del muro de albañilería no aporta la rigidez suficiente para poder considerarlo como un apoyo empotrado. Finalmente, se encontró una diferencia significativa considerando el comportamiento dinámico de la estructura, existiendo en el modelo en elementos tipo *Solid* una disminución de sus frecuencias en un 10%, es así como la modelación basada en elementos tipo *Shell*, corresponde a un método más conservador para análisis del tipo dinámico.

**PALABRAS CLAVES:** Albañilería; Elemento *Shell*; Elemento *Solid*; SAP2000.

### ABSTRACT:

The masonry has been from ancient time a structural element highly used due to its durability. Currently, this type of material is used in construction because of the characteristic already mentioned. However, engineers sometimes do not have enough knowledge about the structural behaviour of this material under extreme conditions. This research analyses modal behaviour of unreinforced masonry walls using SAP2000 to evaluate the effectiveness of different kind of elements (Shell and Solid) for modelling the behaviour of this material. This is performed by comparing the numeric modal parameters with the experimental and the analysis the tensions and stresses. The results obtained by the software show that it is not possible to adjust correctly frequencies which were identified experimentally. However, it was found a significant similarity at the moment of modelling with spring axial in its foundation. In this sense, it was demonstrated that the masonry wall does not give enough rigidity to consider it as fixed. Finally, a significant difference was found considering the dynamic behaviour of the structure, with a 10% decrease in its frequency in the Solid type elements. Thus, modelling based on Shell elements corresponds to a more conservative method for dynamic type analysis.

**KEYWORDS:** Masonry; Shell element; Solid element; SAP2000.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [cisla@ing.ucsc.cl](mailto:cisla@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Macrosteel - Soluciones Integrales de Ingeniería, Chacabuco 485, 5to piso, Concepción, CHILE, [minornozaki@gmail.com](mailto:minornozaki@gmail.com)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [coyartzov@ucsc.cl](mailto:coyartzov@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

La albañilería ha sido uno de los materiales de construcción más utilizados desde el inicio de las civilizaciones. Su construcción consiste en la combinación de rocas, bloques o ladrillos, dispuestas unos sobre otros y unidas por un material adherente conocido como mortero.

Durante estos últimos años se han desarrollado diferentes técnicas de simulación mediante elementos finitos en donde podemos encontrar los Macro-Modelos los cuales son la aproximación más sencilla utilizada para representar estructuras de albañilería en donde representa todos los componentes estructurales a través de a) un modelo de masas concentradas, b) modelos equivalente de marcos, y c) modelos de macro-elementos equivalente. En segundo lugar se encuentran los Micro-Modelos el cual principalmente se centra en un análisis basado en caracterizar cada componente de la albañilería por separado. Estos modelos deben ser capaces de representar cada material por sí solo y la interacción entre ellos. Finalmente, se encuentran los Modelos homogeneizados el cual se orienta la albañilería como un material homogéneo equivalente a las propiedades medias del material combinado (Oyarzo, 2012).

Estas técnicas de modelación hoy en día se utilizan en software comerciales como ETABS, SAP2000, ABAQUS y ANSYS con el fin de obtener mayor precisión en el comportamiento real de la estructura y mejorar la predicción de la salud estructural que esta tendrá frente a excitaciones de carácter eventual donde la mayoría de ellos abordan el problema desde el punto de vista estático, pero no desde el punto de vista dinámico. Es por esta razón que ha surgido un gran interés por desarrollar nuevas metodologías de modelación que también satisfaga los requerimientos provenientes de la dinámica estructural. En especial ha surgido un creciente interés por analizar estructuras patrimoniales con el propósito de conservarlas y prolongando su vida útil teniendo en consideración futuros eventos sísmicos a los que puede estar expuesto. (Figura 1).

Este artículo busca validar distintos tipos de modelación de un muro de albañilería sin reforzar usando SAP2000 con el fin de ajustar el modelo numérico con la estructura física, validar su comportamiento modal comparando los parámetros obtenidos experimentalmente y finalmente, establecer las diferencias que existen en la modelación mediante elementos tipo placa (*shell*) y tipo *solid* de muros de albañilería analizando sus esfuerzos internos, tensiones y frecuencias.



a) Iglesia de Curicó VII Región, Chile



b) Mercado central de Talca VII Región, Chile

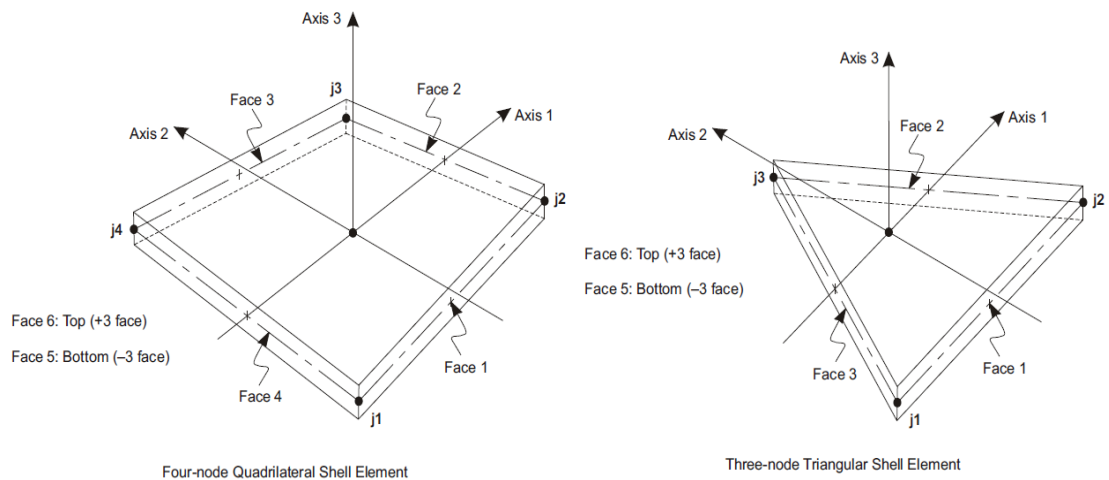
**Figura 1:** Edificios patrimoniales afectados por terremotos en Chile.

## 2. MODELACIÓN NUMÉRICA

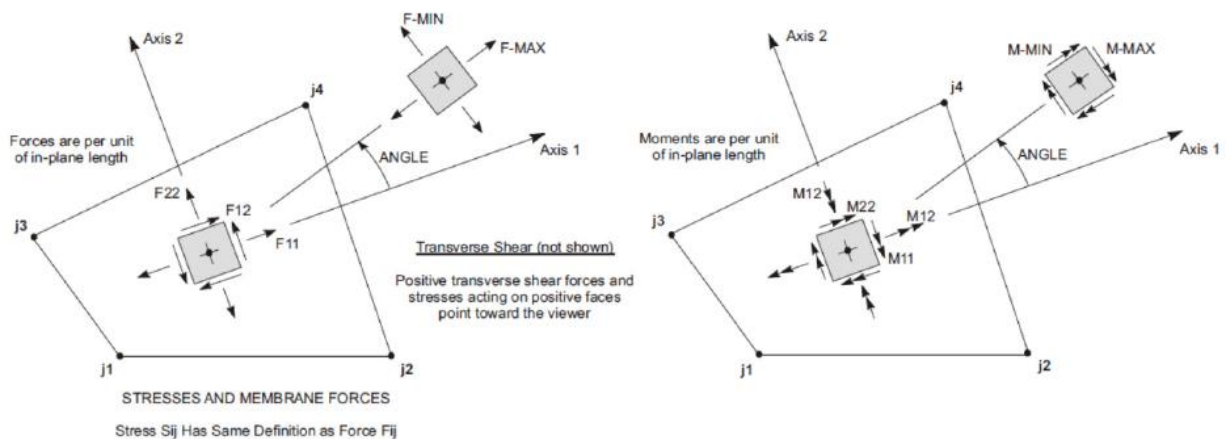
### 2.1. Modelo *Shell*

El modelo de elementos más sencillo y computacionalmente más económico es el modelo del tipo *shell* (Figura 2). Sin embargo, la desventaja de este tipo de modelación es que por lo general no es posible obtener directamente tensiones en el plano transversal (Figura 3). El modelo de elemento *Shell* es una formulación de tres o cuatro nodos. En cada nodo se obtienen 6 grados de libertad con deformación (tres traslaciones  $U_1$ ,  $U_2$  y  $U_3$  y tres rotaciones  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ ). Además, dicho modelo es estable de forma independiente ante cargas perpendiculares y en el plano del elemento.

Los elementos tipo *Shell* se utilizan principalmente para modelar, analizar y diseñar losas, muros o placas sometidas a flexión, corte y fuerza axial (Hernández, 2009).



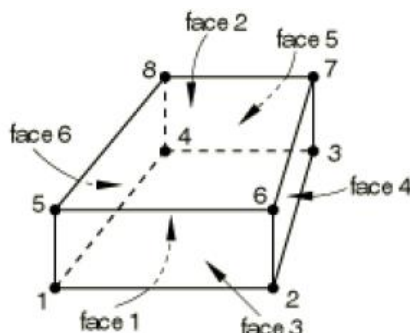
**Figura 2:** Modelo *Shell* (CSI Analysis Reference Manual, 2016).



**Figura 3:** Tensor de tensiones (CSI Analysis Reference Manual, 2016).

## 2.2. Modelo Solid

Otra técnica para la realización de modelos, consiste en la utilización de elementos sólidos (Figura 4). La principal ventaja que tiene este modelo es la obtención directa de las tensiones transversales. Sin embargo, la utilización de este tipo de modelación requiere mayor tiempo de simulación. En cada nodo existen seis grados de libertad, correspondientes a las tres traslaciones y tres rotaciones de un problema tridimensional.



**Figura 4:** Modelo Sólido.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL MURO

El muro de albañilería no reforzada (Figura 5) se construyó en el año 2013 con la finalidad de realizar pruebas modales mediante excitaciones por impacto, para luego comparar dichos resultados mediante modelos construidos con elementos tipo *shell* en el *software* SAP2000 basándose en las propiedades geométricas y mecánicas (Chávez, 2013).

El muro de albañilería fue construido con unidades macizas de ladrillos de arcilla cuyas dimensiones son de 280mm x 140mm x 45mm. Estos ladrillos fueron adheridos con mortero de pega pre-dosificado (TOPEX). En la construcción de dicho muro se siguió un patrón de unión el cual corresponde a dos capas traslapadas y cada tres filas se colocaban ladrillos en dirección opuesta. Además, se construyó en dos etapas, la primera consta de las primeras 10 capas de ladrillos y la segunda corresponde a las siguientes 10 capas. La principal diferencia es la resistencia a la compresión entre las dos etapas, la cual se debe a la dosificación del agua en la preparación del mortero. Finalmente, las dimensiones del panel de albañilería son 1160mm de largo, 1200mm de alto y 290mm de espesor (Chávez, 2013).



**Figura 5:** Muro de albañilería sin reforzar (Chávez, 2013).

## 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

### 4.1. Ladrillo artesanal

#### 4.1.1. Peso específico

El peso específico de la albañilería es el parámetro más importante al momento de determinar las cargas gravitacionales a las cuales serán sometidos los elementos estructurales como muros, pilares y columnas los cuales conforman la estructura. Esto se acentúa en estructuras antiguas, dado su carácter masivo. Debido a la alta variabilidad en el proceso constructivo y la naturaleza de los materiales extraídos de la cantera. Merino (2003) recomienda utilizar un peso específico entre 1800 kg/m<sup>3</sup> y 2400 kg/m<sup>3</sup>, aproximadamente.

Para este estudio el peso específico del ladrillo artesanal que se utilizó es,

$$\gamma_{Lad} = 1800 \frac{kg}{m^3}$$

#### 4.1.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión de los ladrillos depende fundamentalmente de su composición y proceso de cocido. Los ladrillos de fabricación actual tienen resistencias a la compresión de 100 - 150 kg/cm<sup>2</sup> con un máximo de 1000 kg/cm<sup>2</sup> para los ladrillos de arcilla (Merino, 2003).

Para este estudio la resistencia a la compresión que se utilizó fue en base a los resultados obtenidos por Chávez (2013) al material utilizado para construir el muro, el cual se realizó tal como lo establece la NCh 167. Of2001 "Construcción - Ladrillos Cerámicos - Ensayos" (INN-Chile), obteniendo como resultado.

$$f'_{Lad} = 152 \frac{kg}{cm^2}$$

#### 4.1.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad dependerá del tipo de material y fabricación que se compone la unidad de ladrillo. Dada la dificultad de tener una medición precisa del módulo de elasticidad, las normativas internacionales optan por acotarlo dependiendo del tipo de ladrillo. La UIC (UIC778-3) recomienda los siguientes valores del módulo de elasticidad según el tipo de ladrillo (Tabla 1).

**Tabla 1:** Módulo de elasticidad (Em) recomendado por UIC 778-3 (1995)

Tipo de ladrillo	Em [kg/cm <sup>2</sup> ]
Ladrillo Blando	10197- 50985
Ladrillo Medio	50985 - 101971
Ladrillo Duro	101971 - 152957
Ladrillo Clinker	152957 - 203943

El módulo de elasticidad para el ladrillo considerado se determina mediante la expresión  $E_m = k \cdot f'_c$ , Donde k es una constante recomendada por las normas de cada país (R. Lumantarna, 2012). De acuerdo a lo estipulado en NCh 167.Of.2001, el valor de k en Chile se encuentra entre 210 y 1650. Según los resultados experimentales obtenidos por Chávez (2013) se decidió adoptar un valor de k=80, dando como resultado un módulo de elasticidad,

$$E_{Lad} = 12236 \frac{kg}{cm^2}$$

## 4.2. Mortero

El mortero es el componente que aporta menos rigidez al ensamblaje y el mayor responsable en la estimación de deformaciones diferidas e instantáneas para las estructuras de albañilería (Valledor, 2016). En la estructura construida y analizada en el estudio se utilizó el mortero de pega TOPEX el cual está pre dosificado y sólo basta agregar agua para su utilización.

### 4.2.1. Peso específico

El peso específico de los morteros de cal según UIC (1995) varía entre 1530 kg/m<sup>3</sup> y 2100 kg/m<sup>3</sup>. Para este estudio el peso específico utilizado es:

$$\gamma_{Mor} = 2100 \frac{kg}{m^3}$$

### 4.2.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión del mortero (Tabla 2) utilizado modernamente en muros de albañilería está comprendida entre 2 kg/cm<sup>2</sup> y 150 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 2:** Resistencia a la compresión de morteros  $f'_m$  recomendado por UIC 778-3 (1995)

Tipo de mortero	$f'_m$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
De cal	2 - 5
De cal hidráulica	5 - 20
De cemento y cal	20 - 80
De cemento	80 - 150

Se considera las siguientes resistencias (Chávez, 2013):

Etapa 1:

$$f'_{Mor1} = 76 \frac{kg}{cm^2}$$

Etapa 2:

$$f'_{Mor2} = 265 \frac{kg}{cm^2}$$

### 4.2.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad puede variar principalmente según el tipo de mortero y el estado tensional, el cual puede ser difícil de estimar. Además de la variabilidad en los materiales, el módulo elástico también depende del grado de hidratación del material cementicio, la granulometría del árido y de la zona de transición entre cemento - agregado.

Ante la dificultad de realizar y obtener el cálculo del módulo de elasticidad, ciertas normas designan un rango de sugerencia basado en las propiedades y el tipo de mortero. Es el caso de la UIC (1995), cuyos valores sugeridos de módulo elástico en función del tipo de mortero se establecen en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Recomendaciones del UIC (1995) para el módulo de elasticidad según el tipo de mortero.

Tipo de mortero	Em [kg/cm <sup>2</sup> ]
De cal	4078 - 10197
De cal hidráulica	10197 - 20394
De cemento y Cal	20394-61182
De Cemento	61182 - 101971

De acuerdo a Qimbay (s.f.) para determinar el modulo de elasticidad para morteros de resistencia normal con  $f'c$  entre 70 y 210  $kg/cm^2$ .

$$f'_{Mor} = 9100 * \sqrt{f'c} \quad (\text{Con } f'c \text{ en PSI})$$

Para lo tanto el módulo de elasticidad utilizado corresponde a,

Etapa 1:

$$E_{Mor1} = 21093.7 \frac{kg}{cm^2}$$

Etapa 2:

$$E_{Mor2} = 39288.6 \frac{kg}{cm^2}$$

## 5. MODELACION ESTRUCTURAL

### 5.1. Problema dinámico

Se desarrollaron seis modelos de elementos finitos del muro de albañilería no reforzado en el Software comercial SAP2000, con la finalidad de comparar en función de la similitud de frecuencias obtenidas por el modelo computacional, aquellas frecuencias identificadas mediante ensayos de vibración obtenidas experimentalmente por Chávez (2013) la cual se muestran en la Tabla 4.

Estas frecuencias se obtienen mediante los métodos de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD) e Identificación de Sub-espacio Estocástico (SSI).

**Tabla 4:** Frecuencias identificadas mediante ensayos de vibración.

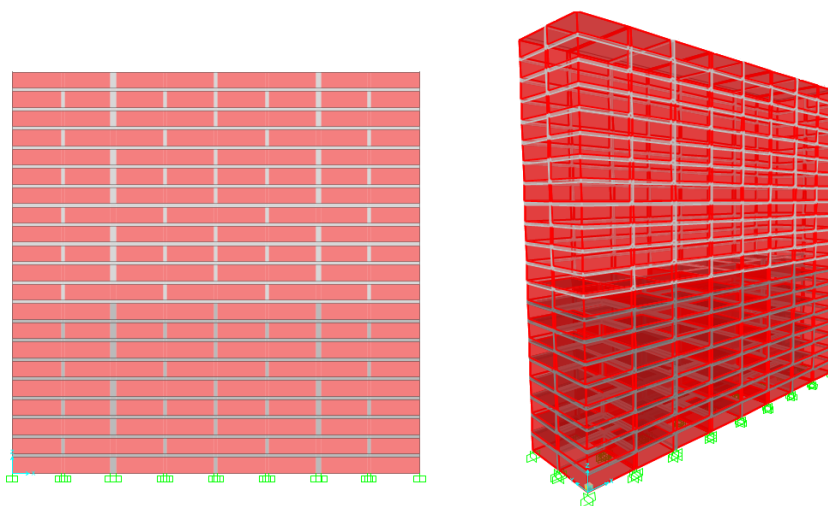
Frecuencias Experimentales	
SSI (Hz)	FDD (Hz)
13.5	13.7
39.3	39.9
59	59.3
67.5	67.4

En las secciones siguientes se muestra el análisis de distintos modelos los cuales es necesario tener en consideración de las propiedades mecánicas de los materiales (ladrillo y mortero) las cuales fueron definidas en el sección 4.

## 5.2. Modelos numéricos

### 5.2.1. Modelo Sólido N°1

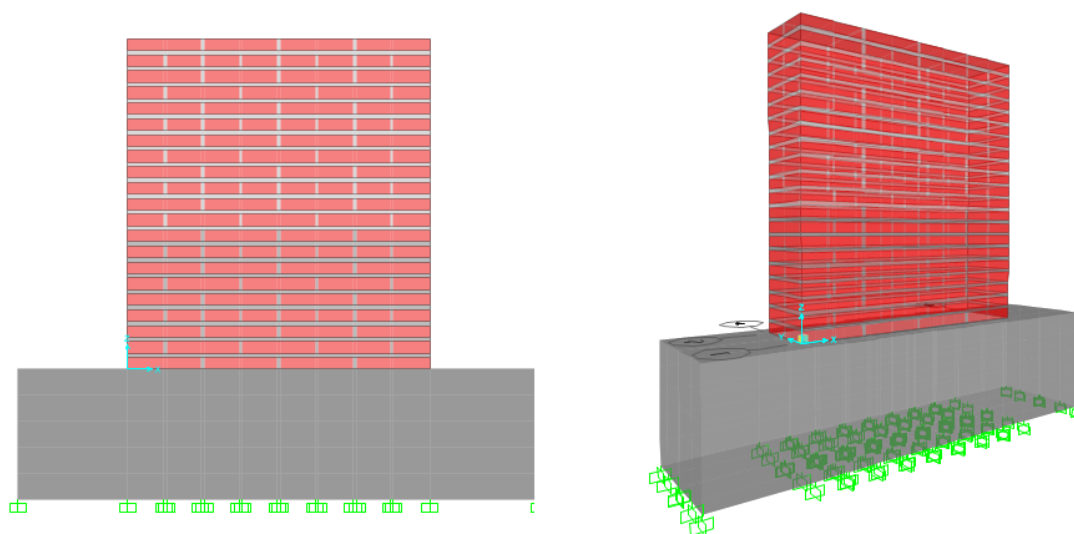
Este modelo fue desarrollado con la propiedad *Solid* incluida en el Software SAP2000 (Figura 6) por lo cual se consideró que el muro de albañilería no reforzada está compuesto de dos materiales homogéneos: el ladrillo y mortero de pega. Se modeló la cantidad total de los ladrillos que componen el muro de albañilería en su forma física, cuyas dimensiones son 280mm x 140mm x 45mm. Además las juntas verticales y horizontales de mortero son de 10mm en todo el paño de albañilería.



**Figura 6:** Modelo Sólido N°1 del muro de albañilería sin reforzar.

### 5.2.2. Modelo Sólido N°2

El modelo sólido N°2 (Figura 7) fue creado con el mismo criterio del modelo Sólido N°1 pero con la diferencia que se modeló la fundación del muro de albañilería en el cual se considera inicialmente empotramiento perfecto en la interfase del muro con el hormigón que compone la fundación. Además se consideró que la fundación modelada se encontraba construida con un hormigón H-25, finalmente la condición de apoyo en la base de la fundación fue asumida restringiendo totalmente los desplazamientos laterales y vertical (U1, U2 y U3).



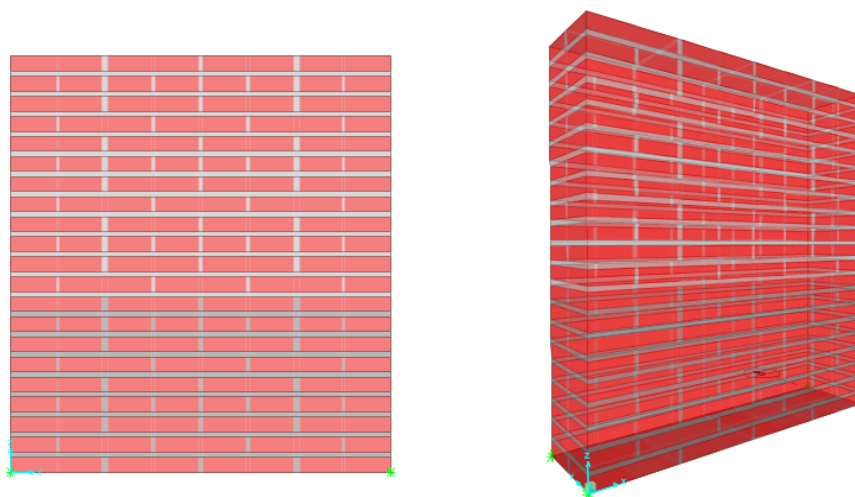
**Figura 7:** Modelo Sólido N°2 del muro de albañilería sin reforzar.

### 5.2.3. Modelo Sólido N°3

El modelo sólido N°3 (Figura 8) fue modelado considerando la siguiente hipótesis: El apoyo o unión de la interface entre el muro de albañilería y la fundación no se encuentra totalmente rígida.

Para esto se considera en la base del muro la propiedad de *Area Spring* que se encuentra incluida internamente en el *software* de acuerdo a las siguientes propiedades:

- En las cuatro esquinas del muro se consideran apoyos traslacionales laterales (U1 y U2).
- Se considera una rigidez axial del resorte de 180000 kg/cm<sup>3</sup>.<sup>4</sup>
- El resorte axial considerado trabaja solamente para cargas de compresión.
- La ubicación del resorte fue integrada en la cara inferior (*Bottom*) de la capa en *Shell* que se modelo al momento de incorporar los resortes.
- La dirección del resorte se ubica paralela al eje local vertical -3.



**Figura 8:** Modelo Sólido N°3 del muro de albañilería sin reforzar.

### 5.2.4. Modelo Sólido N°4

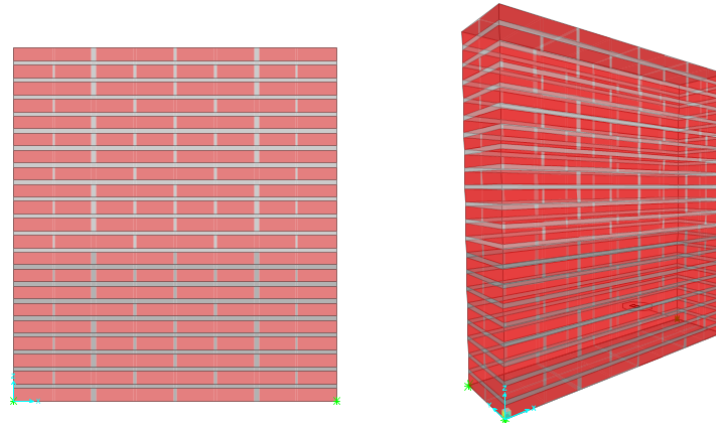
El modelo Sólido N°4 (Figura 9) fue desarrollado con el mismo criterio que el Modelo Sólido N°3, el modelo se desarrolló con la propiedad del *Surface Spring* en el cual tiene el mismo propósito de la herramienta de *Area Spring* solo que no es necesario crear una capa delgada de *Shell* para poder asignar los resortes, esta propiedad tiene la capacidad de incluir el *Spring* en el mismo sólido modelado.

Para esto se consideró en la primera capa de ladrillo la herramienta *Surface Spring* a la que se le asignó las siguientes propiedades:

- En las cuatro esquinas del muro se consideran apoyos traslacionales laterales (U1 y U2).
- Se considera una rigidez axial del resorte de 180000 kg/cm<sup>3</sup>.
- El resorte axial considerado trabaja solamente para cargas de compresión.
- La ubicación del resorte fue integrada en la cara inferior N°1.
- La dirección del resorte se ubicó paralela al eje local vertical -3.

---

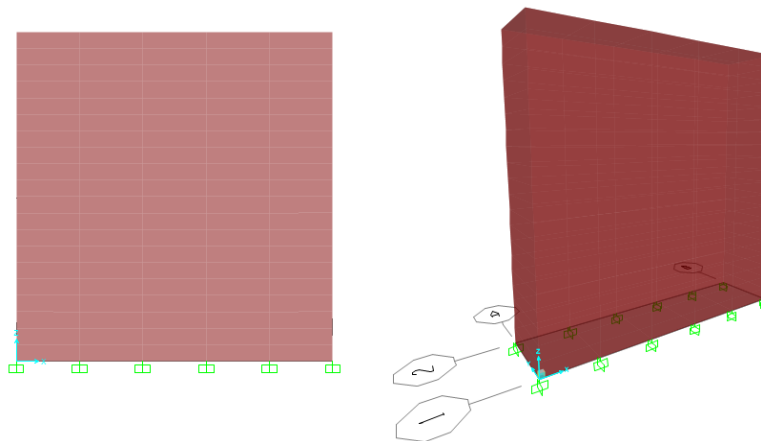
<sup>4</sup> Según Agudelo (2015) establece que el coeficiente de balasto (K30) de una roca blanda o algo alterada la cual se puede asumir como hormigón es de 240000 kg/cm<sup>3</sup>, transformando dicho valor a una fundación de dimensiones B\*L (116cm x 29 cm) da como resultado un coeficiente de balasto de 180000 kg/cm<sup>3</sup>.



**Figura 9:** Modelo Sólido N°4 del muro de albañilería sin reforzar.

#### 5.2.5. Modelo Sólido N°5

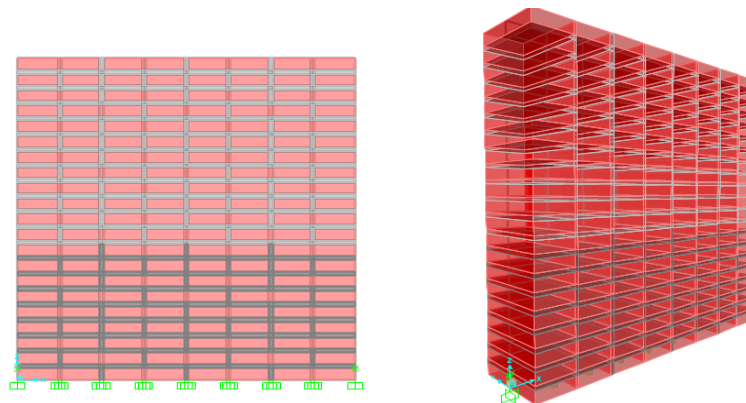
El modelo Sólido N°5 (Figura 10), fue desarrollado homogéneamente con solo la propiedad del ladrillo artesanal, se elaboró con el fin de poder ver el comportamiento modal del muro sin las propiedades del Mortero de Pega y ver si el mortero tiene alguna relevancia en el sentido estructural.



**Figura 10:** Modelo Sólido N°5 del muro de albañilería sin reforzar.

#### 5.2.6. Modelo N°6

El modelo N°6 (Figura 11), se elaboró de forma diferente a los modelos anteriores, ya que se modeló con elementos tipo *shell*. El propósito de esto es comparar los elementos *solid* y *shell* en el ámbito de parámetros modales (frecuencias).



**Figura 11:** Modelo N°6 del muro de albañilería sin reforzar.

### 5.3. Frecuencias numéricas.

Al realizar el análisis modal se obtuvieron las siguientes frecuencias (Tabla 5), cabe destacar que solo se tomaron las primeras cuatro modos obtenidos en el modelo numérico.

**Tabla 5:** Comparación en función de frecuencias.

Modo	Frecuencias Exp.		Modelo N°1	UY (%)	Modelo N°2	UY (%)	Modelo N°3	UY (%)
	SSI (Hz)	FDD (Hz)						
1	13.5	13.7	24.8	62	24.4	27	24.4	60
2	39.3	39.9	58.2	<1	57.7	<1	57.5	<1
3	59	59.3	70.3	<1	69.2	<1	68.2	<1
4	67.5	67.4	132.1	21	128.7	10	120	26

Modo	Frecuencias Exp.		Modelo N°4	UY (%)	Modelo N°5	UY (%)	Modelo N°6	UY (%)
	SSI (Hz)	FDD (Hz)						
1	13.5	13.7	18	77	23.6	61	24.9	64
2	39.3	39.9	39.9	<1	52.7	<1	71	<1
3	59	59.3	46.5	<1	66.2	<1	71.4	<1
4	67.5	67.4	66.8	22	120.6	19	136.8	21

Los resultados obtenidos mediante el Modelo Sólido N°1, evidencian una baja coincidencia entre las frecuencias experimentales y las frecuencias estimadas en el modelo numérico, a pesar de que su participación modal la cual corresponde a un 83% aproximadamente. Esta discrepancia se debe a las consideraciones que se realizaron en el modelo numérico, donde la idealización de los materiales ingresados aumenta la rigidez en la modelación estructural del muro.

En el modelo sólido N°2 siguen la misma tendencia que el modelo sólido N°1 obteniéndose una diferencia porcentual del 2% aproximadamente. Diverge de este resultado el porcentaje de participación modal donde para las primeras cuatro frecuencias la diferencia porcentual llega a un 37% aproximadamente, se puede concluir de los resultados obtenidos para ambos modelos que las condiciones naturales de apoyo del muro no son concordantes a la estructura física.

Al realizar el modelo N°3 mezclando la propiedad de *Area Spring* en un sólido se aprecia que existe una diferencia significativa al igual que los modelos anteriores, incluso al incluir un espesor mínimo de *Shell* en la base.

En el modelo Sólido N°4 es el modelo el cual se ajusto de mejor manera al muro de albañilería, la hipótesis de que el apoyo no se encontraba totalmente rígido es viable como lo demuestra la comparación en similitud de frecuencia y además las primeras cuatro frecuencias tienen un 99% de participación modal.

Las frecuencias obtenidas en el Modelo Sólido N°5 son claramente equivalentes a las obtenidas por los modelos 1 y 2, teniendo solo una diferencia porcentual de un 7%.

Hoy en día el método de modelación más común para muros está basada en el análisis de elementos tipo *Shell* el cual en este estudio lo representa el Modelo N°6. Con los resultados obtenidos en la Tabla 5 se aprecia una notoria diferencia en sus frecuencias junto con el Modelo Sólido N°1, ya que es el único modelo con el que se puede comparar porque el criterio de modelación es semejante tanto en sus dimensiones como sus condiciones de apoyo.

## 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de identificar parámetros (peso específico, módulo de elasticidad o resistencia a la compresión) que influyen más significativamente en la variación de las frecuencias en los modelos.

El análisis se realizó con el Modelo Sólido N°1 ya que este genera empotramientos 100% rígidos en su base. En este modelo se modificaron las propiedades de los dos materiales que componen la albañilería sin reforzar (ladrillo y mortero) con una variación de un  $\pm 30\%$  en cada uno de ellos.

### ➤ Ladrillo

Los valores modificados en la modelación estructural se muestran en Tabla 6

**Tabla 6:** Propiedades del Ladrillo.

Densidad			Módulo de Elasticidad		
Dens_1=	1800	kg/m <sup>3</sup>	Elad_1=	12236	kg/cm <sup>2</sup>
Dens_2=	1260	kg/m <sup>3</sup>	Elad_2=	8565.2	kg/cm <sup>2</sup>
Dens_3=	2340	kg/m <sup>3</sup>	Elad_3=	15906.8	kg/cm <sup>2</sup>

Donde:

Dens\_1, Elad\_1= Densidad y módulo de elasticidad del ladrillo, respectivamente.

Dens\_2, Elad\_2= Densidad y módulo de elasticidad en un 30% menor al valor estándar, respectivamente.

Dens\_3, Elad\_3= Densidad y módulo de elasticidad en un 30% mayor al valor estándar, respectivamente.

En la Tabla 7 y Tabla 8 se muestra un resumen del análisis de sensibilidad junto a la comparación entre las densidades modificadas.

**Tabla 7:** Análisis de sensibilidad a la densidad del ladrillo.

Frecuencias (Hz)			Comparación	
Dens_1	Dens_2	Dens_3	Dens_1 v/s Dens_2	Dens_1 v/s Dens_3
24.8	27.7	22.6	+11.9%	-8.7%
58.2	65.2	53	+12 %	-8.8%
70.3	78.6	64.1	+11.8%	-8.7%
132.1	147.8	120.5	+11.9%	-8.7%

**Tabla 8:** Análisis de sensibilidad al modulo de elasticidad del ladrillo.

Frecuencias (Hz)			Comparación	
Elad_1	Elad_2	Elad_3	Elad_1 v/s Elad_2	Elad_1 v/s Elad_3
24.8	21.6	27.3	-12.9%	+10.4%
58.2	50.3	64.6	-13.6%	+11.0%
70.3	61.3	77.5	-12.7%	+11.3%
132.1	115.1	145.9	-12.9%	+10.5%

En la Tabla 7 se puede apreciar que al aumentar la densidad del ladrillo artesanal se obtiene una disminución de sus frecuencias en un 8.7%. En cambio en la Tabla 8 al disminuir en un 30% el modulo de elasticidad del ladrillo artesanal se observó una disminución aproximada de un 13%.

➤ Mortero

Los valores modificados en la modelación estructural se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10

**Tabla 9:** Propiedades del Mortero en etapa 1.

Densidad			Modulo de Elasticidad		
Dens_1=	2100	kg/m3	Emor_1=	21093.7	kg/cm2
Dens_2=	1470	kg/m3	Emor_2=	14765.6	kg/cm2
Dens_3=	2730	kg/m3	Emor_3=	27421.8	kg/cm2

**Tabla 10:** Propiedades del Mortero en etapa 2.

Densidad			Modulo de Elasticidad		
Dens_1=	2100	kg/m3	Emor_1=	39288.6	kg/cm2
Dens_2=	1470	kg/m3	Emor_2=	27502	kg/cm2
Dens_3=	2730	kg/m3	Emor_3=	51075.2	kg/cm2

Donde:

Dens\_1, Emor\_1= Densidad y módulo de elasticidad del mortero, respectivamente.

Dens\_2, Emor\_2= Densidad y módulo de elasticidad en un 30% menor que el valor estándar, respectivamente.

Dens\_3, Emor\_3= Densidad y módulo de elasticidad en un 30% mayor que el valor estándar, respectivamente.

En la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 se encuentra el análisis de sensibilidad junto a la comparación entre densidades y modulo de elasticidad, respectivamente.

**Tabla 11:** Análisis de sensibilidad a la densidad del Mortero

Frecuencias (Hz)			Comparación	
Dens_1	Dens_2	Dens_3	Dens_1 v/s Dens_2	Dens_1 v/s Dens_3
24.8	26.08	23.63	+5.3%	-4.5%
58.2	61.22	55.59	+5.1%	-4.4%
70.3	74.02	67.02	+5.3%	-4.6%
132.1	139.07	126.03	+5.3%	-4.5%

**Tabla 12:** Análisis de sensibilidad al módulo de elasticidad del Mortero en etapa 1.

Frecuencias (Hz)			Comparación	
Emor_1	Emor_2	Emor_3	Emor_1 v/s Emor_2	Elad_1 v/s Emor_3
24.8	23.8	25.4	-3.9%	+2.7%
58.2	56.8	59.1	-2.4%	+1.5%
70.3	67.7	72.1	-3.7%	+2.6%
132.1	129.2	134	-2.2%	+1.4%

**Tabla 13:** Análisis de sensibilidad al módulo de elasticidad del Mortero en etapa 2.

Frecuencias (Hz)			Comparación	
Emor_1	Emor_2	Emor_3	Emor_1 v/s Emor_2	Elad_1 v/s Emor_3
24.8	23.8	25.4	-0.5	+0.3%
58.2	56.8	59.1	-1.3	+0.9%
70.3	67.7	72.1	-0.8	+0.6%
132.1	129.2	134	-2.2	+1.6%

En el análisis de sensibilidad en el mortero se aprecia que la diferencia porcentual es mucho menor e incluso insignificante que en caso del ladrillo artesanal. Al aumentar en un 30% en la densidad existe una disminución de sus frecuencias en un 5.1% y, en el caso de disminuir, el módulo de elasticidad existe una reducción de sus frecuencias en un 3%. Esto quiere decir que las propiedades del mortero no influyen muy significativamente en la respuesta dinámica de la estructura.

## 7. COMPARACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS Y FRECUENCIAS DE MODELOS CON ELEMENTOS TIPO *SHELL* Y *SOLID*.

Se generaron tres modelos representativos de un muro de albañilería con el fin de observar y realizar una comparación de las diferencias que existen en el sentido estático (tensiones y esfuerzos) y dinámico (frecuencias) de la estructura.

Las dimensiones del muro son 1160 mm de largo, 1200 mm de alto y 290 mm de espesor. Los modelos están elaborados en elementos tipo *shell* y *solid*. Los primeros dos modelos se elaboraron con un solo material homogéneo con las propiedades obtenidas mediante un ensayo de prisma (Chávez, 2013) las cuales se muestran en la Tabla 14 y el tercer modelo *solid* se realizó modelando el ladrillo artesanal y el mortero por separado con las propiedades entregadas en la sección 4.

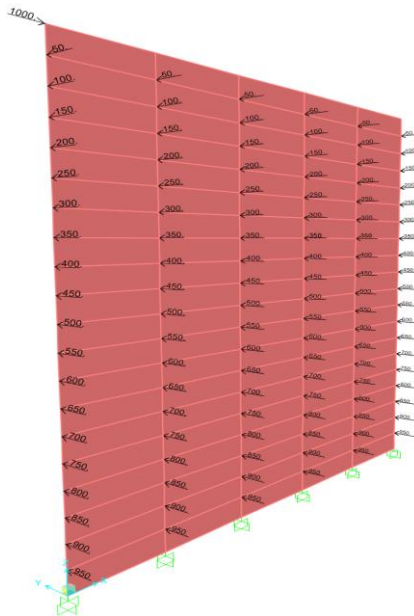
A cada modelo se aplicó una carga de corte superior de 1000 kg y además se agregó una carga distribuida en los nodos la cual varió de 0 a 950 kg. Cabe destacar que la principal diferencia a la asignación de la carga de corte superior en los dos tipos de modelación es que en el caso del elementos *solid* se debe distribuir en ambos nodos superiores.

**Tabla 14:** Propiedades mecánicas del Prisma (Ladrillo artesanal y mortero)

	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	M. Young (kg/cm <sup>2</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Valor medio	62	6057	1591

### 7.1. Muro en elementos tipo *Shell*

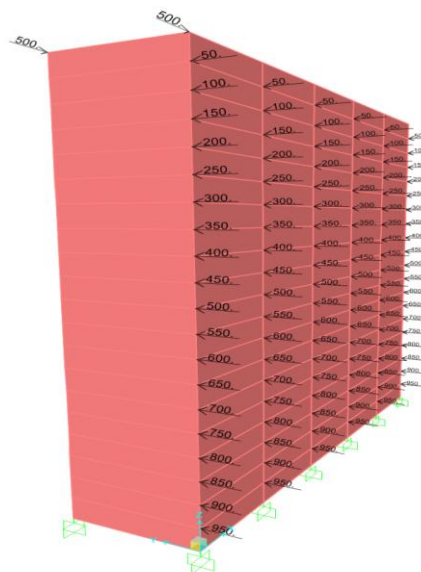
Se elaboró una plantilla de dimensiones 1160 mm en dirección horizontal y 1200 mm en dirección vertical y considerando un espesor de 290 mm (*shell section data*). Cabe señalar que la grilla definida se ajusta a las dimensiones aproximadas del ladrillo (Figura 12).



**Figura 12:** Modelo Tipo Shell.

### 7.2. Muro en elementos tipo *Solid* homogéneo

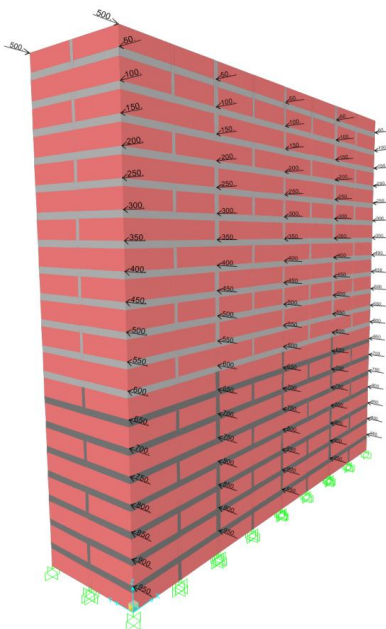
Para el caso del muro en elementos *solid* se elaboró un bloque homogéneo con las mismas dimensiones del muro en Shell (1160 mm x 1200 mm x 290 mm) dividiendo cada elemento de acuerdo a las dimensiones aproximadas del ladrillo (Figura 13). En este caso la carga aplicada se distribuye en los dos nudos del extremo superior considerando 500 kg en cada uno de ellos (Figura 13).



**Figura 13:** Modelo Tipo Sólido.

### 7.3. Muro en elementos tipo *Solid*

Además de realizar los modelos homogéneos en ambos tipos de elementos (*Shell* y *Solid*) se elaboro un tercer modelo (Figura 14) que consta en la modelación de los materiales por separado (Ladrillo artesanal y mortero), las propiedades utilizadas de estos materias fueron definidas en la sección 4.



**Figura 14:** Modelo Tipo Sólido con materiales por separado.

### 7.4. Tensiones de corte y momento

Para obtener el corte y momento a lo largo de ambos muros homogéneos se utilizó la aplicación de SAP2000 *DRAW SECTION CUT* trazando una horizontal en el muro y creando grupos en la base, centro y superior del muro, de dicho análisis se obtienen los siguientes resultados tanto en el muro *shell* como en el modelo *solid* (homogéneo), respectivamente (Tabla 15 y Tabla 16).

**Tabla 15:** Resultados obtenidos por Modelo *Shell*.

SectionCut	F1 (kgf)	F2 (kgf)	F3 (kgf)	M1 (kgf -m)	M2 (kgf -m)	M3 (kgf -m)
Corte y Momento Shell (base)	-1000	-57000	0	23940	-1200	0
Corte y Momento Shell (Centro)	-1000	-13500	0	2970	-600	0
Corte y Momento Shell (Superior)	1000	0	0	0	0	0

**Tabla 16:** Resultados obtenidos por Modelo Sólido.

SectionCut	F1 (kgf)	F2 (kgf)	F3 (kgf)	M1 (kgf -m)	M2 (kgf -m)	M3 (kgf -m)
Corte y Momento Sólido (base)	-1000	-57000	0	23940	-1200	0
Corte y Momento Sólido (Centro)	-1000	-13500	0	2970	-600	0
Corte y Momento Sólido (Superior)	1000	0	0	0	0	0

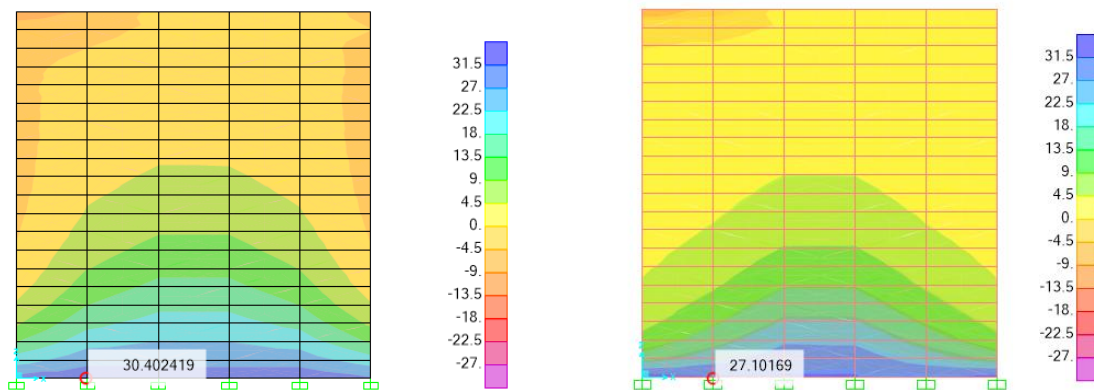
En las Tabla 15 y Tabla 16 es posible observar que los resultados entregados para modelaciones basadas en ambos tipos de elementos homogéneos son idénticos en relación a sus tensiones de corte y momentos.

### 7.5. Esfuerzos

A continuación se presenta una comparación entre la relación de esfuerzos internos para modelaciones basadas en *Shell* y modelos *Solid*, respectivamente.

➤ Modelo N°1 (homogéneo)

La diferencia de esfuerzos S11 y S22 entre los modelos basados en elementos tipo *Shell* y *solid* es insignificante como se puede apreciar en la Figura 15 donde existe una diferencia porcentual en sus esfuerzos máximos S11 de un 6%.

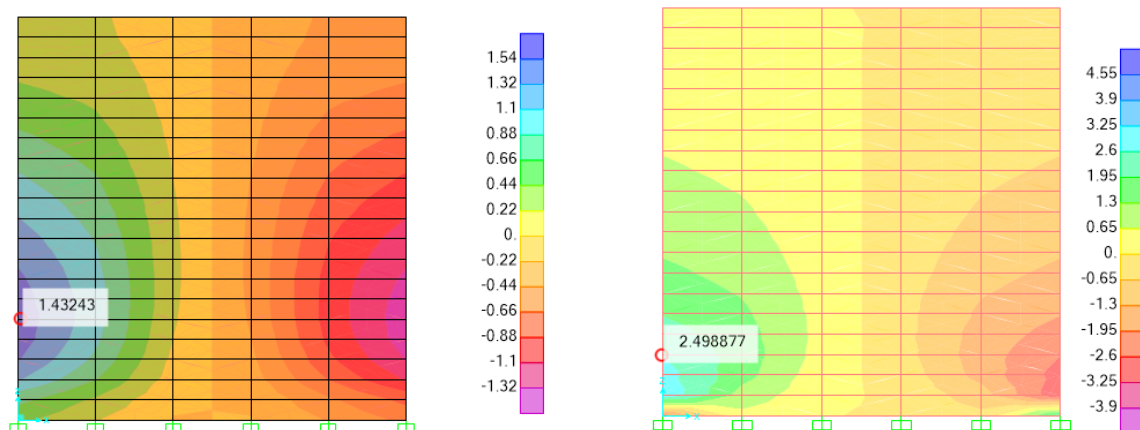


a) Modelo *Shell*

b) Modelo *Solid*

**Figura 15:** Distribución de esfuerzos máximo S11 en modelo N°1.

A pesar que estas diferencias las cuales son despreciables la mayor discrepancia se encuentra en los esfuerzos de corte, donde es posible encontrar una diferencia porcentual máxima del esfuerzo S13 de un 43% (Figura 16).

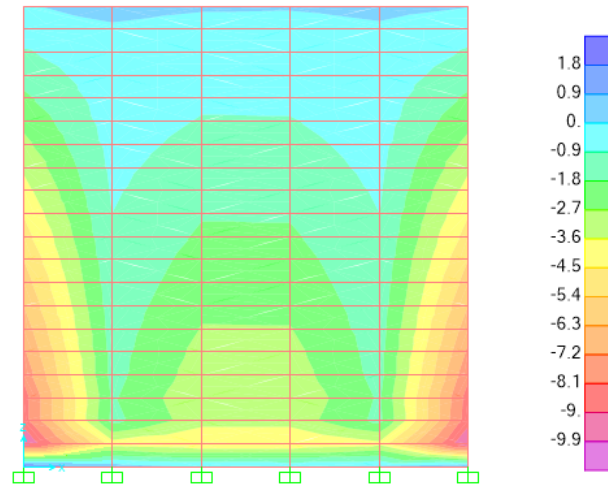


a) Modelo *Shell*

b) Modelo *Solid*

**Figura 16:** Distribución de esfuerzos máximo S13 en modelo N°1.

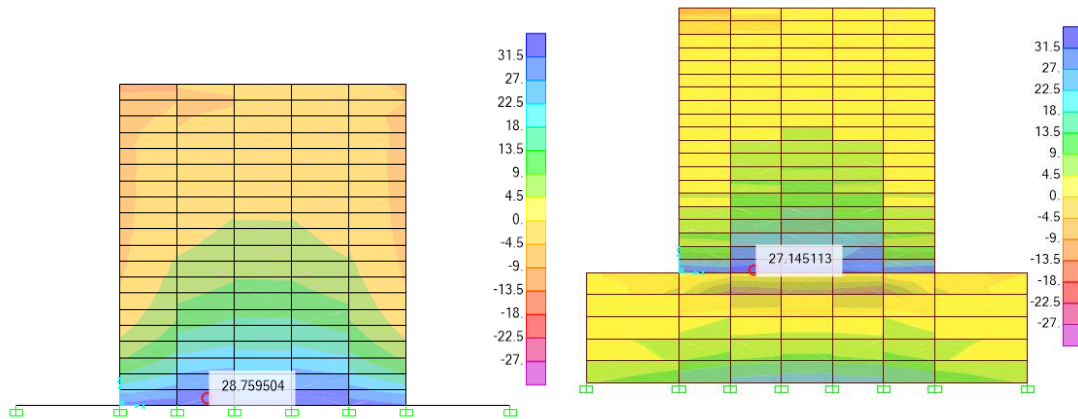
Cabe señalar que la mayor diferencia en ambos tipos de elementos es que en el modelo *Shell* no es posible obtener los esfuerzos perpendiculares al plano del muro de albañilería que en el caso de esta modelación es el esfuerzo S33. En cambio en el modelo sólido es posible obtenerlo (Figura 17), al igual que todos los esfuerzos de las seis caras que compone el elemento.



**Figura 17:** Distribución de esfuerzos máximo S33 en modelo N°1.

➤ Modelo N°2 (homogéneo)

Al igual que las diferencias entre esfuerzos encontradas en el modelo N°1, se obtuvieron en el modelo N°2 logrando encontrar una discrepancia de un 6% en los esfuerzos S11 (Figura 18).



a) Modelo *Shell*

b) Modelo *Solid*

**Figura 18:** Distribución de esfuerzos máximo S11 en modelo N°2.



### 7.6. Comparación de la respuesta modal entre el modelo tipo *Shell* y *Solid*.

Se realizó un análisis modal el cual corresponde a un proceso que describe una estructura en términos de sus propiedades dinámicas: frecuencias, amortiguamiento y modos de vibrar. Estos parámetros dependen principalmente de la masa y la rigidez de la estructura. La utilización de este análisis es de suma relevancia para un modelo estructural, ya que proporciona una descripción definitiva del comportamiento de una estructura en términos dinámicos.

En este ítem (Tabla 17) se muestran la comparación entre las frecuencias entre ambos tipos de elementos homogéneos (Figura 12 y Figura 13) en la modelación básica del muro los cuales se realizaron restringiendo sus 6 grados de libertad.

**Tabla 17:** Comparación de frecuencias numéricas.

<b>Modelo Prisma</b>		
Sólido	Shell	%
19	19.5	2.7
41.1	48.6	15.4
53.5	53.5	0.1
91.3	103.3	11.6
108.1	127.6	15.3
122.7	133.3	7.9
127.6	144.8	11.9
144.4	149.6	3.4
177.4	222	20.1
204.1	224.7	9.2
209.5	243.8	14.1
220.6	253	12.8
Promedio=		10.4%

En la Tabla 17 se observa una diferencia porcentual de un 10% en los primeros 12 modos de vibrar (los cuales alcanzaron el 90% de participación modal) en donde existe una diferencia significativa en el comportamiento dinámico de la estructura.

## 8. CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados, es posible apreciar diferencias notorias entre el comportamiento del modelo y el medido experimentalmente. Esto radica principalmente en el comportamiento anisotrópico de los materiales que componen la albañilería no reforzada, lo cual influye de gran manera en el proceso de fabricación de los mismos provocando que el comportamiento del muro sea distinto en cada dirección.

El modelo Sólido N°4 con *Surface Spring* se ajusta de mejor manera a la respuesta experimental en término de frecuencias. Esto se debe principalmente a la modelación de las condiciones de borde ideales a través de resortes lineales.

En el análisis de sensibilidad realizado al modelo numérico, se obtuvo una diferencia despreciable desde el punto de vista dinámico cuando se utiliza las propiedades del mortero. En tal caso se encontró una diferencia porcentual promedio de solo un 3%. En el caso del ladrillo se encontró la mayor diferencia porcentual al modificar el módulo de elasticidad lo cual provocó una reducción de las frecuencias numéricas en relación a las observadas con un valor promedio de 13%.

Al realizar los modelos sin las capas de mortero de pega horizontales y verticales existe una diferencia promedio de un 11,4% en las primeras 12 frecuencias y un 6.8% en las frecuencias con mayor participación modal en comparación al modelo Sólido N°1 (Modelo Básico). Esto implica que las

propiedades del mortero no aportan de manera significativa mayor rigidez al modelo numérico.

El muro de albañilería construido no es del todo representativo para estudios de evaluación estructural de patrimonios en el sentido dinámico, ya que, como se demostró en el presente artículo el modelo físico no genera empotramientos 100% rígidos en su base. Para estudios posteriores se recomienda rigidizar la interface del muro de albañilería con la fundación y además obtener de mejor manera el módulo de elasticidad del ladrillo artesanal que se está utilizando, pues varía de gran manera en su composición.

El diagrama de esfuerzos en elementos finitos para modelaciones basadas en elementos tipo *Shell* no presenta continuidad en los bordes como es en el caso de los elementos sólidos. Con lo que no se logran evitar saltos de tensión entre elementos por muy pequeñas sean las diferencias. Esto se debe a que la formulación del elemento no es 100% compatible para esfuerzos de borde.

Se resolvieron satisfactoriamente las primeras dos estructuras homogéneas con los diferentes tipos de elementos en estudio aplicando la herramienta *Section cut* confirmando que es aplicable en la evaluación de cargas y esfuerzos resultantes en elementos *Shell* y *Solid*. Las fuerzas de corte y momento en ambos tipos de elementos se comportan de igual forma ya que los resultados obtenidos son prácticamente idénticos. Esto se debe mayoritariamente al tamaño de la estructura y asignaciones de carga.

Al comparar los esfuerzos de las estructuras (S11, S22, S33, S12, S13 y S23) se pueden observar algunas diferencias entre los dos tipos de elementos (*Shell* y *Solid*), pero no es posible determinar cuál es más conservador.

La mayor diferencia entre ambos tipos de modelaciones se encontró al modelar el muro con ambos tipos de materiales que componen la albañilería (Ladrillo y mortero) donde se encontró una discontinuidad de esfuerzos, la cual es producto de las propiedades del mortero ya que dicho material es el que aporta menos rigidez al muro de albañilería, además en el caso del elemento del tipo *Shell* no se pueden determinar los esfuerzos perpendiculares al plano del muro (S33).

Finalmente, se encontró una diferencia significativa en ambos tipos de elementos (*Shell* y *Solid*) en el sentido dinámico de la estructura, en la cual se apreció una diferencia porcentual promedio de un 10% en ambos tipos de modelación. Esto revela que el método de elementos tipo *Shell* el cual se utiliza para el análisis y diseño en gran parte de las estructuras es un método conservador en el sentido dinámico.

## 9. REFERENCIA

**Chávez, M. (2013).** *"Caracterización de las propiedades mecánicas de la albañilería basada en ensayos vibratorios no destructivos"*, memoria de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2013.

**Computer and Structures, INC (2016).** " Csi Analysis Reference Manual"

**Espinosa, W. (2016).** *"Aplicación del método de Montecarlo para la caracteiación de la albañilería no reforzada"*, memoria de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2013.

**Franco, V. (2011).** *"Caracterización y modelado de estructuras del patrimonio histórico"*, máster en la ingeniería de Estructuras, cimentación y Materiales, Universidad Politécnica de Madrid.

**Hernández, E. (2009).** Manual de Aplicación del Programa SAP2000 v14, " *Software Integrado para el Análisis y Diseño Estructural.*"

**Lumantarna, R. (2012).** *"Material characterisation of New Zealand's clay brick unreinforced masonry buldings."* PhD Thesis University of Auckland, Auckland, New Zeland.

**Merino, P. R. (2003).** *"Evaluación de la resistencia biaxial de paneles de fábrica de ladrillo reforzados exteriormente con fibra de carbono"*. Barcelona: s.n.

**NCh 158. Of 67.** *"Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento"*

**NCh 167. Of2001.** *"Construcción- Ladrillos Cerámicos – Ensayos"*. INN-Chile.

**Oyarzo, C. (2012).** *"Damage identification of unreinforced masonry structures based on vibration response"*. PhD in civil Engineer. Departament of Civil and Environmetal Engineering, University of Auckland, New Zealand.

**Qimbay, R. (s.f.).** *"Estimación del modulo de elasticidad del concreto y del mortero mediante TCTM"*

**Rodríguez, M. (2005).** *Análisis modal operacional: Teoría y práctica. Capítulo V.* Sevilla.

**UIC 778-3, código. (1995).** *Recomendaciones para la evaluación de la capacidad portante de puentes abovedados existentes en obra de fábrica y hormigón.* Unión Internacional de Ferrocarriles.

**Valledor, R. (2016).** *"Análisis sísmico lineal y simulación numérica del daño sísmico acumulado de una estructura patrimonial de albañilería simple. El caso del palacio Pereira"*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2016.