



UCASAL
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO FINAL DE GRADO
EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE UN
EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA

AUTORES:

MAIDANA RAMIRO LUIS

PEREZ VILLAGRA FERNANDO OMAR

DIRECTORA:

ING. LIA OROSCO

2019



EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA

TÍTULO DE GRADO: INGENIERO CIVIL

PROFESORA GUIA: Ing. Lía Orozco

TRIBUNAL EVALUADOR:

.....

Fecha de exposición:



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecemos a la Universidad Católica de Salta quien nos abrió las puertas, para poder estudiar nuestra carrera y nos prestó sus instalaciones para poder realizar los ensayos necesarios. De igual forma a cada docente que brindaron sus conocimientos y su apoyo para poder seguir adelante día a día.

También a nuestra tutora de tesis, Ingeniera Lía Orozco, por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, como también habernos tenido en cuenta para este proyecto y toda su paciencia para guiarnos durante el desarrollo de dicho trabajo. Por otro lado, nombrar a la institución Escuela Benjamín Zorrilla y sus directivos que nos abrieron las puertas para poder realizar las distintas mediciones para poder realizar nuestros modelos.

Por ultimo y muy importante nombrar a nuestras familias y seres querido que, sin su apoyo en cada momento de nuestras vidas, jamás podríamos haber conseguido llegar a este logro. Gracias por creer en nosotros y gracias a Dios por darnos la fortaleza necesaria en aquellos momentos de dificultad.



ÍNDICE

RESUMEN	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	6
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 ALCANCE	12
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	13
2.1: DEFINICIONES IMPORTANTES	13
2.2: MACROELEMENTOS	13
2.3 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA POR ELEMENTOS FINITOS	15
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO BAJO ESTUDIO	19
3.1 MODELADO DEL EDIFICIO	22
3.2 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	24
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTRUCTRAL	26
4.1 ANÁLISIS DINÁMICO POR ELEMENTOS FINITOS (SAP2000).....	26
4.1.1 DEFINICIÓN DEL MATERIAL.....	26
4.1.2 INTRODUCCIÓN DEL ACELEROGRAMA EN EL PROGRAMA	30
4.1.3 RESULTADOS	33
4.2 ANÁLISIS DINÁMICO MEDIANTE ETABS.....	36
4.2.1 DEFINICIÓN DEL MATERIAL.....	38
4.2.2 INTRODUCCIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS	40
4.2.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS EN ETABS.....	43
4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ETABS Y SAP2000.....	47
CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LOS MACROELEMENTOS	50
5.1 MÉTODO ESTÁTICO: DETERMINACIÓN DEL CORTE BASAL	50
5.2 ANÁLISIS ESTÁTICO CON MACROELEMENTOS (SAP2000)	55
5.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO.....	60
5.4 COMPARACIÓN ENTRE EL ANÁLISIS DINÁMICO Y ESTÁTICO (SAP2000)	62
CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	68



RESUMEN

El presente trabajo realizó el estudio estructural de un edificio realizado en mampostería sin confinar, tomándose la Escuela “Dr. Benjamín Zorrilla” ubicada en calle 20 de febrero N° 47, de la ciudad de Salta como ejemplo de esta tipología. Dicho edificio forma parte del patrimonio histórico de esta ciudad y debido a ello, es de enorme importancia su preservación y conservación.

Se analizó el mismo tanto por los métodos estático y dinámico, mediante el empleo de programas de análisis estructural basados en el Método de Elementos Finitos (SAP2000, ETABS) y modelado (Revit y AutoCAD), con las especificaciones de las normas INPRES-CIRSOC 103 y CIRSOC 501. Se aplicó también el Método de Macroelementos, de creciente uso para el análisis sismorresistente de este tipo de estructuras.

Se buscó reflejar el desempeño de la estructura ante un evento sísmico intenso, de aceleración máxima igual a la aceleración de suelo sugerida por la norma INPRES-CIRSOC 103, para Zona 3 y suelos Sc y Sd.

Los resultados muestran que al menos en este caso, el método de macroelementos es un buen indicador del modo de falla de la estructura. Por otro lado, en los análisis dinámicos la resistencia de la mampostería a tracción y compresión no fue sobrepasada.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Los asentamientos humanos, en varias partes del mundo, están amenazados por sismos de gran intensidad. Para nombrar solo algunos, se citan los siguientes:

- 24 de agosto de 2016, Italia: terremoto de magnitud 6,2 con saldo de 38 personas muertas.
- 16 de abril de 2016, Ecuador: terremoto de magnitud 7,6 con un saldo de 28 personas muertas.
- 16 de septiembre, 2015 Chile: terremoto de magnitud 8,4 con un saldo de 15 personas muertas.
- 25 de abril de 2015, Nepal: terremoto de magnitud 7,9 y un saldo de 8000 muertos.

En estas regiones surge la importancia de realizar el estudio del estado de las estructuras, a los fines conocer si están realmente preparadas para soportar tales movimientos sísmicos. Es decir, esto radica en conocer su grado de vulnerabilidad.

En la actualidad existen diversos métodos para la determinación de la vulnerabilidad de las estructuras. Este enfoque depende demasiado de las capacidades tecnológicas que tengamos al alcance. La aplicación de estos métodos también depende de la zona estudiada, de las tipologías de las construcciones, del contexto geográfico y de su relieve.

Los sismos constituyen desastres naturales que frecuentemente golpean a distintas regiones del mundo produciendo pérdidas de vidas humanas, daño en las edificaciones y obras civiles, y pérdidas económicas, impactando negativamente en el desarrollo de las zonas afectadas. A su vez, es posible definir tres aspectos principales del problema sísmico: el terremoto en sí mismo (cuándo, dónde y cómo ocurre el sismo), el movimiento del terreno asociado y su efecto sobre las construcciones. Los dos primeros aspectos representan la peligrosidad o amenaza sísmica de un determinado lugar, mientras que el tercero se vincula a la vulnerabilidad.

No es posible actualmente modificar la amenaza sísmica. Sin embargo, la ingeniería sí dispone de “soluciones” para reducir la vulnerabilidad de las construcciones. El daño producido por los sismos puede ser controlado y ser reducido a niveles aceptables, a partir de medidas de prevención, que no solo incluyen aspectos ingenieriles, sino también consideraciones sociales, educacionales, de manejo de emergencia, entre otras. La ingeniería sismorresistente presenta diversas soluciones adecuadas que, mediante el uso de distintos materiales estructurales, sistemas constructivos, dispositivos para el control de vibraciones, criterios de diseño y

métodos de análisis confiables, permiten reducir el efecto de los terremotos sobre las construcciones.

En este contexto internacional se tiene identificado que la parte litoral de la República Argentina, limítrofe con Chile, se encuentra en una zona de constante actividad sísmica debido al encuentro entre dos grandes placas tectónicas la placa de Nazca y la Placa Sudamericana (Fig. 1.1)



El Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) que tiene como objetivo realizar estudios e investigaciones básicas y aplicadas de sismología e ingeniería sismorresistente, destinados a la prevención del riesgo sísmico mediante el dictado de reglamentos que permitan en forma óptima la estabilidad y permanencia de las estructuras civiles existentes en las zonas sísmicas de Argentina, divide al territorio nacional en cinco zonas sísmicas (Fig. 1.2) de acuerdo con la peligrosidad sísmica existente en cada región. La Ciudad de Salta se encuentra en zona sísmica 3, es decir de peligrosidad sísmica elevada, por lo que la consideración de la acción sísmica en el diseño de estructuras cumple un rol decisivo.



Figura 1.2: Zonificación Sísmica de la República Argentina

El mapa de la Figura 1.3 muestra los sismos más importantes sucedidos en el país, marcando sus ubicaciones e intensidades y en donde se pueden ver aquellos ocurridos en la ciudad de Salta en la última década:

- 27 de febrero de 2010, SALTA: Sismo destructivo en el departamento Cerrillos, provincia de Salta. Se reportaron dos muertos e importantes daños materiales en las construcciones no sismorresistentes. La intensidad fue de VII grados en la escala Mercalli.

- 17 de octubre de 2015, SALTA: Terremoto en El Galpón, Salta. Se reportó un muerto y treinta heridos. Hubo 170 viviendas dañadas, 20 debieron ser demolidas y otras apuntaladas. La intensidad fue de VII grados en la escala Mercalli.

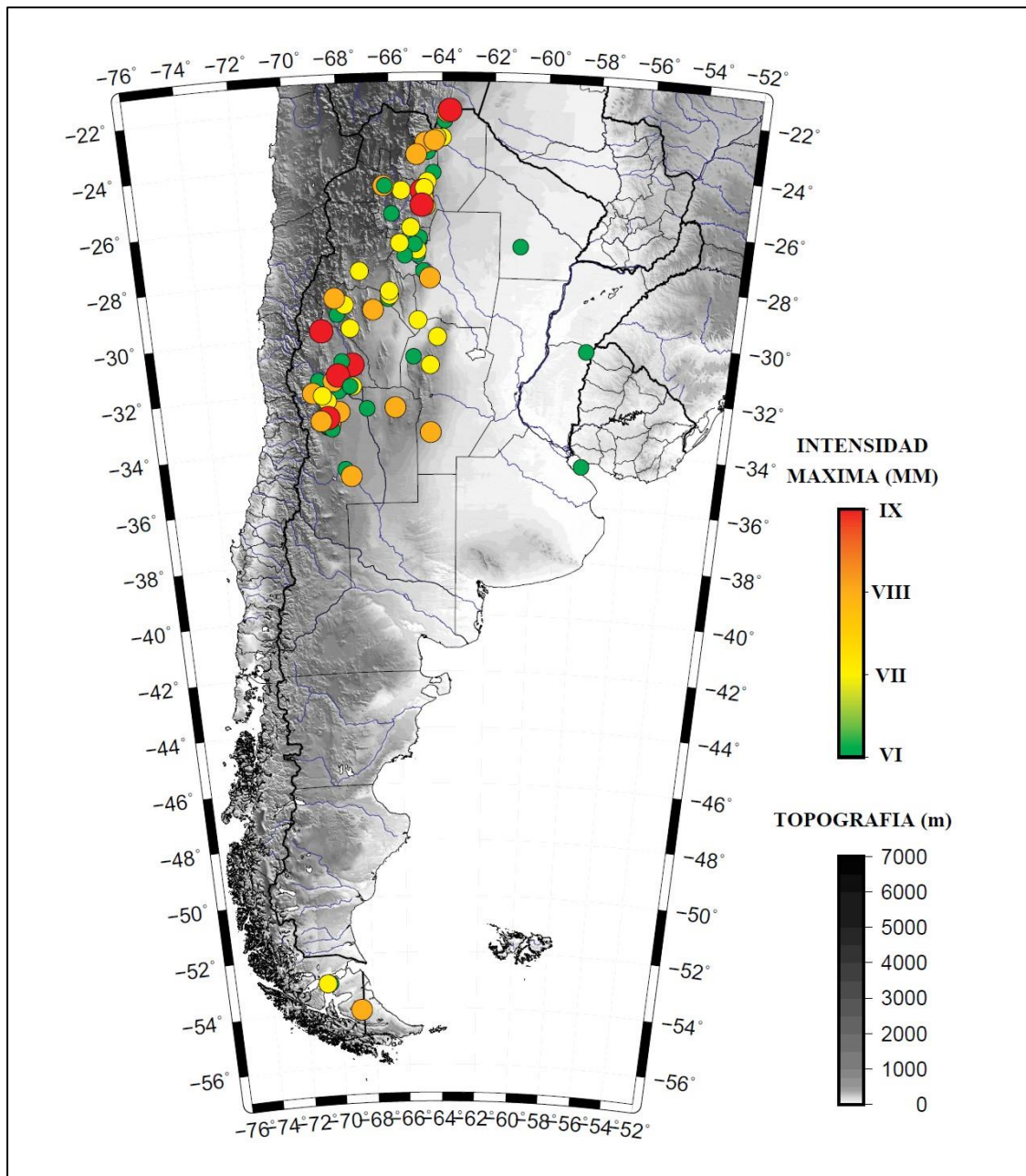


Figura 1.3: Epicentro de los terremotos destructivos en Argentina (1692 - 2015)

1.2 OBJETIVOS

En el año 2017, como ya se había comentado anteriormente, ocurrió un sismo que afectó sobre todo al pueblo del Galpón perteneciente a la provincia de Salta, el cual desató la falla estructural de una iglesia y parte de una escuela.



Figura 1.4: Foto del sismo en la localidad del galpón 1



Figura 1.5: Foto del sismo en la localidad del galpón 2

Las estructuras más afectadas en El Galpón fueron aquellas realizadas de mampostería simple sin encadenados. Se descubrió que son estas las más vulnerables a la hora de estos acontecimientos. En la ciudad muchas estructuras del macrocentro son construcciones de este tipo, como resultó de un trabajo realizado para estimar la vulnerabilidad física de esa zona de la ciudad, realizada por los alumnos autores de este informe. (*Anexo 1: Practica Profesional Supervisada: Índice de vulnerabilidad mediante la escala macrosísmica europea EMS. Páginas 5 – 19*).

Esto fue lo que impulsó el interés en el estudio de este tipo de estructuras, ya que estas edificaciones constituyen el mayor porcentaje de edificios de viviendas del macro centro salteño que exhiben una vulnerabilidad promedio importante, debido a que tienen una tipología



estructural de mampostería sin reforzar, están mayormente afectadas por la humedad, tienen poco mantenimiento e incluso son de mayor antigüedad.

Se considera importante conocer el comportamiento sísmico de una estructura de mampostería sin confinar y qué tan afectada estará en el momento que ocurra el sismo. Para ello se utilizó las normas CIRSOC competentes en sismos y mampostería, también programas de análisis estructural como el SAP2000 y ETABS para encontrar el desempeño que tendrán este tipo de estructura frente al sismo propuesto, teniendo en cuenta la teoría de macroelementos y cómo estos elementos se ven afectados frente a la acción de las perturbaciones simuladas.

OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación estructural de un modelo edilicio basado en la escuela Dr. Benjamín Zorrilla por medio de un análisis dinámico lineal aplicando el Método de Elementos Finitos y la comparación de los resultados con aquellos obtenidos mediante la aplicación de la teoría de macroelementos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un relevamiento de la escuela y tomar medidas para diseñar un modelo que sea representativo.
- Llevar a cabo ensayos de materiales para obtener las propiedades de estos lo más fiables posible.
- Utilizar la teoría de macroelementos para separar la estructura en elementos y estudiar su comportamiento individual.
- Crear un modelo basado en el edificio de estudio en un programa de elementos finitos.
- Introducir un sismo tipo, en el programa y evaluar sus resultados.
- Comparar los resultados del software y verificar que la teoría de macroelementos sea válida para la estructura en cuestión.



1.3 ALCANCE

Esta propuesta comprende una serie de actividades que se relacionan a distintos temas del programa de estudio de Ingeniería Civil, debido a que trata áreas fundamentales en el diseño de edificios ubicados en zonas de elevada peligrosidad sísmica, como lo es la Ciudad de Salta.

Asignaturas involucradas:

- Dinámica Estructural.
- Estabilidad I, II y III.
- Fundaciones.
- Conocimiento de materiales.
- Mecánica de suelos.

Las materias con las que este trabajo se relaciona constituyen asignaturas troncales de la Ingeniería Civil.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1: DEFINICIONES IMPORTANTES

La vulnerabilidad sísmica de una edificación cuantifica el riesgo debido únicamente a las características de la estructura. Constituye el área de trabajo de la ingeniería, cuyo objetivo es reducir el riesgo sísmico teniendo en cuenta los costos y los principios de la ingeniería estructural.

Por su parte, el peligro sísmico es la magnitud que cuantifica el riesgo debido a la zona geográfica sobre la cual se emplaza la estructura. También denominado “peligrosidad sísmica de una región” es aquella probabilidad de que se produzcan en esta última movimientos sísmicos de una cierta importancia en un plazo determinado. No debe confundirse este concepto con el de riesgo sísmico, que depende de factores antropológicos y se refiere a los daños potenciales.

Tanto la vulnerabilidad sísmica de una estructura, como el peligro sísmico asociado a su emplazamiento, así como el daño sísmico potencial, contribuyen a cuantificar el riesgo sísmico asociado a un conjunto. De esta manera, dos edificios idénticos en sus características físicas presentarán una vulnerabilidad sísmica equivalente, pero un peligro sísmico es aquel que depende del lugar del emplazamiento.

Se llama riesgo sísmico a una medida que combina el peligro sísmico, con la vulnerabilidad y la posibilidad de que se produzcan en ella daños por movimientos sísmicos en un período determinado. No debe confundirse este concepto con el de peligro sísmico, que mide la probabilidad de que se produzca una cierta aceleración del suelo por causas sísmicas.

(Caro Roberto, Barbat Alex y Oller Sergio. 2011. Evaluación del riesgo sísmico mediante el método del índice de vulnerabilidad. Riesgo y vulnerabilidad sísmica. Páginas 5-7).

2.2: MACROELEMENTOS

Uno de los principales aportes de esta teoría es que se puede establecer un procedimiento para delimitar los macroelementos de una estructura con determinadas características, tales como una iglesia o estructura antigua, realizada en mampostería sin confinar, y también el de usar un concepto de energía para evaluar el comportamiento y el daño estructural de este tipo de edificios. Utilizando estos dos conceptos se puede evaluar por partes las edificaciones ya

mencionadas para conocer su comportamiento global ante un sismo. Por otro lado, la interpretación de resultados se prevé sencilla.

Si bien esta teoría fue probada en iglesias antiguas que tienen una misma forma constructiva, se puede extrapolar en casonas antiguas que tienen como características ser simétricas, con muros altos periféricos y más pequeños en su interior (esta cualidad permite resolver en macroelementos).

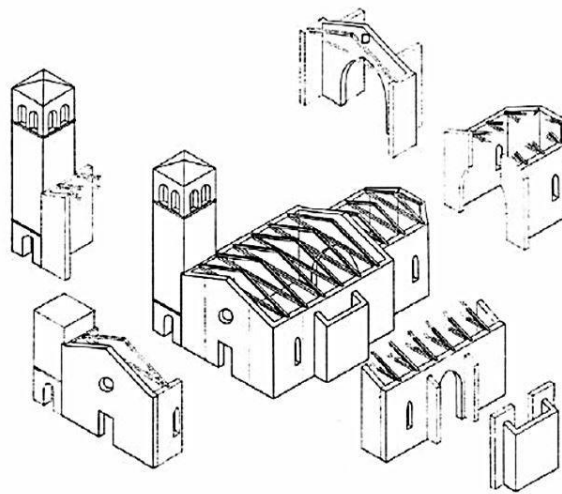


Figura 2.1: La imagen muestra como la estructura de la iglesia se divide en macroelementos.

Primero se presenta el caso de las iglesias de adobe, que es el más estudiado. Para estudiar la vulnerabilidad sísmica de las iglesias históricas de mampostería sometidos a eventos sísmicos, se aplica el método de los macroelementos. Esto es considerar cada templo como un ensamblaje de componentes, macroelementos, los cuales, de acuerdo con experiencias de sismos pasados, responden como unidades independientes entre sí ante la acción sísmica.

Una vez que el macroelemento y sus mecanismos de colapso más probables son identificados, es posible predecir los posibles daños. El comportamiento sísmico global se obtendrá entonces como la suma de la contribución de cada uno de los macroelementos definidos, presentes en la estructura.

Definida la tipología de estudio, es sencillo definir los macroelementos presentes en la misma. Así se determinaron los macroelementos (Figura 3.2) para el prototipo de manera que el mismo fuera lo más representativos a cada una de las iglesias estudiadas (*Jeremías Gonzalo - Soulé Sofía Ligia - Lávaque Silvera Agustín (2018). Parametrización para el estudio de vulnerabilidad sísmica de*

iglesias de la provincia de Salta a través del método de Macroelementos. Ponencia CONEIC. Recuperado de: <https://www.aneic.com.ar/coneic11-ponencias>.

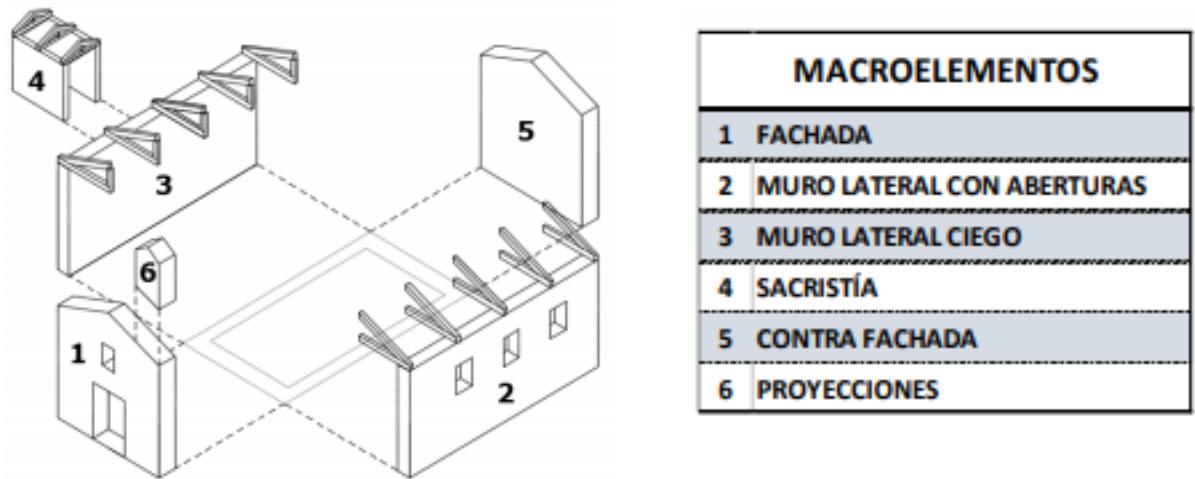


Figura 2.2: macroelementos de una iglesia tipo.

2.3 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA POR ELEMENTOS FINITOS

El análisis por elementos finitos es una técnica de simulación por computadora usada en ingeniería. Usa una técnica numérica llamada método de los elementos finitos (FEM). El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Además, constituye una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero estructuralista resolver infinidad de problemas.

Sin embargo, este método no proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que, en realidad, posibilita obtener una solución aproximada que, con el juicio ingenieril que se le supone al calculista, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico. Su idea básica no puede ser más sencilla: dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras, el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, de manera que suponemos que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales). Posteriormente, se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento.

De esa manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, podría determinarse de una forma aproximada las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento. Véase un ejemplo de lo dicho anteriormente. Suponiendo el problema de la Figura 2.3, corresponde a un problema de una placa de dimensiones finitas, sometida a tracción en sus lados superior e inferior, y posee un agujero circular, de un determinado radio, en su centro.



Figura 2.3

Una modelización por elementos finitos de este problema, empleando elementos triangulares, por ejemplo, podría ser la representada en la Figura 2.4, en la que se representa la malla de un modelo que podría utilizarse para la resolución del problema.

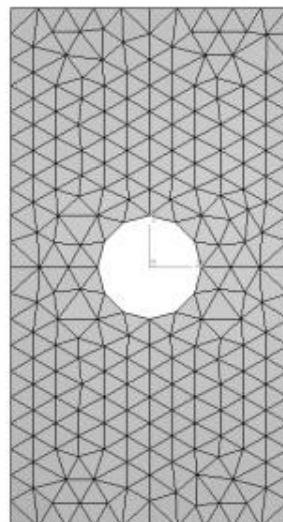


Figura 2.4

Como se ve en dicha figura, la placa ha sido subdividida en elementos triangulares, de forma que estos elementos se suponen interconectados a través de sus vértices. Evidentemente, dado el número de elementos que hemos utilizado, el agujero circular de la realidad, por



ejemplo, ya no es circular en nuestro modelo, sino que es un dodecágono. Las consideraciones hechas conducen a que, irremisiblemente, la solución a obtener resulta una aproximación a la solución real del problema de la Figura 2.3 pero, muchas veces, en la aplicación práctica en ingeniería estructural, esto puede ser más que suficiente.

No obstante, podría haberse “refinado” la malla anterior reduciendo el tamaño de los elementos y, por lo tanto, aumentar el número de ellos. Esto hubiese permitido modelizar mejor la geometría del agujero central de la placa, y así obtener una solución que, aunque siguiera siendo aproximada, resultara más próxima a la realidad.

Todo lo anterior, nos ilustra sobre las posibilidades del método, que no sólo se limita al caso bidimensional, sino que, también, permite analizar problemas tridimensionales. Es posible analizar cualquier pieza de cualquier geometría, obteniendo el campo tenso deformación en su interior, y así luego poder comprobar que la pieza analizada cumple con los requisitos estructurales que se espera de ella. En general, en un problema a analizar a partir del Método de los Elementos Finitos, se conoce las fuerzas exteriores aplicadas en algunos de sus nudos y los valores de los desplazamientos en otros (dependiendo de las ligaduras que posea el sólido). La clave del método está en que, tras su aplicación, aquel obtendrá una expresión del siguiente tipo:

$\{F\} = [K]\{u\}$ (1) en la que, $\{F\}$ es un vector columna, conocido como vector de cargas, en el que están todas las fuerzas exteriores (las directamente aplicadas y las reacciones producidas por las ligaduras) que actúan sobre el sólido; en el miembro de la derecha nos encontramos al vector $\{u\}$, denominado vector de desplazamientos nodales, que representa, de manera ordenada, todos los desplazamientos que experimentan los nudos del modelo, y la matriz $[K]$, que se conoce como matriz de rigidez del sistema estructural y, cuya formación constituye el “corazón” de este método.

Al igual que sucedía con la técnica convencional del análisis matricial de estructuras, del vector de cargas se conoce sus componentes correspondientes a las cargas directamente aplicadas al sólido, pero, en general, no se aprecia las cargas de reacción que aparecen como consecuencia de las ligaduras existentes. No es posible conocer los componentes del vector de desplazamientos nodales, aunque sí en algunos que resultan consecuencia directa de las ligaduras que existan. Lógicamente, si se dispone de la matriz $[K]$, al hacer un nuevo análisis del sólido con otro tipo de cargas, por ejemplo, en la hipótesis de que se mantiene su misma



geometría y las propiedades del material del que está realizado, es muy sencillo, pues sólo es necesario cambiar los vectores $\{F\}$ y $\{u\}$.

Paquetes de software sobre elementos finitos

Existen muchos paquetes de software, tanto libres como no libres. El desarrollo de elementos finitos en estructuras, suele basarse en análisis energéticos como el principio de los trabajos virtuales. En estas aplicaciones, el objeto o sistema se representa por un modelo geoméricamente similar que consta de múltiples regiones discretas simplificadas y conectadas.

Las ecuaciones de equilibrio, junto con consideraciones físicas aplicables, así como relaciones constitutivas, se aplican a cada elemento, y se construye un sistema de varias ecuaciones. El sistema de ecuaciones se resuelve para los valores desconocidos usando técnicas de álgebra lineal o esquemas no lineales, dependiendo del problema. Siendo un método aproximado, la precisión de los métodos puede ser mejorada refinando la discretización en el modelo, usando más elementos y nodos.

Comúnmente aquel se usa para determinar los esfuerzos y desplazamientos en sistemas mecánicos. Es además utilizado de manera rutinaria en el análisis de muchos otros tipos de problemas, entre ellos la transferencia de calor, la dinámica de fluidos, y el electromagnetismo. Con los elementos finitos se pueden manejar sistemas complejos cuyas soluciones analíticas son difícilmente calculables. (*Método de los Elementos Finitos. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos*). (Ferrari Mora Darío, Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. 2018. *Método del elemento finito y AutoFEM. Laboratorio de Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Recuperado de: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf*

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO BAJO ESTUDIO

Como se mencionó anteriormente, el edificio elegido para llevar a cabo este trabajo constituye una escuela en el microcentro de Salta. en la calle 20 de febrero número 21, entre calles España y Caseros a metros de la Catedral y el Cabildo. Todos pertenecen al “casco histórico y fundacional” de la ciudad de Salta.



Figura 3.1: Fachada del edificio elegido

En primer lugar, se realizaron las mediciones de la estructura, para obtener un primer modelo arquitectónico; también se tomaron fotografías, obteniéndose las siguientes características generales:

- Los muros perimetrales tienen una altura de 7m de altura, y los que dan al patio interno tienen 5 m de alto.
- El espesor de todos los muros es de 0,6 m.
- Las aberturas se simplificaron adoptando puertas tipo P1 de ancho 1,2 m y altura 2,2 m, puerta tipo P2 de ancho 1,4 m y altura 2,6 m, arcos de ancho 2,4 m y altura 4 m, ventanas tipo V1 1,8 m de ancho por 1,4 m de alto, ventanas tipo V2 de ancho 1,2 m por 2 m. (Fig.3.3)
- También se verificó la disposición en planta de los locales dentro de la estructura.
- También a razón de encontrar la forma de las fundaciones, se obtuvo en los distintos registros de las construcciones que datan de la época, que usualmente se utilizaba cimientos de ladrillos. Así, en un estudio de relevamiento estructural en un edificio destinado a escuela situado en el centro de la Ciudad, se realizó

una excavación en una de las aulas. Se levantó cuidadosamente el parqué del suelo y se excavó hasta una profundidad de 1,60 metros. El cimiento es de ladrillos macizos, con mortero de buena calidad y bien trabado (Fig. 3.2). El edificio que fue remodelado para su uso como Museo de Bellas Artes (sito en la esquina de Avda. Sarmiento y Avda. Belgrano) también tiene este tipo de fundaciones, por lo que parece haber sido construido con una técnica similar. Las dimensiones de la estructura ubicada en avenida Sarmiento y avenida Belgrano son las siguientes: Ancho de murete: 0,45 m y una altura de: 1, 60 metros (desde nivel de piso terminado hasta un asiento de hormigón de 0,60 m de ancho y 0,40 metros de altura aproximadamente.

- Para el análisis entonces, se considera una base de ancho mayor a los muros 10 cm a cada lado y una profundidad de entre 1 m y 1,5 m, realizada con el mismo material con el que se construían los muros (ladrillos macizos, con mortero de buena calidad y bien trabado).



Figura 3.2: Fundaciones de muros de ladrillos macizos en un edificio del centro salteño (ubicado entre Av. Belgrano y Av. Sarmiento)

PLANO DE PLANTA - MODELO

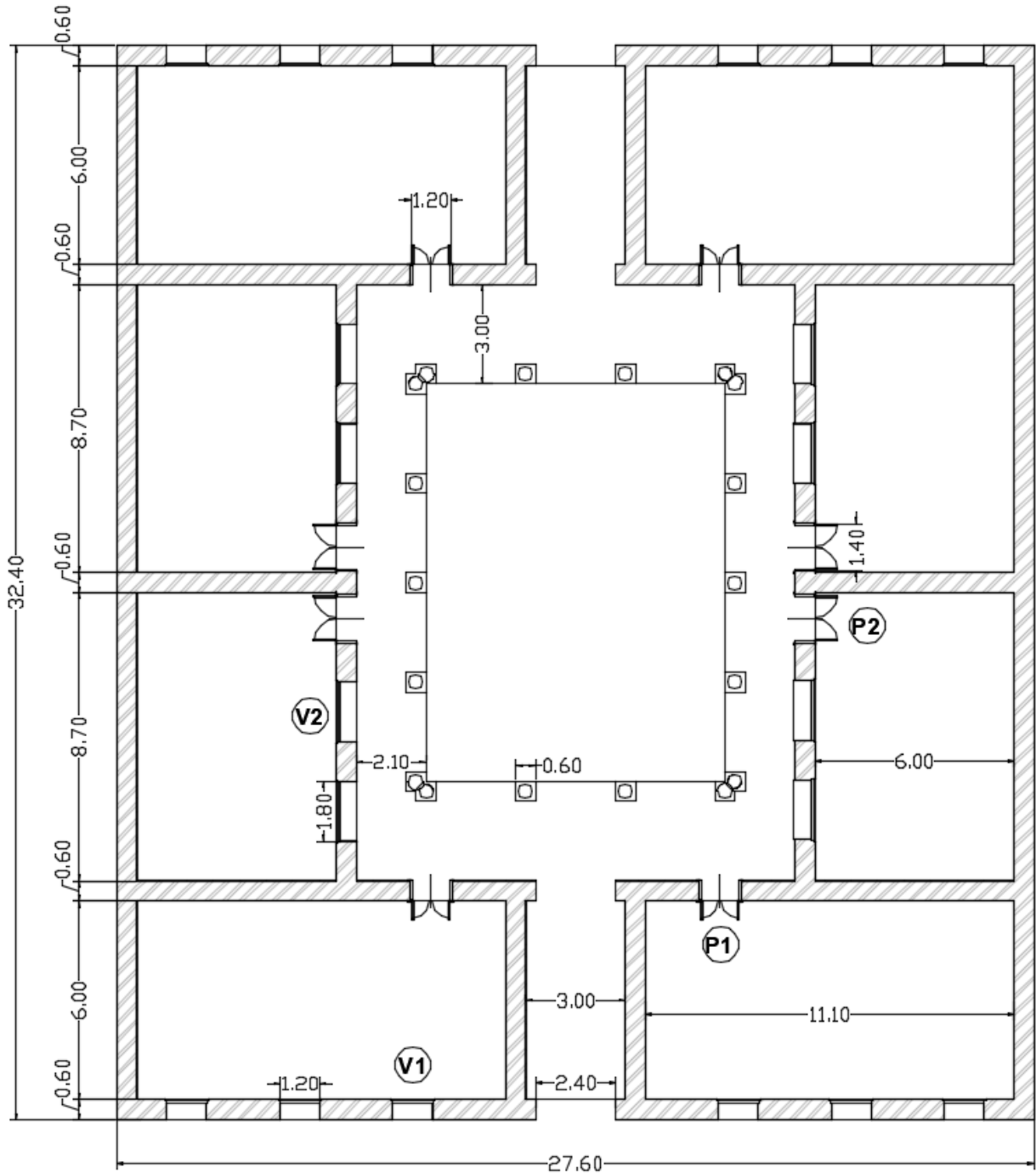


Figura 3.3: Plano de la planta del Modelo

3.1 MODELADO DEL EDIFICIO

Para modelar esta construcción se utiliza primero Revit y AutoCAD (Fig. 3.5 y 3.6) (programas de los denominados BIM que son útiles para el diseño y desarrollo arquitectónico), luego se lo exportó a los programas de elementos finitos SAP2000 y ETABS. Este último, cuenta con la definición del material mampostería (Masonry) en su base de datos, por lo que la caracterización del mismo para el análisis, resultó más clara en este caso.

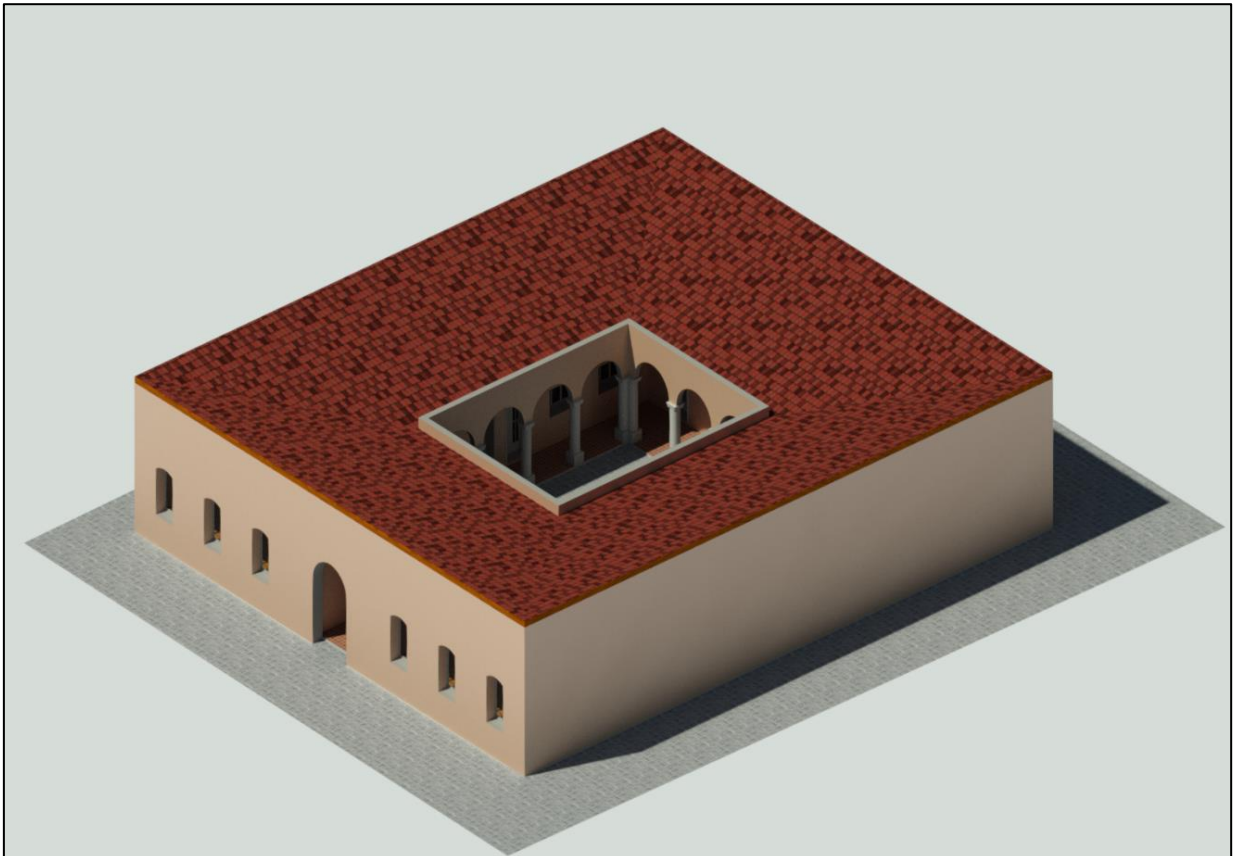


Figura 3.4: Modelado 3D en REVIT.

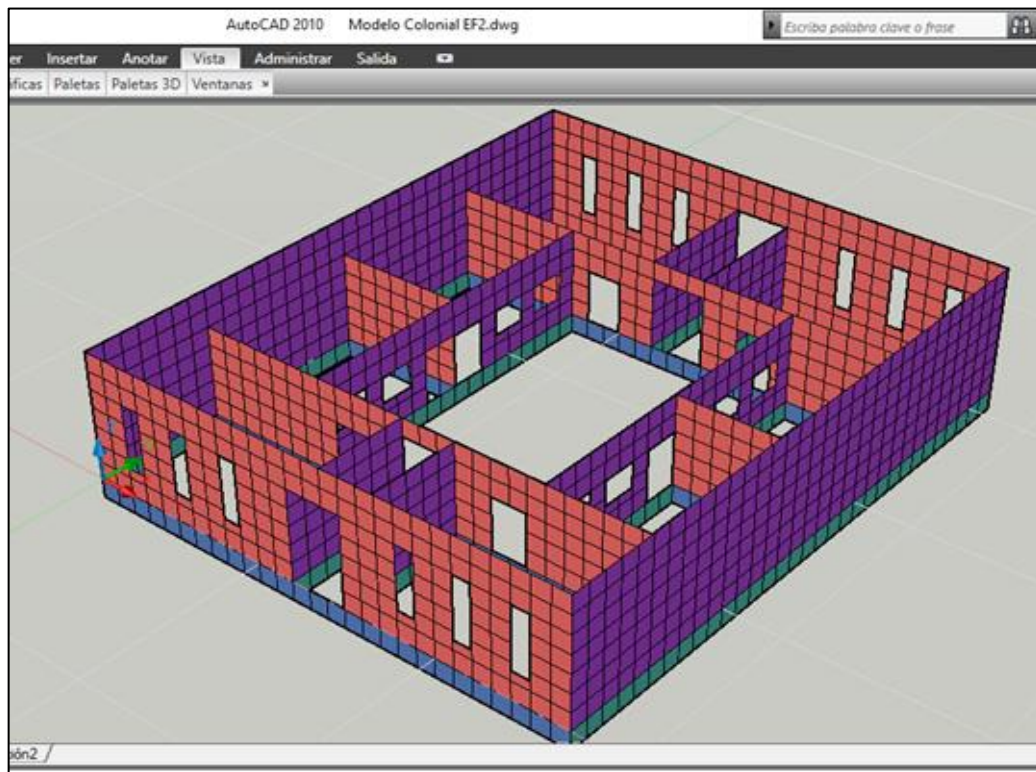


Figura 3.5: Modelado 3D en AutoCAD.

Con base en el modelo realizado en Revit se procedió a realizar el edificio en 3d con el programa AutoCAD a través de elementos “3D Face” lo cual permite que este modelo en AutoCAD sea exportado en formato *dxf* a programas de cálculo estructural como el SAP2000 y el ETABS. Este modelado se realizó con elementos de 1x1 m cada uno y teniendo en cuenta la disposición de la escuela. Además, también se cuidó las vinculaciones de muros; esto representa que las uniones se colocan alineadas, asegurando que las mismas se comporten como una malla.

Para considerar el caso más desfavorable no se cuenta con la rigidez que otorga el techo a la estructura, sin embargo, se tendrán en cuenta las cargas (muertas y vivas) que el mismo les trasmite a los muros. La cubierta al ser de un material que se encuentra deteriorado, debido al transcurso del tiempo y a la falta de mantenimiento, se la puede despreciar estando del lado de la seguridad en el análisis, es decir, la misma no aporta demasiado a la resistencia frente a un sismo.

Dentro de este modelado se separaron dos tipos de áreas. Una de ellas corresponde a los cimientos cuyos espesores se fijaron en 0,8m con una altura de un metro (sacado de la investigación de estructuras antiguas) y longitudes representativas de las longitudes de muro;

la otra sección es la de muros cuyo espesor es de 0,6m y sus alturas varían si están en el perímetro de la estructura 7 m y si es un muro interno es de 5m.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Para definir el material se utilizó la norma CIRSOC 501 del Reglamento Argentino de Estructuras de Mamposterías, ya que el material con el cual están realizados los muros, es de ladrillo macizo cerámico común, unido a través de mortero de cal, cemento y arena. Se tomó por seguridad el menor valor como referencia, es decir, un valor normal de resistencia a la compresión $f'_m = 1,75 \text{ Mpa} = 17,85 \text{ kgf/cm}^2$. Específicamente se utilizó el capítulo 6 de la norma el cual define sus características, estas son:

- $f'_v = 1,75 \text{ mpa}$ (resistencia a la compresión de la mampostería)
- $f'_r = 0,50 \text{ mpa}$ (resistencia a la tracción)
- $f'_v = 0,19 \text{ mpa}$ (resistencia al corte)
- $E = 850f'_m = 1487,5 \text{ mpa}$ (modulo de elasticidad)
- $G = 0,3E = 446,25 \text{ mpa}$ (modulo de corte)
- $\epsilon = 0,0035m$ (def. max. de la mamposteria en la fibra externa comprimida)
- $\epsilon_u = 0,008m$ (def. ultima de la mamposteria en la fibra externa comp.)

Por otro lado, se buscó darle al material características similares al mampuesto existente en el edificio, para ello, se realizó un ensayo de mampostería que consiste en realizar:

- Ensayo de compresión (ensayo de pila): Se aplican cargas perpendiculares a la probeta (hilada de 5 ladrillos) para determinar la resistencia a la compresión. Este valor es útil para analizar el comportamiento del muro ante las cargas gravitatorias y frente a las acciones sísmicas, ya que en esta situación se presenta valores elevados de esfuerzos de compresión.
- Ensayo de compresión diagonal: Se emplea para la determinación de la resistencia al corte en la junta horizontal del murete (probeta de ensayo de corte). Esta junta por lo general es el plano de falla de los muros.

Para ambos ensayos, los mampuestos utilizados fueron extraídos de construcciones con cierta antigüedad (25 a 30 años), emulando a los de la estructura en estudio y las proporciones del mortero de unión son similares a los empleados en la época. Debido a la limitada cantidad de mampuestos obtenidos, para el ensayo de pila se pudieron realizar 5 probetas y para el ensayo de corte se logró hacer un solo murete. Los resultados fueron los siguientes:



ENSAYO DE COMPRESION		
PROBETA	P _{máx}	Tensión (kg/cm ²)
C I	9 Tn	27,17
C II	9 Tn	27,17
A III	14 Tn	42,26
A II	19 Tn	57,36
A I	18 Tn	54,34

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:

$$f'm = 35 \text{ kg/cm}^2 = 3,43 \text{ Mpa (Antigua)}$$
$$f'm = 22 \text{ kg/cm}^2 = 2,16 \text{ Mpa (Comercial)}$$

RESISTENCIA AL CORTE:

$$\gamma'_m = \frac{P_u}{A_n} = 7,30 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 0,7 \text{ Mpa}$$

Comparando estos valores con los dados por norma, se observó una discrepancia en los valores, siendo los obtenidos en los ensayos más del doble que los indicativos ($f'm = 1,7 \text{ Mpa}$ y $f_v = 0,19 \text{ Mpa}$), por otro lado, no se cumplió con la cantidad mínima de probetas a ensayar (en el ensayo de pila un mínimo de 6 probetas y en el ensayo de corte un mínimo de 10 muretes) lo que afectó el tratamiento estadístico para la obtención de los valores de los esfuerzos. Por lo que se consideró más acertado realizar el análisis estructural con los valores indicados en la norma.

(Anexo 2: Practica Profesional Supervisada: Ensayo de Mampostería. Páginas 21 – 53)

(2007. Reglamento Argentino de estructuras de mampostería. Reglamento CIRSOC 501. Capítulo 6 Páginas 25 – 30).

(2018. Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes, Parte III Construcciones de mampostería. Reglamento CIRSOC 103. Capítulo 2. Páginas 13 – 15).

(Gallegos Héctor. 1989. Albañilería estructural. Diseño y cálculo de muros. Páginas 243 – 288).

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1 ANÁLISIS DINÁMICO POR ELEMENTOS FINITOS (SAP2000)

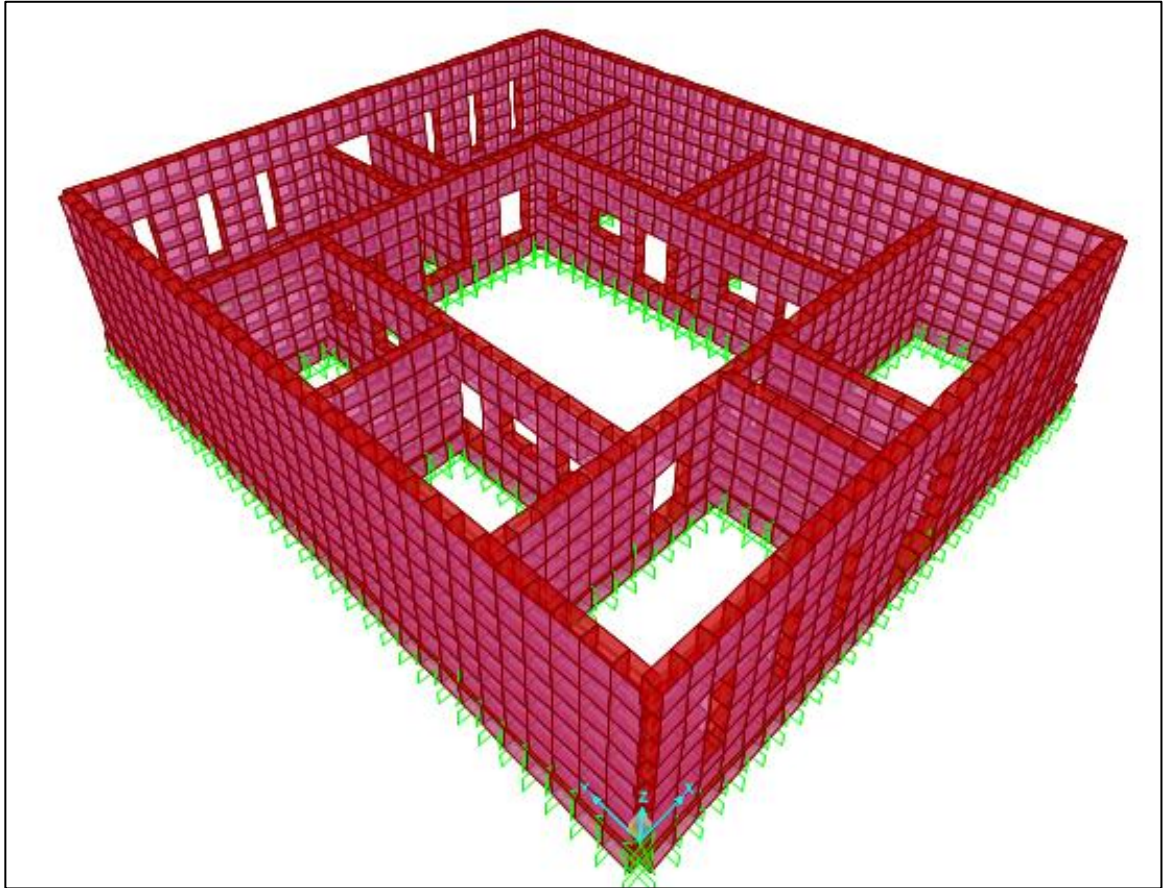


Figura 4.1: Modelo en Sap2000.

4.1.1 DEFINICIÓN DEL MATERIAL

Se procedió a cargar las características del material en “*Define/materials*”, definiendo al material como “*Other*”, es decir, otro tipo de material diferente a los materiales predefinidos. Luego se nombró al nuevo material como “*MAMPO*”, distinguiéndolo con un color. Por su parte, aquel es considerado *isotrópico*, según bibliografías consultadas.

(Farah Cesín Javier. 2008. *Análisis estructural de estructuras de mampostería*. Recuperado de: https://www.academia.edu/16337385/Analisis_estructural_de_estructuras_de_mamaposteria).

(Comportamiento sísmico de edificios de mampostería no reforzada. Capítulo 6. Recuperado de: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6230/07CAPITULO6.pdf?sequence=7&isAllowed=y>).

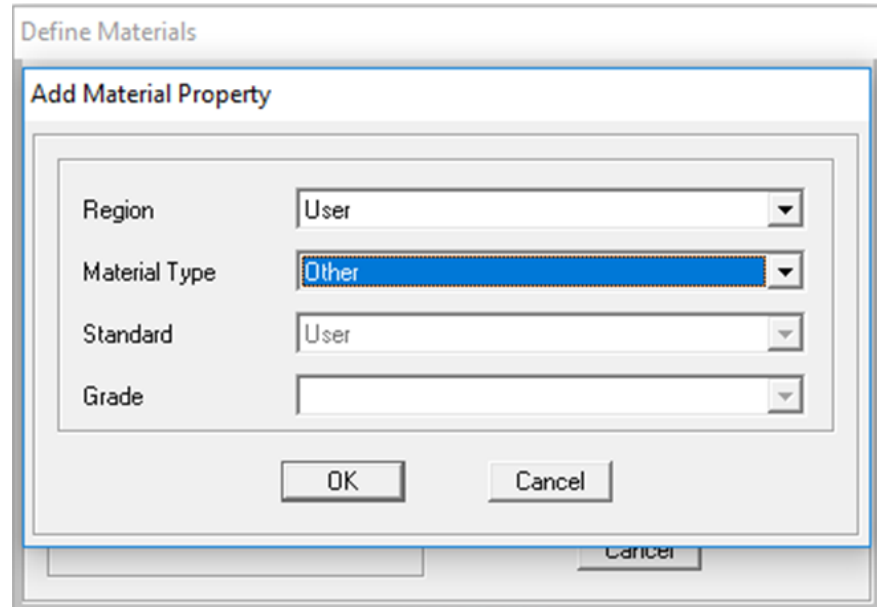


Figura 4.2: Cuadro de dialogo "Define Materials".

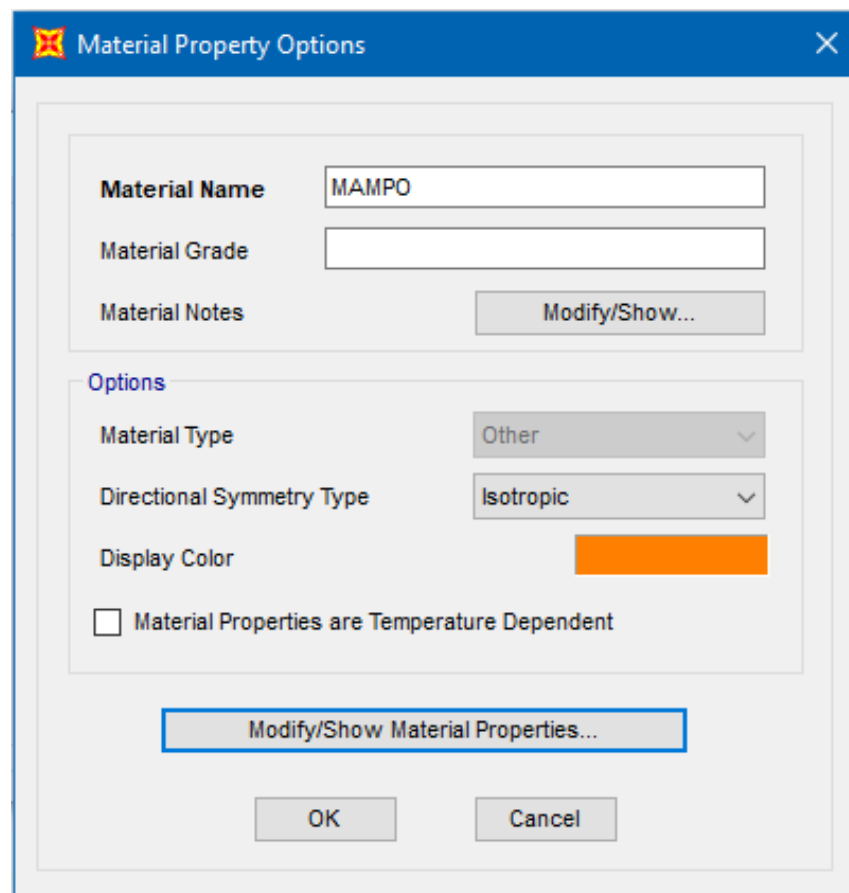


Figura 4.3: Cuadro de dialogo para colocar las propiedades de los materiales.

En este caso para modificar las características de las propiedades del material se ingresó en “*Modify/Show Material Properties*”. Luego, se selecciona las opciones avanzadas (*Switch to advanced property display*) para colocar las propiedades de manera más específicas, como el peso específico, el módulo de elasticidad (E), el módulo de corte (G), coeficiente de Poisson, el coeficiente térmico y el diagrama de tensión-deformación.

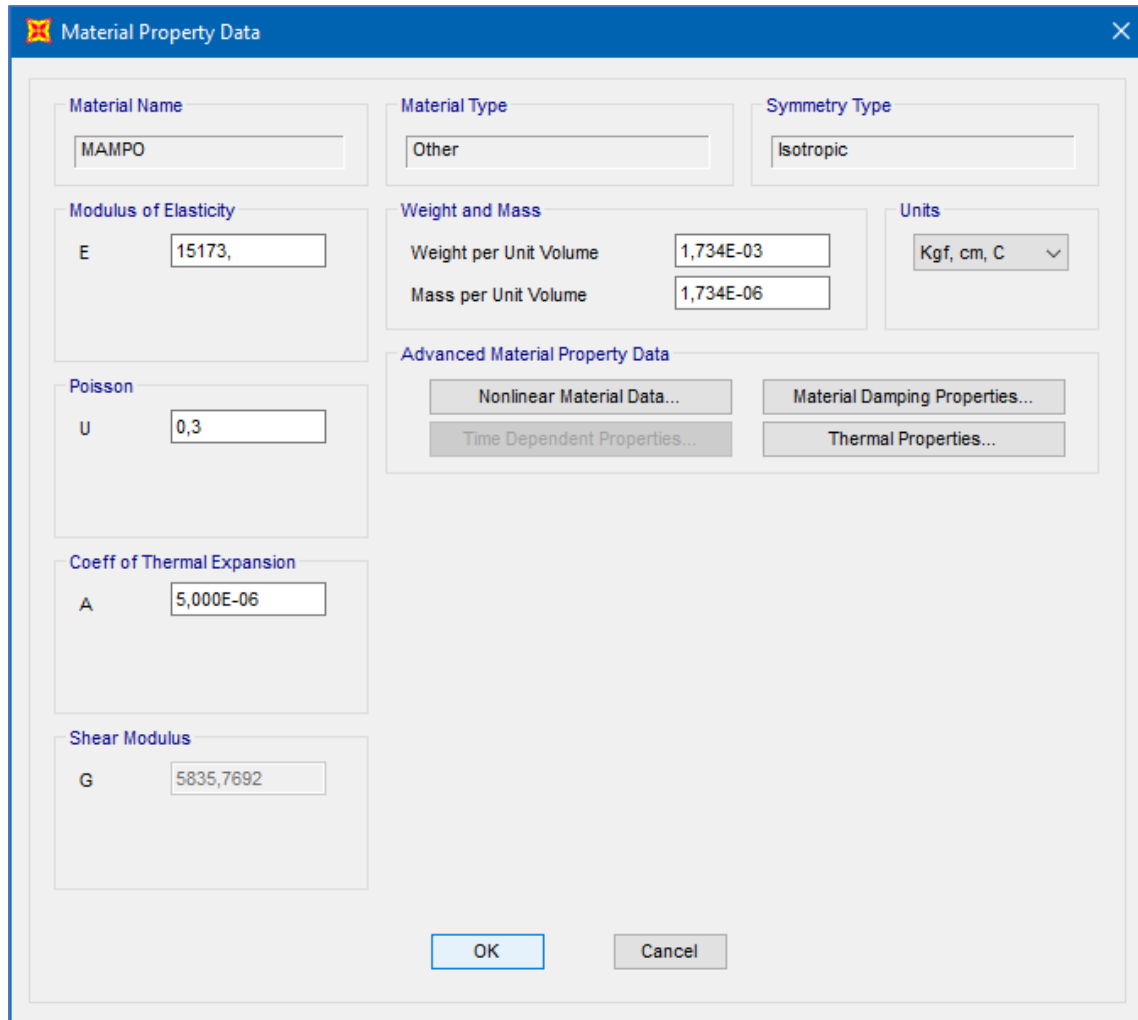


Figura 4.4: Ventana de “Modify/Show data properties”

Como se puede observar en la figura 4.4, se ingresan los datos de la norma. Para verificar la curva tensión deformación del material, se ingresa en datos del material no lineal (*Nonlinear material data*). Luego se ingresó las tensiones en función de las deformaciones obteniendo el diagrama de la figura 4.5, para verlo más claramente se puede seleccionar “*show plot*”:

User Stress-Strain Curve Data

Number of Points in Stress-Strain Curve

	Strain	Stress	Point ID
1	-6,000E-03	-11,31	
2	-5,000E-03	-14,28	-E
3	-8,000E-06	-17,85	-C
4	-7,500E-06	-17,82	
5	-7,000E-06	-17,39	
6	-5,000E-06	-15,54	
7	-3,000E-06	-10,54	
8	0,	0,	A
9	2,830E-04	8,4	B
10	3,108E-03	0,	E

OK Cancel

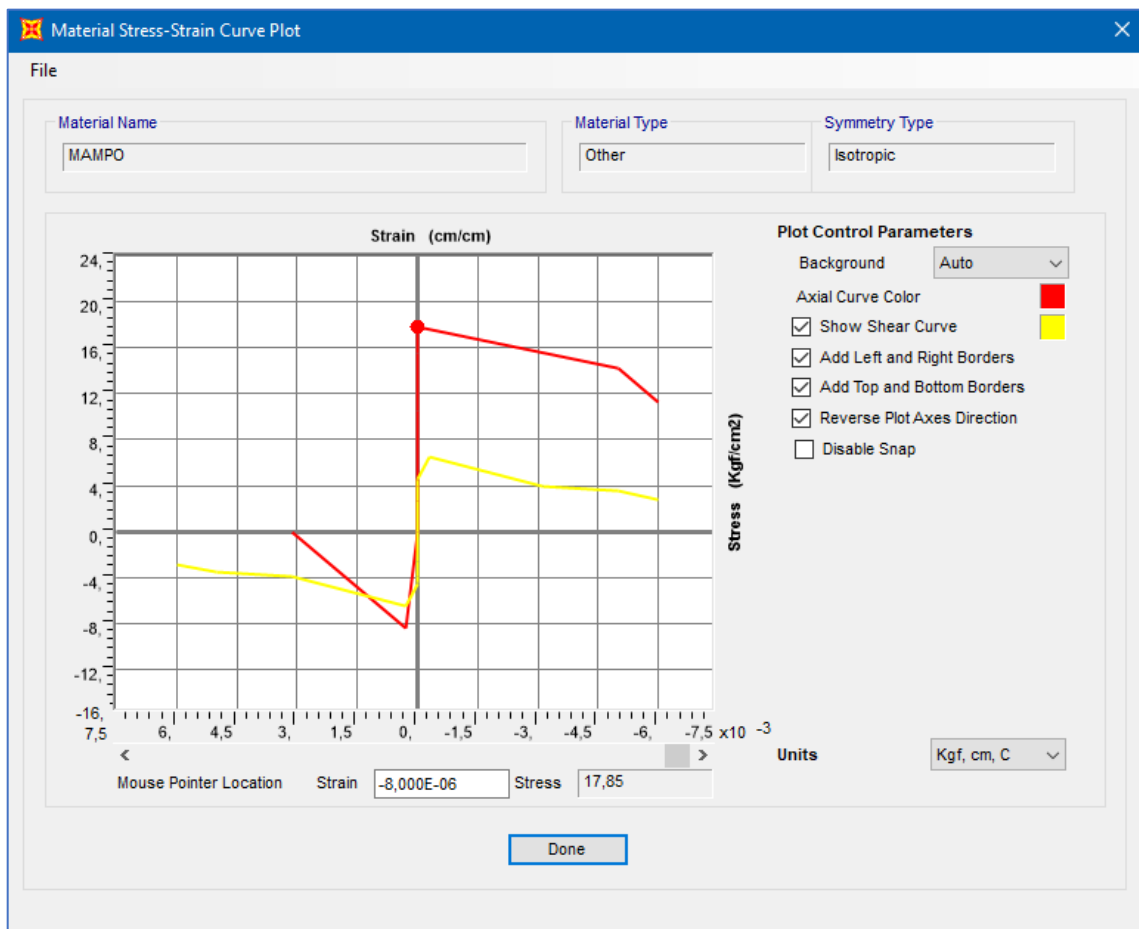


Figura 4.5: Modificación del grafico tensión-deformación

4.1.2 INTRODUCCIÓN DEL ACELEROGRAMA EN EL PROGRAMA

Para llevar a cabo el método dinámico, debe cargarse un acelerograma en el programa, con sus respectivos datos. El acelerograma en cuestión corresponde a un sismo ocurrido en el año 1999 en la Ciudad de Tilcara, Provincia de Jujuy; de este se tiene las mediciones en el sentido longitudinal (*LO*) y en el sentido transversal (*TR*), los cuales se consideraron para el análisis como sismos en el sentido de *X* e *Y*, respectivamente.

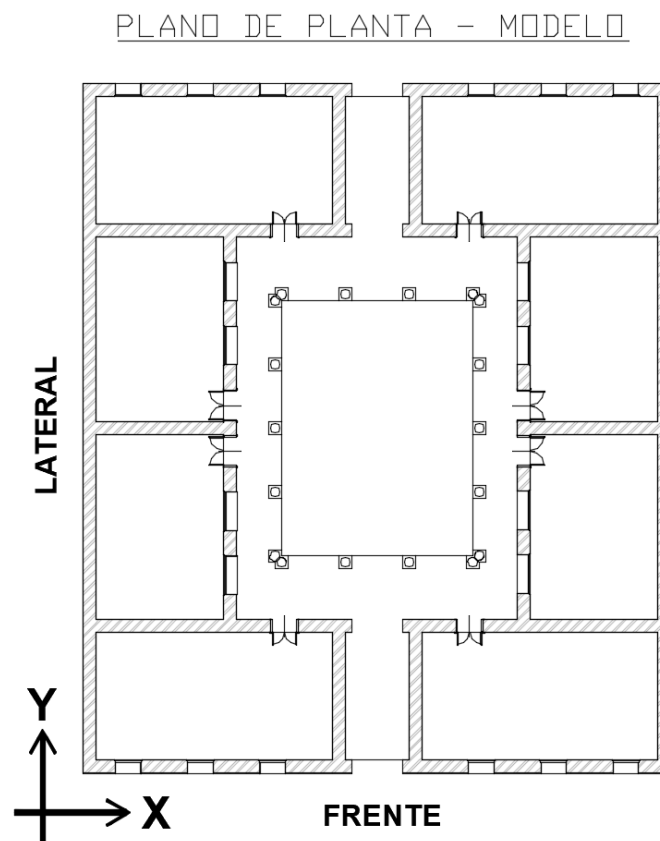
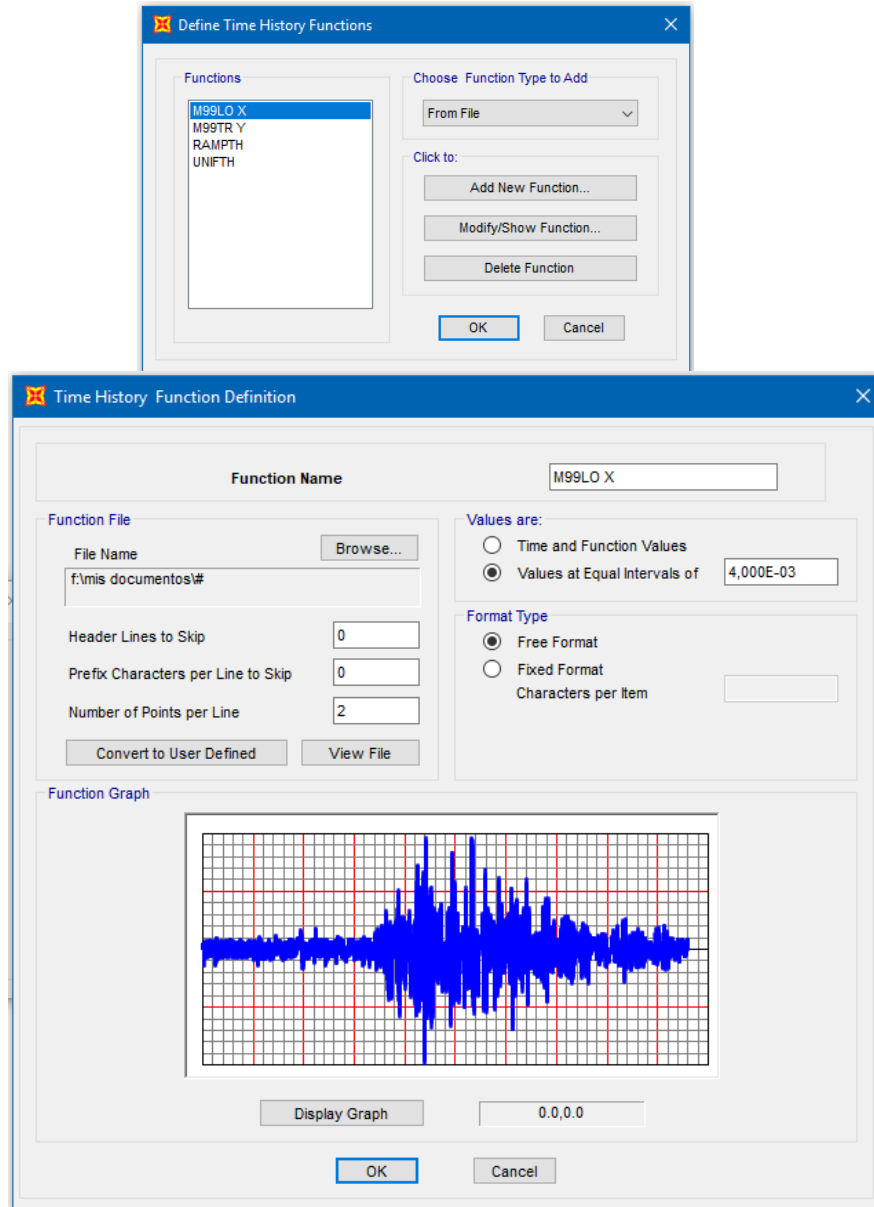


Figura 4.6: Plano de la planta del modelo con ejes de referencia.

El sismo empleado se originó en Tilcara, es muy pequeño y los registros corresponden a la componente longitudinal (*M99LO*) y transversal (*M99TR*), tomados en la estación sísmica ubicada en el IPV, calle Belgrano al 1300. Los valores están en $[cm/seg^2]$, cada registro tiene un total de 6000 puntos y el intervalo de tiempo es de 0,004seg. Las aceleraciones máximas registradas son de 19 cm/seg^2 , para la dirección *Longitudinal X (LO)* y de 12,74 cm/seg^2 para la dirección *Transversal Y (TR)*.

El procedimiento fue el siguiente: se seleccionó en el menú la opción *Define/ Functions/ Time History* y se procedió a cargar el archivo “.txt” del sismo en cuestión seleccionando la opción “*From File*”. Luego se modificaron ciertos parámetros de la gráfica, como el intervalo de valores (0,004) y el número de datos por línea (2):



Figuras 4.7 y 4.8: Introducción del acelerograma: Sismo en Tilcara año 1999.

Una vez cargados los acelerogramas en ambas direcciones, se debía definir los casos de carga para el análisis dinámico. Para ello la opción “*Define/ Load Cases*” fue seleccionada y se creó un caso de carga del tipo *Time History*.

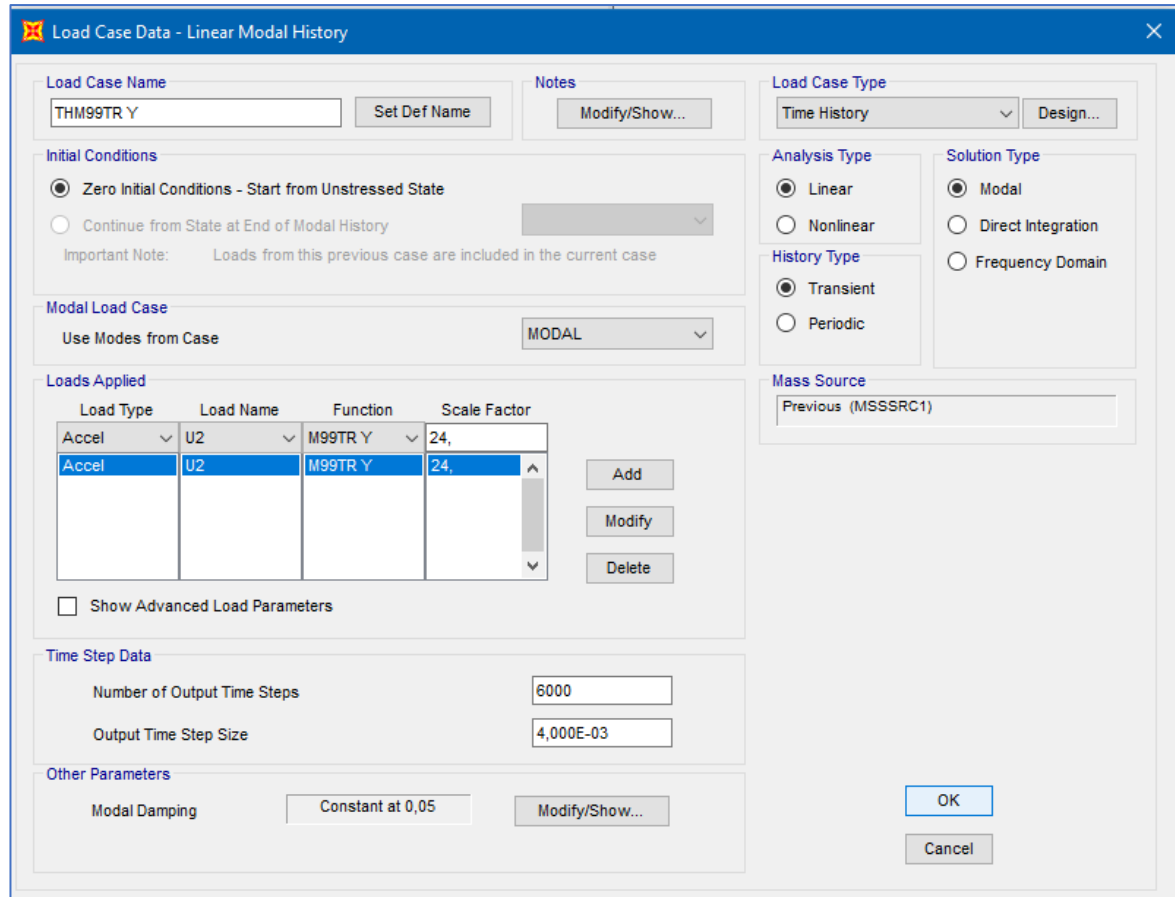
Se seleccionó el análisis de tipo Linear, solución del tipo *Modal* y se pasó a la aplicación de carga en donde se define el tipo de carga en este caso al ser un acelerograma se seleccionó “*Accel*”, luego se eligió la función “*M99LO X*”, seleccionando la dirección *U1* correspondiente a la dirección *X*, con un factor de escala que permita alcanzar una aceleración máxima entre los valores $0,30g - 0,35g$, que son valores máximos esperados en Salta.



Sabiendo que la aceleración $g=980 \text{ cm/seg}^2$, los valores de las aceleraciones máximas deberán estar entre $294,3 \text{ cm/seg}^2 - 343 \text{ cm/seg}^2$. Para alcanzar dichos valores los factores de carga fueron:

- *Factor de Escala* = $Fe = 18$, para la dirección **X**. Obteniendo así una aceleración máxima igual a 342 cm/seg^2 .
- $Fe = 24$, para la dirección **Y**. Lo que nos da una aceleración máxima de $305,76 \text{ cm/seg}^2$.

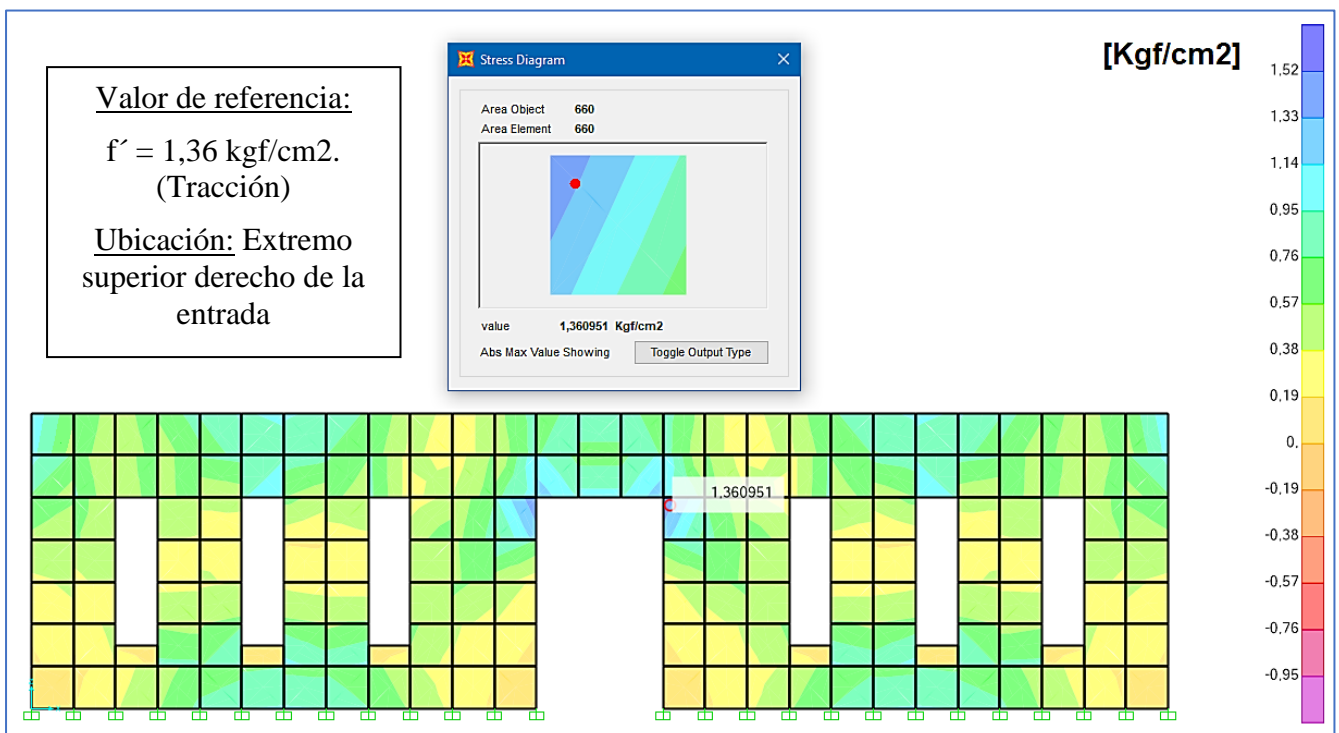
Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	M99LO X	18,
Accel	U1	M99LO X	18,

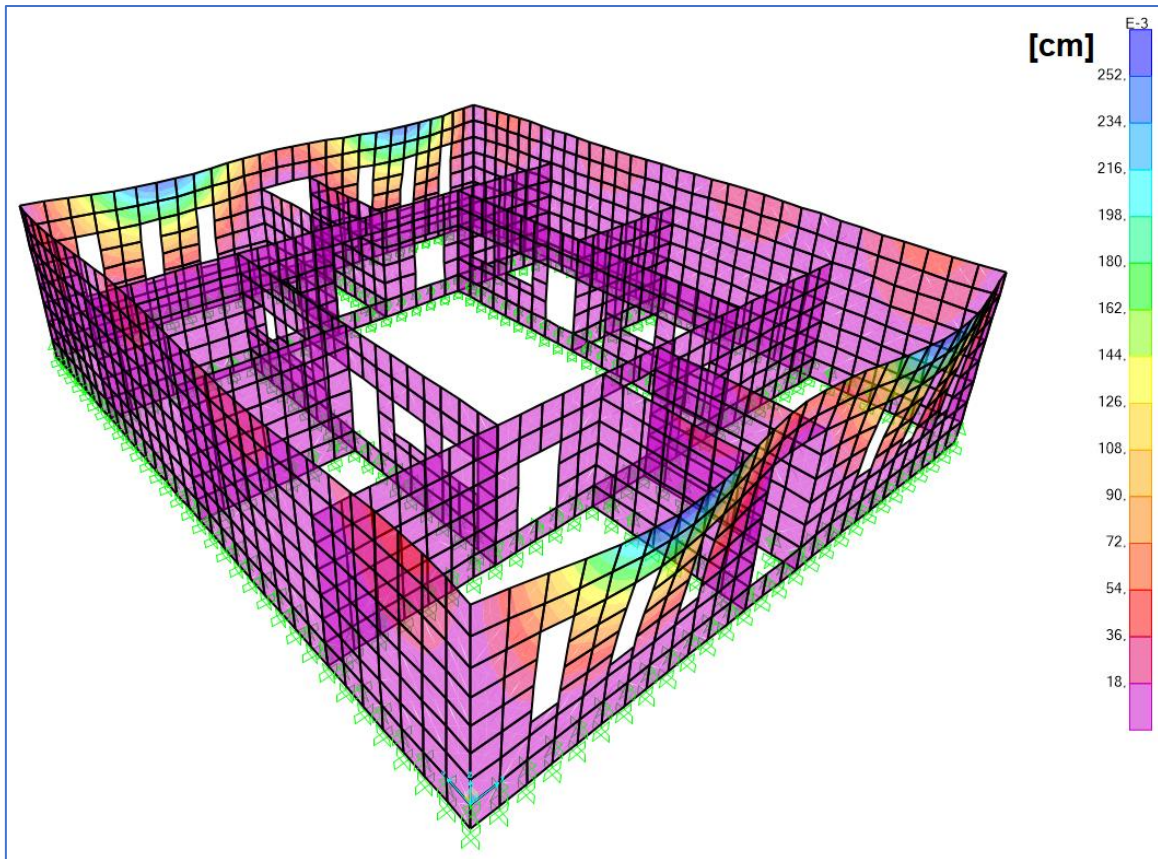


Figuras 4.9 y 4.10: Introducción de los acelerogramas: Caso de carga Tiempo-Historia

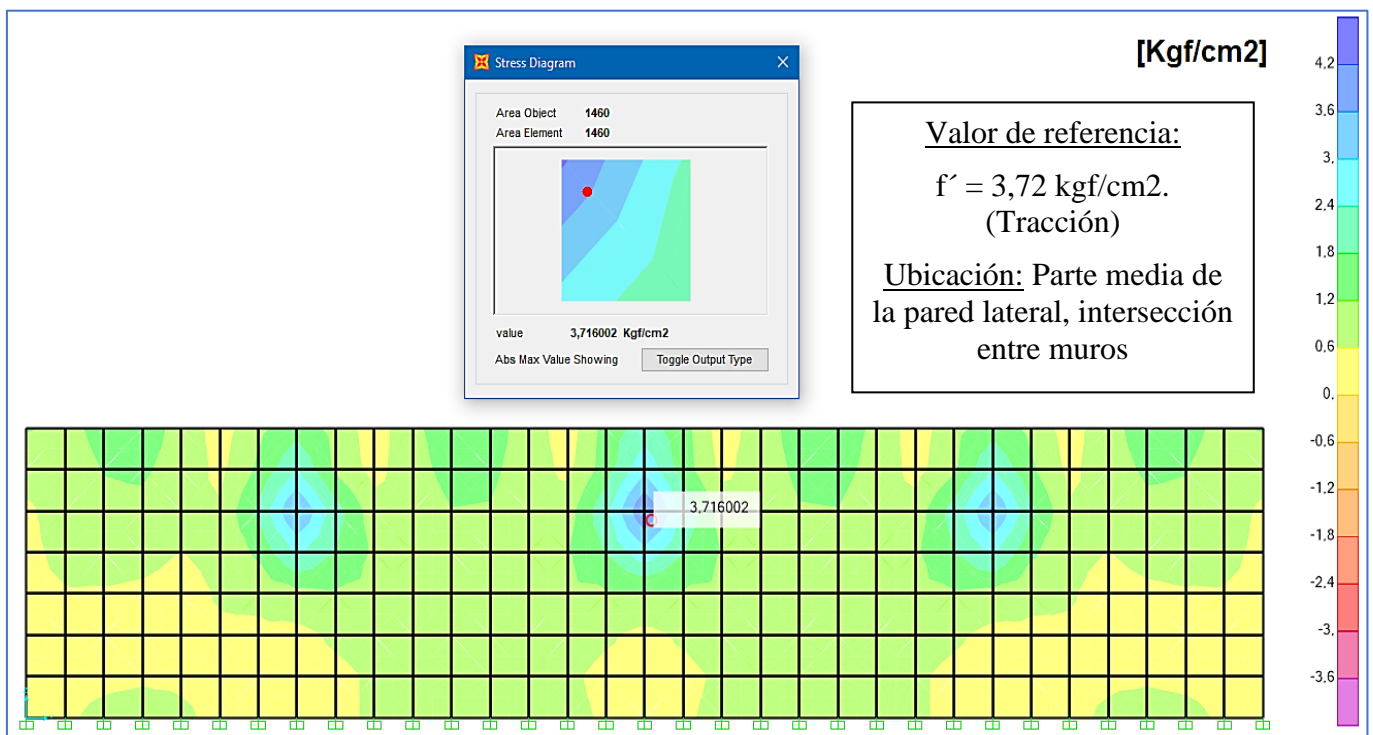
4.1.3 RESULTADOS

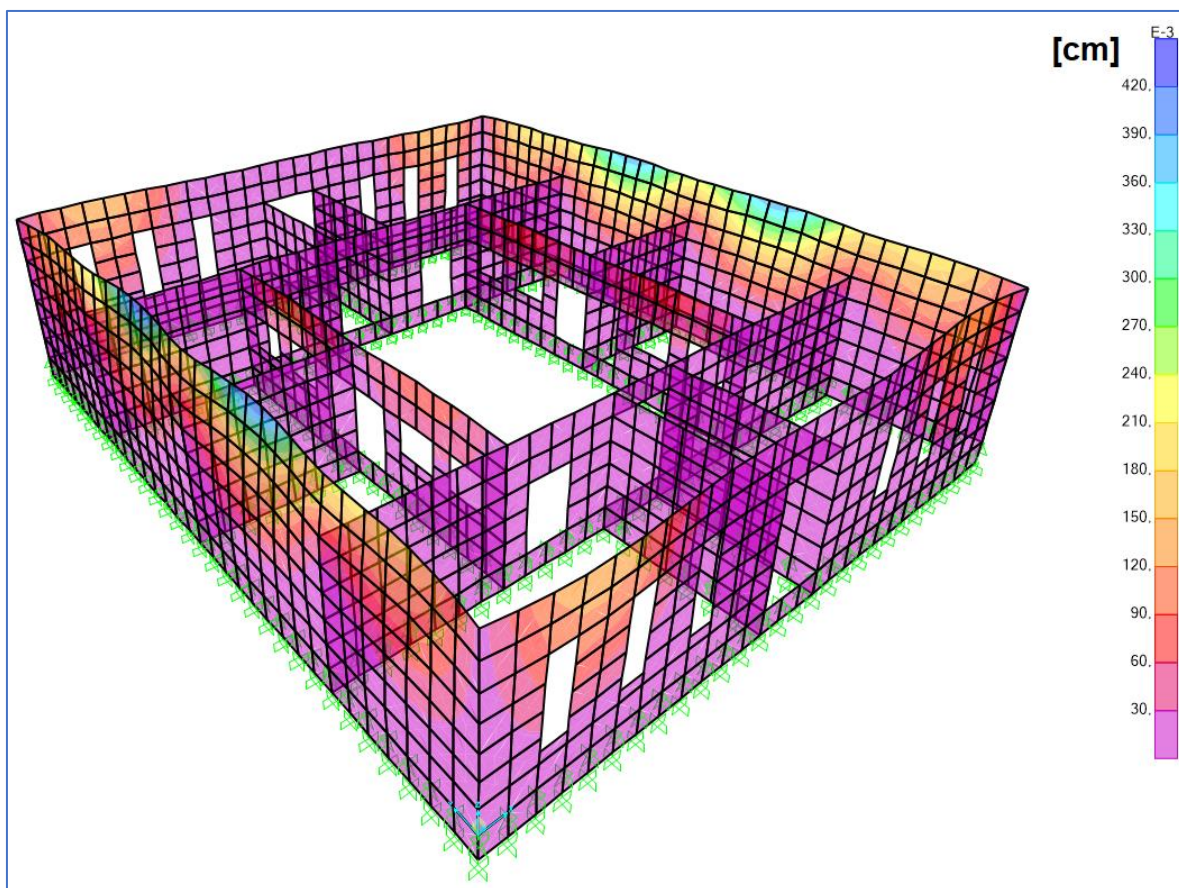
Luego de la carga de datos se realizó el análisis correspondiente, los resultados fueron los siguientes:





Figuras 4.11 y 4.12: Tensiones normales ($S_{m\acute{a}x}$) en el muro del frente y Deformaciones obtenidas del análisis en la dirección Y en el tiempo $t=25,016$ seg cuando se produce la Aceleración máxima $305,76$ cm/seg².





Figuras 4.13 y 4.14: Tensiones normales ($S_{máx}$) en el muro lateral y Deformaciones obtenidas del análisis mediante SAP2000 en la dirección X en el tiempo $t=21,928$ seg cuando se produce la Aceleración máxima 342 cm/seg^2 .

CARACTERISTICAS DINAMICAS OBTENIDAS	
Periodo T [seg]	0,2547
Frecuencia f [Cyc/seg]	3,97

En el análisis mediante el acelerograma con dirección X se observó que el muro más afectado fue el de la parte lateral del edificio, por otro lado, en el análisis correspondiente al acelerograma con dirección Y el frente del edificio es el más afectado. Lo anterior se tendrá en cuenta a continuación, para la aplicación de la teoría de los Macroelementos partiendo del Método Estático, que permite obtener un sistema de fuerzas equivalentes a la acción sísmica. Con esto se buscó conseguir el mismo comportamiento que en el análisis dinámico.

4.2 ANALISIS DINAMICO MEDIANTE ETABS

El modelado del edificio fue el mismo que el realizado para el programa SAP2000, puesto que las interfaces en ambos softwares es la misma.

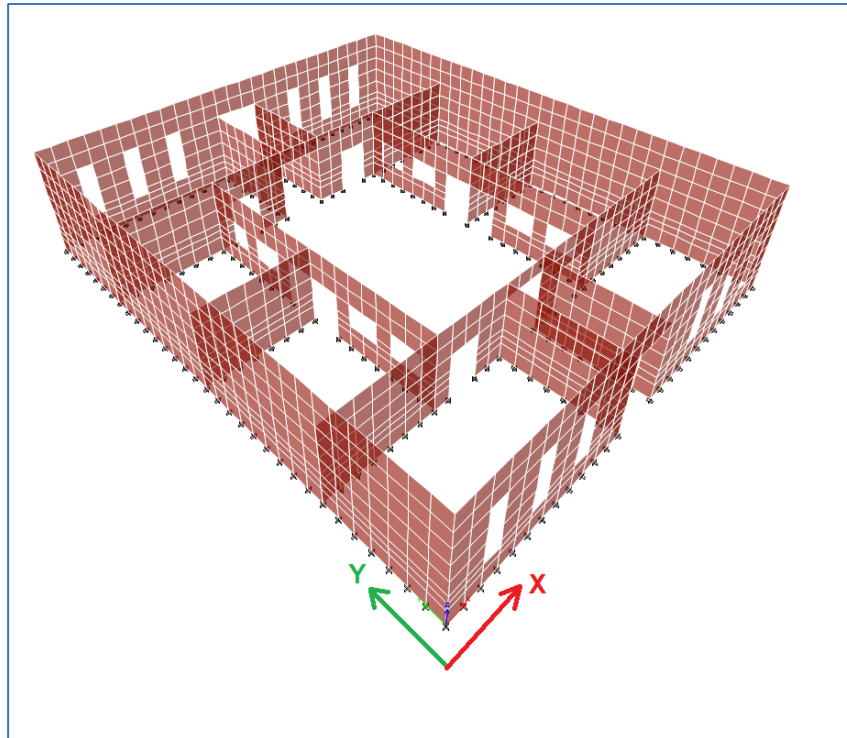
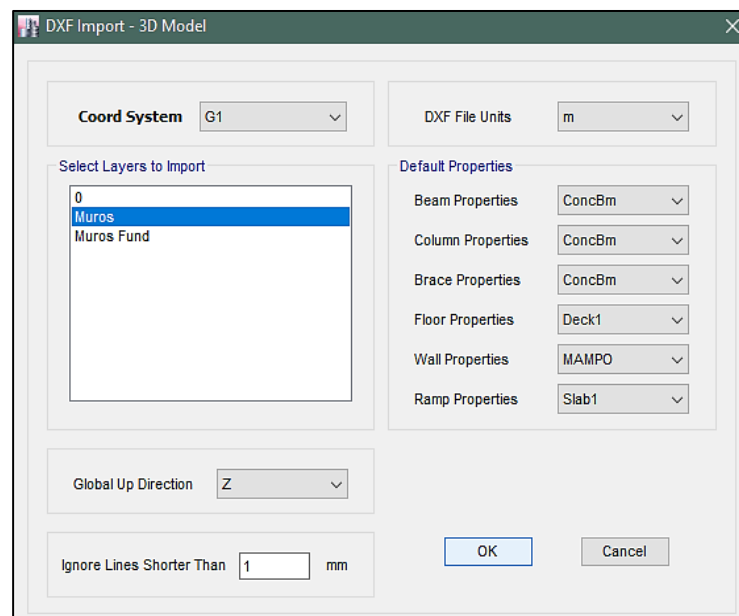
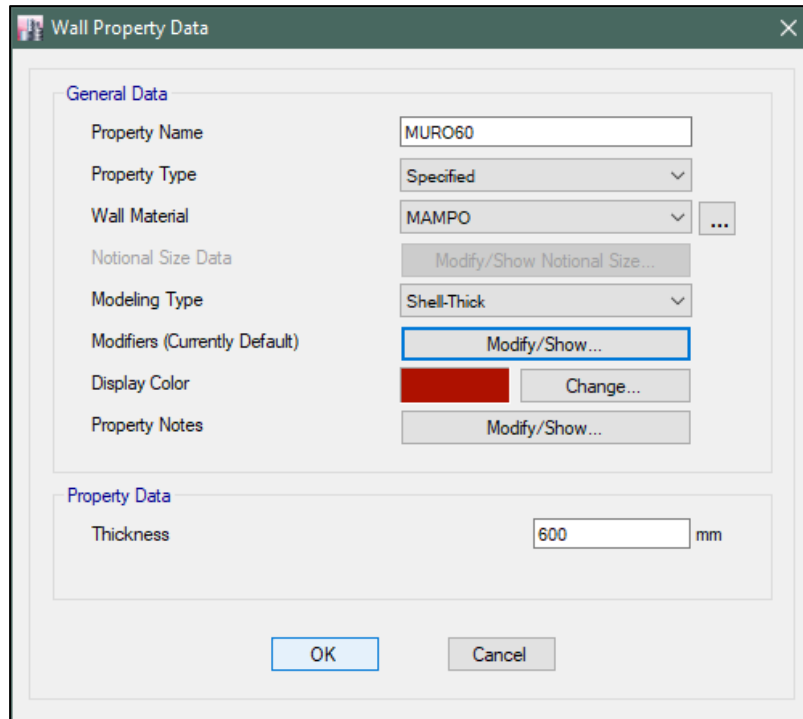


Figura 4.15: Modelo del edificio en ETABS

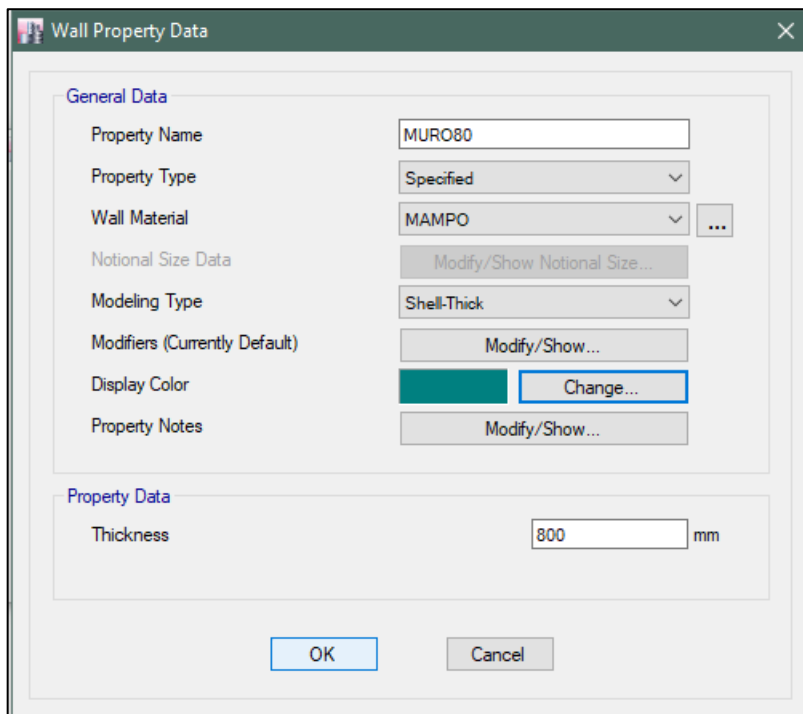


Figuras 4.16: Cuadro de dialogo para Exportar de AutoCAD (dxf) a ETABS.

Se definió dos secciones: una para el muro común de 60cm y otra para la zona de fundaciones, que es un poco más ancha que el muro común con unos 80cm.



The screenshot shows the 'Wall Property Data' dialog box for a wall section named 'MURO60'. The 'General Data' section includes: Property Name (MURO60), Property Type (Specified), Wall Material (MAMPO), Notional Size Data (Modify/Show Notional Size...), Modeling Type (Shell-Thick), Modifiers (Currently Default) (Modify/Show...), Display Color (a red color swatch with a Change... button), and Property Notes (Modify/Show...). The 'Property Data' section shows a Thickness of 600 mm. The dialog has OK and Cancel buttons at the bottom.

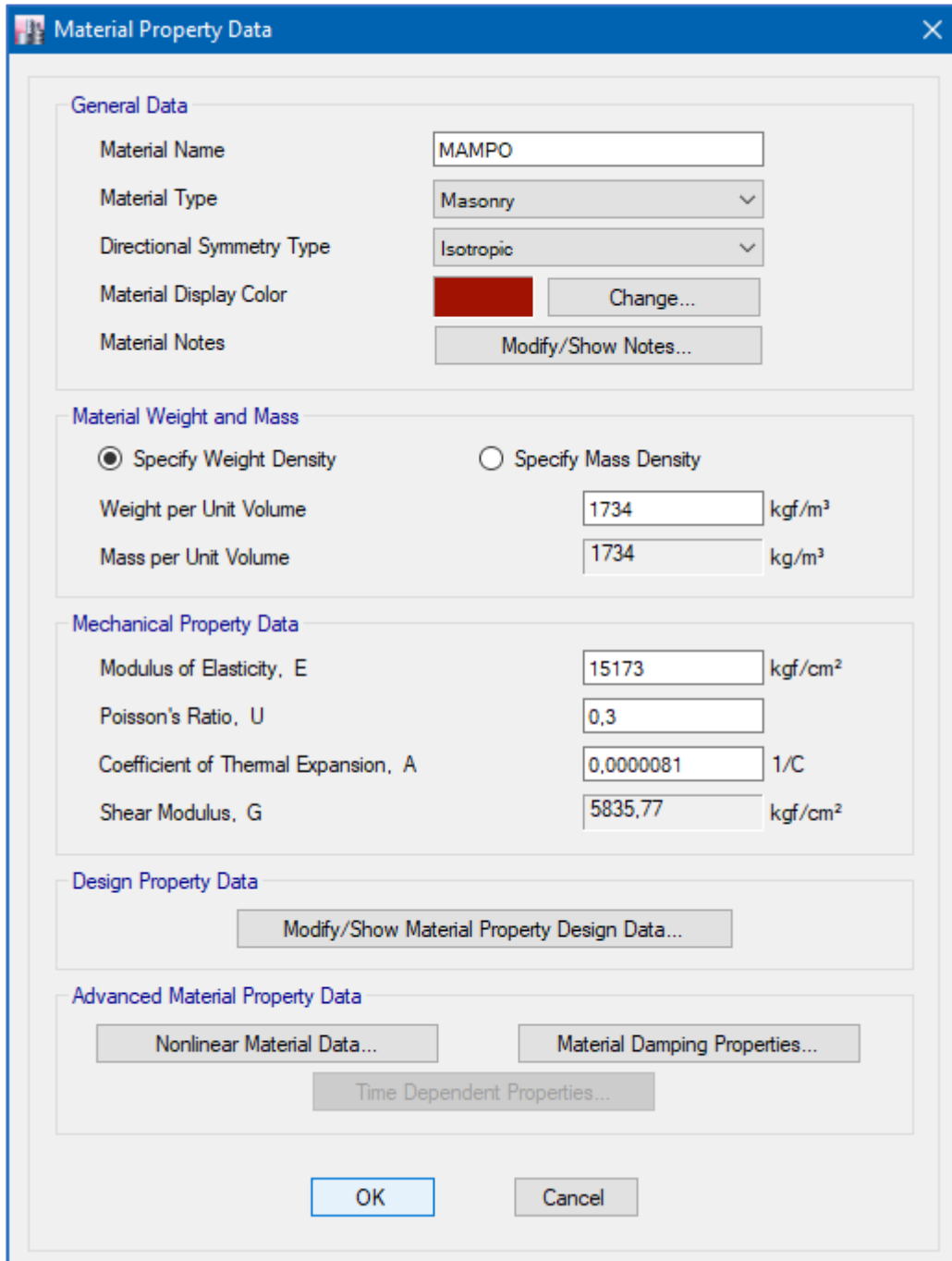


The screenshot shows the 'Wall Property Data' dialog box for a wall section named 'MURO80'. The 'General Data' section includes: Property Name (MURO80), Property Type (Specified), Wall Material (MAMPO), Notional Size Data (Modify/Show Notional Size...), Modeling Type (Shell-Thick), Modifiers (Currently Default) (Modify/Show...), Display Color (a teal color swatch with a Change... button), and Property Notes (Modify/Show...). The 'Property Data' section shows a Thickness of 800 mm. The dialog has OK and Cancel buttons at the bottom.

Figura 4.17 y 4.18: Cuadro de dialogo para la definición de las secciones.

4.2.1 DEFINICIÓN DEL MATERIAL

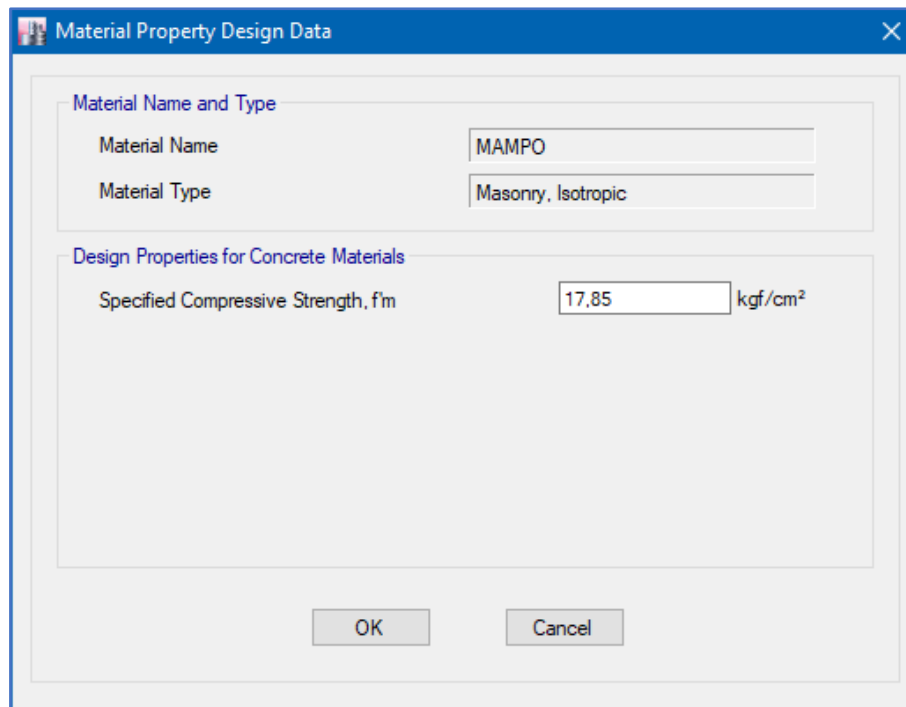
En ETABS se tiene la ventaja de contar con el material de mampostería (*Masonry*) ya definido en su comportamiento, dando la seguridad de obtener resultados más fiables que en el análisis mediante el SAP200. En este caso, también se tomó los valores obtenidos de la norma.



The image shows a screenshot of the 'Material Property Data' dialog box in ETABS. The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Material Name (MAMPO), Material Type (Masonry), Directional Symmetry Type (Isotropic), Material Display Color (Red), and Material Notes (Modify/Show Notes...).
- Material Weight and Mass:** Radio buttons for 'Specify Weight Density' (selected) and 'Specify Mass Density'. Fields for Weight per Unit Volume (1734 kgf/m³) and Mass per Unit Volume (1734 kg/m³).
- Mechanical Property Data:** Modulus of Elasticity, E (15173 kgf/cm²), Poisson's Ratio, U (0,3), Coefficient of Thermal Expansion, A (0,0000081 1/C), and Shear Modulus, G (5835,77 kgf/cm²).
- Design Property Data:** A button for 'Modify/Show Material Property Design Data...'. This section is currently disabled.
- Advanced Material Property Data:** Buttons for 'Nonlinear Material Data...', 'Material Damping Properties...', and 'Time Dependent Properties...'. This section is also disabled.

At the bottom of the dialog are 'OK' and 'Cancel' buttons.



Material Property Design Data

Material Name and Type

Material Name: MAMPO

Material Type: Masonry, Isotropic

Design Properties for Concrete Materials

Specified Compressive Strength, f'm: 17,85 kgf/cm²

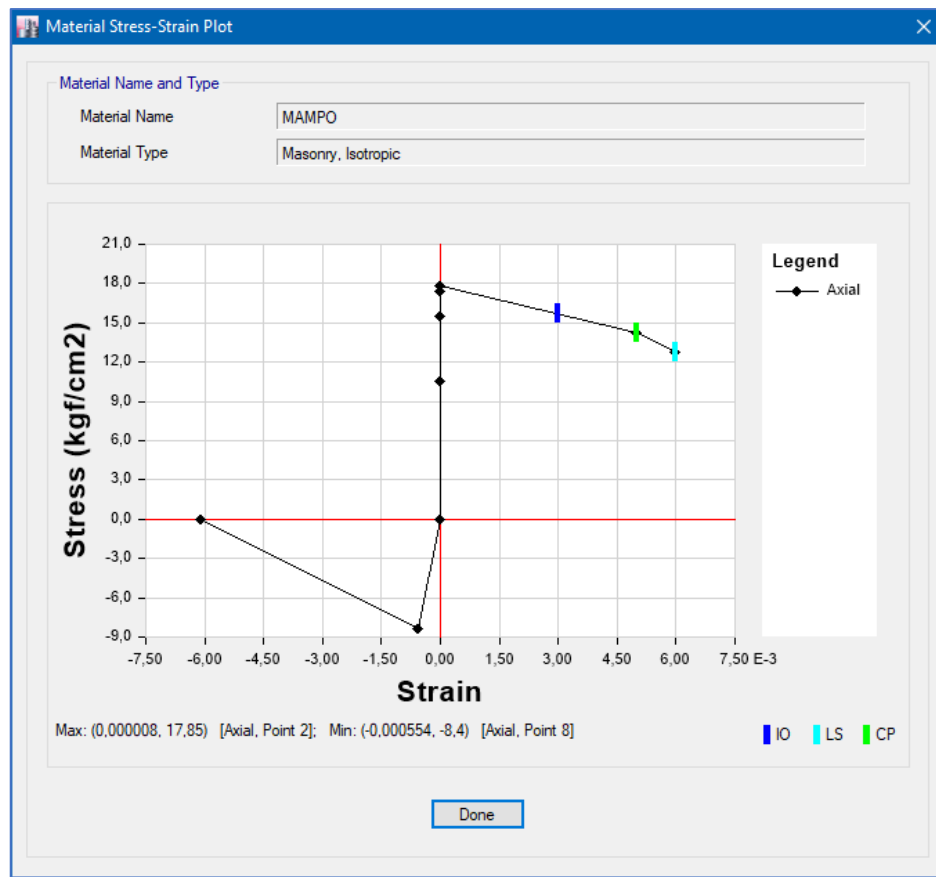
OK Cancel

Figura 4.19 y 4.20 Cuadros de diálogos para la definición del material.

User Stress-Strain Curve Data

Number of Points in Stress-Strain Curve

Point Number	Strain	Stress (kgf/cm ²)	Point ID
1	-0,006	-12,76	
2	-0,005	-14,28	-E
3	-0,000008	-17,85	-C
4	-0,000008	-17,82	
5	-0,000007	-17,39	
6	-0,000005	-15,54	
7	-0,000003	-10,54	
8	0	0	A
9	0,000554	8,4	B



Figuras 4.21 y 4.22: curva de tensión deformación del material

4.2.2 INTRODUCCIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS

Del mismo modo que en SAP2000 se cargaron los acelerogramas desde un archivo formato *txt*. (“*From file*”). Por otro lado, los acelerogramas también fueron afectados por los mismos factores de escala que en SAP2000 para que la aceleración máxima en los mismos se encuentre entre los valores de $0,3g - 0,35g$, (aceleraciones esperadas para Salta).

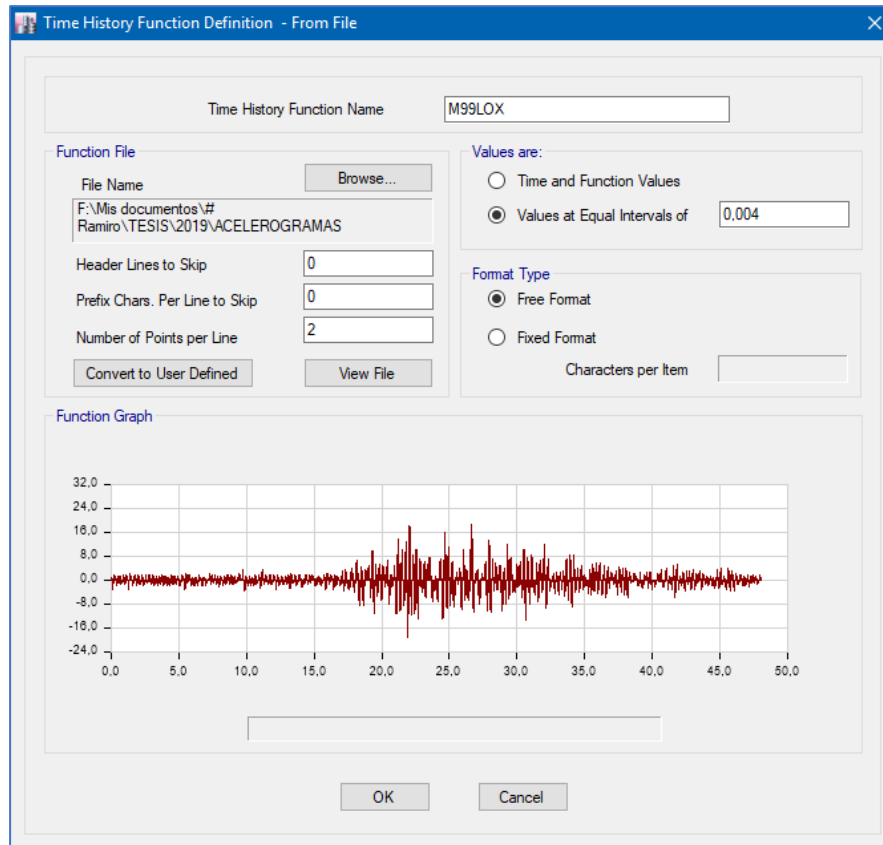


Figura 4.23: Acelerograma cargado en la dirección X.

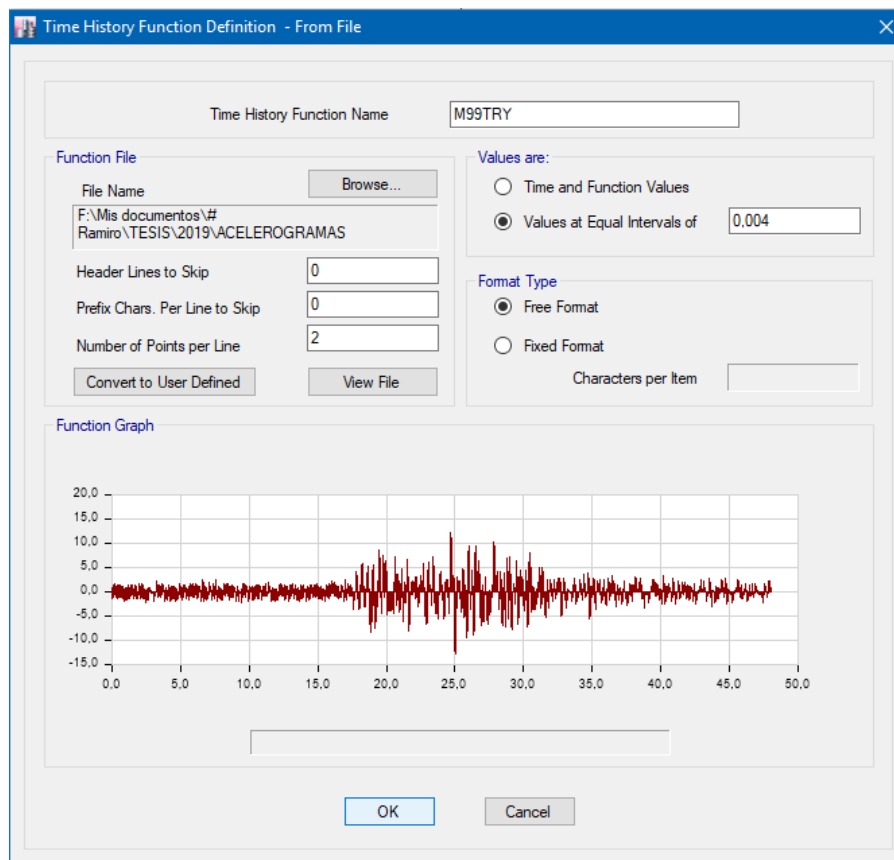
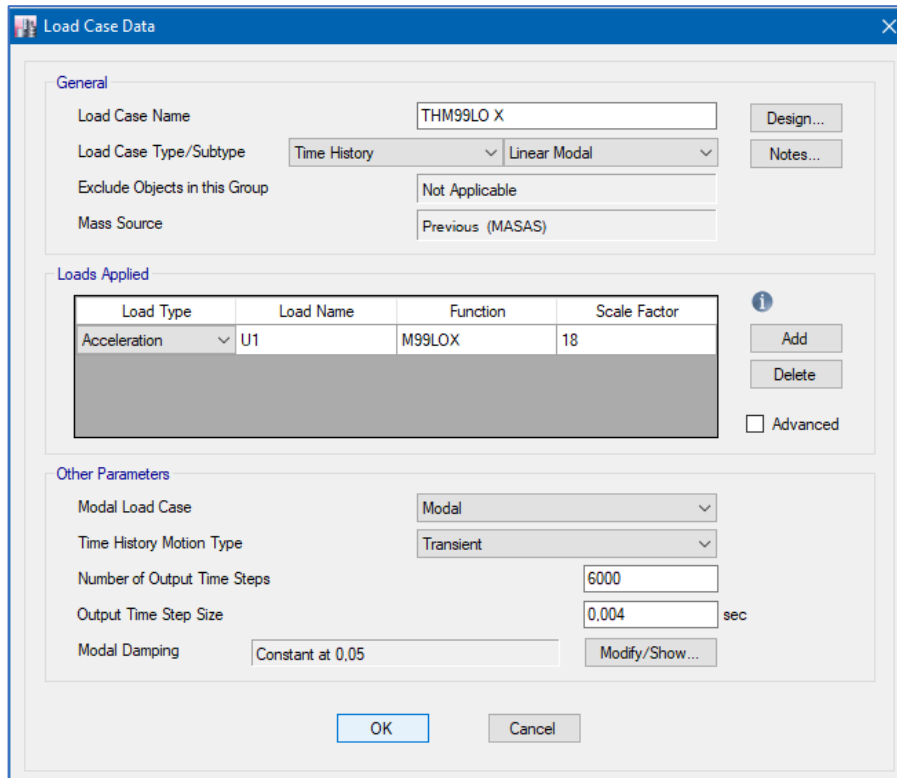


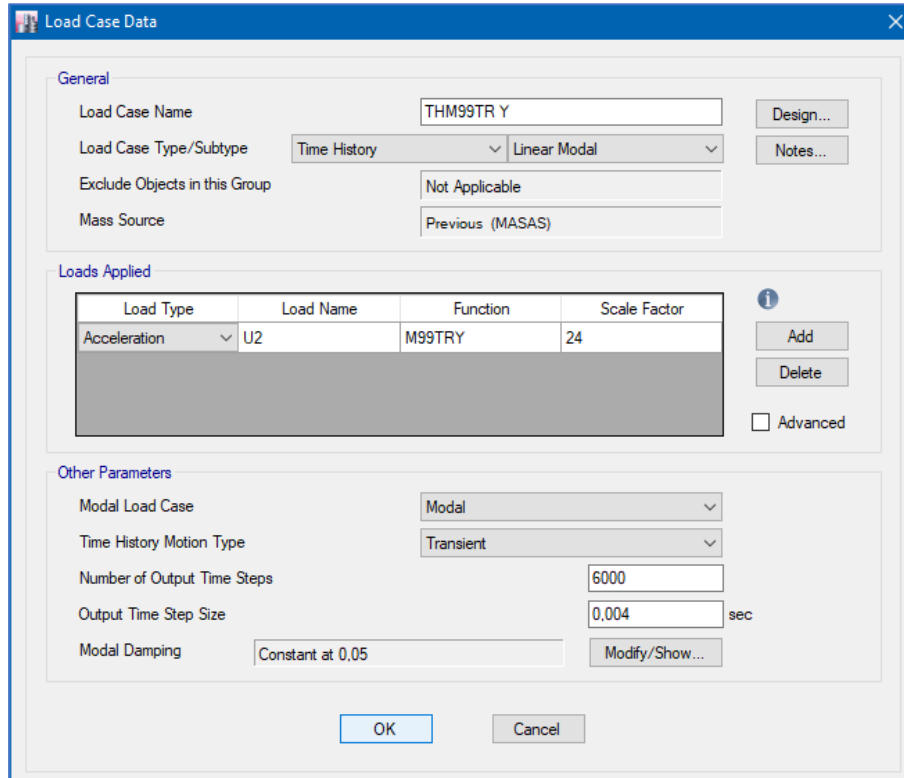
Figura 4.24: Acelerograma cargado en la dirección Y.



The screenshot shows the 'Load Case Data' dialog box for a load case named 'THM99LO X'. The 'General' section includes fields for 'Load Case Name', 'Load Case Type/Subtype' (Time History / Linear Modal), 'Exclude Objects in this Group' (Not Applicable), and 'Mass Source' (Previous (MASAS)). The 'Loads Applied' section contains a table with one entry: Acceleration (U1) with a scale factor of 18. The 'Other Parameters' section includes 'Modal Load Case' (Modal), 'Time History Motion Type' (Transient), 'Number of Output Time Steps' (6000), 'Output Time Step Size' (0.004 sec), and 'Modal Damping' (Constant at 0.05). Buttons for 'Design...', 'Notes...', 'Add', 'Delete', 'Advanced', 'OK', and 'Cancel' are visible.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	M99LOX	18

Figura 4.25: Introducción del acelerograma en la dirección "X" al modelo, aplicando el factor de escala $fe=18$.



The screenshot shows the 'Load Case Data' dialog box for a load case named 'THM99TR Y'. The 'General' section includes fields for 'Load Case Name', 'Load Case Type/Subtype' (Time History / Linear Modal), 'Exclude Objects in this Group' (Not Applicable), and 'Mass Source' (Previous (MASAS)). The 'Loads Applied' section contains a table with one entry: Acceleration (U2) with a scale factor of 24. The 'Other Parameters' section includes 'Modal Load Case' (Modal), 'Time History Motion Type' (Transient), 'Number of Output Time Steps' (6000), 'Output Time Step Size' (0.004 sec), and 'Modal Damping' (Constant at 0.05). Buttons for 'Design...', 'Notes...', 'Add', 'Delete', 'Advanced', 'OK', and 'Cancel' are visible.

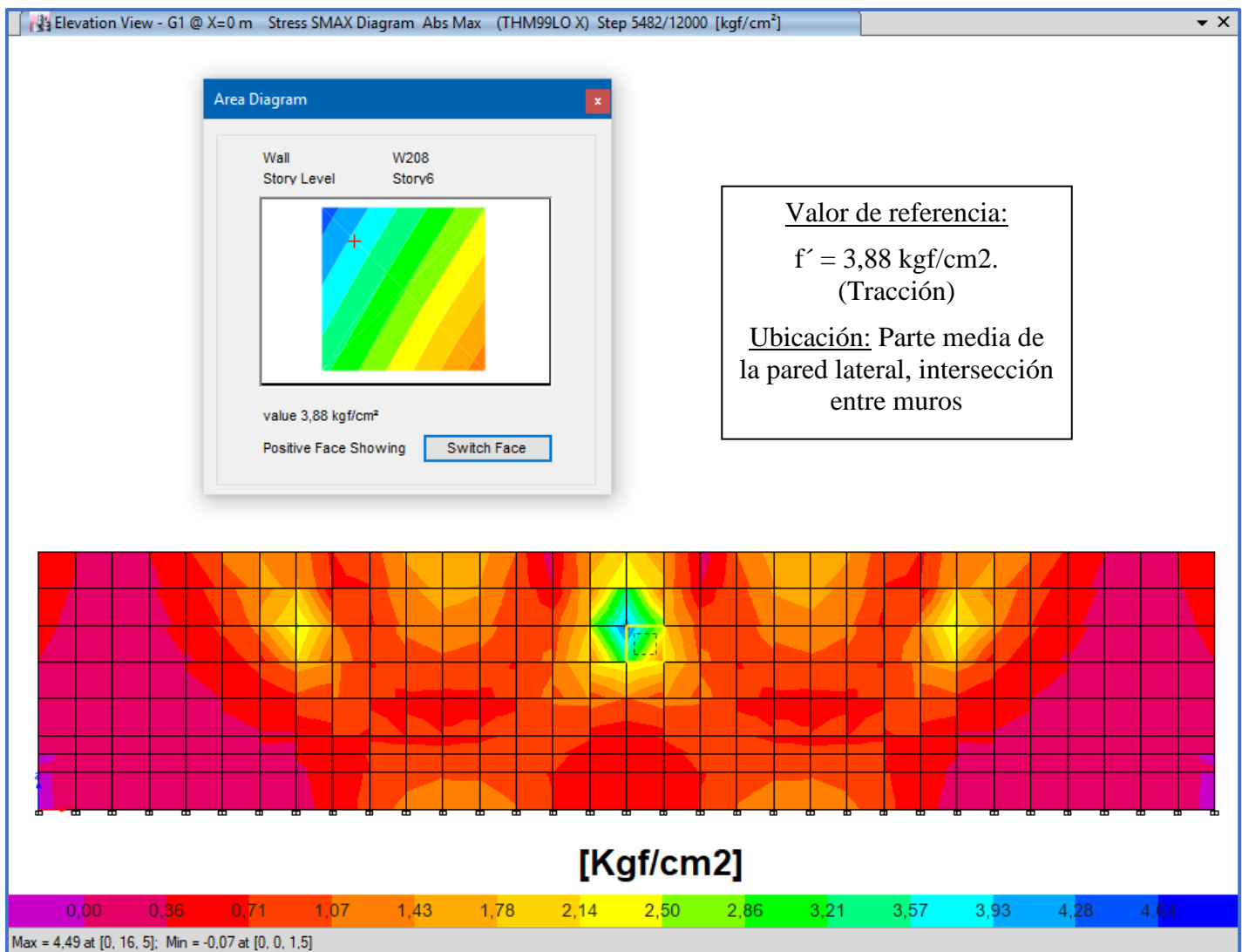
Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	M99TRY	24

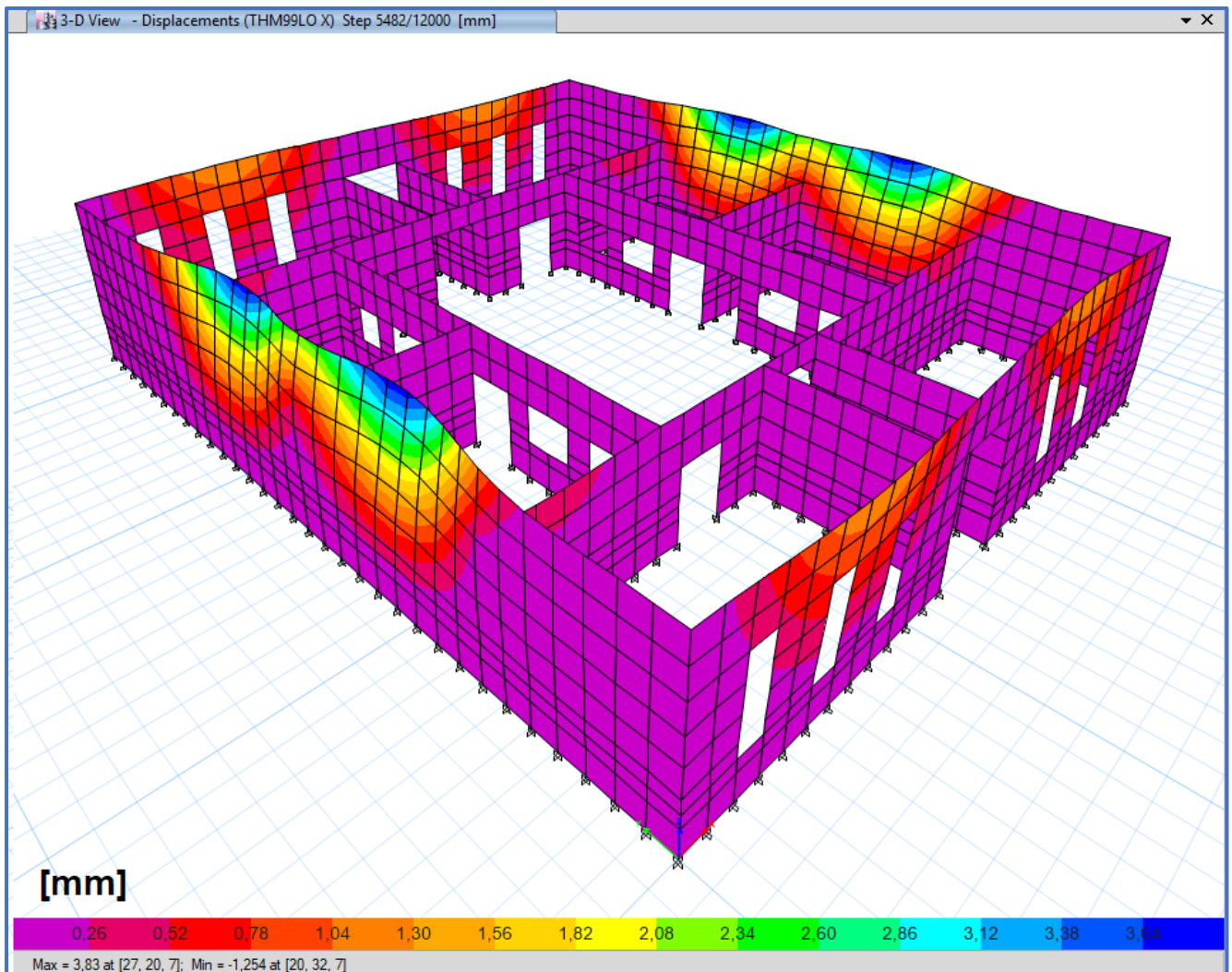
Figura 4.26: Introducción del acelerograma en la dirección "Y" al modelo, aplicando el factor de escala $fe=24$.

4.2.3 RESULTADOS DEL ANALISIS EN ETABS

Los resultados de estos estudios son los siguientes, se tiene en cuenta que se aplicó dos acelerogramas en direcciones diferentes, tomándose como ejemplo los resultados más representativos (en el momento donde se produjeron las aceleraciones máximas), estos son los diagramas de tensiones y deformaciones obtenidos en los tiempos: 22 *segundos* del sismo en la dirección *X* y 25 *segundos* del sismo en la dirección *Y*. Para una mejor comparación con los resultados obtenidos en SAP2000 se tomaron los mismos puntos de referencia.

CARACTERISTICAS DINAMICAS OBTENIDAS	
Periodo T [seg]	0,255
Frecuencia f [Cyc/seg]	3,92





Figuras 4.27 y 4.28: Tensiones normales ($S_{m\acute{a}x}$) en el muro lateral y Deformaciones obtenidas del análisis mediante ETABS en la dirección X en el tiempo $t=21,928$ seg cuando se produce la Aceleración máxima 342 cm/seg^2 .

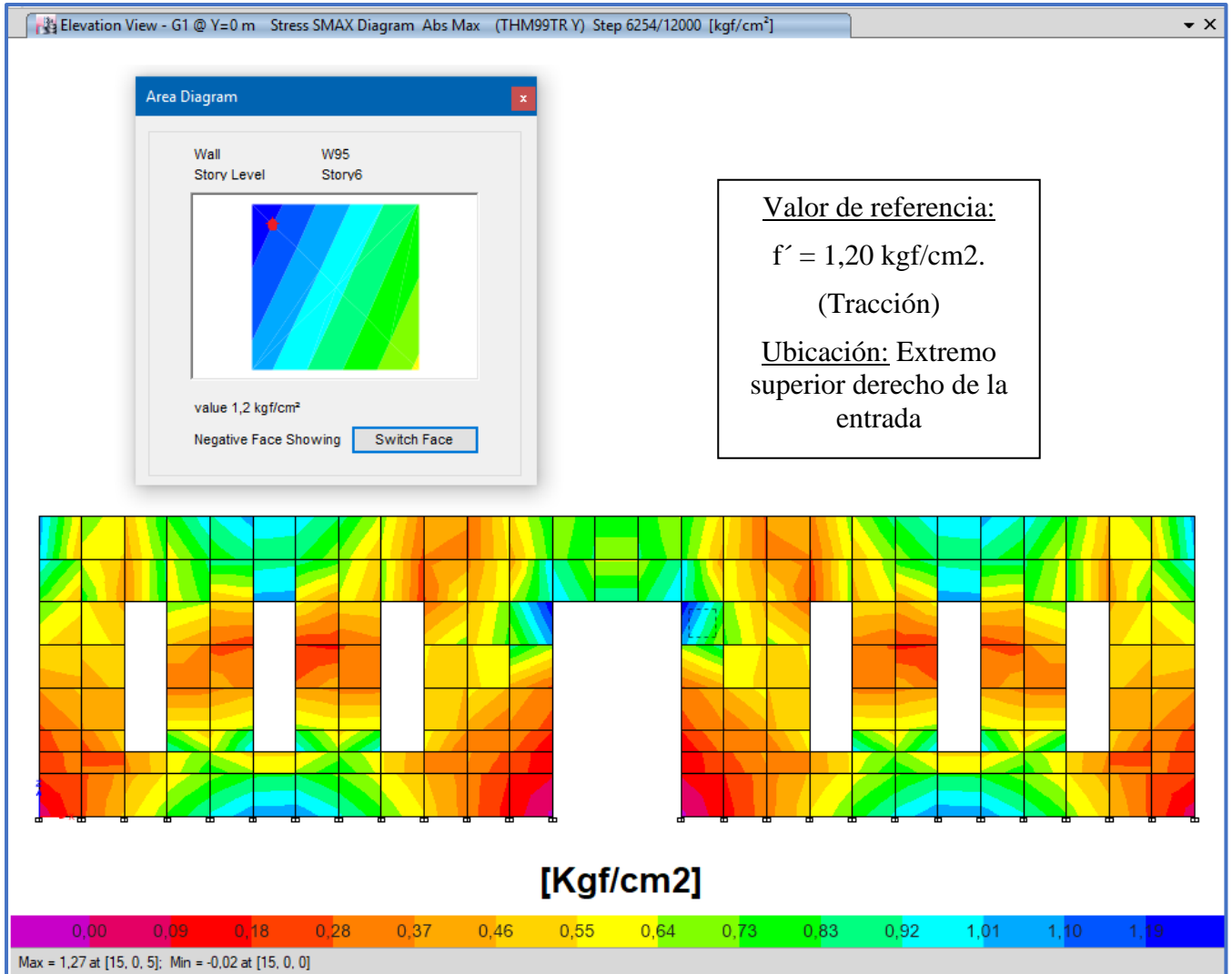


Figura 4.29: Tensiones normales ($S_{m\acute{a}x}$) en el muro del frente obtenidas del análisis mediante ETABS en la dirección Y en el tiempo $t=25,016$ seg cuando se produce la Aceleración máxima $305,76 \text{ cm/seg}^2$.

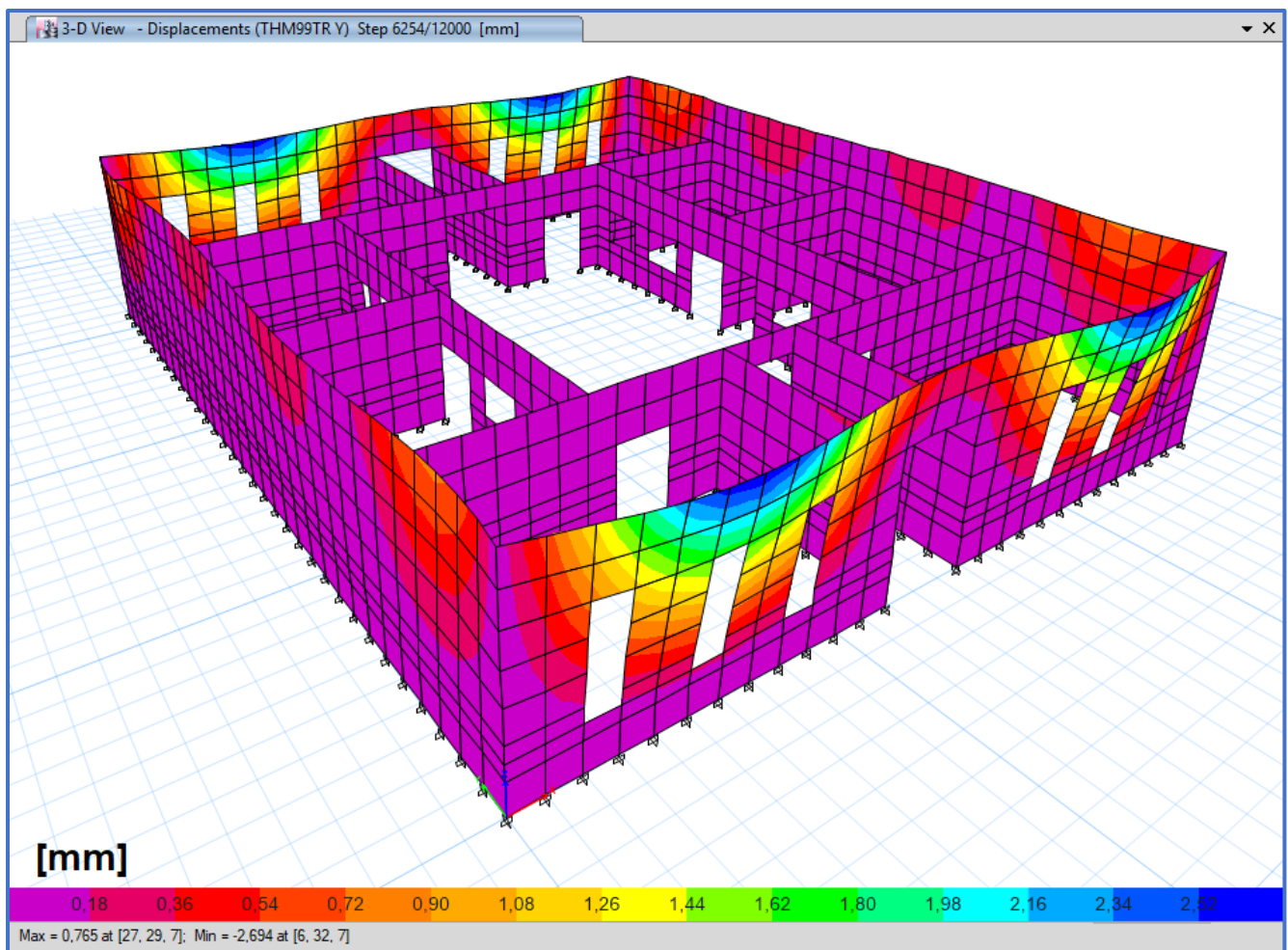


Figura 4.30: Deformaciones en el muro del frente obtenidas del análisis mediante ETABS en la dirección Y en el tiempo $t=25,016$ seg cuando se produce la Aceleración máxima $305,76$ cm/seg².

4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ETABS Y SAP2000

PUNTO DE REFERENCIA	TENSION NORMAL [Kgf/cm ²]	
	SAP2000	ETABS
MURO FRENTE	1,36	1,20
MURO LATERAL	3,72	3,88

- *Cuadro de tensiones normales: Los valores al ser positivos son considerados de tracción.*
- *Los puntos de referencia son aquellos en donde se encuentran los valores máximos de tensiones normales.*

En ambos programas los valores de la tensión normal ($S_{m\acute{a}x}$), no sobrepasan la resistencia de la mampostería a la compresión $f'm = 17,85 \text{ Kgf/cm}^2$, ni la resistencia a la tracción $f'r = 5,10 \text{ Kgf/cm}^2$.

Los valores en los puntos de referencia son bastante próximos y el comportamiento en cuanto a deformación de la estructura en los momentos de máxima aceleración del sismo son similares, por lo que se puede decir que los resultados de los análisis dinámicos realizados con ambos programas son prácticamente los mismos.

Otra comparación es la muestra de la información del análisis dinámico en ETABS, donde a diferencia de SAP2000, nos da un resumen de la respuesta total del edificio, se pueden ver en los siguientes cuadros de resumen, el primero es para el sismo en la dirección "X", y el segundo le corresponde al sismo en la dirección "Y". Se puede observar el desplazamiento (*Displacement [mm]*) por cada metro de altura, como así también el corte (*Shear [tn]*) en cada nivel (de un metro de altura), que se producen en un momento determinado del sismo. También se ven los máximos (color rojo) y mínimos (color verde).

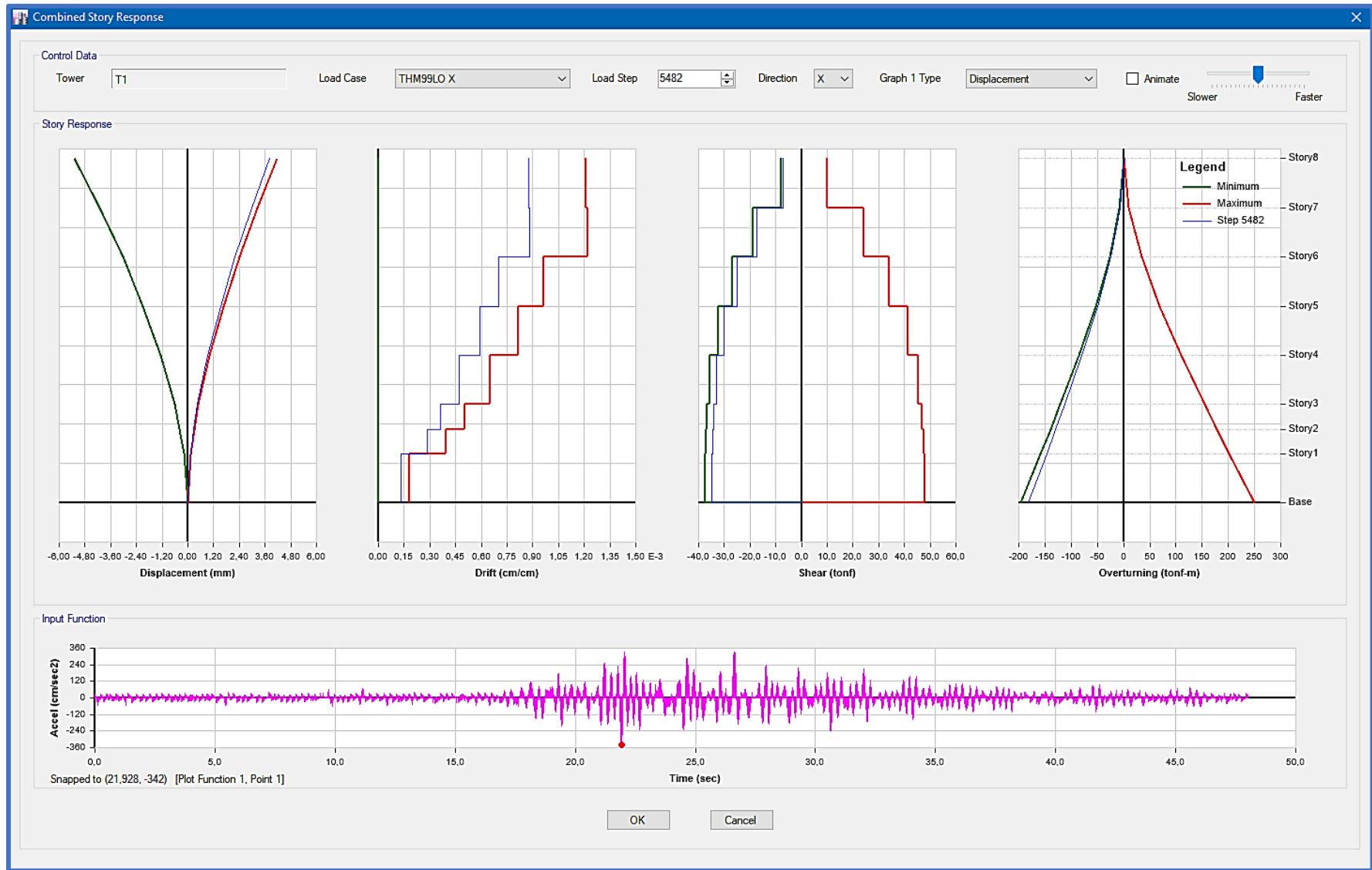


Figura 4.31 Respuesta global del edificio, sismo en la dirección X.

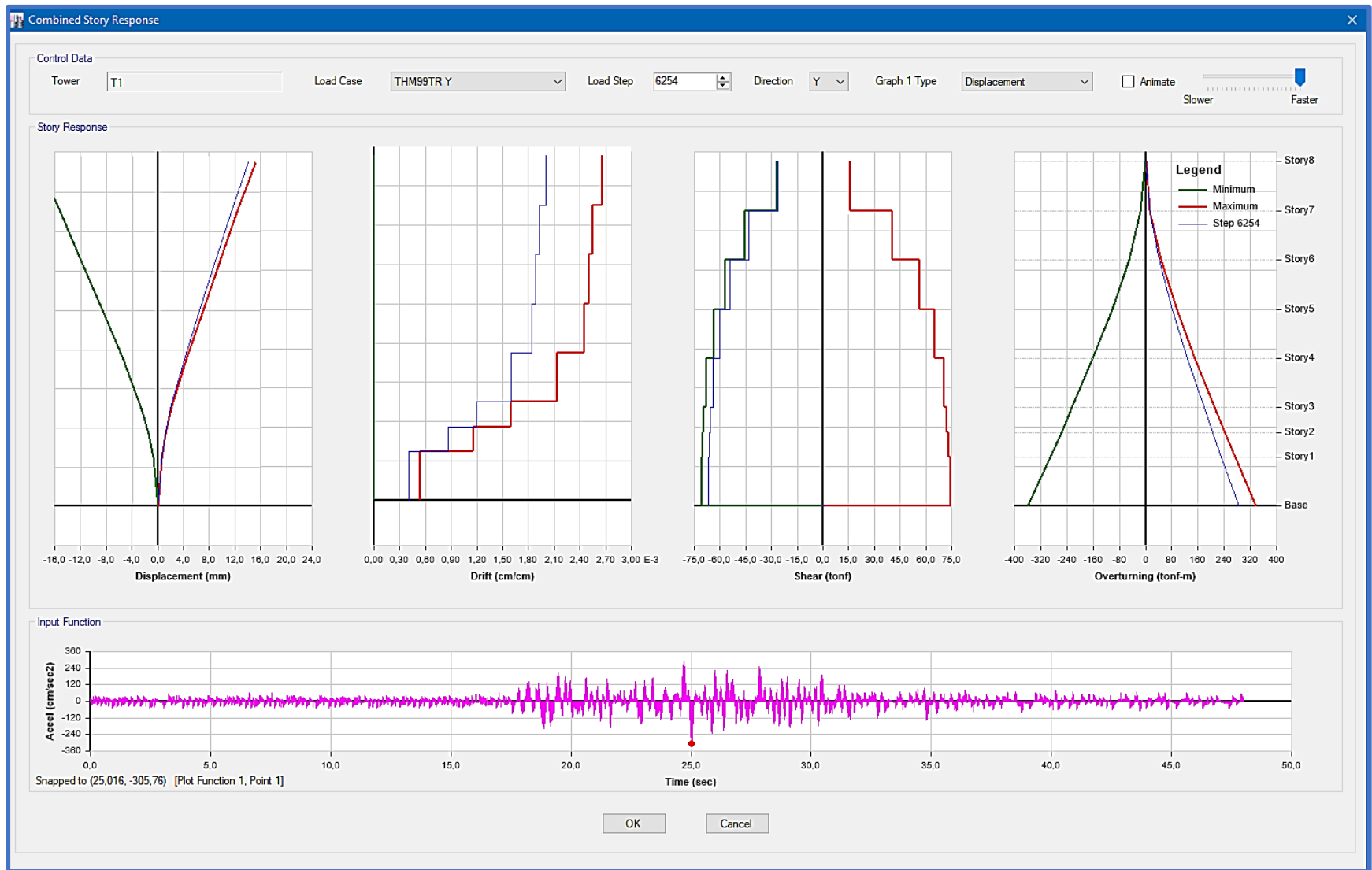


Figura 4.32 Respuesta global del edificio, sismo en la dirección Y.

CAPITULO 5: APLICACIÓN DE LA TEORIA DE LOS MACROELEMENTOS

5.1 METODO ESTÁTICO: DETERMINACIÓN DEL CORTE BASAL

El sistema de fuerzas horizontales equivalentes a la acción sísmica, que se aplica según la dirección de análisis considerada, se establece determinando primero el valor de la fuerza sísmica horizontal resultante (esfuerzo de corte en la base de la construcción), a partir de la cual se determinan luego las fuerzas componentes del sistema, las cuales, a su vez, se suponen concentradas a nivel de los entrepisos y techo de la construcción, en los que se han supuesto concentradas las cargas gravitatorias.

Para la obtención de dicha fuerza (V_0), se realizó el método simplificado que consiste en la fórmula $V_0 = c \cdot W$, en donde c es un coeficiente de sismicidad y W es el peso propio del muro más la sobrecarga del piso a analizar.

El coeficiente de sismicidad se determina mediante la siguiente fórmula:

$$C = C_{nm} \cdot \gamma_d$$

Donde C_{nm} es el coeficiente sísmico normalizado para construcciones de mampostería y para nuestro caso de zona 3 y para ladrillo macizo común es igual a 0,25 (Fig. 5.1);

Zona sísmica	C_{nm}	
	Mampostería de ladrillos Macizos	Mampostería de bloques huecos portantes
1	0,10	0,15
2	0,18	0,27
3	0,25	0,38
4	0,35	0,53

Figura 5.1: selección del coeficiente de sismicidad C

γ_d es el factor de riesgo y en nuestro caso por ser una escuela es igual a 1,3.

Antes se debe verificar la esbeltez para descartar aquellos muros que no colaboren en la resistencia. Esta fórmula está dada en función de la longitud y la altura del muro:

$$\frac{H}{l} \leq 2.2$$

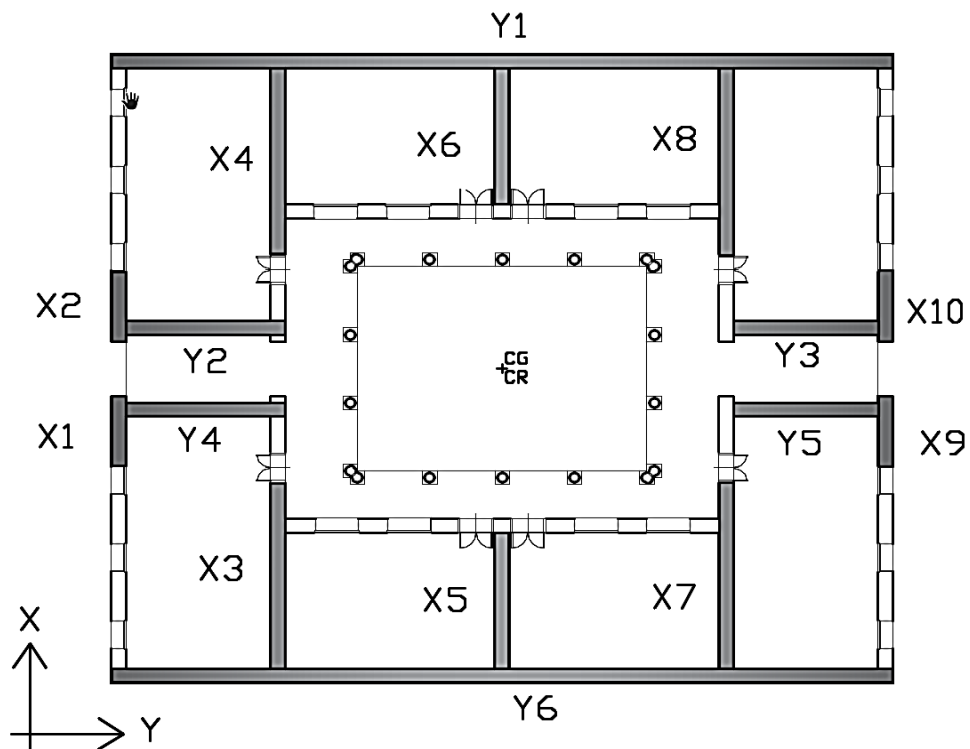


Figura 5.2: Planta de la estructura con la referencia sobre cada muro

Sabiendo entonces cuáles muros son los resistentes, se procedió a realizar el análisis de carga:

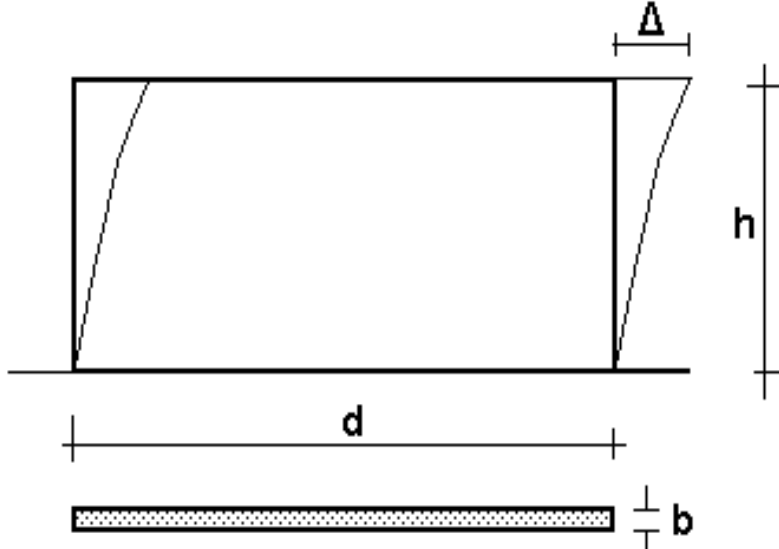
MURO	X	Y	Z	VOL	χ	PESO
X1	3,20	0,60	7,00	13,44	1,70	22,85
X2	3,20	0,60	7,00	13,44	1,70	22,85
X3	8,20	0,60	5,00	24,60	1,70	41,82
X4	8,20	0,60	5,00	24,60	1,70	41,82
X5	6,60	0,60	5,00	19,80	1,70	33,66
X6	6,60	0,60	5,00	19,80	1,70	33,66
X7	8,20	0,60	5,00	24,60	1,70	41,82
X8	8,20	0,60	5,00	24,60	1,70	41,82
X9	3,20	0,60	7,00	13,44	1,70	22,85
X10	3,20	0,60	7,00	13,44	1,70	22,85
						325,99
Y1	0,60	32,40	7,00	136,08	1,70	231,34
Y2	0,60	6,00	5,00	18,00	1,70	30,60
Y3	0,60	6,00	5,00	18,00	1,70	30,60
Y4	0,60	6,00	5,00	18,00	1,70	30,60
Y5	0,60	6,00	5,00	18,00	1,70	30,60
Y6	0,60	32,40	7,00	136,08	1,70	231,34
						585,07

$$\text{Corte Basal} = T_s = C \times W_{\text{total}} = 0,25 \times 1,3 \times (326 + 585,07)$$

PESO TOTAL=	911,26
C	0,325
FUERZA Ts=	296,10

El corte sísmico calculado fue de 296,10 tn. Esta fuerza sísmica será resistida por los muros y serán distribuidos en relación con la rigidez de cada uno. El cálculo de la rigidez de muro se calculó determinando la deformación de un muro (Δ) producida por una carga unitaria horizontal aplicada en el nivel superior del muro, como se muestra en la siguiente figura:

area $A = b \times d$ momento de Inercia $J = \frac{b \times d^3}{12}$
 Desplazamiento $\Delta = \frac{P \times h^3}{3 \times E \times J} + \frac{3}{2} \frac{P \times h}{G \times A}$



Se puede calcular Δ en función de las dimensiones de los muros, su altura H , su longitud L y su espesor t .

$$\text{Desplazamiento} = \Delta = \frac{H/L \left[1 + (H/L)^2 \right]}{3 \times t}$$

$$\text{Rigidez} = K = \frac{1}{\Delta}$$

Figura 5.3: Fórmulas de cálculo de rigidez de un muro.



Con base en la anterior fórmula, se procedió a determinar la rigidez de los muros en la dirección *X* y la dirección *Y*.

DIRECCION	MURO	H	L	H/L	Δ (cm)	K (tn/cm)
t=60 cm	X1	7,00	3,20	2,19	0,070	14,22
X	X2	7,00	3,20	2,19	0,070	14,22
	X3	5,00	8,20	0,61	0,005	215,19
	X4	5,00	8,20	0,61	0,005	215,19
	X5	5,00	6,60	0,76	0,007	150,96
	X6	5,00	6,60	0,76	0,007	150,96
	X7	5,00	8,20	0,61	0,005	215,19
	X8	5,00	8,20	0,61	0,005	215,19
	X9	7,00	3,20	2,19	0,070	14,22
	X10	7,00	3,20	2,19	0,070	14,22
	Y	Y1	7,00	32,40	0,22	0,001
Y2		5,00	6,00	0,83	0,008	127,48
Y3		5,00	6,00	0,83	0,008	127,48
Y4		5,00	6,00	0,83	0,008	127,48
Y5		5,00	6,00	0,83	0,008	127,48
Y6		7,00	32,40	0,22	0,001	795,99

ΣK _x	K_x TOTAL	1219,58	tn/cm
ΣK _y	K_y TOTAL	2101,88	tn/cm

A partir de este resultado, se obtuvo las rigideces relativas dividiendo cada rigidez de muro por la rigidez total, para luego obtener los cortes directos, se emplean las siguientes formulas:

$$\text{Rigidez relativa} = K_r = \frac{K_{\text{muro}}}{K_{\text{total}}}$$

$$\text{Fuerza o Corte Directo} = \text{Rigidez relativa} \times \text{Corte basal} = K_r \times T_s$$



				CORTE DIRECTO	
DIRECCION	MURO	KRELATIVOX	KRELATIVOY	FUERZA X (ton)	FUERZA Y (ton)
t=60 cm	X1	0,01		3,45	
X	X2	0,01		3,45	
	X3	0,18		52,25	
	X4	0,18		52,25	
	X5	0,12		36,65	
	X6	0,12		36,65	
	X7	0,18		52,25	
	X8	0,18		52,25	
	X9	0,01		3,45	
	X10	0,01		3,45	
	Y	Y1		0,38	
Y2			0,06		17,96
Y3			0,06		17,96
Y4			0,06		17,96
Y5			0,06		17,96
Y6			0,38		112,13

En este análisis no se tiene en cuenta el efecto del Corte por Torsión debido a que el techo tiene poca rigidez por lo que se descarta como parte del sistema sismorresistente principal, también por este mismo motivo no es considerado en el modelado por computadora.

(Bibliografía de referencia: Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2013, Reglamento para Construcciones Sismorresistentes Parte I Construcciones en general)

(Bibliografía de referencia: Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2018, Reglamento para Construcciones Sismorresistentes Parte III Construcciones de Mampostería)

5.2 ANALISIS ESTÁTICO CON MACROELEMENTOS (SAP2000)

Con base en la teoría de macroelementos, se definió el modelo apropiado para el caso de la escuela estudiada; el edificio escolar pertenece a una estructura típica colonial, por lo que representa a varias del mismo tipo ubicadas en la Ciudad de Salta.



Figura 5.4: Vista desde el patio interno de una estructura tipo colonial

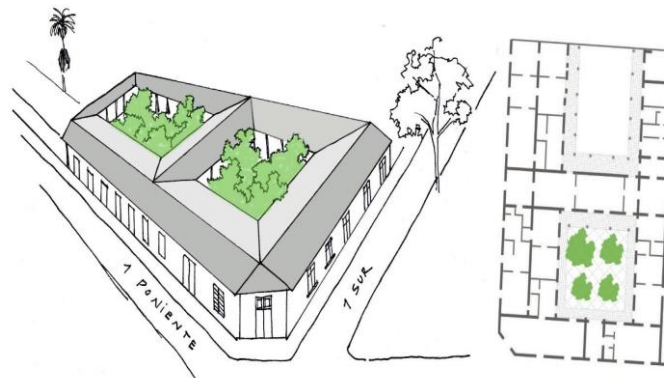


Figura 5.5: Esquema de una estructura similar a la elegida

Muchas estructuras, por un lado, poseen la misma tipología y arquitectura. Por otro, suelen ser de mampostería sin confinar y con muros altos en el perímetro y pequeños adentro. El modelo de macroelementos optado (Figura 5.6) consiste en separar los cuatro muros perimetrales y el centro por otro lado. Es decir, está compuesto por cinco macroelementos. Este conjunto será afectado por un sismo en distintas direcciones y se pretende observar cómo la estructura se comporta ante esta perturbación.

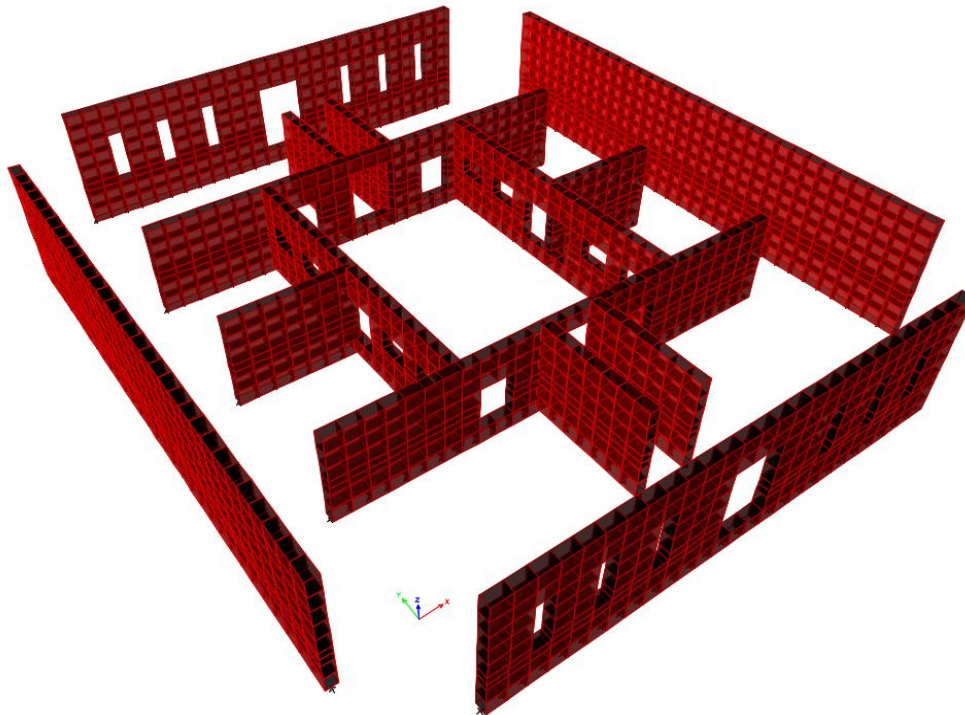


Figura 5.6: Modelo de Macroelementos optado.

Teniendo ya determinadas las fuerzas horizontales mediante el método estático, se aplicó la teoría de *Macroelementos*, separando el muro del frente y el muro lateral de la estructura (figuras 5.7, 5.8 y 5.9), debido a que en el análisis dinámico fueron los más afectados por el sismo. Para el modelado se consideró conveniente dejar parte de los muros perpendiculares a los mismos, para una mejor representación. A cada muro se le aplicó el sistema de fuerzas horizontales correspondientes.

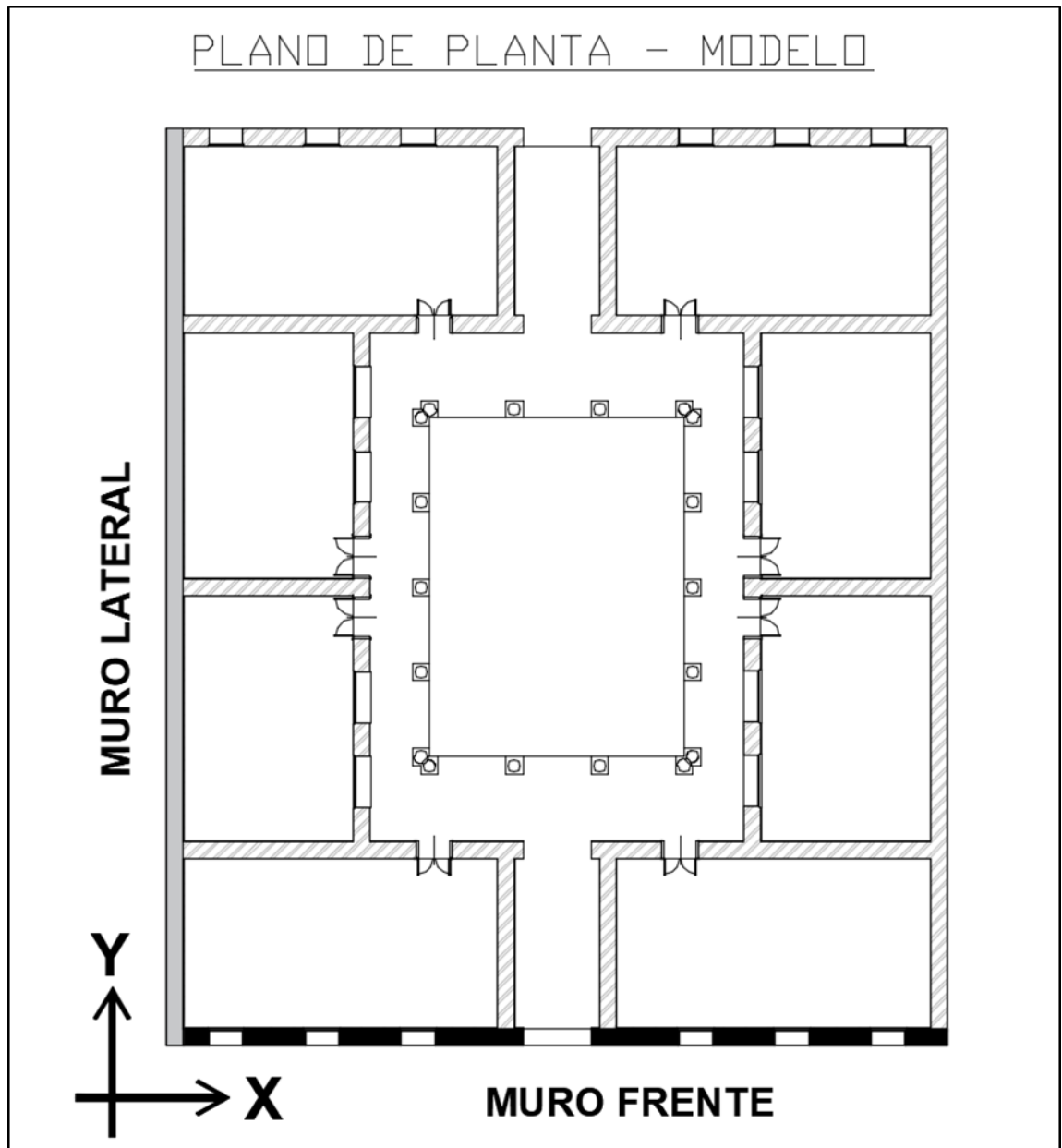


Figura 5.7: Muros elegidos para el análisis (muro de frente y lateral) con las direcciones de referencia.

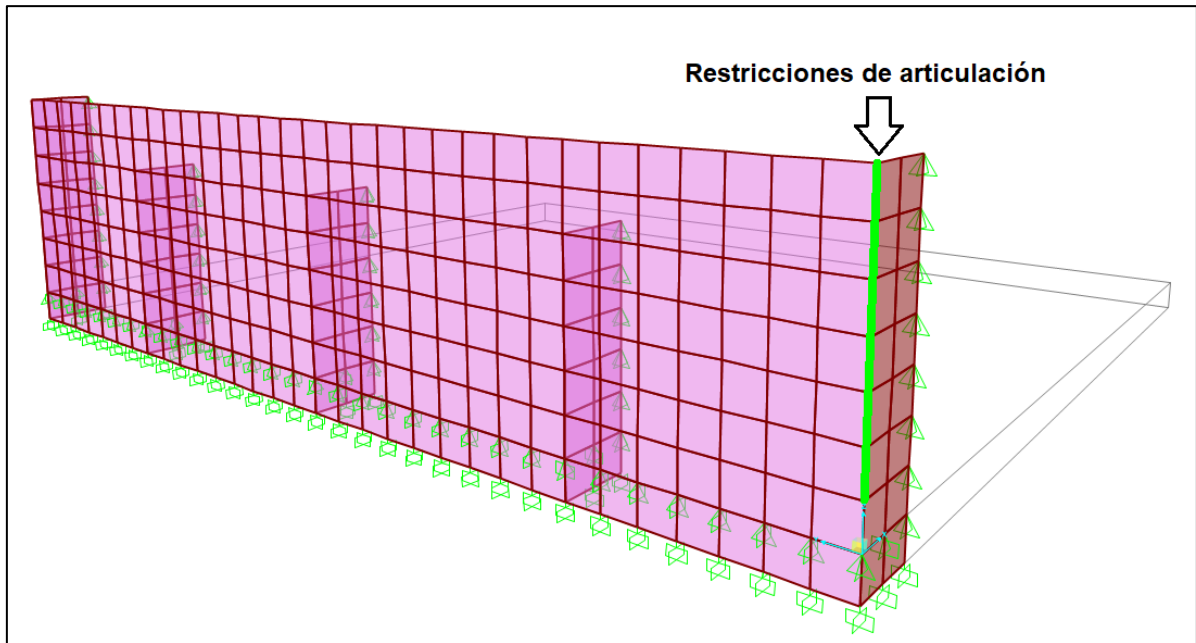


Figura 5.8: Modelo del Muro Lateral separado

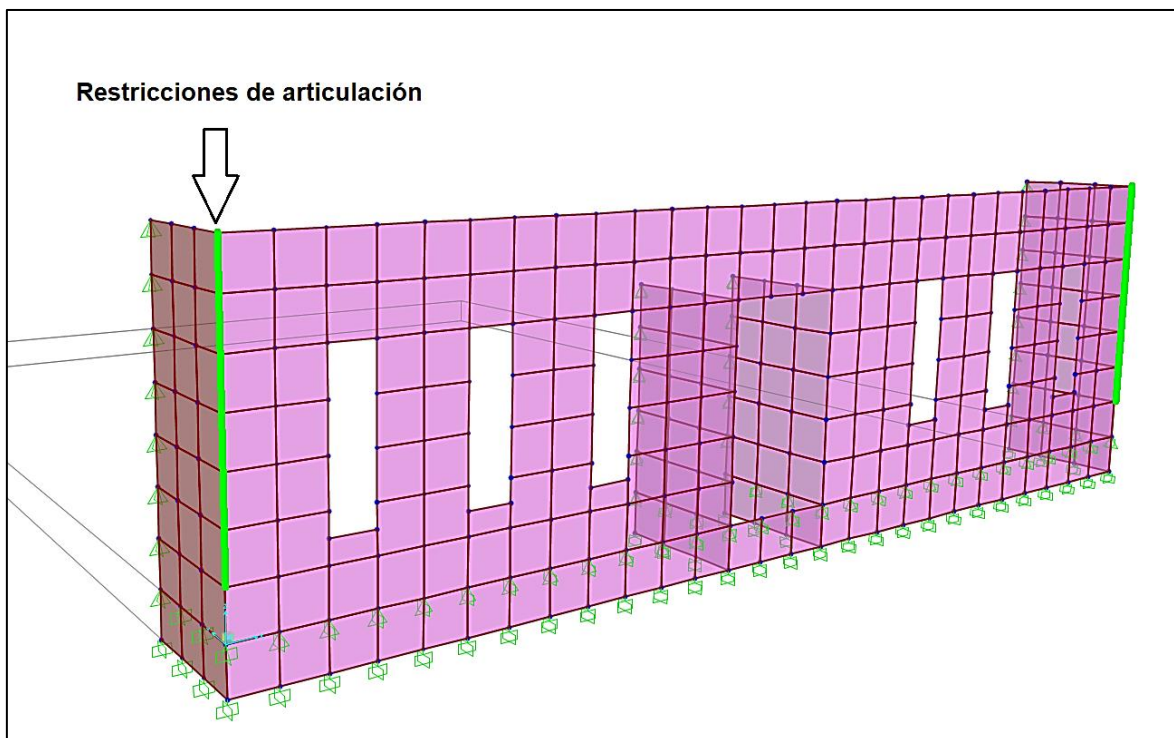


Figura 5.9: Modelo del Frente separado

Se aplicaron las fuerzas estáticas determinadas a en el Método Estático. Para desarrollar este método, conviene suponer que la fuerza se encuentra aplicada en el extremo superior de los muros que intervienen en el análisis, tanto en la dirección “X” como en la dirección “Y”.

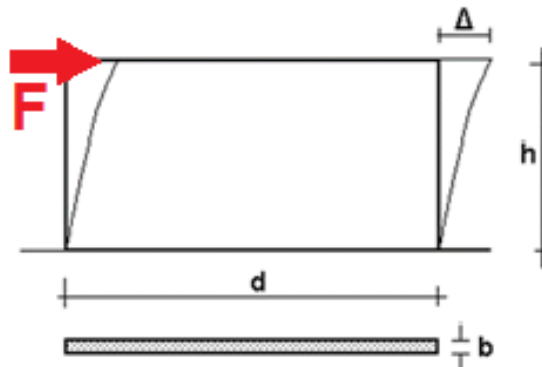
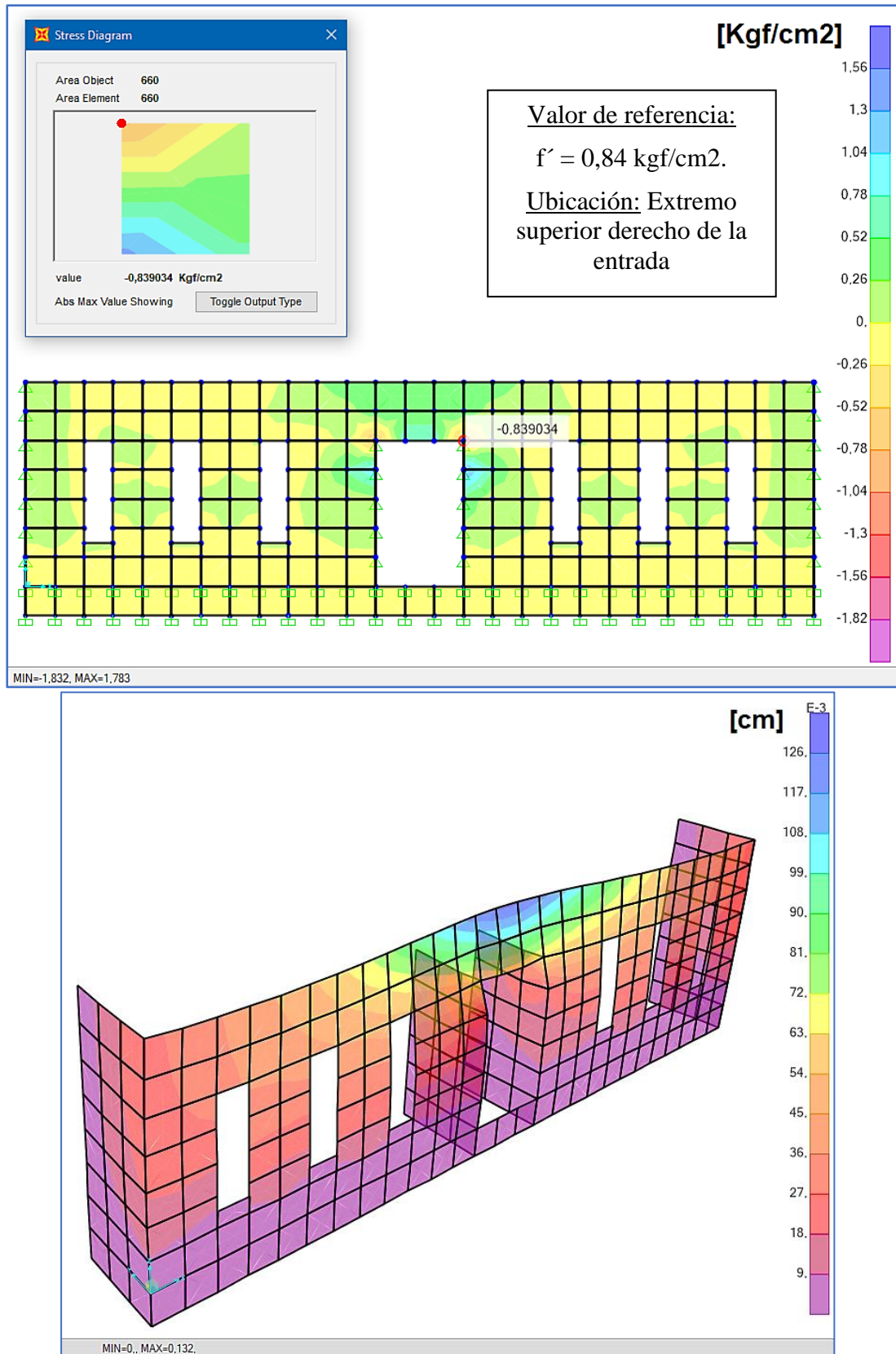


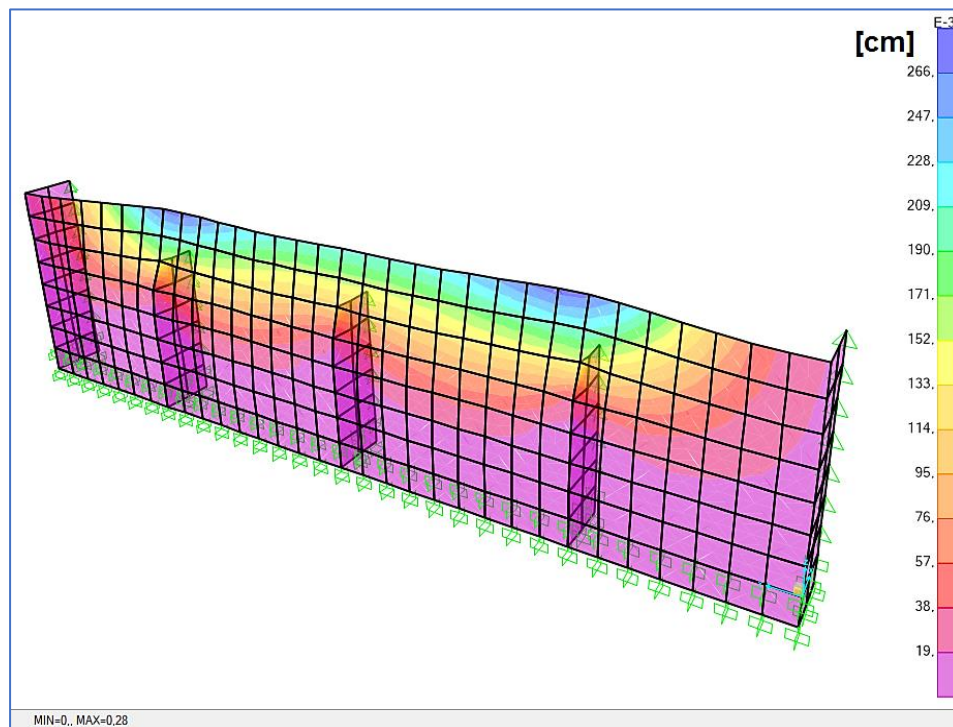
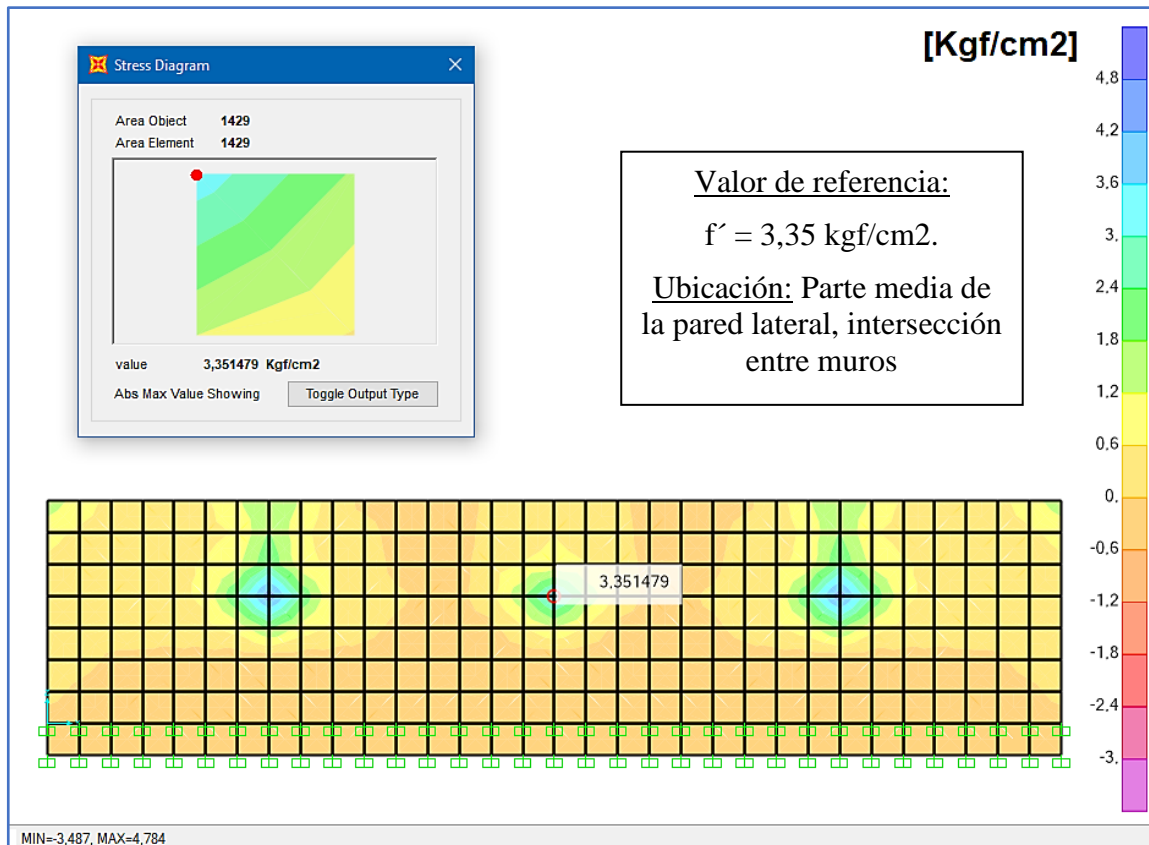
Figura 5.10: Desplazamiento de los muros debido a la fuerza sísmica

Las estructuras propuestas se trabajaron como en la figura 5.10 y para permitir este análisis se debe aplicar restricciones a lo largo de la intersección de los muros, estas permiten que los muros se desplacen en el programa de manera idéntica a un voladizo, son necesarios para que en el análisis la fuerza afecte al muro en su conjunto. Se procede a *Define/ Joint Constraints/ Type: Diaphragm* para materializar dicha suposición en donde se aplican restricciones a la articulación del tipo diafragma permitiendo así unir y rigidizar el extremo en donde se aplica la carga. Estos pueden ser apreciados en las figuras 5.8 y 5.9.

5.3 RESULTADOS DEL ANALISIS ESTÁTICO



Figuras 5.11 y 5.12: Tensiones normales ($S_{m\acute{a}x}$) en el muro del frente y Deformaciones obtenidas del análisis en la dirección Y.



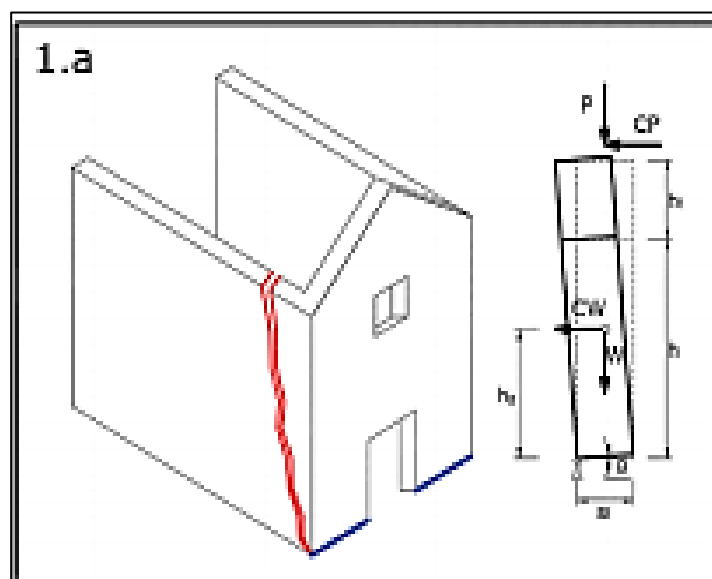
Figuras 5.13y 5.14: Tensiones normales ($S_{m\acute{a}x}$) en el muro lateral y Deformaciones obtenidas del análisis en la dirección X.

5.4 COMPARACIÓN ENTRE EL ANÁLISIS DINAMICO Y ESTÁTICO (SAP2000)

- Numéricamente los resultados de los análisis estáticos y dinámicos son bastante cercanos. Esto indica que el modelo propuesto en el método estático actúa de manera aproximada a la respuesta de la estructura ante un sismo con aceleraciones máximas entre los $0,30g$ y $0,35g$. Se debe tener en cuenta que en el análisis dinámico se emplea un sismo y en el análisis estático se trabaja con un sistema equivalente de fuerzas horizontales.

PUNTO DE REFERENCIA	TENSIÓN NORMAL [Kgf/cm ²]	
	DINAMICO	ESTÁTICO
MURO FRENTE	1,36	0,84
MURO LATERAL	3,72	3,35

- Por otro lado, se comparó la manera en qué falla cada estructura y si cumplen con la teoría de macroelementos. Se pudieron observar las fallas características dadas en la teoría de macroelementos, las cuales fueron:
 1. Rotación fuera del plano debido al desarrollo de una rotura horizontal cilíndrica en la base de la fachada.



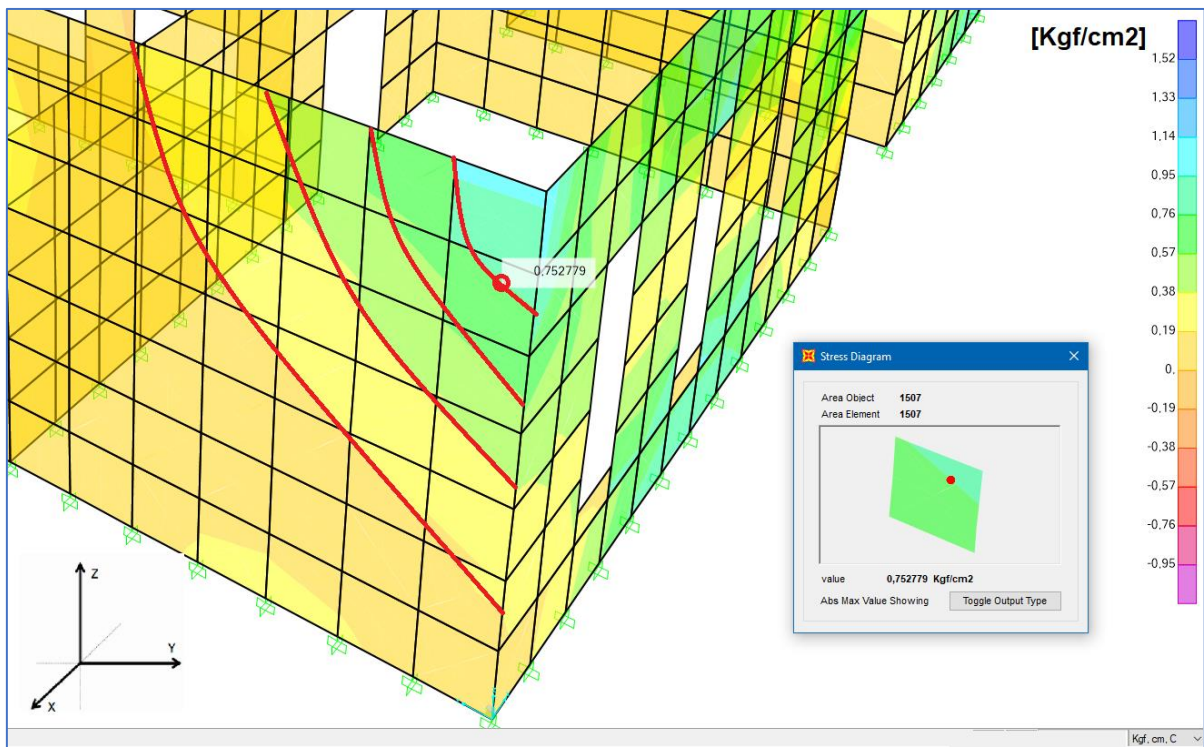
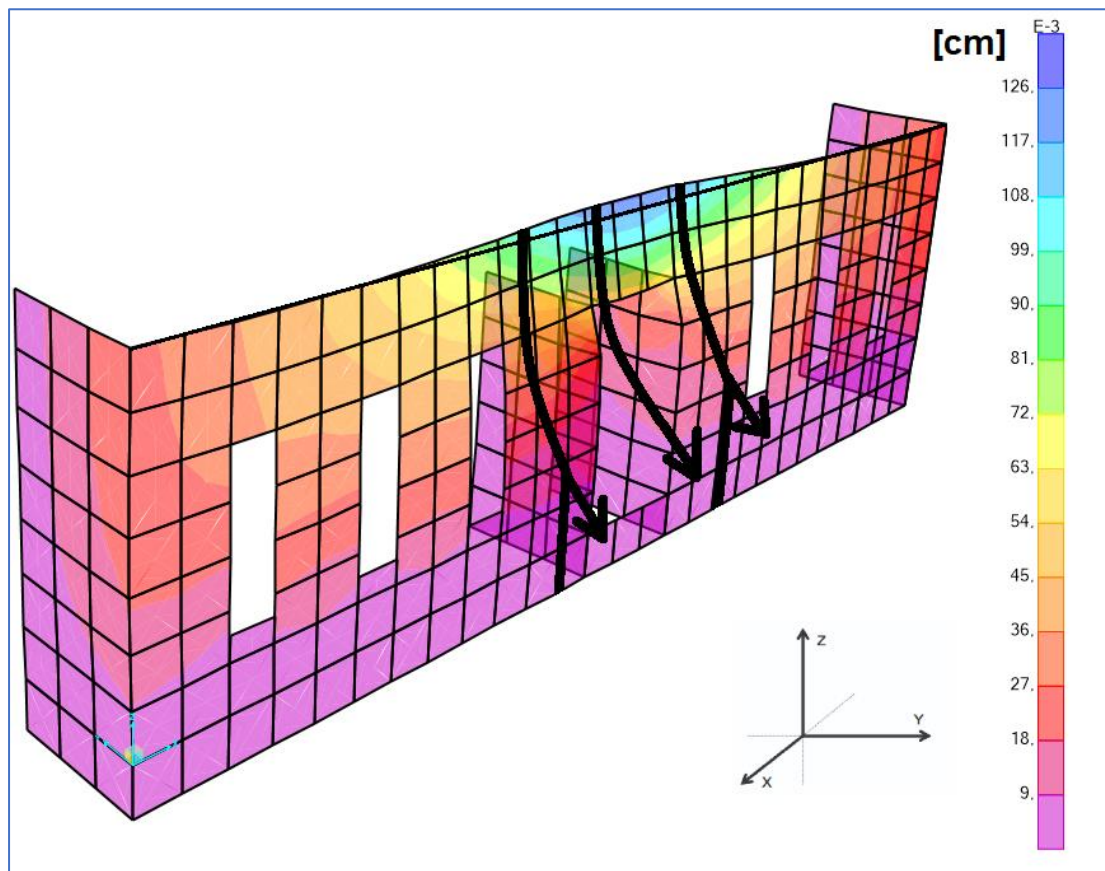
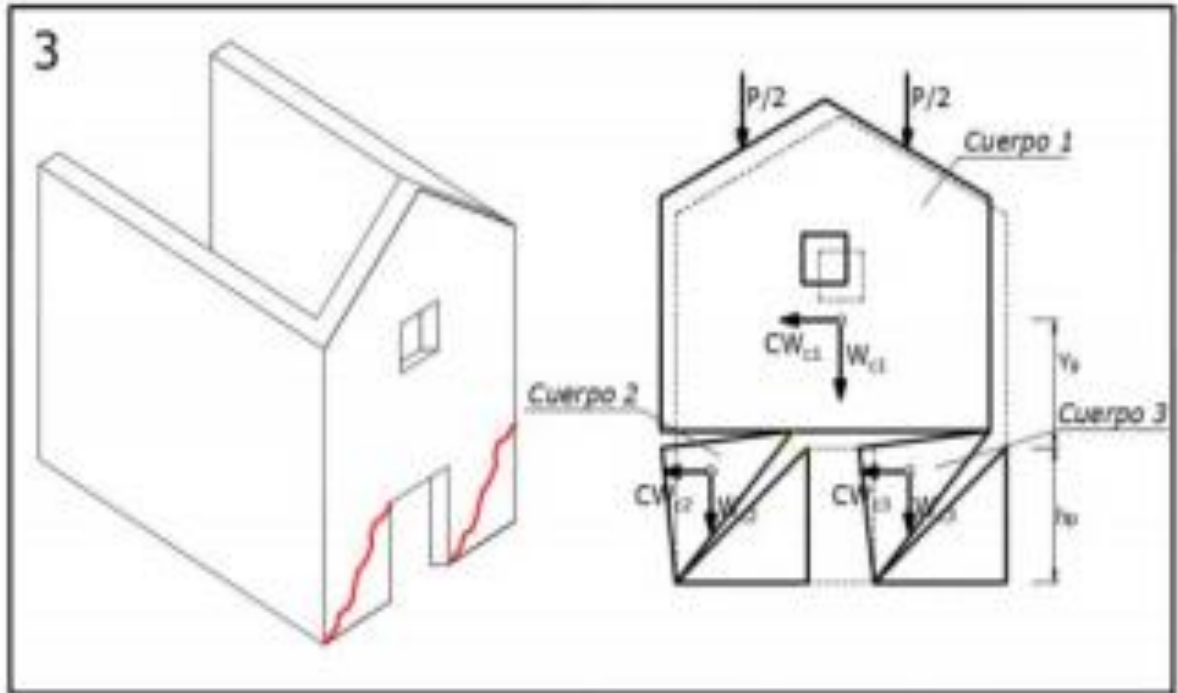


Fig. 5.15: Rotación fuera del plano de la fachada modelo en SAP2000. Se observa claramente el mismo tipo de rotura. Análisis Dinámico.

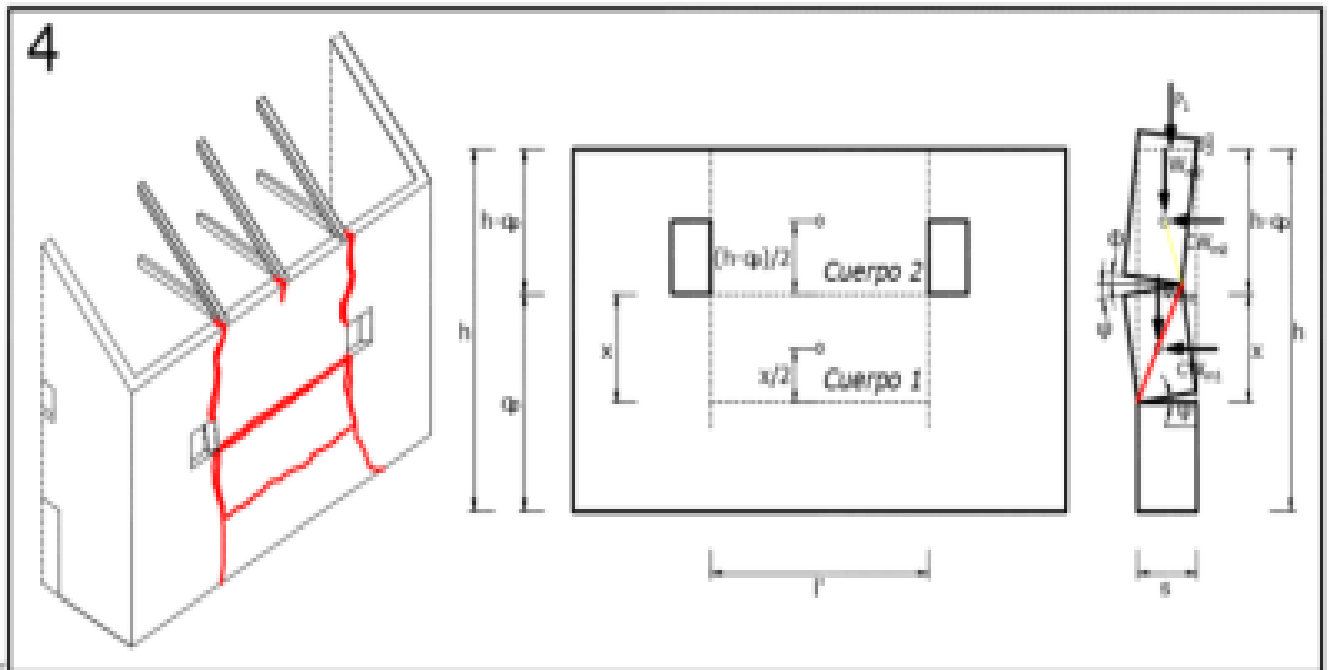


5.16: Rotación fuera del plano de la fachada modelo en SAP2000. Análisis Estático.

2. Deslizamientos en forma de x, debido a fisuras diagonales.



3. Rotación fuera del plano de un muro restringido en los cuatro bordes.



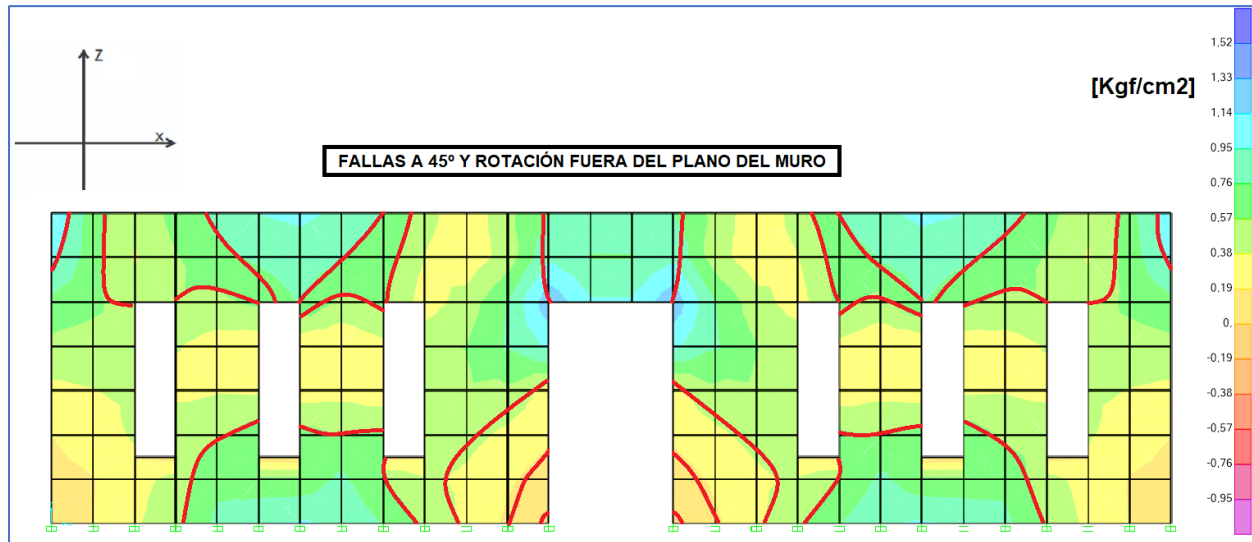


Fig. 5.17: Rotación fuera del plano del muro y se observa fisuras diagonales. Análisis Dinámico. SAP2000.

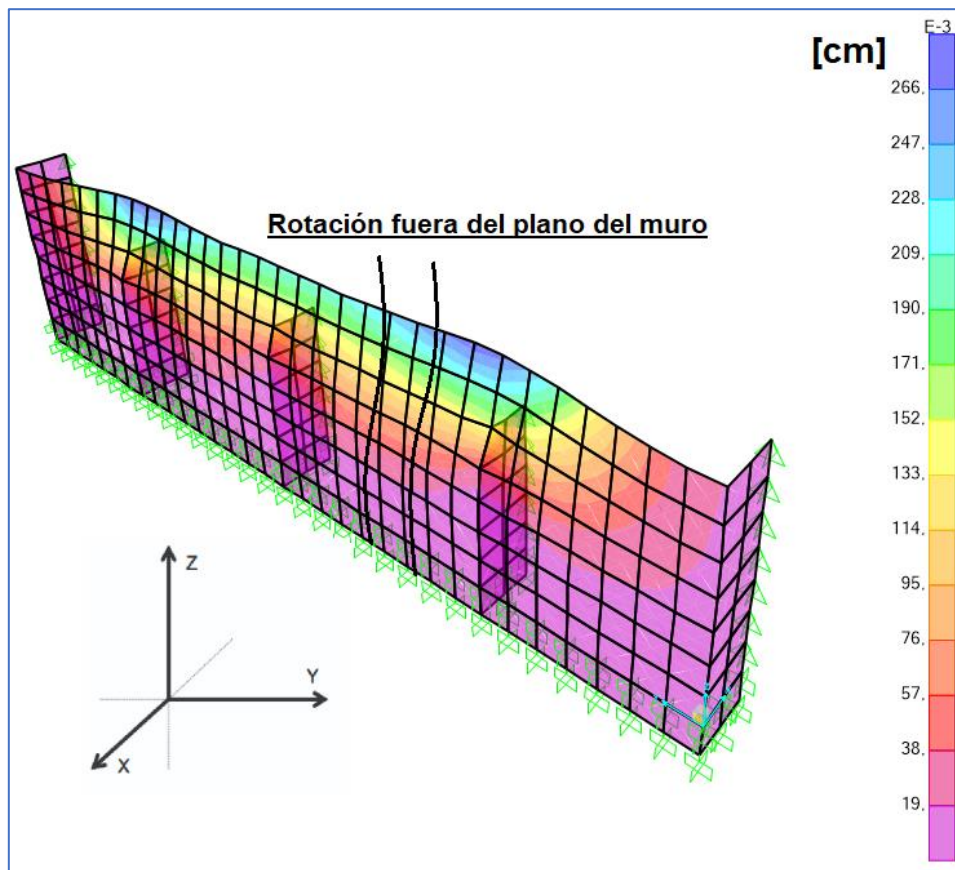


Fig. 5.18: Rotación fuera del plano del muro restringido en los cuatro bordes. Análisis Estático. SAP2000.

En conclusión, el método de elementos finitos realizado en SAP2000 arrojó datos similares a los propuestos por la teoría de macroelementos.



CONCLUSIONES

A la finalización del trabajo se puede concluir lo siguiente:

- A.** Los resultados obtenidos con ambos programas son similares, pero, aunque con el programa SAP2000 se puede resolver el problema planteado, ETABS permite mostrar los resultados de una mejor manera a nivel global, resultando una mejor herramienta en el análisis.
- B.** Las tensiones que se obtuvieron en el momento de máxima aceleración del sismo no sobrepasan la resistencia de la mampostería, en este caso al ser valores máximos de signo positivo son comparados con la resistencia a la tracción de la mampostería (f_r).
- C.** Las fallas estructurales en el modelo estudiado se dieron como predice la teoría de macroelementos, al menos para el sismo utilizado en el análisis. Por lo que la teoría de macroelementos es completamente aplicable en el caso estudiado.
- D.** Se realizó un análisis estático a macroelementos seleccionados de la estructura, obteniendo resultados aproximados, aunque menores a los obtenidos por el método dinámico. En una primera aproximación, este método es suficiente para una evaluación rápida.
- E.** Frente a un sismo la fachada del edificio, sería la más afectada, por lo cual, como medida preventiva, se debería reforzar. El muro lateral no ha sufrido tanto daño debido a que tiene lugares a los que interceptan una mayor cantidad de muros, proporcionándole una mayor rigidez transversal. Comparado con el muro del frente no posee aberturas que faciliten el desarrollo de fisuras.



BIBLIOGRAFIA

- Caro Roberto, Barbat Alex y Oller Sergio. 2011. Evaluación del riesgo sísmico mediante el método del índice de vulnerabilidad. Riesgo y vulnerabilidad sísmica. Editorial Universidad Nacional de Salta EUNSa.
- Jeremías Gonzalo, Soulé Sofia Ligia y Lávaque Silvera Agustín. 2018. Parametrización para el estudio de vulnerabilidad sísmica de iglesias de la provincia de Salta a través del método de Macroelementos. Ponencia CONEIC. Recuperado de: <https://www.aneic.com.ar/coneic11-ponencias>.
- Método de los Elementos Finitos. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos. Página vigente al 08/09/19.
- Ferrari Mora Darío, Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. 2018. Método del elemento finito y AutoFEM. Laboratorio de Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Recuperado de: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf. Página vigente al 08/09/19
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2007. Reglamento Argentino de estructuras de mampostería. Reglamento CIRSOC 501. Editorial INTI.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2013. Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes Parte I Construcciones en general. Reglamento CIRSOC 103. Editorial INTI.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2018. Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes Parte III Construcciones de Mampostería. Reglamento CIRSOC 103. Editorial INTI.
- Gallegos Héctor. 1989. Albañilería estructural. Diseño y cálculo de muros. Editorial Fondo.
- Farah Cesín Javier. 2008. Análisis estructural de estructuras de mampostería. https://www.academia.edu/16337385/Aanalisis_estructural_de_estructuras_de_mamaposteria. Página vigente al 08/09/19.
- (Comportamiento sísmico de edificios de mampostería no reforzada. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6230/07CAPITULO6.pdf?sequence=7&isAllowed=y>. Página vigente al 08/09/19.



ANEXOS