



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MODELO DE ELEMENTO FINITO PARA ANÁLISIS  
ESTRUCTURAL DE LA ESQUINA NORPONIENTE  
DEL PALACIO NACIONAL DE MÉXICO**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

**QUIROZ RAMÍREZ GEORGINA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**ING. ABRAHAM ROBERTO SANCHEZ RAMÍREZ**



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“MODELO DE ELEMENTO FINITO PARA ANÁLISIS  
ESTRUCTURAL DE LA ESQUINA NORPONIENTE  
DEL PALACIO NACIONAL DE MÉXICO”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**I N G E N I E R A C I V I L**

**P R E S E N T A:**

**GEORGINA QUIROZ RAMÍREZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**ING. ABRAHAM ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ**



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por su amistad, por concederme fortaleza y perseverancia ante la adversidad, por guiarme e iluminarme en los momentos difíciles.*

*A mis padres Graciela y Arturo, por todos los sacrificios que han hecho por apoyarme y la paciencia que han tenido para conmigo. Gracias por seguir confiando en mí.*

*A mi sobrina Monserrat, por su compañía, ayuda y amistad.*

*A mi hermano Arturo, por sus consejos y su ayuda.*

*Al Instituto de Ingeniería, especialmente al Ing. Abraham Roberto Sánchez, por su apoyo, su tiempo y su dirección en el desarrollo de esta investigación, a su equipo de trabajo, al Ing. Alan Gómez, la Arq. Navani Cadena y el Ing. José Luis Palomino, por su ayuda y consejo.*

*A mis sinodales M.I. Alba Beatriz Vázquez González, M.I. José Francisco Téllez Granados, M.I. Agustín Demeneghi Colina y al M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, no solo por sus comentarios a este trabajo, sino también, por todos los conocimientos que me transmitieron en sus clases.*

*A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por toda la preparación y formación que he recibido.*

*A la Conservaduría del Palacio Nacional, por la amabilidad con la que me proporcionaron la información que requería.*

# “MODELO DE ELEMENTO FINITO PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA ESQUINA NORPONIENTE DEL PALACIO NACIONAL DE MÉXICO”

## ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
2. ANTECEDENTES	
2.1 Ubicación.	
2.2 Aspectos Arqueológicos.	3
2.3 Aspectos Históricos.	4
2.4 Aspectos Arquitectónicos.	9
2.5 Aspectos Estructurales.	43
2.6 Aspectos Geotécnicos.	46
2.7 Sistema de monitoreo continuo.	47
2.8 Daños actuales.	59
	60
3. MODELO	
3.1 Método del Elemento Finito.	
3.2 Modelo de Elemento Finito.	99
3.3 Consideraciones.	104
	120
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	
4.1 Interpretación del comportamiento estructural a partir de los daños.	
4.2 Análisis de los resultados.	131
4.3 Comparación entre los daños observados y los resultados obtenidos en el modelo con módulos de reacción variable.	135
	159
5. CONCLUSIONES	
	162
BIBLIOGRAFÍA	
	164

## INTRODUCCIÓN

A través de la historia, el edificio ubicado entre las calles de Moneda, Correo Mayor, Venustiano Carranza y Pino Suárez, en el centro histórico de la Ciudad de México, ha tenido varias transformaciones, así como diversos nombres, Palacio de Moctezuma, Casas del Marques del Valle, Palacio Virreinal, Palacio de los Supremos Poderes, Palacio del Supremo Gobierno y al fin Palacio Nacional de México.

Edificio de un gran valor histórico y arquitectónico, que fue, es y será sede del poder político, símbolo de la identidad y unidad nacional que, a través de sus patios, pasillos y salones, nos ofrece una mezcla de estilos arquitectónicos y procedimientos constructivos, por medio del cual, refleja, muestra, da a conocer al México que representa, del cual surgió y al que pertenece.

Este edificio emblemático sigue de pie a pesar de las dificultades que se han presentado en el país, desde el punto de vista político, como levantamientos, guerras e invasiones, hechos históricos de los cuales es testigo. Estos no son los únicos enemigos con los que ha tenido que lidiar, existen otros, el más importante de todos es, el tiempo que, junto con el clima, las condiciones del subsuelo, las fuerzas de la naturaleza y la acción del hombre, le han ocasionado diversos problemas, entre ellos, los hundimientos diferenciales, provocando grietas y desplomes en sus elementos estructurales.

Es así, que habiendo considerado su importancia y como parte de un conjunto de investigaciones que se han realizado en torno a este edificio histórico, se decidió analizar su estructura bajo la acción del peso propio, realizando un modelo de elemento finito de una sección del Palacio, con la finalidad de evaluar el efecto que han tenido los hundimientos diferenciales en la estructura de dicha sección. Cabe señalar que el modelo se realizó a partir de los planos disponibles y se consideró la información obtenida a partir de estudios e investigaciones históricas, arqueológicas, arquitectónicas y geotécnicas.

Como se puede observar se requiere de una continua colaboración interdisciplinaria entre varias Instituciones, pues es obligación de la Nación, velar por la conservación de este Monumento Histórico, uno de los más importantes de México.

## 1. OBJETIVOS

Los objetivos que se han propuesto cumplir con este trabajo son los siguientes:

- I. Realizar un modelo de elemento finito de una sección del Palacio Nacional con la finalidad de estudiar su comportamiento estructural. El modelo se elaborará a partir de los planos disponibles y de los conocimientos que se tienen tanto de la estructura como de los materiales constructivos empleados.
- II. Llevar a cabo el análisis del modelo bajo la acción del peso propio, considerando 3 condiciones de apoyo: apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, con las que se representa, un suelo firme, un suelo uniformemente compresible y un suelo con diferentes grados de compresibilidad, respectivamente. Con la última condición de apoyo se intenta considerar el subsuelo en el que está desplantado el edificio.
- III. Comparar los resultados obtenidos con la distribución y el patrón de agrietamiento, para evaluar el efecto que han tenido los hundimientos diferenciales en la estructura del área en estudio.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Ubicación

El Palacio Nacional se encuentra ubicado entre la plaza de la Constitución y las calles de Moneda, Correo Mayor, Venustiano Carranza y Pino Suárez, en el Centro Histórico de la Ciudad de México, Delegación Cuauhtémoc, Colonia Centro, como se puede observar en la figura 1.

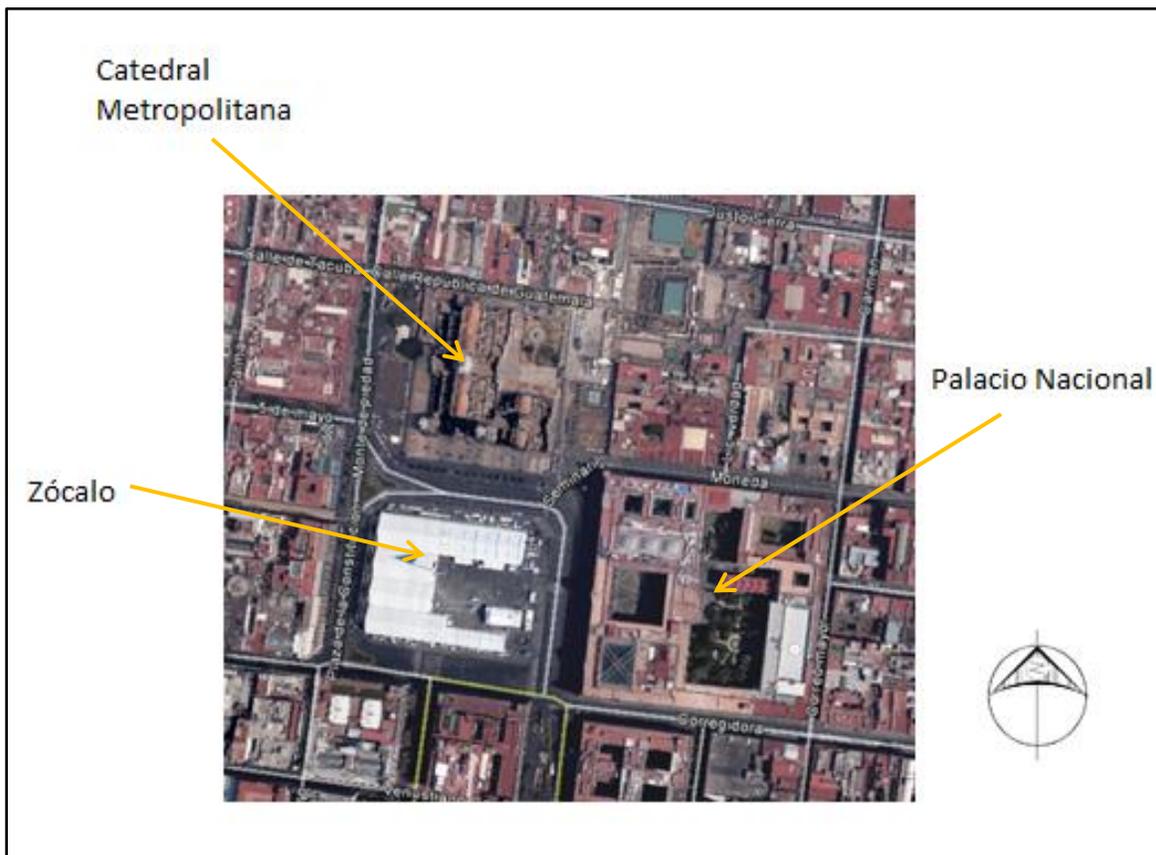


Figura 1. Ubicación del Palacio Nacional de México. (Imagen obtenida de Google Maps)

## 2.2 Aspectos Arqueológicos

La Capital de la Nueva España fue fundada por Hernán Cortés en el mismo lugar en que se encontraba el centro político, social y religioso del Imperio Azteca. Posiblemente, en su momento y desde el punto de vista político, esta decisión era la más acertada, tratándose de una conquista, pero con el paso del tiempo se pudo observar el gran inconveniente que presentaba el lugar para establecer una ciudad, aun así, se continuó con el proyecto a pesar de los graves problemas que sufrían las construcciones, al presentarse hundimientos diferenciales, inundaciones y sismos.

La extracción del agua del subsuelo para el abastecimiento de la población en continuo crecimiento, que ha invadido casi toda la cuenca del Valle de México, impidiendo la reabsorción de agua, al hacer una capa impermeable con toda la infraestructura presente, aunado a una historia previa de consolidación del subsuelo debido a la presencia de los basamentos y templos ceremoniales prehispánicos, han intensificado los asentamientos diferenciales en las últimas décadas, afectando a los edificios históricos del Centro de la Ciudad, entre ellos el Palacio Nacional.

Por tal motivo, se ha considerado importante y necesario la localización de los basamentos prehispánicos ubicados bajo el inmueble, con la finalidad de tomar en cuenta en el modelo, por medio de los módulos de reacción, la interacción suelo-estructura.

Desde el establecimiento de los aztecas en el islote y la fundación de la Ciudad de Tenochtitlan, resultaba muy complicada la construcción del centro ceremonial y de todos los edificios que requerían, ya que estos se hundían, teniendo que ser elevados los pisos constantemente. Es así como los arqueólogos han encontrado etapas constructivas sobrepuestas en los hallazgos descubiertos, llegando aproximadamente a unos 20 metros de profundidad el desplante de la primera etapa constructiva del Templo Mayor.

Gracias a las excavaciones realizadas por el Instituto Nacional de Antropología e Historia, en el Centro Histórico, con el programa Arqueología Urbana, se ha logrado recabar información de los basamentos prehispánicos ubicados debajo del Palacio Nacional. Los datos presentados a continuación se extrajeron de *Islas y Barrera, 2010*. Los basamentos mencionados se encuentran cerca o dentro de la zona de análisis, su ubicación se puede observar en la figura 2.

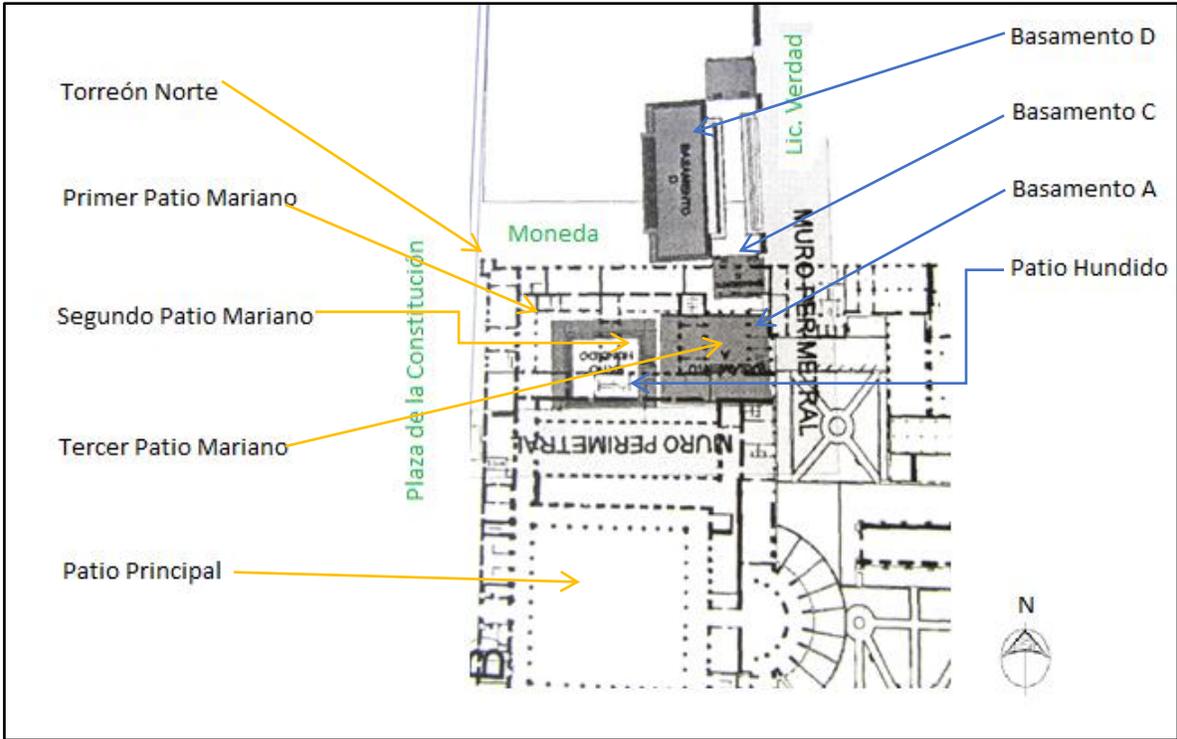


Figura 2. Vista en conjunto de los basamentos prehispánicos con su ubicación en relación con las calles existentes y la parte norte del Palacio Nacional. (Islas y Barrera, 2010)

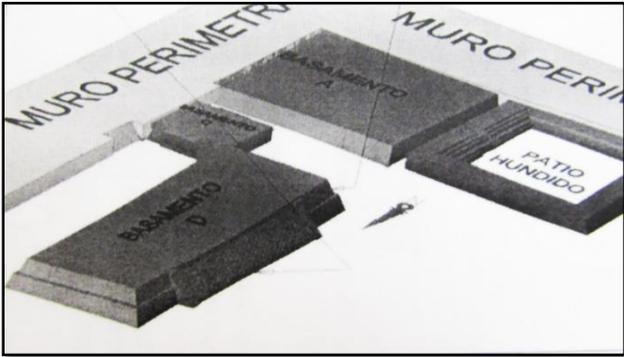


Figura 3. Vista en perspectiva de los basamentos prehispánicos ubicados debajo del Palacio Nacional. (Islas y Barrera, 2010)

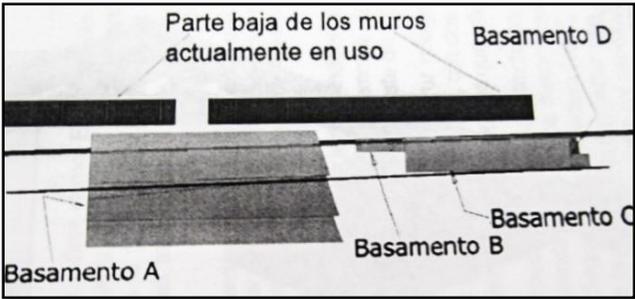


Figura 4. Vista en corte del conjunto de basamentos, donde se puede observar la profundidad y las sobreposiciones de cada un de los basamentos. (Islas y Barrera, 2010)

➤ Recinto de Patio Hundido.

El espacio que ocupaba este recinto abarca partes del Primer y Segundo Patios Marianos, extendiéndose hasta el salón de la Tesorería. Se trataba de un recinto cerrado, con diferentes superposiciones, conformado por una plataforma cerrada de planta rectangular con un patio central y escalinatas periféricas, limitada en su exterior con un muro de sillares de tezontle que tiene 1.20 metros de altura y en el interior presenta 4 escalones con una altura de 2.30 metros (las alturas son de las secciones excavadas). En su interior se detectaron 2 subestructuras y otra más que debió cubrirlos. Se le llegó a denominar “superestructura” por el Arqueólogo Corona (1994), debido a que presentó cinco niveles de ocupación. De acuerdo al informe del Arqueólogo Pérez (1996), las gradas miden 20 m aproximadamente de norte a sur por 22 metros hacia el poniente.

➤ Basamento A.

Este basamento se detectó desde el costado oriente de la Tesorería hacia el Segundo Patio Mariano. Su muro poniente se ubica a 5.66 metros al oriente del Recinto del Patio Hundido. Plataforma descrita con una longitud de al menos 32.0 metros en sentido oriente- poniente y 26.0 metros de norte a sur, y que presenta cuatro etapas constructivas. No se han detectado sus escalinatas de acceso.

Otro fragmento del basamento reportado por el Arqueólogo Corona (1994) que denomina Estructura 2, presentó 4 superposiciones. Se localizó desde el costado oriente de la Tesorería hacia el Segundo Patio Mariano. Así el muro que conformó la fachada poniente, se le agrega este último que corresponde a su fachada norte. Esta estructura no presentó plataforma, por lo que se consideró que no estaba dedicada a la adoración de algún dios, ya que los templos siempre presentan un protocolo, esto es, una plataforma, un basamento y el adoratorio. Se supone que esta construcción forma parte de un complejo junto con el Patio Hundido.

➤ Basamento B

Localizado en el vértice sur poniente del basamento C. No se hicieron más exploraciones por lo que no se sabe de sus dimensiones. De la misma forma que el basamento A, este basamento tampoco presentó plataforma y de la cual solo se encontró una etapa constructiva.

➤ Basamento C.

Se encontró al norte del basamento A y se prolonga en esa misma dirección hasta la banqueta de la calle de Moneda. Construcción de planta rectangular de 13.20 metros de largo, 14.20 metros de ancho y una altura máxima de 2.80 metros, con 4 accesos, 2 al sur y 2 al norte, los primeros se registraron al interior del Palacio Nacional y los segundos en la banqueta al norte del Edificio, bajo la calle de Moneda. El piso sobre el que se desplanta en su fachada sur, en relación al piso de la fachada norte, tiene una diferencia de 0.64 metros, es decir, el piso frente a la fachada norte está más abajo. Se debe considerar que la profundidad del lado norte debió ser mayor, ya que una parte del basamento está fuera de la construcción del Palacio Nacional y al soportar menor peso se hundió menos.

➤ Basamento D.

En el año 1984, se realizaron trabajos de recimentación en el edificio del Ex Arzobispado, donde intervino la Dirección de Salvamento Arqueológico del INAH, fue así como se localizó el límite del lado norte y la fachada poniente del basamento.

Durante los trabajos de recimentación en el Palacio, se realizaron excavaciones arqueológicas entre 1991 y 1993, localizándose la fachada sur de este basamento, su esquina sur-poniente y posteriormente la esquina sur-oriente, la cual se encuentra inmediatamente después del Basamento C.

Ambos hallazgos forman parte del templo conocido como “Templo de Tezcatlipoca Rojo”. Esta desplantada a los 4.00 metros de profundidad, mientras su parte superior se encontró a 1.70 metros a partir del nivel de la calle. Basamento alargado de norte a sur de 25.00 metros, con un ancho de oriente a poniente de 10.50 metros aproximadamente. Su vértice suroriente se une al vértice norponiente del basamento C, por lo que se considera que ambos conformaban la mitad de una sola unidad arquitectónica. Más de su mitad norte se encuentra en el Palacio del Ex- arzobispado y su mitad sur está dispuesta hacia el Palacio Nacional, cruzando la calle de Moneda. Constaba, al menos, de dos cuerpos, su vértice suroriente se encuentra a una distancia de 14.00 metros de donde suponen está el Muro Perimetral del Recinto Sagrado. Se encontró un espacio hundido que, considerándolo un juego de pelota, limitaba hacia el oriente con el muro perimetral del Recinto Sagrado a una distancia de 14.50 metros, en este caso correspondería al ancho de los cabezales. El ancho de la cancha resulta de 5.50 metros.

➤ Otros hallazgos

-En la temporada 1991-1993, se localizó un basamento en forma circular, ubicada en los cuartos al norte del Segundo Patio Mariano, no se mencionan otros aspectos como sus dimensiones o sus etapas constructivas.

-Se encontró una escalinata prehispánica con acceso norte-sur, en el costado norponiente del Auditorio.

-En el Torreón norte de Palacio se encontraron dos estructuras prehispánicas, una consistió en una plataforma estucada con un descenso hacia el norte por medio de 4 escalones, hasta llegar a un piso estucado sobre el que se desplanta la otra estructura, de la que solo se detectó un escalón.

-En las excavaciones realizadas para el Metro, se encontró en la Plaza de la Constitución, frente al Palacio Nacional, el corte de un canal prehispánico que corría con dirección oeste a este, también se localizaron varios cuartos, sin puertas de entrada al nivel de suelo, atravesados por un angosto canal, con pisos de estuco, en una de cuyas esquinas tenía una concavidad.

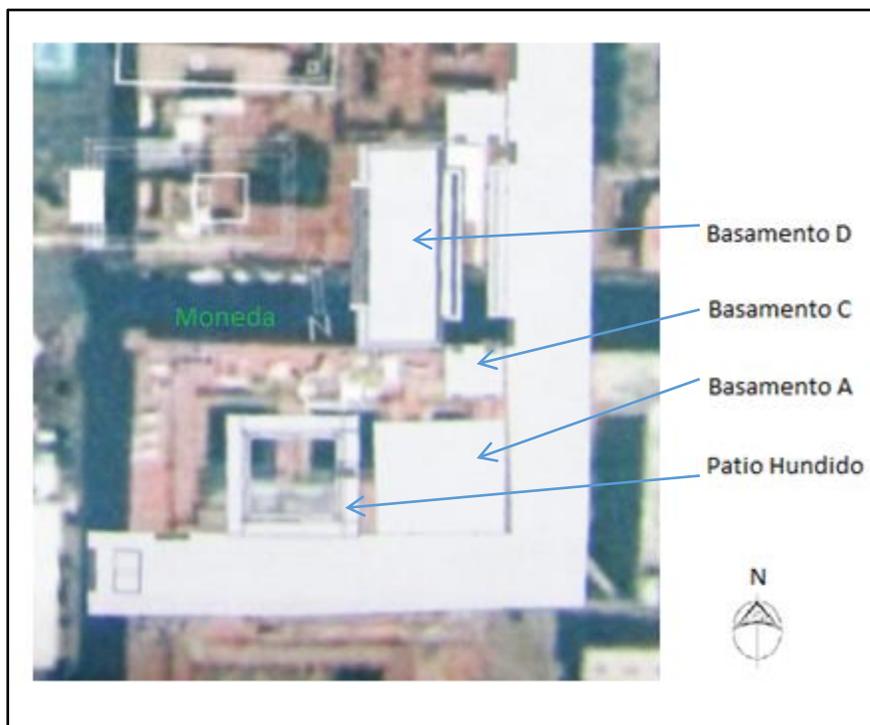


Figura 5. Sobreposición, en planta, de los basamentos prehispánicos sobre una vista satelital del centro histórico. (Islas y Barrera, 2010)

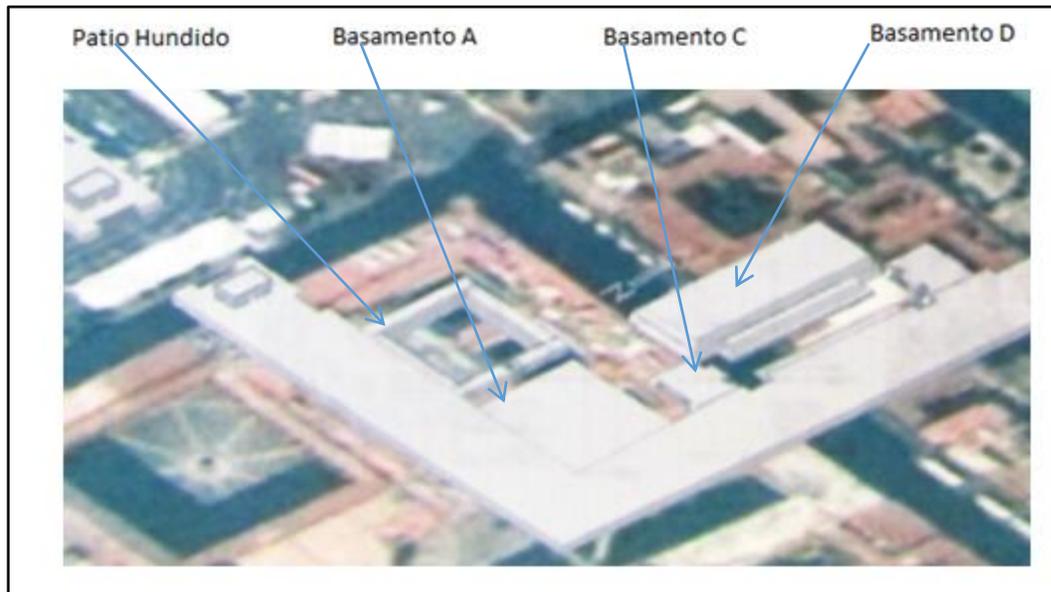


Figura 6. Sobreposición, en perspectiva, de los basamentos prehispánicos sobre una vista satelital del centro histórico. (Islas y Barrera, 2010)

## 2.3 Aspectos Históricos

La Historia constructiva del Palacio Nacional es muy complicada de seguir, debido a la gran cantidad de cambios que se realizaron en el transcurso del tiempo, aun así, es importante tener presente la evolución que ha tenido, ya que, al abarcar un área extensa, estas etapas constructivas influyeron en la consolidación del subsuelo.

En seguida se presenta un resumen histórico de la evolución arquitectónica y constructiva del Palacio Nacional, con el cual se pretende presentar los eventos más importantes que tuvieron algún impacto en la Estructura del Edificio, además de mencionar los materiales empleados y, en algunos casos, los procedimientos constructivos. La información fue obtenida a partir de las referencias siguientes referencias: Castro, 2003, *Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH) del INAH, 1996, Valle-Arizpe, 1952, Krauze, 2005, Relatos e historias en México año VIII No. 85.*

Las plantas proporcionadas son una aproximación a la evolución histórica constructiva del Palacio Nacional, que fueron obtenidas y/o elaboradas a partir de las referencias mencionadas anteriormente.

➤ Palacio del Huey Tlatoani Moctecuhzoma

1325

Fundación de México-Tenochtitlan el año 2-Casa. Los aztecas edificaron un pequeño templo a su dios tutelar, distribuyeron la población en cuatro sectores y lentamente fueron ganando tierra al lago.

1369

Se introdujo una nueva organización política diferente a la de tipo tribal, ya que comenzaron a elegir un huey tlatoani o gobernante supremo, con carácter sacerdotal y militar encargado del gobierno de la ciudad- estado. Desde ese momento la sede del gobernante fue el sitio de mayor importancia en la vida religiosa, política y social de la comunidad después de los templos ceremoniales. Sus casas, designadas como tecpan o tecpancalli e identificadas por los conquistadores como palacios o casa reales, se encontraban en el centro de la ciudad, junto o dentro del gran recinto ceremonial.

1417-1448

Las primeras construcciones dentro del recinto sagrado de Tenochtitlan fueron construidas con madera, cañas y lodo, durante los gobiernos de Itzcoal y Moctecuhzoma Ilhuicamina. Posteriormente fueron sustituidas, paulatinamente, con estructuras de mejores materiales, aumentando su complejidad y el número de dependencias como resultado de la expansión imperialista de los mexicas.

1499

Gran Inundación de Tenochtitlan. La ciudad quedó inhabitable, por lo que, para volver a edificarlo, los aztecas cegaron toda el agua con estacas, céspedes, tierra y piedra provenientes de los pueblos sometidos, quedando debajo muchos de los edificios ya construidos.

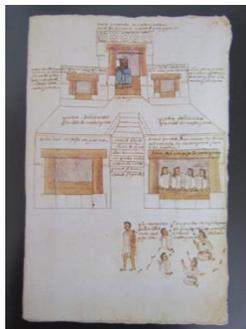


Figura 7. Representación del Palacio de Moctezuma. Francisco del Paso y Troncoso, Códice Mendocino, edición facsimilar de 1925. Biblioteca Eusebio Dávalos, CONACULTA- INAH. (Krauze, 2005).



Figura 8. El Tecpancalli (casas reales) de Tenochtitlan, pintura del gobernador, alcaldes y regidores de México, 1565. Códice Osuna. Biblioteca Nacional de Madrid. (Krauze, 2005).

1520

Conquista de México Tenochtitlan por los españoles.



Figura 9. México- Tenochtitlan a la llegada de los españoles en 1520.( [www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).

➤ Casa del Marqués del Valle

1523

Tras la demolición de las edificaciones prehispánicas, se inicia la construcción de las Casas de Cortés, las cuales ocuparon solo una parte relativamente pequeña del predio, en la zona suroeste. Los techos eran de terrado, columnas y arcos de cantera labrada.

1547

Muere Cortés, quedando Martín Cortés como el heredero. La edificación tenía 2 niveles y 3 grandes patios rodeados de corredores. Hacia la actual calle de Moneda, se encontraban los corrales, las caballerizas, hornos y carretas. (Figura 10).

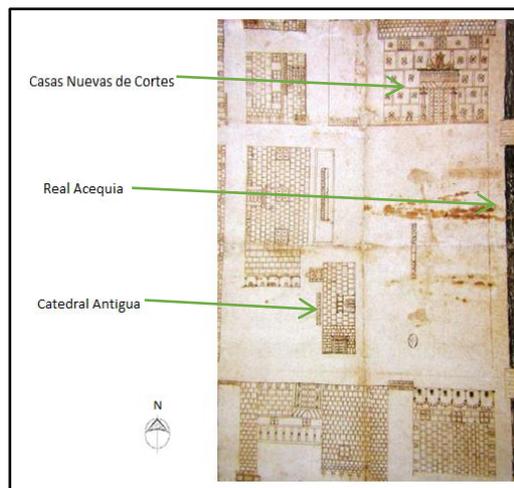


Figura 10. Plaza de la Ciudad de México, donde se representó la plaza Mayor, la plazuela del Marqués, la iglesia mayor (Catedral vieja) y cimientos de la nueva Catedral, la casa Arzobispal, el portal de Mercaderes, la real acequia, las casa viejas de Hernán Cortes y las casas reales, que ocupan la parte sur de la cuadra, entre 1563 y 1565. (Krauze, 2005).

1550

Termina la construcción de la Casa de Cortés.

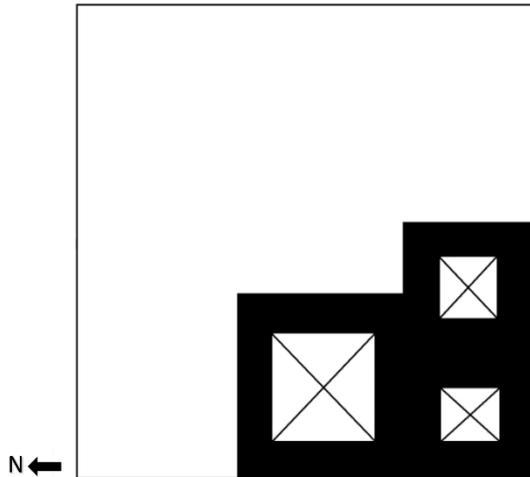


Figura 11. Plano aproximado de la Casa del Marqués del Valle en 1550. (CNMH, INAH, 1996).



Figura 12. Plano de la Plaza Mayor en 1555. 1) Antigua Catedral, 4) Casa nuevas de Cortés, 5) Santo Domingon, 6) Casa viejas de Cortés. ([www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).

1562

Venta del inmueble y de los terrenos adjuntos a la Corona Española.

- Casa Real del Virreinato

1563

El Virrey y la Real Audiencia toman posesión del inmueble. Los terrenos frente a la casa del arzobispo, se destinaron para la construcción de tiendas, con el fin de obtener recursos a través de su renta, que se supone servirían para las reparaciones necesarias, las cuales nunca funcionaron por su mal estado.

Se realizaron obras de adaptación conservando la traza original, es decir sin modificar la disposición original de los 3 patios, en un constante destruir y edificar en torno a las viejas estructuras de la casa de Cortés. Estas nuevas edificaciones, que albergarían, con el tiempo, todas las dependencias del Virreinato, fueron ocupando paulatinamente las áreas libres del terreno, sin ocupar toda el área, lo que proporcionó, en el centro de la cuadra un gran espacio de jardines conocido como el Parque. Se menciona que algunas áreas tenían construcciones provisionales.

Entre las dependencias que se encontraban dentro del Palacio, además del Virrey y de la Real Audiencia, se tenían: la Cárcel, Casa de Moneda, Casa de Fundición, Capilla real, Juzgado de Provincia, Real Contaduría, un Batallón del Ejército, entre otros.

Las nuevas construcciones que se fueron realizando a pesar de emplear materiales y técnicas similares, por su peso y dimensiones, ocasionaron serios problemas a la estabilidad estructural de las construcciones más antiguas, pues se presentaban daños en los cimientos, en los muros y en los techos debido a fallas del subsuelo, a inundaciones, temblores y al suelo cenagoso. Estos daños fueron paulatinamente aumentando.

La cimentación de los primeros edificios constaba de un sistema de estacado a base de murillos o vigas encajados en el fango a manera de pequeños pilotes sobre los que se desplantaban los muros.

Los muros eran fabricados con piedra cortada en pequeños bloques rectangulares, procedentes de las construcciones prehispánicas, colocados como revestimiento a un núcleo de piedras irregulares unidas con lodo o con una mezcla de tierra y cal. En este tipo de muros se presentaban con facilidad grietas, que trataban de solucionar con la colocación de rafas o costuras de ladrillo y cal, para tratar de unir los fragmentos del muro fracturado.

Los techos eran de terrado, que consistían en grandes vigas de madera acomodadas paralelamente en una dirección, separadas entre sí a una distancia corta, sobre las cuales colocaban tablas, y encima de estas una gruesa capa de escombros o tierra y ladrillo. Estos techos además de fallar por lo anteriormente expuesto, también se veían seriamente dañados por la lluvia y la polilla.

1570-1573

Construcción de la Antigua Casa de Moneda. (Figura 15)

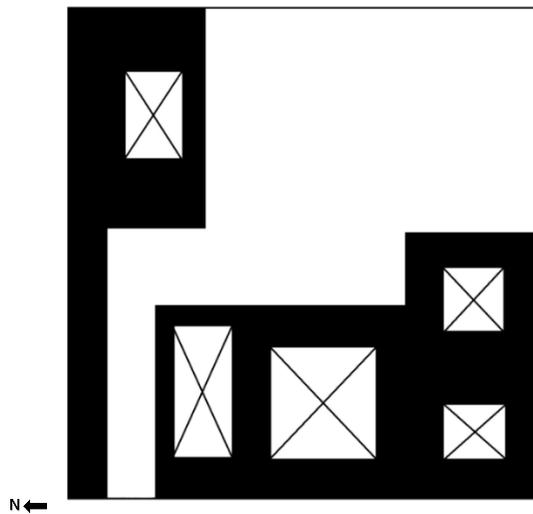


Figura 13. Plano aproximado de la Casa Real de Virreinato para 1573. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de los planos de la fuente bibliográfica: CNMH, INAH, 1996).

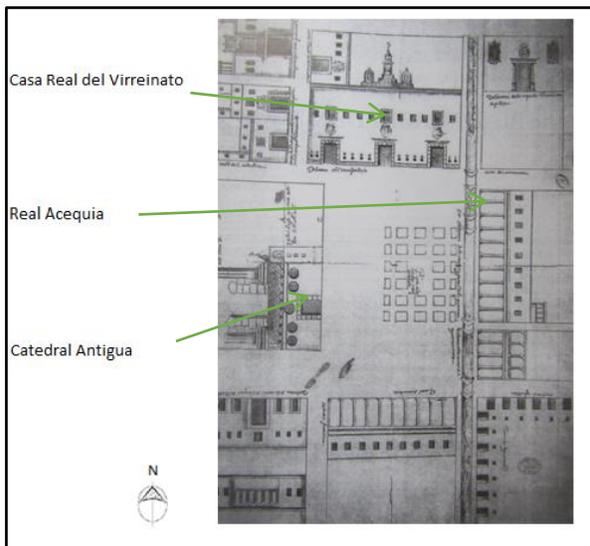


Figura 14. Plano de la plaza Mayor de la Ciudad de México, hacia 1596, con la ubicación de las casas viejas y casas nuevas de Cortes, real acequia, Universidad, palacio Arzobispal, Catedral vieja y cimientos de la nueva, Ayuntamiento y fundición. Archivo General de Indias. Sevilla. (Castro, 2003).



Figura 15. Antigua Casa de Moneda, hoy Museo Nacional de las Culturas. (Valle-Arizpe, 1952).

### 1587-1595

Se construye la capilla real, la primera con bóvedas vaídas, la obra fue dirigida por el Arquitecto Cristóbal de Miranda. (Figura 17)

### 1597-1605

Se presentaron problemas estructurales, viéndose en la necesidad de apuntalar los arcos y llevar a cabo obras constantemente.

1603

Reconstrucción de las tiendas que se habían derrumbado en la esquina noroeste de la Real Casa.

1611-1612

En el Parque se construyó un coso para lidiar toros.

15 de enero de 1624

Se presentó un motín, por el cual el Palacio se vio seriamente dañado al incendiarse la zona de la cárcel.

1625-1635

Reedificación total del edificio, realizándose cambios en la fachada.

1628

Para este año, la fachada del Palacio, contaba con 2 niveles en la parte central, 3 niveles en la esquina sur poniente y 1 nivel sobre la calle del Arzobispado, donde se encontraban las tiendas. Gómez de Trasmonte, obrero mayor, se encargó de reparar corredores y azoteas, de construir un capitel para un reloj y un cuarto para el virrey con 12 balcones en la fachada principal. (Figuras 17 y 18)



Figura 16. Plano de la Ciudad de México, firmado por el arquitecto Juan Gómez de Trasmonte en 1628, según la litografía impresa en 1907, por Francisco del Paso y Troncoso. ([www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).



Figura 17. Palacio de los Virreyes, detalle del plano firmado por el arquitecto Juan Gómez de Trasmonte en 1628. ([www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).



Figura 18. El Palacio de los Virreyes de México a mediados del S. XVII. Biombo del Museo de América, Madrid. (Krauze, 2005).

1629

Grave inundación causa varios daños. En estos casos se terraplenaba, es decir, se elevaba el nivel de las partes hundidas empleando tierra, piedra y césped o zacate que se iban superponiendo con el objeto de evitar que el agua de las calles o de la acequia penetrase al interior.

1631

Se concluyó la construcción del Juzgado de Provincia que ocupó la esquina norte de la cuadra, para este edificio se construyeron, en la planta baja, un portal de 3 arcos de cartera que se abrían a la Plaza Mayor. Este edificio colindaba con las tiendas. Es entonces cuando la fachada principal queda completamente de 2 niveles. (Figuras 20, 21 y 22).

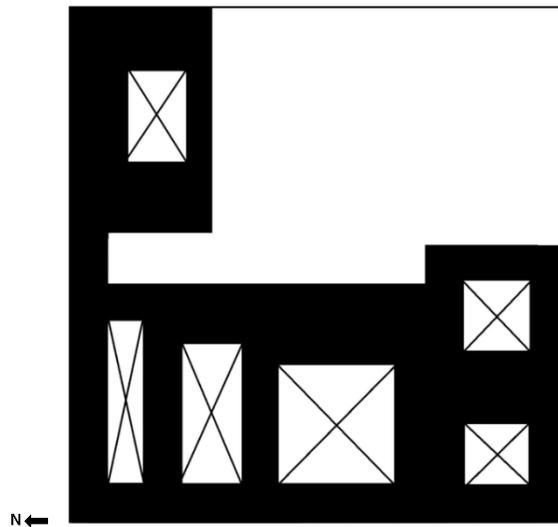


Figura 19. Plano aproximado del Palacio de los Virreyes para el año 1631. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de los planos de la fuente bibliográfica: CNMH, INAH, 1996).

1640

Se menciona que algunas edificaciones se hacían de ladrillos, los cuales se fabricaban en el Palacio. Por otra parte, ese año se construye el Balcón de la Virreina. (Figuras 20, 21 y 22)



Figura 20. Palacio de los Virreyes de Nueva España, detalle en el biombo de la Marquesa del Huetor de Santilán, Madrid. En esta ilustración se puede observar los tres arcos de cantera, que formaban parte del edificio del Juzgado de Provincia. (Castro, 2003).

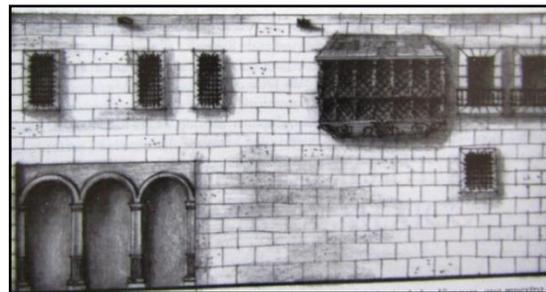


Figura 21. Reconstrucción hipotética de la fachada y esquina noroeste del Palacio de los Virreyes, que muestra el portal de provincia y el balcón de la Virreina, a mediados del siglo XVII. (Castro, 2003).



Figura 22. Fachada del Palacio Virreinal de México, a mediados del siglo XVII. Al sur se representó la acequia y la real Universidad. Biombo, óleo sobre tela y madera en el Museo de América, Madrid. ([recolecthistorias.wordpress.com/tag/latinoamerica/](http://recolecthistorias.wordpress.com/tag/latinoamerica/)).

➤ El Viejo Palacio de los Virreyes

1650

Se realizaron reparaciones de techos y muros, pues empezaban a derrumbarse.

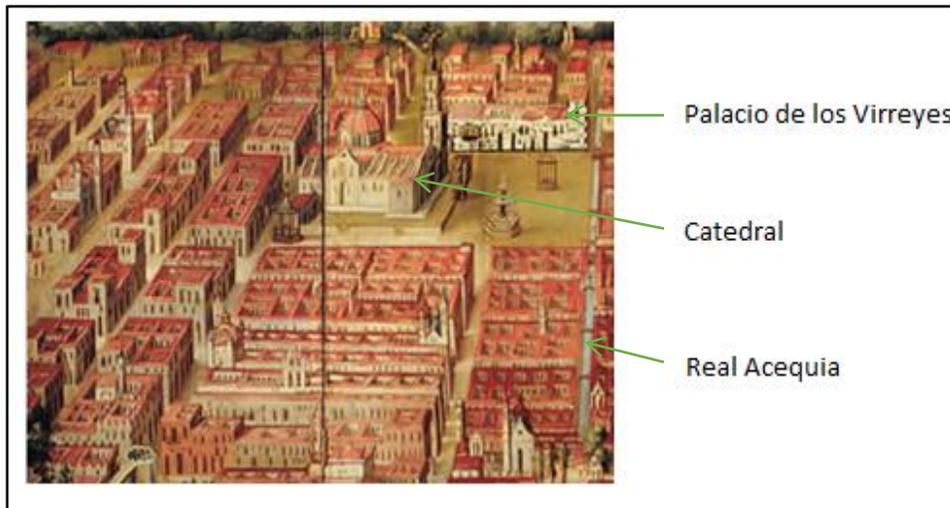


Figura 23. Anónimo, Detalle "Vista de la Ciudad de México", Biombo, Museo Franz Mayer, finales siglo XVII. El Palacio de los Virreyes contaba con 2 niveles en toda la fachada principal. ([www.ruizhealytimes.com/virreinato](http://www.ruizhealytimes.com/virreinato)).

1653

Se amplió la puerta de la plaza del Volador y se demolieron muros para colocar 3 arcos para permitir que las carrozas pudieran pasar libremente de un patio a otro.

19 de noviembre de 1659

A la media noche los presos incendian unos pisos de la cárcel.

1667

En este año se presentaron muchas lluvias y repetidos temblores ocasionando que las paredes se abrieran, amenazando con derrumbarse.

8 de junio de 1691

Acaece el motín más violento de la época colonial, provocando un incendio que afectó principalmente las zonas frente a la Plaza y la que se encuentra sobre la actual calle de Corregidora. Gran parte del edificio no sufrió daños por el fuego, pero las malas condiciones en que se encontraba a causa de la antigüedad se acentuaron. Ante tal situación se decidió iniciar la construcción de un Nuevo Edificio.

➤ La ruina del Viejo Palacio

1692

Se estaba planeando realizar trabajos para salvar al edificio o hacer una nueva construcción, pero no se tenían los recursos necesarios, para emprender las obras.

Mediados de febrero de 1693

Comienza la reedificación, con la traza del Arquitecto Diego Rodríguez, la superintendencia estuvo a cargo de Fray Diego de Valverde, con la colaboración del Ingeniero militar Jaime Francisco Franck que dirigía las obras del fuerte de San Juan de Ulúa en Veracruz, fue invitado por el Virrey a hacer un reconocimiento, después de la inspección recomendó derribar los Arcos de Cantería de Provincia por estar desplomados, así como, la construcción de 2 torreones con troneras para la defensa del Palacio.

1695

Se suspenden los trabajos por falta de fondos. La parte antigua que había respetado el fuego amenazaba con derrumbarse.

Durante varios años el Palacio conservó un peculiar aspecto de renovación y ruina, que daba una fisonomía singular a la parte central de la ciudad, la figura 24 muestra el estado en que se encontraba al suspenderse los trabajos de reedificación.



*Figura 24. Pintura de la Plaza Mayor, realizada en los primeros años del siglo XVIII por Cristóbal de Villalpando. Colección privada, Londres, Inglaterra. Parte del Palacio Virreinal, se encuentra edificada al norte de la cuadra y al sur aun se conservan los patios del antiguo edificio. ([www.ruizhealytimes.com/virreinato](http://www.ruizhealytimes.com/virreinato)).*

1696

La obra se reanuda a la llegada del nuevo virrey José Sarmiento y Valadez (1696-1701), dando prioridad a sus habitaciones.

Jueves 23 de mayo de 1697

A pesar de que continuaban las obras, se bendijo el Palacio.

1699

La nueva edificación provocó la destrucción del antiguo edificio que se demolió, pues los techos se sostenían con puntales de madera y las paredes se encontraban muy dañadas por el incendio y los terremotos. Buena parte de lo antiguo se aprovechó para la construcción.

Se hizo un reconocimiento en la que se menciona que la obra tenía:

- Cimientos nuevos, se ahondaron sus zanjas y se puso un nuevo estacado.
- El precinto era de piedra negra, con su coronación de piedra blanda de chiluca para evitar el tequesquite (salitre).
- Portadas de cantera.
- En el Patio principal se encontraba una danza de arcos, con cimiento corrido y basas de chiluca, con fustes y arcos de piedra blanda, labrados cuidadosamente.
- La escalera principal tenía sus bóvedas de hocinos que cargaban los escalones de chiluca.
- El torreón norte tenía su primer cuerpo de chiluca labrada, el resto mampostería con sillares de cantera en las esquinas.
- Los materiales que se utilizaron fueron: cantera labrada, cal, arena, piedra de tezontle, piedra de chiluca, ladrillo, madera y piedra negra de procedencia prehispánica para el rodapié en toda la obra.

Se menciona que se obligó a algunas alcaldías a cooperar con materiales, las Alcaldías de Atitalaque, Guipustla y Tetepango, proporcionaron Cal, mientras las Alcandías de Chalco y Xochimilco aportaron madera y las Alcaldías de Iztapalapa y Tacuba, piedra y tezontle.

1701

En todos estos años la obra fue dirigida por Fray Diego de Valverde con la intervención de los Arquitectos: Diego Rodríguez, Juan de Zepeda, Diego del Castillo, Juan Montero, Felipe de Roa y Cristóbal de Roa, con las modificaciones del Ingeniero militar Jaime Francisco Franck, lo que determinó el aspecto del actual Palacio.

➤ Palacio Nuevo de los Virreyes.

1708

Para ese año el segundo nivel (entresuelo) solo estaba construido en los lados poniente y norte del patio principal.

1710

La obra se reanudó.

16 de agosto de 1711

Se presentó un terremoto.

1714-1716

Continuó la construcción con lentitud.

1722

Con el Virrey Juan de Acuña la construcción avanzó de forma apreciable.

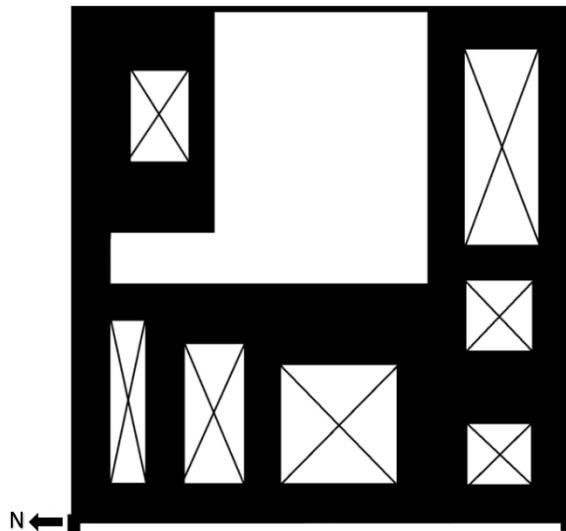


Figura 25. Plano aproximado del Palacio Virreinal para el año 1720. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de los planos de la fuente bibliográfica: CNMH, INAH, 1996).



Figura 26. Plano de la Ciudad de México en el año 1720. (<http://www.geografiainfinita.com/2016/12/evolucion-de-la-ciudad-de-mexico-a-traves-de-los-mapas/>).

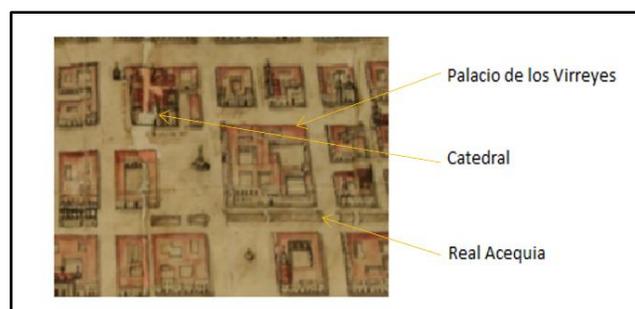


Figura 27. Detalle del Plano de la Ciudad de México en 1720. (<http://www.geografiainfinita.com/2016/12/evolucion-de-la-ciudad-de-mexico-a-traves-de-los-mapas/>).

1725-1729

Construcción de la cárcel en la parte noroeste.

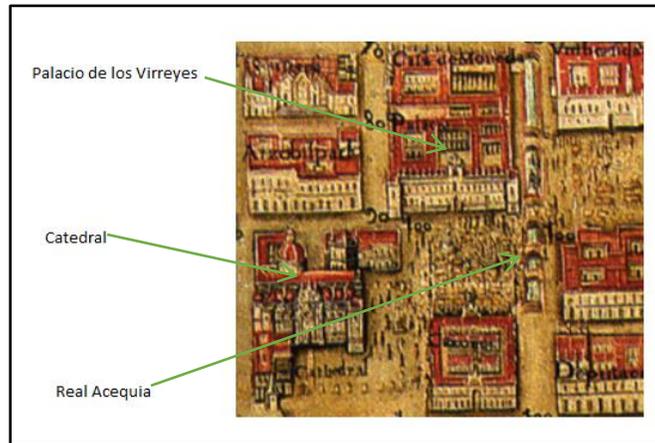


Figura 28. Plano de la Ciudad de México para 1737. (www.mexicomaxico.org).

1745

La obra quedó concluida en una gran parte con un severo aspecto militar. Los cuarteles con sus caballerizas y almacenes ocuparon las áreas libres del Parque ya mutilado previamente por las ampliaciones de la casa de Moneda.

Después de varios años en construcción, se puede observar, la sujeción de los maestros mayores a las trazas iniciales de Fray Diego de Valverde, sacrificando las novedades estilísticas en pos de una austera unidad.

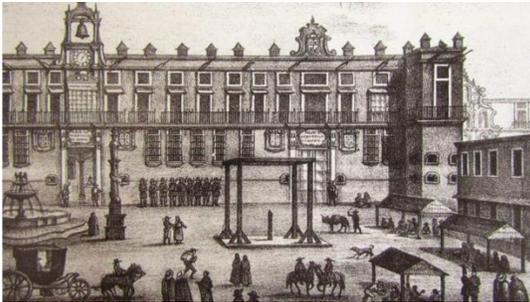


Figura 29. Obra de Luis Garés, Vista de la Plaza de México, S. XVIII. Biblioteca Miguel Lerdo de Tejada, SHCP. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).



Figura 30. Acuarela de Fernando Brambila, que muestra la plaza Mayor de México y real Palacio en la segunda mitad del siglo XVIII. Museo Naval, Madrid. (Valle-Arizpe, 1952).

➤ El Palacio Virreinal de los Borbones.

1753

Se presentaron varios temblores causando severos daños.

1754

62 años después del incendio, el Palacio se había reedificado en su aspecto principal.

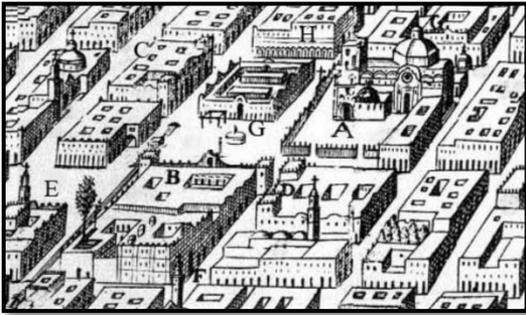


Figura 31. Plano de la Ciudad de México para el año 1760.  
A) Catedral, B) Palacio Virreinal. ( www.mexicomaxico.org).



Figura 32. Fragua de la Casa de Moneda, de una antigua estampa. (Valle-Arizpe, 1952).

1772

Inició la ampliación de la Antigua Casa de Moneda, que terminó hasta 1782.

2 de abril de 1776

Un fuerte temblor afectó muros y techos.

28 de marzo al 11 de abril de 1787

Se sintieron fuertes y repetidos temblores, dañando severamente el Palacio, presentándose grietas en los muros y en los arcos de corredores del 2 piso.

1787

Se decide fundar el Jardín Botánico de la Nueva España.

- El Palacio de los Virreyes en el ocaso colonial.

1789

El Palacio se encontraba en un estado lamentable, tenía muy mala reputación y servía de tránsito para todas las personas.

El virrey Juan Vicente de Güemes, Segundo Conde de Revillagigedo (1789-1794), considerado el virrey más notable de Nueva España en el s. XVIII, introduce las reformas administrativas de los Borbones. En su gobierno se realizaron varias reparaciones y modificaciones, en la tesorería y contaduría general del ejército y real hacienda, en las cajas reales, demoliendo parte de lo construido, con excepción de los techos y paredes principales. También fueron suprimidos callejones, sótanos y escondites. Durante su gobierno, mandó cubrir con losas de piedra la real acequia.



Figura 33. Detalle de Palacio Virreinal obtenido de la "Vista de la Plaza Mayor de México, reformada y hermo세ada por disposición del excelentísimo señor virrey conde de Revillagigedo en el año de 1793". Archivo General de la Nación, México, D.F. (Krauze, 2005).

8 de marzo de 1796

A las nueve de la mañana se sintió un fuerte temblor, el cual provocó severos daños al edificio. El Virrey describió el movimiento como oscilatorio de oriente a poniente, luego cambio de norte a sur y terminó con movimientos encontrados a manera de círculo.

1800

Se presentó un temblor ocasionando daños.

Para ese entonces, el Inmueble presentaba nuevamente un aspecto deteriorado y sucio. Las paredes presentaban una fuerte pérdida de mortero al grado de estar desunidas las piedras. La cantera labrada y el tezontle se encontraban ensalitrados. Por otro lado, las inversiones para el mantenimiento del edificio continuaron disminuyendo y se hizo palpable una desorganización en la conservación del mismo.

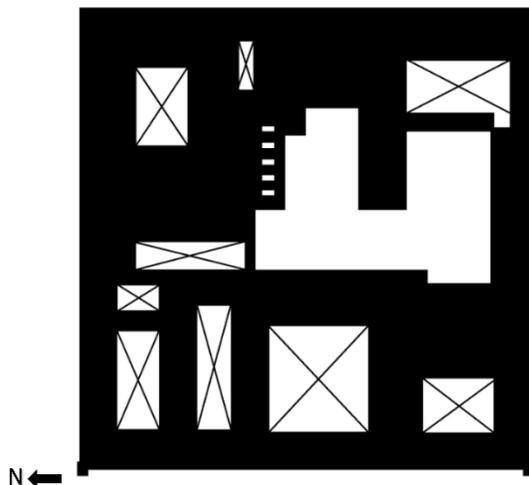


Figura 34. Plano aproximado del Palacio Virreinal para el año 1800. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de los planos de la funete bibliografiaca: CNMH, INAH, 1996).

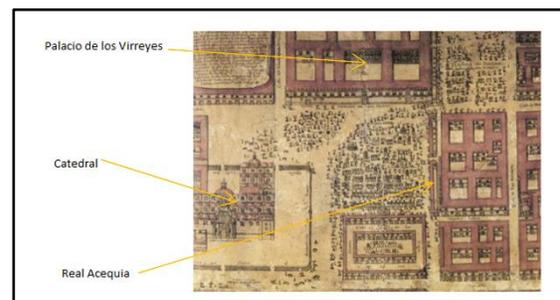


Figura 35. Plano de la Ciudad de México, anónimo, ca. Siglo XVIII. ([www.ruizhealytimes.com/virreinato](http://www.ruizhealytimes.com/virreinato)).

14 de septiembre de 1802  
Temblor ocasiona daños ligeros.

1810  
Inicia la Guerra de Independencia.

1818  
Aparecen grietas entre la unión del Palacio Virreinal con la casa de Moneda, la parte alta de las fachadas amenazaban con derrumbarse. Las obras que se realizaban se limitaban a disfrazar las viejas estructuras siempre dañadas por el inestable suelo.

➤ El Palacio de los Supremos Poderes



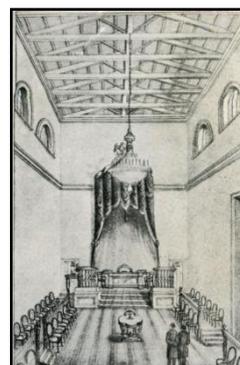
Figura 36. Obra de Theubet de Beauchamp, *Jura solemne de la Independencia de México*, CA. 1821-1830, Lápiz y aguada sobre papel. Real Bbiblioteca del Palacio Real de Madrid. (*Relatos e historias en México* año VIII No. 85).

1822  
Después de la guerra, el Palacio de los Supremos Poderes tenía un aspecto de un enorme y descuidado cuartel, a pesar de que se hicieron obras aun en las peores épocas. Ante esta situación, se decidió repararlo, modificando las dependencias virreinales que habían logrado subsistir, para ello, el Congreso Constituyente aprobó el presupuesto destinado a las obras.

La Cámara de Diputados se instaló en una edificación circular que subsistió hasta 1872, en que se perdió por un incendio, mientras la Cámara de Senadores se instaló en la Capilla. (Figuras 37 y 38).



*Figura 37. La Cámara de Diputados construida dentro del Palacio Nacional, concluida en 1829. Obra de Urbano López. Litografía Coloreada, publicada en J. Michaud y Thomas, Álbum Pintoresco de la República Mexicana, México, estampería de Julio Michaud y Thomas, CA. 1850. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).*



*Figura 38. Salón de Sesiones de la antigua Camara de Senadores en el Palacio, que fue capilla durante el Imperio de Maximiliano. (Valle-Arizpe, 1952).*

## 1835

Para este año el Palacio mostraba un aspecto deteriorado por fallas estructurales debidas a los hundimientos diferenciales, los sismos y por la falta de obras efectivas. Para evitar gastos preferían clausurar áreas que requerían trabajos urgentes, más permanentes y definitivos. Mientras, los exiguos fondos que se destinaban a las reparaciones eran utilizadas para mantener un aspecto suntuoso en los salones destinados a las recepciones. La situación continuó agravándose a pesar de algunos intentos para reorganizar la ejecución de las obras.

16 de septiembre de 1835

Se inicia la costumbre de iluminar la fachada.

22 de noviembre de 1837

Un temblor agravó la situación, ya que aparecieron numerosas grietas en la escalera principal, en los arcos de los patios y en la zona de Hacienda.

Para entonces, los militares habían ocupado más áreas del edificio transformándolo en un gigantesco cuartel.

Abril de 1839

Por el estado de deterioro que se encontraba el Palacio, el presidente Santa Anna se estableció en el Palacio provisional de Buenavista.

15 de Julio de 1840

En ese año en la Presidencia se encontraba Anastasio Bustamante. Se produce la Revolución Federalista al mando de Valentín Gómez Farías y José Urrea. Ese día 15 de

julio, los rebeldes entraron violentamente al edificio, capturando al presidente. El edificio fue severamente dañado, con el baluarte sur prácticamente destruido. Al ser capturados los rebeldes, el edificio fue entregado el día 27 de julio, quedando en condiciones lamentables, en esa situación el presidente y algunos funcionarios se alojaron en el convento de San Agustín. (Figuras 39 y 40).



Figura 39. Vista de la Plaza Nacional de México, el día de 15 de julio de 1840. (Valle-Arizpe, 1952).



Figura 40. En julio de 1840, la revuelta federalista de Valentín Gómez Farías y José Urrea ocasionó graves daños al Palacio Nacional. Obra de Pedro Gualdi, Vista del Palacio de los Supremos Poderes tras la jornada del 15 al 27 de julio de 1840, CA. 1840. Litografía, Museo de la Ciudad de México. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).

#### 5 de septiembre de 1841

En otra revuelta conocida como el Motín de la Ciudadela, los rebeldes dirigieron sus baterías al Palacio, resultando nuevamente dañado.

#### 7 de abril de 1845

El temblor que derribó la cúpula de la capilla del Señor de Santa Teresa, provoca en el palacio daños tanto en la Cámara de Diputados como en la de Senadores, por lo que pasaron a sesionar en el edificio de la Antigua Inquisición.

#### 1846

El Coronel Ingeniero Sebastián Blanco se hizo cargo de la construcción de oficinas del Ministerio de Guerra y de Marina, pues el presidente interino Mariano Paredes estaba interesado en reorganizar el ejército.

#### 15 de septiembre de 1847

Santa Anna abandona la ciudad y el Palacio fue objeto de un desenfrenado saqueo, antes de ser ocupado por las fuerzas invasoras extranjeras. Al ser ocupado por los norteamericanos el edificio quedó a cargo del teniente coronel Watson y su batallón de marinos, que trataron de evitar mayores destrozos y pérdidas. (Figura 41)



*Figura 41. La mañana del 14 de septiembre de 1847 las tropas norteamericanas, comandadas por el general Winfield Scott, izaron en Palacio de los Supremos Poderes la bandera de su nación en señal de victoria. La enseña fue retirada hasta el 12 de junio de 1848. Obra de Carl Nebel, Entrada del General Scott a México, 1851. Litografía, acuarela. Col. Museo Soumaya- Fundación Carlos Slim, A. C./ CD. De México.(www.mexicomaxico.org).*

12 de junio de 1848

Al terminar la ocupación, el inmueble fue entregado, volviendo a izarse la bandera de México en la asta bandera del Palacio de los Supremos Poderes.

1850

La Casa de Moneda fue trasladada a la Calle del Apartado y el edificio se destinó a oficinas de gobierno.

1851- 1853

Durante el gobierno de Mariano Arista se realizaron obras de mejoramiento en el Palacio, como la apertura de la puerta norte que en su honor se llamó Mariana.



*Figura 42. Casimiro Castro, Palacio de los Supremos Poderes, 1855. Litografía. Colecciones especiales. Biblioteca de México. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).*

16 de junio de 1853

Se expidió el “Reglamento para el Gobierno Interior del Palacio Nacional”. El Palacio mantuvo su tradicional aspecto junto con las acostumbradas reparaciones.

1864

Ante la invasión francesa (Figura 43), se llevó a cabo la remodelación del Palacio para que Maximiliano ocupara el área destinada tradicionalmente a las habitaciones de los virreyes y de los presidentes. Entre las obras de importancia se tienen:

- Cambio en el nivel de los patios y pisos para evitar inundaciones.
- Demoliciones de las áreas que amenazaban con derrumbarse.
- Ampliación del Jardín botánico con la demolición del antiguo cuartel que lo ocupaba parcialmente.
- Retiro de viviendas que ocupaban las azoteas.
- Cambio de techos y vigas deterioradas.
- Construcción de la Escalera de la Emperatriz por los Ingenieros Juan y Ramón Agea. (Figura 44).

La estructura del edificio fue poco modificada con nuevas construcciones, sin intentar corregir las tradicionales fallas estructurales y constructivas, ninguna innovación tecnológica fue introducida con excepción de la Escalera de la Emperatriz. Reduciéndose a mejoras ostentosas en áreas destinadas a ceremonias. Se careció de un plan definido y las obras se hacían a medida que se creían necesarias.



Figura 43. Octaviano D’Alvimar, *Vista de la Plaza Mayor de la Ciudad de México (detalle)*. Óleo sobre tela. Colección particular. (Krauze, 2005).



Figura 44. Escalera de la Emperatriz obra de los Ingenieros Juan y Ramón Agea. ([www.flickr.com/photos/elviajante/111649863](http://www.flickr.com/photos/elviajante/111649863)).

- El Palacio del Supremo Gobierno de la Nación.

1867

Al ser abandonado el Palacio, los liberales y conservadores participaron en el saqueo de las habitaciones imperiales.

Posteriormente el edificio albergó los poderes de la República. En las reparaciones se empearon algunas innovaciones técnicas, nuevos materiales y sistemas constructivos, lo que mejoró notablemente las viejas estructuras virreinales, permanentemente deterioradas, estas obras permitieron suavizar su severo aspecto que se tornó más elegante y refinado.



Figura 45. Palacio de los Supremos Poderes en julio 1867.  
([www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).



Figura 46. Fachada de Palacio de los Supremos Poderes,  
Album la Capital de México y fragmento de paseo del Zocalo,  
ca. 1876. Fototeca de Monumentos Históricos- INAH.  
(Krauze, 2005).

1871

La capilla imperial fue desmantelada y la imprenta se instaló en el Palacio.

1872

Fallece el presidente Juárez.

22 de julio de 1872

Un incendio derrumbó el techo del salón de sesiones de la Cámara de Diputados, resultó severamente dañado la crujía oriente del patio principal y se evitó que el fuego se propagara al resto del edificio. La Cámara de Diputados paso temporalmente al salón de recepciones o de Embajadores y después al Teatro Iturbide.

1877

Al triunfar la Revolución de Tuxtepec, asume el poder el General Porfirio Díaz, el cual promovió trabajos de renovación en gran escala y de forma constante, transformando grandes áreas que fueron nuevamente construidas o reedificadas.

El Observatorio Meteorológico y Astronómico de México se creó por decreto presidencial, bajo iniciativa del Secretario de Fomento, Vicente Riva Palacio, el 6 de febrero de 1877 y

dependiente de la Comisión Geográfica Exploradora del Territorio Nacional; fue inaugurado el 6 de marzo de ese mismo año, durante el gobierno de Porfirio Díaz. El 8 de febrero de 1877, se acordó que en el Palacio Nacional se instalara un observatorio meteorológico, que fuese el centro de todas las observaciones realizadas en el país. (Figuras 47 y 48).



Figura 47. El observatorio meteorológico en la azotea del Palacio de los Supremos Poderes. (Valle-Arizpe, 1952).



(www.mexicomaxico.org).

Figura 48. El Palacio de los Supremos Poderes en 1883.

### Julio de 1879

La imprenta es trasladada a la planta baja del Museo Nacional, para facilitar las instalaciones que le pertenecían en el Palacio, a la Tesorería de la Federación.

### 1883

Instalación de elevadores hidráulicos.

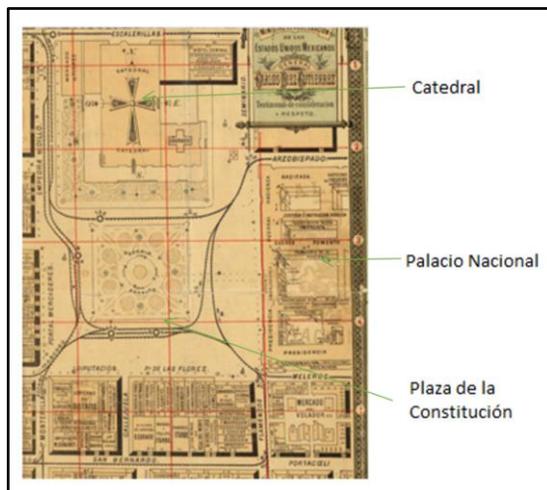


Figura 49. Julio Popper Ferry, Plano del perímetro central. Directorio Comercial, 1883, detalle. (www.ruizhealytimes.com/virreinato).



Figura 50. Obra de Casimiro Castro, Palacio Nacional, CA. 1880-1889. Litografía acuarelada y tinta. Col Museo Soumaya-Fundación Carlos Slim, A.C. /CD. De México. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).

1884

El presidente Díaz pasa a vivir en el Palacio de Chapultepec, se puso a disposición de la Secretaría de Hacienda la casa No 1 de la Calle de Moneda. Las reparaciones realizadas en el Palacio se llevaban a cabo sin ningún estudio previo ni con un plan definido.

Julio de 1886

Se requerían obras urgentes pues los techos amenazaban con caerse. El Ingeniero Ramón Agea presentó presupuestos para el cambio de techos empelando dobles T de hierro o rieles, pero no fue aprobado por resultar muy costoso.

Las obras verdaderamente urgentes se continuaron posponiendo, mientras la fachada es iluminada con gas.

Se intentan varias perforaciones en el jardín para acondicionar un pozo artesiano, después de 3 intentos que fracasaron, las obras fueron interrumpidas en 1888.



*Figura 51. Fachada principal del Palacio del Supremo Gobierno de la Nación en la segunda mitad del siglo XIX. (Valle-Arizpe, 1952).*

1889

Se introdujo el uso de energía eléctrica para la iluminación del edificio, también se realizaron una serie de modificaciones de gran importancia en el área noroeste para acondicionar con toda amplitud y elegancia la secretaría de Hacienda. Se procedió a aprovechar parcialmente las construcciones ya existentes, regularizando los muros y demoliendo otros que hacían difícil la distribución y ventilación. En el baluarte noroeste fue preciso abrir ventanas en los lugares que habían ocupado los calabozos.

El Primer Patio Mariano se determinó dividirlo levantando una crujía intermedia para situar en ella las escaleras de acceso a los entresuelos. (Figuras 34 y 54). Fueron construidos corredores volados sobre el patio, apoyados en ménsulas de hierro con pisos de mármol (Figura 52).

Gran parte de los antiguos techos y entrepisos fueron sustituidos por el sistema de vigas y láminas de hierro. Se construye el pasillo poniente que comunicaría el Patio Principal con la Secretaría de Hacienda. En los vestíbulos o corredores bajos, oriente y poniente, los antiguos techos de vigas fueron sustituidos por bóvedas de mampostería.

En Tesorería fue iniciada la construcción de 2 arcos de 7.75 metros con sus machones de cantera y el central de chiluca, cargando los techos sobre una trabe de hierro.



Figura 52. Primer Patio Mariano. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).



Figura 53. Palacio del Supremo Gobierno de la Nación a finales del S. XIX. ([www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).

1895

Los techos de los corredores del segundo piso se sustituyeron por un sistema de rieles enlazados sobre el cual, se colocaron láminas acanaladas bombeadas, cubriéndolas con fragmentos de tezontle, después con cascajo, por último, con soleras de mármol gris y negro.

1900

El s. XIX fueron décadas de gran actividad constructiva gracias al auge económico y a la continuidad de la administración porfiriana. A inicios del s. XX las únicas dependencias que se encontraban en el edificio eran Presidencia, Hacienda, Guerra, Senado y dos cuarteles, además, por esa época, se revalorizó la importancia histórica y estética del edificio.

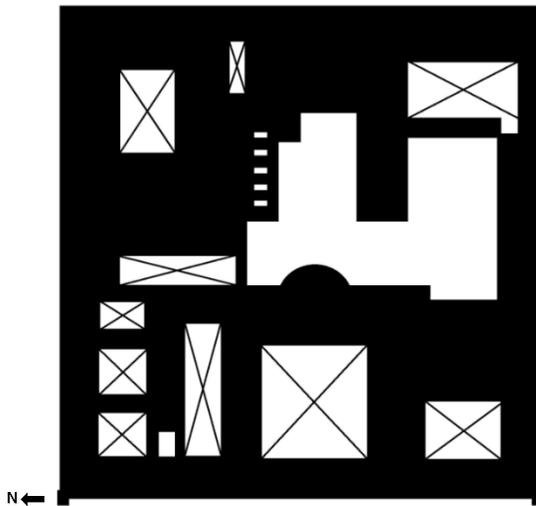


Figura 54. Planta aproximada del Palacio del Supremo Gobierno de la Nación para 1900. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de los planos de la funete bibliografica: CNMH, INAH,1996).

1907

Era necesaria la sustitución de las antiguas vigas de madera de los techos de los corredores del Patio Principal y de varias áreas del Palacio. En el salón de Embajadores se conservaron las vigas antiguas de madera, sujetando las rotas con estribos de metal.

1909

Se renovó todo el edificio para la celebración del centenario de Independencia. Nunca antes el Palacio había alcanzado un aspecto tan suntuoso como lució durante las fiestas celebradas en septiembre de 1910. Sus antiguas estructuras y elementos arquitectónicos fueron drásticamente transformados, todos los adelantos tecnológicos de carácter constructivo fueron aplicados e introducidas todas las comodidades que daban los avances científicos de la época.



Figura 55. El Palacio del Supremo Gobierno de la Nación a principios del S. XX. (www.mexicomaxico.org).

## ➤ EL Palacio Nacional

1910

Inicia la Revolución. Por esta época se observó que, además de las acostumbradas fallas ocasionadas por el tipo de suelo, al sustituir los techos con materiales considerados como modernos de menor peso, causaron la pérdida de estabilidad de las antiguas estructuras coloniales, repitiendo en menor escala los problemas que hicieron preocuparse a los arquitectos del s. XVII.



Figura 56 y 57. El Palacio del Supremo Gobierno de la Nación iluminado en las fiestas del centenario de la Independencia. (Relatos e historias en México año VIII No. 85).



Figura 58. El Palacio del Supremo Gobierno de la Nación iluminado en las fiestas del centenario de la Independencia. (grandescasasdemexico.blogspot.mx).



Figura 59. El Palacio del Supremo Gobierno de la Nación en la Decena trágica del 9 al 18 de febrero de 1913. (<http://elmodo.mx/>).



Figura 60. El Palacio del Supremo Gobierno de la Nación después de la Decena trágica. (*Relatos e historias en México año VIII No. 85*).

1925

Fueron emprendidos obras de gran magnitud, entre ellas añadir un tercer nivel al conjunto, transformando completamente el Palacio. Con estos trabajos el edificio adquirió su actual fisonomía. (Figuras 61,62 y 63)

Para acondicionar la Tesorería General de la Nación fue colocada una gran cubierta con estructuras metálicas y blocks de vidrio para transformarlo en un amplio salón. Esta obra fue elaborada por el Arquitecto Manuel Ortiz Monasterio, Carlos Greenham y Bernardo Calderón. Las obras concluyeron en mayo de 1926. (Figura 64)



Figura 61. Se inicia la construcción del tercer piso del Palacio Nacional. (*es.pinterest.com*).

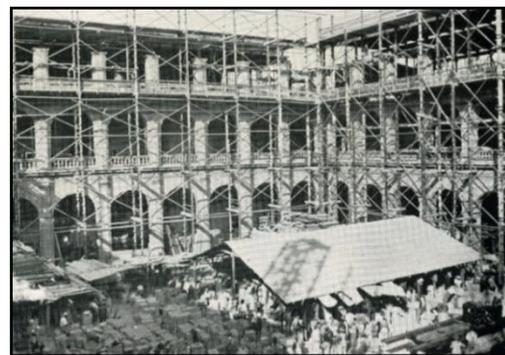


Figura 62 y 63. Construcción del tercer piso del Palacio Nacional. (*Valle-Arizpe, 1952*).

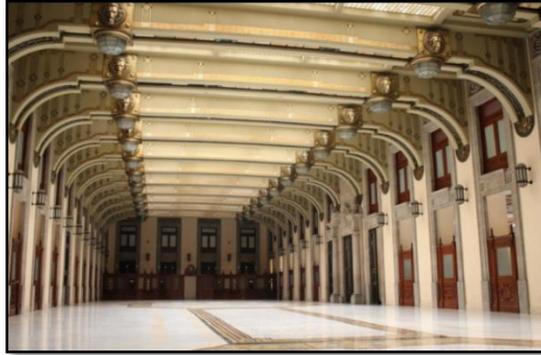


Figura 64. Ex-tesorería General de la Nación, con la cubierta con estructuras metálicas y blocks de vidrio para transformarlo en un amplio salón. (Salón Guillermo Prieto). (<http://www.viviendoamexico.com>).

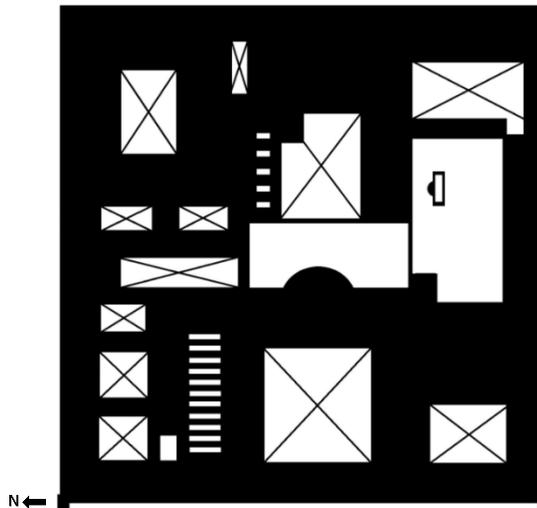


Figura 65. Planta aproximada del Palacio Nacional para 1925. (CNMH, INAH, 1996).

Marzo de 1926

Se realizaron excavaciones y perforaciones en los cimientos del edificio, para asegurar la estructura metálica que soportaría el piso que se iba a agregar. Los trabajos avanzaron rápidamente.

Agosto de 1926

La fachada del cuarto piso estaba terminada, la cual fue cubierta con chapas de tezontle cortado.

14 de septiembre de 1926

Se coloca la Campana. (Figura 68)

15 de septiembre de 1926

El Presidente Calles inaugura la nueva fachada.

1927

Se continúa la construcción del cuarto piso. En la parte del jardín se construyeron las oficinas de Contraloría.

1928

Las reformas están completamente terminadas (Figuras 66, 67 y 70). El nuevo piso fue diseñado de acuerdo con los antiguos módulos del conjunto, con una serie de ventanas separadas por pilastras y con cerramientos de medio punto, para dar el aspecto de una galería que aligera el conjunto. En la planta baja de la fachada los vanos fueron regularizados, en los superiores se conservó su disposición anterior y los enmarcamientos fueron relabrados.

Los paramentos en los 2 pisos inferiores se revistieron con piedra de chiluca y los de la parte alta con sillares regulares de tezontle. En las 3 portadas se mantuvieron parcialmente algunos de sus elementos originales, pero completamente relabrados, los fueron retirados los agregados neoclásicos y colocados otros neocoloniales. El reloj del Palacio fue suprimido. La pesada balaustrada de cantería, colocada durante el gobierno de Díaz fue sustituida por una discreta balconería de bronce.

Los cielos rasos y los techos que seguían siendo de vigas de madera, fueron cambiados por estructuras metálicas con plafones de yeso.

Las obras continuaron para traer constantes mejoras, con la única finalidad de darle al edificio la funcionalidad que se requería.



Figura 66. Vista aérea del Zócalo de la Ciudad de México para 1930. Las obras en Palacio Nacional habían terminado. ([www.mexicomaxico.org](http://www.mexicomaxico.org)).



Figura 67. Fachada del Palacio Nacional con las obras del tercer piso concluidas. (Valle-Arizpe, 1952).



Figura 68. Durante la administración de presidente Plutarco Elías Calles (1924-1928) se construyó el tercer nivel del Palacio y se sustituyó la piedra blanca de la fachada por tezontle. (*Relatos e historias en México año VIII No. 85*).

1935 a 1940

Se realizaron excavaciones arqueológicas.

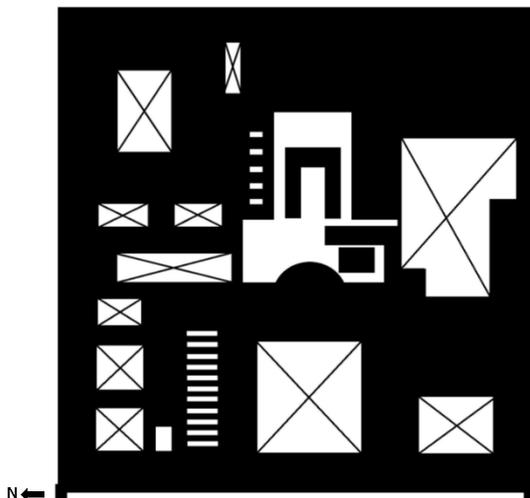


Figura 69. Planta aproximada del Palacio Nacional para 1940. (CNMH, INAH, 1996).

1945

Construcción de la escalera del Patio de Honor y de los corredores interiores de la dirección de aduanas.

1948

La Secretaría de la Defensa Nacional entregó la parte del edificio que ocupaba en la calle de Moneda a la Secretaría de Hacienda.

Se establece el recinto de Homenaje a Juárez en los restos de la antigua casa No 1 de la Calle de Moneda.



Figura 70. Recinto Homenaje a Juárez , establecido en 1948. (<http://www.mexicoescultura.com>).

1955

Se efectuaron demoliciones y reconstrucciones en la parte norte del Palacio utilizando el mismo material y sin alterar el estilo.

1956

Se hicieron reformas a la puerta mariana.

1957

Demolición del techo de la Hemeroteca de la Secretaría de Hacienda.

1958

Se hicieron obras sin consultar.

1960

Se lleva a cabo la demolición de la Antigua Ampliación de la Casa de Moneda, el Cuartel y el consultorio médico para empleados de la Secretaría de Hacienda. Dejando tan solo la fachada con relieves, obra del Ingeniero Miguel Constanzó. Allí se edificó un conjunto de edificio “funcionales” para oficinas de la Secretaría de Hacienda, de acuerdo al proyecto de los Arquitectos Enrique y Agustín Landa, obras concluidas en 1961.

Ante la falta de coordinación en el gobierno y la administración del edificio, hizo que muchas de las dependencias oficiales emprendieran obras diversas con el pretexto de ampliar o mejorar sus oficinas, estableciendo almacenes y bodegas, dormitorios o comedores, canchas deportivas, estacionamientos y talleres de automóviles civiles y militares, entre otras instalaciones que afectaron el funcionamiento y el aspecto del Palacio.

Todo parecía coincidir para provocar la destrucción del antiguo edificio. El peso del cuarto nivel, la construcción del colector en la calle de Moneda, la consolidación de subsuelo, comenzaron a provocar graves hundimientos diferenciales, desplomes y fracturas en los muros.

1968-1970

Para empeorar la situación se emprendió la construcción de la línea y la estación “Zócalo” del Metro, provocando graves asentamientos que se hicieron evidentes con el desplome de la fachada principal y en diversos sectores del edificio. (Figuras 71 y 72)



Figura 71. Construcción de la línea 2 del metro en 1969. (www.mexicomaxico.org).



Figura 72. Línea 2 del metro de la Ciudad de México frente al Palacio Nacional. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de la imagen satelital de Google Maps).

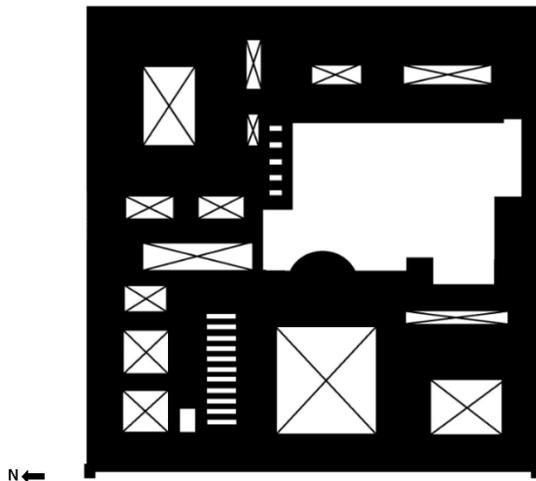


Figura 73. Planta aproximada del Palacio Nacional en 1970. (CNMH, INAH, 1996).



Figura 74. Vista aérea del Zocalo de la Ciudad De México en 1968. (www.mexicomaxico.org).

1971

Se emprendieron trabajos de recimentación y reconstrucción de las fachadas principal, sur y norte. En el patio central y sus corredores se realizaron obras para consolidar sus estructuras. También se instalaron, en la azotea entre el patio central y el de presidencia, una serie de ménsulas que permitieron detener la fachada principal en esta zona ya que estaba girando hacia fuera, generado por la construcción de la estación del metro Zócalo.

1972

Se reconstruyó el antiguo Recinto Legislativo.



Figura 75. Recinto parlamentario. (<http://enmexico.about.com/od/Actividades/ss/Tesoros-del-Palacio-Nacional.htm>).

#### 1973-1974

Se realizan exploraciones arqueológicas, entre los descubrimientos más importantes se encuentra lo realizado en el Patio de Honor en la que al ser retirados los aplanados de los muros norte y oriente se encontró que, están formados por sistemas constructivos que podrían datar del siglo XVI, con sillares rectangulares labrados en basalto gris oscuro de procedencia prehispánica. Otros muros se encontraron formados por restos de dovelas, fustes, capiteles procedentes del viejo edificio, que fueron reutilizados en el s. XVIII.

La preocupación debida por las obras realizadas arbitrariamente, nace el interés oficial por la conservación de los testimonios del pasado.

Se realizaron trabajos de recimentación del torreón y crujía norte de los Patios Marianos afectados por graves hundimientos diferenciales.

9 de febrero de 1981

El Palacio es Declarado Monumento.

1991

Se inicia una intervención importante en el Palacio Nacional que consiste en la recimentación, restructuración y restauración, con el propósito de contrarrestar el hundimiento diferencial del área norponiente, que incluía las oficinas de la Secretaría de Hacienda, los Patios Marianos, el recinto de la Ex Tesorería, la banqueta de Moneda y el de la Plaza de la Constitución.

15 de Julio de 1994

Se considera Propiedad federal.

Diciembre de 1995

La zona denominada de la Ex – Defensa es demolida sin autorización.

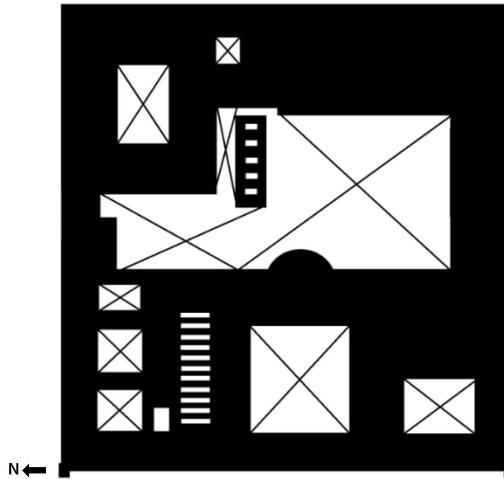


Figura 76. Planta aproximada del Palacio Nacional en 1995. (Imagen realizada por la autora a partir de la información recabada y de los planos de la funete bibliografica: CNMH, INAH,1996).

2005

Terminan obras de recimentación en el Palacio.

2010

En el área de Presidencia, sobre el Patio de Honor se construyó un techo movible, el proyecto fue realizado por el Arquitecto Pedro de la Peza de la Empresa CANSOL.

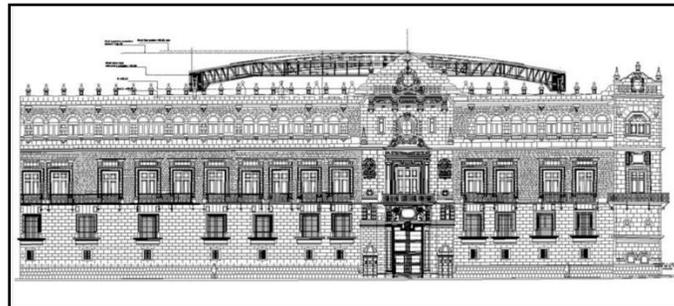
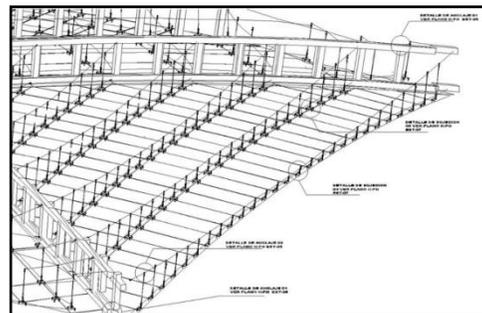
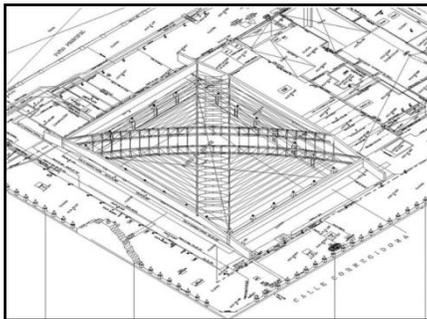


Figura 77. Cubierta del Patio de Honor del Palacio Nacional, 2010. (www.cansol.com.mx/proyectos/ejecutivos/cphpn.html).



*Figura 78. Perspectiva de la cubierta del Patio de Honor del Palacio Nacional, 2010.*  
([www.cansol.com.mx/proyectos/ejecutivos/cphpn.htm](http://www.cansol.com.mx/proyectos/ejecutivos/cphpn.htm)).

*Figura 79. Detalles de la cubierta del Patio de Honor del Palacio Nacional, 2010.*  
([www.cansol.com.mx/proyectos/ejecutivos/cphpn.htm](http://www.cansol.com.mx/proyectos/ejecutivos/cphpn.htm)).

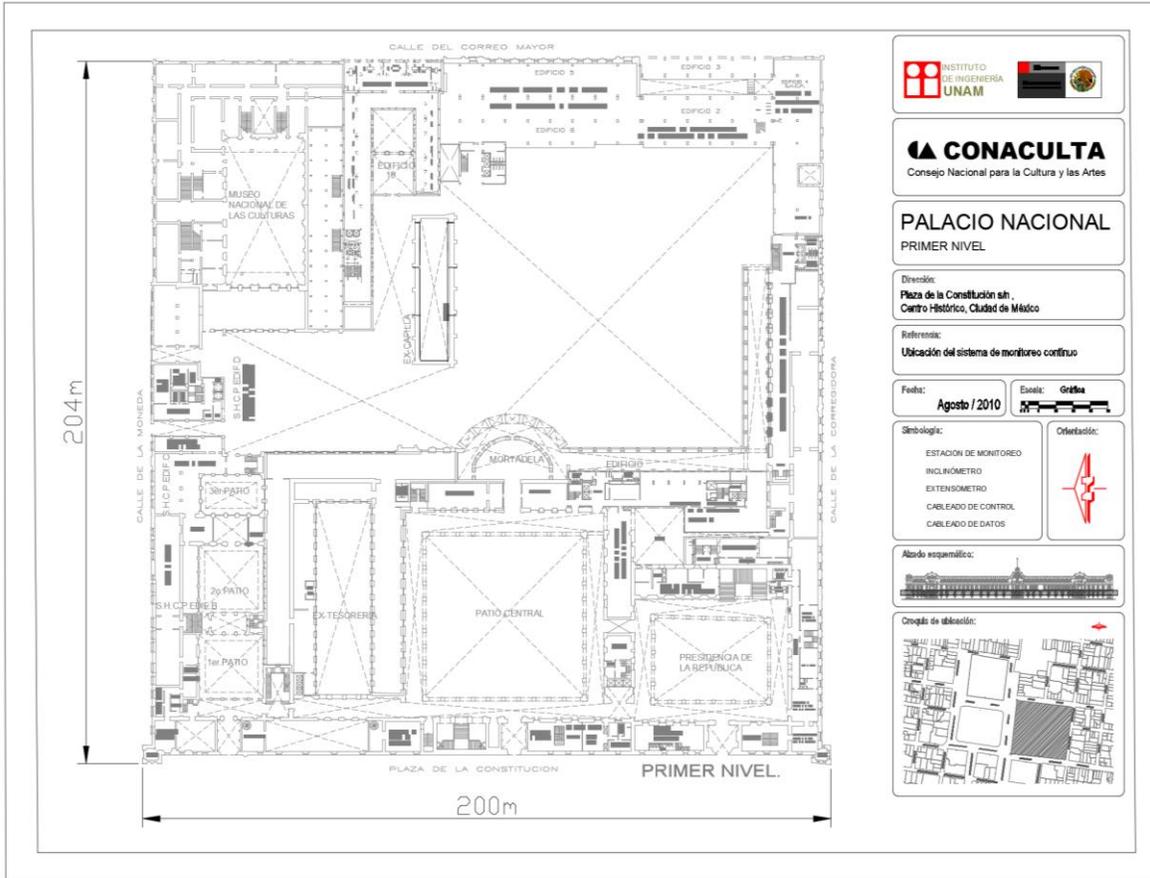
2010-2016

Actualmente se siguen realizando trabajos de mantenimiento en el Palacio Nacional, organizados por la Conservaduría del Palacio Nacional.

## 2.4 Aspectos Arquitectónicos

El Palacio Nacional se encuentra construido sobre un área de 40 mil metros cuadrados, en una planta cuadrangular de 200 metros por lado. El edificio es utilizado como oficinas y museo, cuenta con planta baja y 3 niveles. Los salones y pasillos están distribuidos alrededor de varios patios, entre ellos: el Patio de Honor, en la zona de Presidencia, el Patio Central, 3 Patios Marianos en la zona de Hacienda, también cuenta con un jardín conocido como Jardín de la Emperatriz.

A continuación, se presentan los planos empleados en la elaboración del modelo, los cuales fueron proporcionados al Instituto de Ingeniería por la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural (DGSMPC), de la Secretaría de Cultura y por la Conservaduría del Palacio Nacional.






**CONACULTA**  
Consejo Nacional para la Cultura y las Artes

**PALACIO NACIONAL**  
PRIMER NIVEL

Dirección:  
 Plaza de la Constitución s/n  
 Centro Histórico, Ciudad de México

Referencia:  
 Ubicación del sistema de monitoreo continuo

Fecha: **Agosto / 2010**

Estado: **Gréfilis**

Simbología:  
 ESTACION DE MONITOREO  
 INCLINÓMETRO  
 EXTENSÓMETRO  
 CABLEADO DE CONTROL  
 CABLEADO DE DATOS

Orientación:  


Alzado esquemático:  

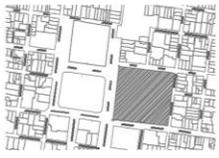

Contexto de ubicación:  


Figura 80. Planta del primer piso del Palacio Nacional. (DGSMPC).

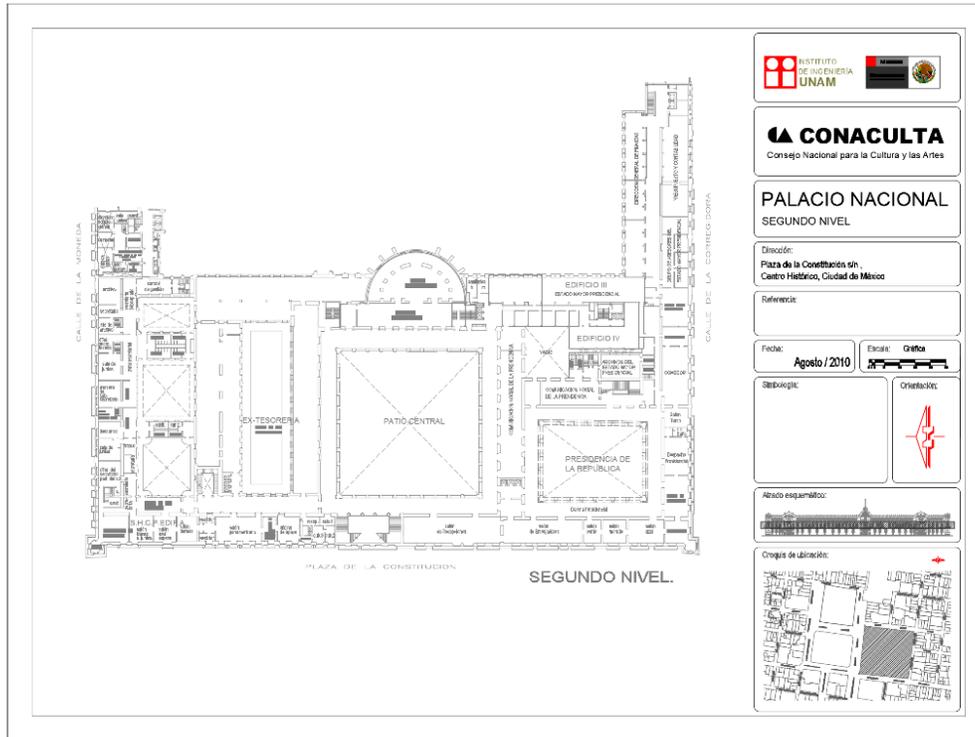


Figura 81. Planta del segundo piso del Palacio Nacional. (DGSMPC).

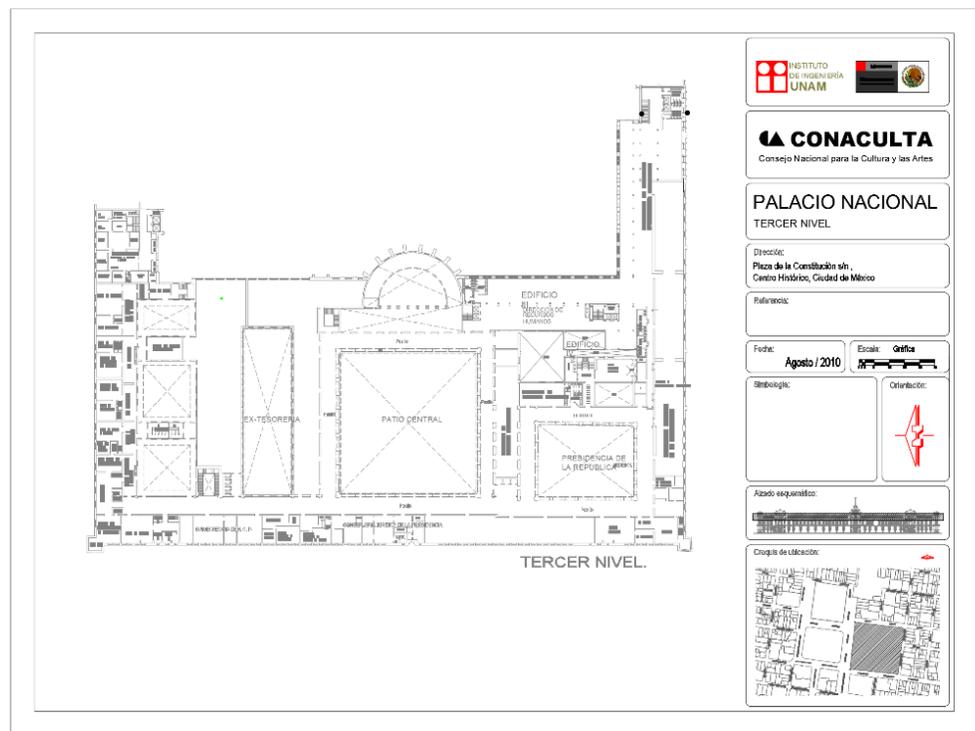


Figura 82. Planta del tercer piso del Palacio Nacional. (DGSMPC).

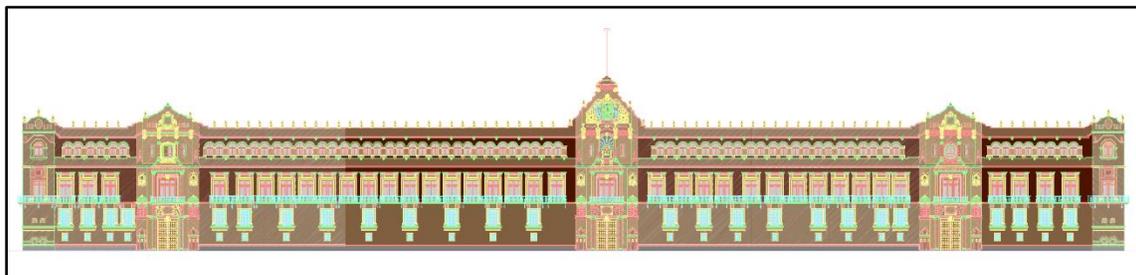


Figura 83. Fachada principal del Palacio Nacional. (DGSMPC)

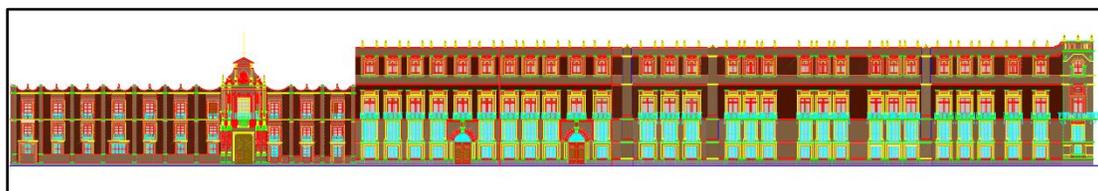


Figura 84. Fachada del Palacio Nacional que da a la Calle de Moneda. (DGSMPC).



Figura 85. Fachada que da al Jardín de la Emperatriz. (Plano obtenido por la autora a partir de tres planos proporcionados por la Conservaduría del Palacio Nacional).

## 2.5 Aspectos Estructurales

Es necesario tener presente que las etapas y los métodos constructivos en Palacio Nacional han variado a través del tiempo, por lo que se debe recordar dos cosas, una, que la mayor parte del edificio fue reconstruido a principios del siglo XVIII, y otra, el tercer piso fue construido a principios del siglo XX, al finalizar la Revolución Mexicana, por lo que no se cuentan con planos estructurales del Palacio, por lo que aquí se pretende describir, de forma muy general, los principales elementos estructurales presentes en el edificio, así como, los materiales del que están constituidos y sus dimensiones aproximadas.

Como se ha visto, el Palacio Nacional está conformado por varios patios alrededor de los cuales se fueron construyendo varios edificios interconectados, los cuales están conformados por los siguientes elementos estructurales:

- La gran mayoría de los muros principales en planta baja, primer y segundo pisos, son muros de mampostería de tezontle, que varían alrededor de un metro de ancho. Se ha detectado un muro de mampostería de ladrillo rojo recocido, el cual se encuentra junto a la mortadela en el edificio XII, frente al Jardín de la Emperatriz, (edificio que no es parte del presente análisis).
- En el último piso se tiene el conocimiento de que está construido a base de una estructura de acero, sin embargo, no se sabe con precisión como está conformada la estructura, tampoco se sabe de qué están formados los muros, los cuales tienen una anchura menor a los muros de los pisos inferiores, siendo de 0.6m los muros exteriores, mientras los interiores son de 0.4m.
- Las columnas y los arcos son de cantera labrada. Las columnas tienen una sección cuadrada, alrededor de 90cm por lado, mientras los arcos están constituidos por dovelas.
- Los muros divisorios han ido cambiando constantemente, al hacer adecuaciones, por lo que algunos son muros de mampostería de ladrillo y otros muros de tablaroca.
- Así mismo, las losas han sufrido varios cambios, actualmente la mayoría son de losacero, cuyas características pueden variar de una zona a otra, ya que las reparaciones realizadas no se han llevado a cabo de forma simultánea.
- Las jambas y platabandas de los vanos, están constituidos por cantera labrada.

## 2.6 Aspectos Geotécnicos

Para los fines de este trabajo es necesario recurrir a los antecedentes geotécnicos, ya que el buen comportamiento estructural de un edificio, depende tanto de las características de los elementos que lo componen como de las características del subsuelo.

Con los avances tecnológicos y científicos se han desarrollado varios métodos de análisis del subsuelo, lo que permite conocer sus características y poder estudiar su comportamiento ante la presencia de ciertas acciones. Gracias a ello, fue posible obtener la siguiente información, necesaria para nuestro estudio.

### 2.6.1 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México.

En primer lugar, recurrimos al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2004. De acuerdo al Reglamento, el Distrito Federal se divide en 3 zonas: Zona I- Lomas, Zona II- Transición y Zona III- Lacustre. El Palacio Nacional se ubica en la Zona III, la cual es descrita en el artículo 170 del Reglamento de la siguiente forma: *“Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50m.”*

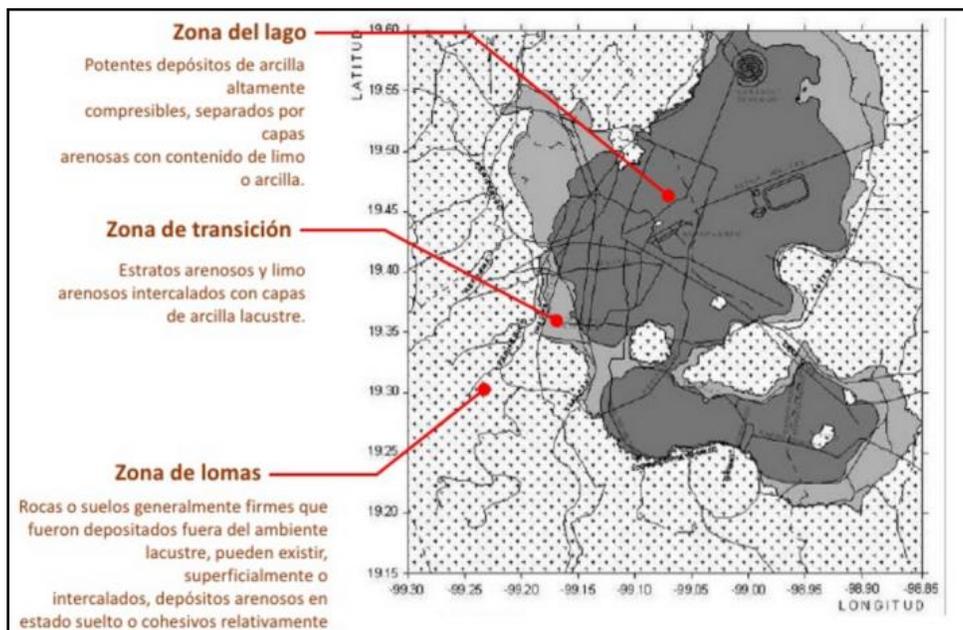


Figura 86. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México de acuerdo al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2004. (Imagen tomada de <https://es.slideshare.net>, Rodríguez Rebolledo, 2011).

### 2.6.2 Hundimientos diferenciales.

Como siguiente punto a considerar, son los hundimientos diferenciales. A continuación, se explica de forma breve este fenómeno que afecta no solo al Palacio Nacional, sino también, a varios edificios ubicados en el Centro de la Ciudad de México.

El Palacio Nacional está ubicado sobre parte de lo que fue el recinto ceremonial de los Aztecas, por tal motivo debajo del Palacio, se encuentran los restos de varios edificios prehispánicos, los cuales, con características muy diferentes como su antigüedad, el tamaño y sus etapas constructivas, indujeron esfuerzos de preconsolidación variables en las arcillas blandas subyacentes, en consecuencia, desde el inicio de la construcción de los edificios en el predio donde actualmente se encuentra el Palacio Nacional, en el siglo XVI, las diferencias en la compresibilidad del suelo contribuyeron al desarrollo de asentamientos diferenciales, es así como, durante el proceso evolutivo de la construcción, se fueron transmitiendo cargas al subsuelo que se sumaron al de los restos de las pirámides provocando, en esas zonas previamente consolidadas, una mayor consolidación y por ende, una disminución en la velocidad de asentamiento, con respecto a su entorno.

La existencia de zonas precargadas indujo hundimientos diferenciales, los cuales continuaron manifestándose hasta que, a finales del siglo XIX, se añadió el del hundimiento regional de la ciudad provocado por la extracción de agua de los mantos profundos, lo cual, incrementó los asentamientos.

De acuerdo con *Tamez y Santoyo, 1995*, en el desarrollo de los movimientos diferenciales deben distinguirse dos etapas:

- Consolidación bajo el peso propio.  
Es aquel en el que ocurre el proceso de consolidación de las arcillas bajo los esfuerzos inducidos por el peso de la estructura que, al actuar sobre suelos desigualmente compresibles, producen asentamientos diferenciales mayores que los que pudieran presentarse en un suelo razonablemente homogéneo.
- Hundimiento regional.  
Esta etapa de asentamientos se presenta debido al hundimiento regional asociado a la pérdida de presión en el agua de los estratos permeables que subyacen a los depósitos de arcilla compresible.

Es un fenómeno que en la Ciudad de México ha generado un notable descenso de la superficie, provocado por el intenso bombeo profundo para abastecer de agua a la población, a este hundimiento contribuyen tanto los depósitos arcillosos superiores como los suelos conocidos como Depósitos Profundos.

La siguiente figura (figura 87) muestra el asentamiento regional de la referencia TICA de la Catedral (*Santoyo y Ovando, 2008*), así como el crecimiento de la población en la Ciudad de México entre los años 1900 y 2015. Al comparar ambas gráficas, queda claro que, al ir aumentando la población, se requirieron más pozos profundos para el abastecimiento de la población, lo que ha ocasionado el hundimiento paulatino de la Ciudad. En cuanto al asentamiento regional, se puede observar en la figura 87 que, entre 1965 y 1990 el hundimiento es casi lineal, con una velocidad promedio de 7.1 cm/año, de 1991 al 2000 aumentó a 10 cm/año, para el 2006 y el 2007 se midieron 7.5 y 6.1 cm/año, respectivamente. A través de los años se han realizado acciones, para disminuir la explotación de acuífero, especialmente en la zona centro de la Ciudad, sin embargo, se siguen observando los efectos o consecuencias de la extracción del agua del subsuelo.

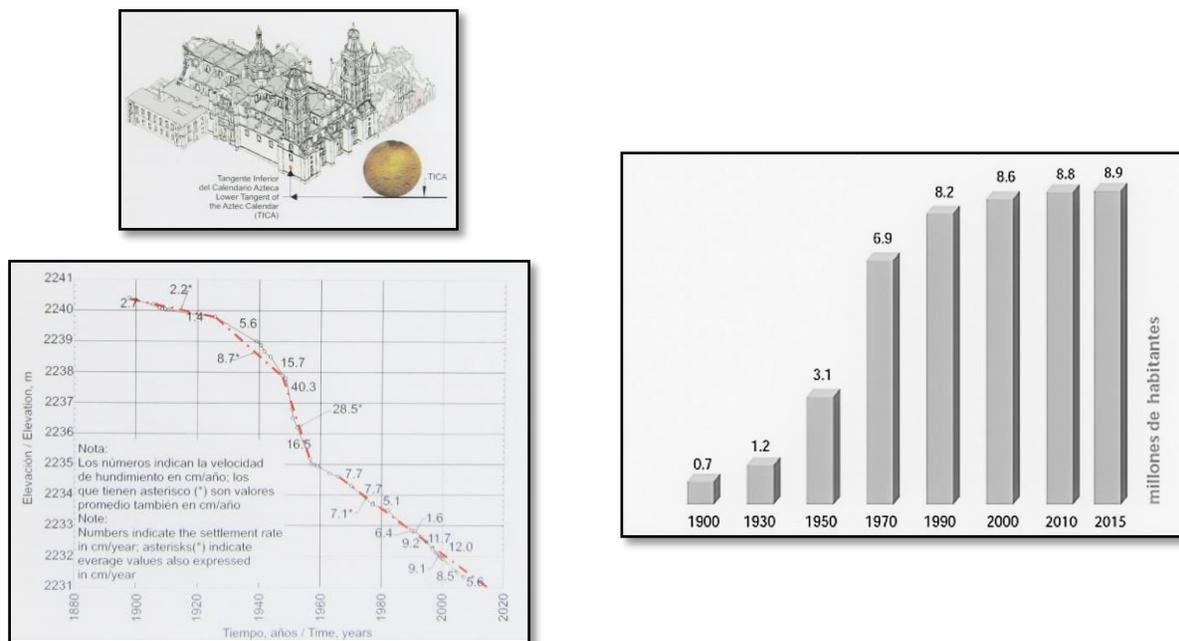


Figura 87. Asentamiento regional de la referencia TICA de la Catedral. (*Santoyo y Ovando, 2008*). Población total de la Ciudad de México, de 1900 a 2015, (INEGI).

Los siguientes párrafos obtenidos de *Santoyo y Ovando, 2008*, explican con mayor claridad este fenómeno.

*“El fenómeno del hundimiento regional que daña a la ciudad de México se explica de la siguiente manera: el bombeo produce una disminución de la presión de agua dentro del acuífero, el cual tiene dos grandes características: a) está constituido por materiales muy permeables como arenas, limos arenosos o gravas, y b) está confinado por arcillas de muy baja permeabilidad. Al disminuir la presión del agua en el acuífero, también ocurre una disminución gradual de la presión del agua que se encuentra en los poros o intersticios estructurales de los materiales arcillosos. Dependiendo del espesor y de la permeabilidad de la arcilla, un cambio súbito en la presión del agua en el acuífero produce cambios diferidos en la presión del agua de los poros de los materiales poco permeables que pueden tardar incluso décadas en alcanzar un nuevo estado de equilibrio. Junto con esta alteración, se establece un flujo lento descendente de agua, desde la arcilla hasta el acuífero.*

*Cuando las arcillas están saturadas, como ocurre con buena aproximación para el caso de la ciudad de México, el volumen de agua que expulsan es proporcional al hundimiento que manifiesta la superficie. Los cambios de presión que experimenta el agua de los poros de la arcilla incrementan los esfuerzos que actúan efectivamente sobre la fase sólida del suelo. De ahí que ocurra la compresión de ésta y por ello el proceso de bombeo equivale a sobrecargar efectivamente al suelo, como respuesta a la disminución de las presiones del poro. El fenómeno de deformación vertical tiene dos componentes que se desarrollan simultáneamente: a) la consolidación primaria o salida del agua intersticial, la cual predomina por algunos años, y b) la deformación secundaria, que actúa durante muchas décadas.”*

La siguiente figura, obtenida de *Rodríguez Rebolledo, 2011*, muestra gráficamente el fenómeno del hundimiento regional.

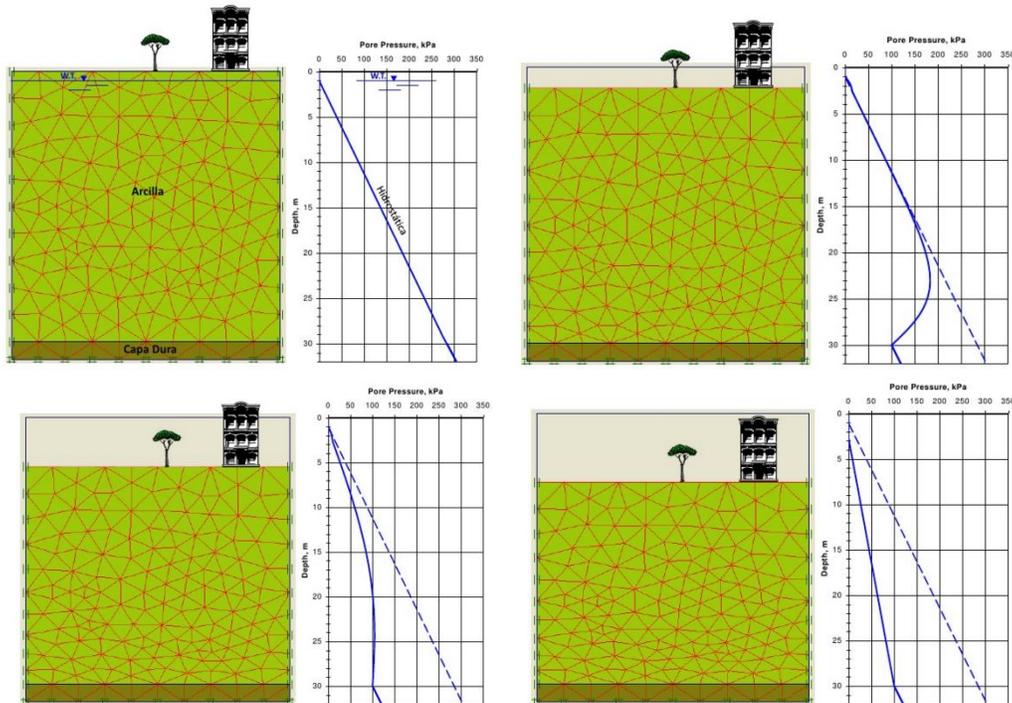


Figura 88. Debido al bombeo profundo del agua, la presión en los poros disminuye, ocasionando el reacomodo de las partículas, la consolidación del suelo y el hundimiento regional. (Imagen tomada de <https://es.slideshare.net>, Rodríguez Rebolledo, 2011).

### 2.6.3 Evaluación Geotécnica.

En el año 2007, ante la presencia de daños estructurales en el Palacio provocado por los hundimientos diferenciales, se realizó una evaluación geotécnica, (TGC, *Geotecnia S.A de C.V.*, 2007). A continuación, se presenta algunos resultados de dicho estudio.

#### ➤ Nivelación topográfica

Se instalaron una serie de puntos topográficos para precisar la velocidad de asentamiento que presentan todas las estructuras que constituyen el Palacio Nacional. La elevación de los puntos está referida al banco de nivel profundo BNP-100 instalado en la Catedral Metropolitana. El resultado se puede observar en la figura 89, la cual muestra las curvas de igual hundimiento para el periodo del 2 de marzo de 2002 al 18 de diciembre de 2007, como se puede observar existen 2 zonas con menor hundimiento, que corresponden a la esquina surponiente de la Capilla de la Emperatriz y la zona del Segundo Patio Mariano. Se concluyó que la tendencia general de asentamiento del Palacio Nacional ocasionado por el hundimiento regional es, presentar un menor hundimiento prácticamente al centro del área que ocupa y mayor deformación hacía sus cuatro esquinas. La esquina que menos se ha hundido corresponde a la que forman la calle de Moneda y Plaza de la Constitución. La tabla 1, muestra el hundimiento que han sufrido las cuatro esquinas del edificio en el periodo de cinco años y nueve meses.

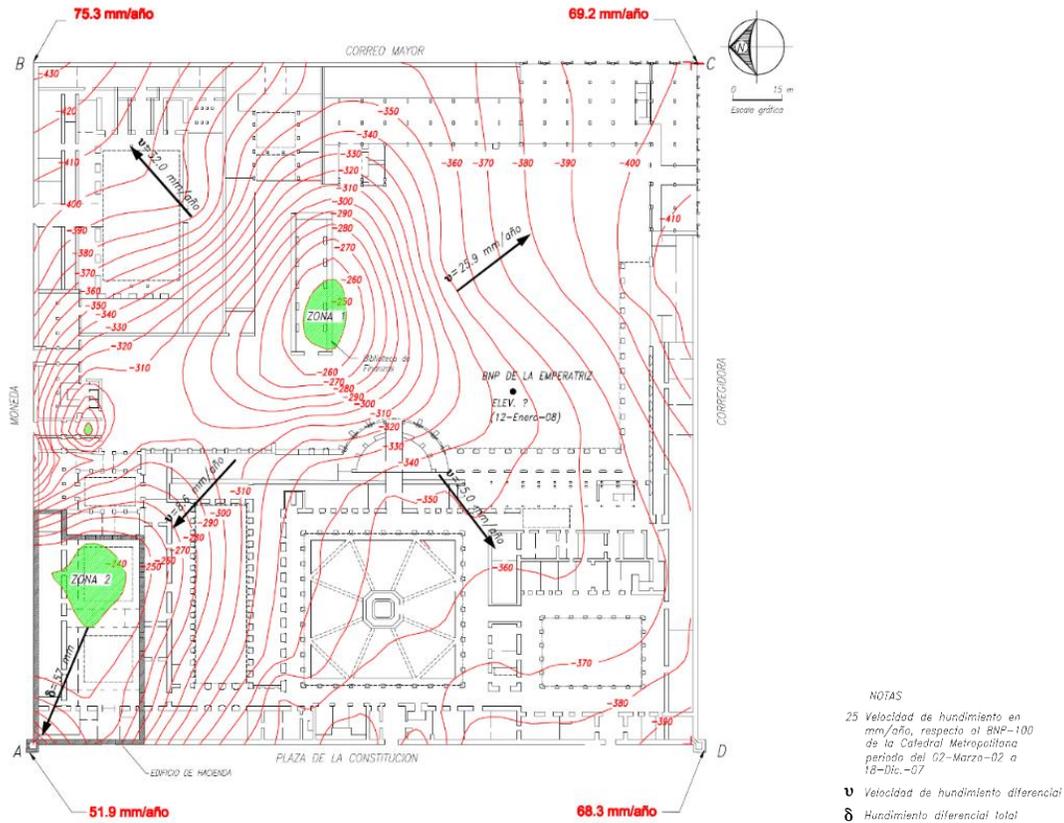


Figura 89. Curvas de igual asentamiento en mm, del periodo de 2-03-2002 al 18-12-2007 respecto al BNP- 100 de la Catedral Medtropolitana. (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007).

<b>Tabla 1. Hundimiento de las cuatro esquinas. (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007).</b>			
Esquina	Ubicación	Hundimiento	Velocidad de hundimiento
		mm	mm/año
A	Plaza de la Constitución y Moneda	300	51.9
B	Moneda y Correo Mayor	430	75.3
C	Correo Mayor y Corregidora	402	69.2
D	Plaza de la Constitución y Corregidora	395	68.3

➤ Perfil topográfico de la banqueta

En el estudio realizado, se obtuvieron los niveles topográficos de las banquetas. En seguida, se muestran los perfiles topográficos de nuestro interés.

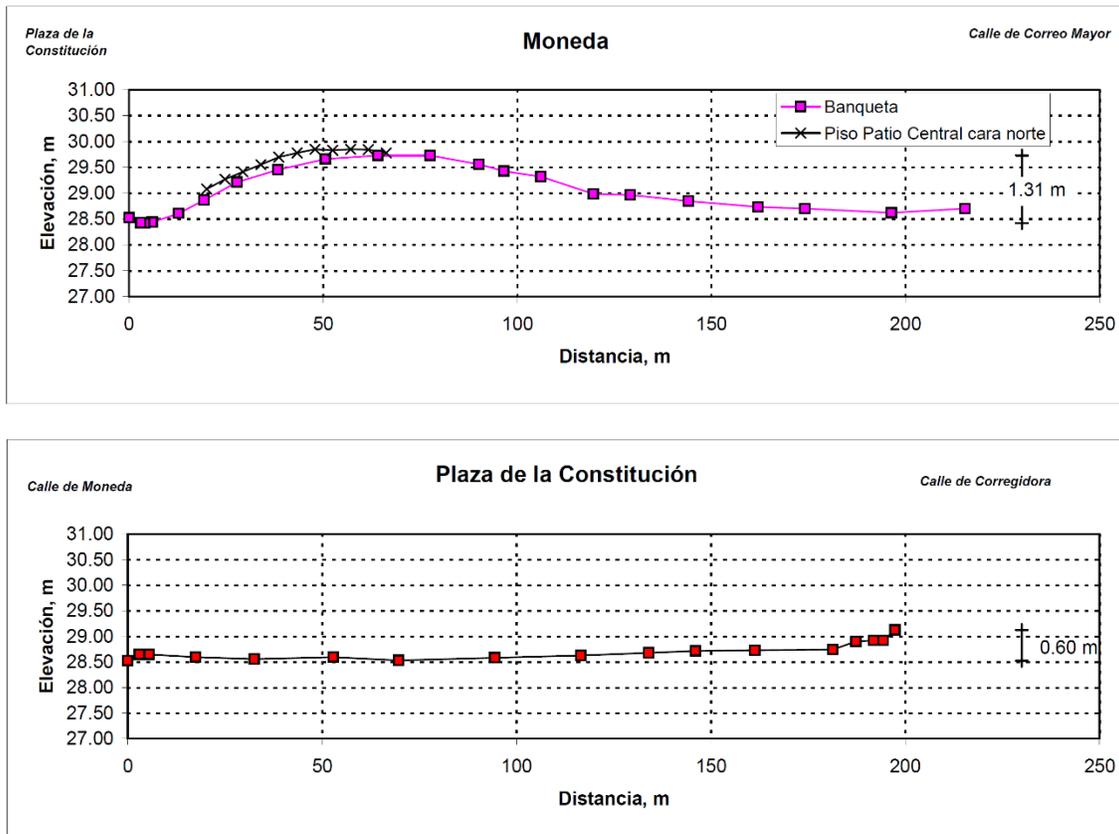


Figura 90. Perfiles topográficos de la banquetas perimetrales a Palacio Nacional, diciembre 2007. (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007).

En estos perfiles se observa que, sobre la calle de Moneda existe una protuberancia en su mitad poniente, el cual corresponde con la presencia del Basamento D, estructura prehispánica descrita en los Antecedentes Arqueológicos, por otra parte, el diferencial máximo entre la cima y la esquina con Correo Mayor es de 1.31m.

➤ Sondeos de muestreo

En la evaluación geotécnica se realizaron los siguientes análisis cuya ubicación se muestran en la figura 91:

- Seis sondeos de cono eléctrico, el cual es un dispositivo que se hinca dentro del terreno con una velocidad de penetración constante. Arriba de su punta cónica se coloca una celda electrónica con la que se mide la resistencia del suelo a la penetración de la punta. Esta oposición depende de dos factores: la resistencia del

suelo al esfuerzo cortante y la compresibilidad del suelo. La resistencia medida con el cono eléctrico se correlaciona con ambos parámetros. (*Santoyo, Ovando 2008*)

- Se obtuvieron muestras inalteradas de los estratos representativos en dos sondeos.
- Para definir las condiciones de la presión de agua del subsuelo se realizaron dos sondeos con piezocono, tomando lecturas de presión del agua a diferentes profundidades.
- Se instalaron dos estaciones piezométricas con objeto de conocer la evolución de la presión del agua contenida en los poros del suelo.
- Se instalaron tres bancos de nivel profundo a 37.27m, 60.0 m y 100.37m de profundidad.

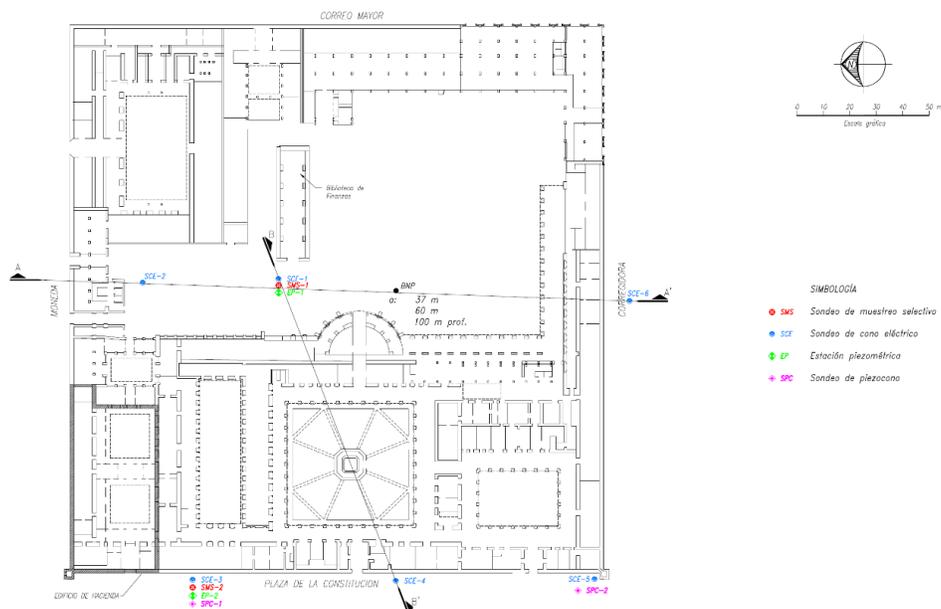


Figura 91. Ubicación de sondeos y cortes estratigráficos. (TGC, Geotecnia S.A de C.V., 2007).

➤ Estratigrafía del sitio.

Los sondeos de cono eléctrico realizados permitieron elaborar cortes estratigráficos que se muestran a continuación, donde se pueden observar los espesores y las profundidades de los estratos más significativos de la secuencia de suelos del sitio.

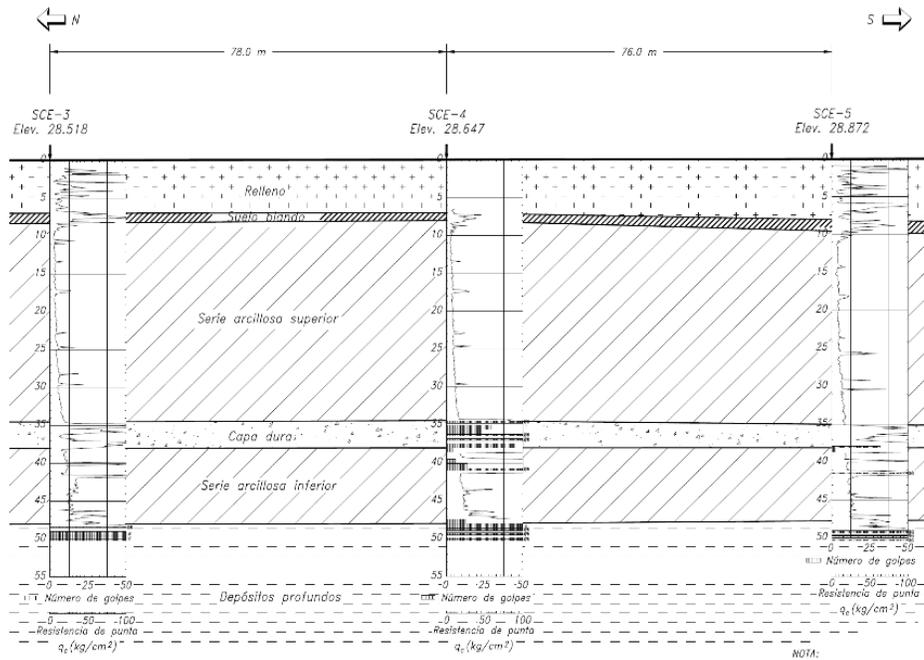


Figura 92. Corte estratigráfico A-A'. (TGC, Geotecnia S.A de C.V., 2007).

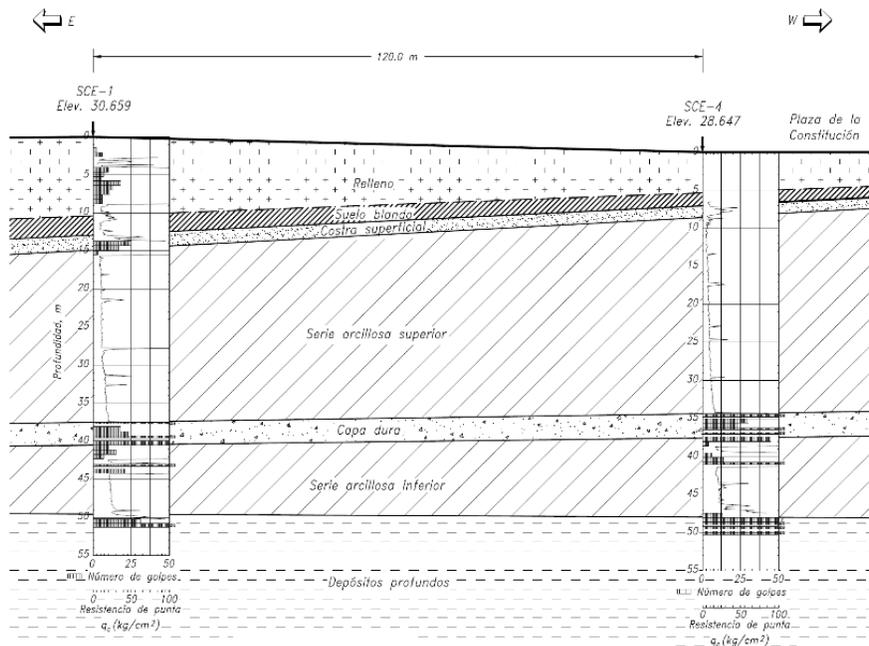


Figura 93. Corte estratigráfico B-B'. (TGC, Geotecnia S.A de C.V., 2007).

➤ Ensayes de laboratorio.

Los resultados de los ensayos triaxiales y de consolidación realizados se resumen en las tablas 2 y 3, la nomenclatura es la siguiente.

Nomenclatura:			
Prof	Profundidad de la muestra en metros	$e_0$	Relación de vacíos inicial
SUCS	Clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	$\omega$	Contenido natural de agua
$\sigma_c$	Esfuerzo crítico (carga de preconsolidación)	$\gamma$	Peso volumétrico natural
$\sigma_0$	Esfuerzo vertical efectivo en el sitio	$S_s$	Densidad de sólidos
OCR	Relación de preconsolidación ( $\sigma/\sigma_0$ )	$G_w$	Grado de saturación
$c$	Cohesión en condiciones no drenadas	$E$	Módulo de Young equivalente

Tabla 2. Resultados de ensayos triaxiales UU. (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007).								
Sondeo	Prof m	SUCS	$\omega$ %	$e_0$	$G_w$ %	$\gamma$ t/m <sup>3</sup>	$c$ kg/cm <sup>2</sup>	$E$ kg/cm <sup>2</sup>
SMS-1	16.7	MH	246	5.54	98	1.17	1.38	137
	24.8	MH	127	2.84	100	1.31	1.41	157
	29.8	MH	231	5.08	100	1.21	1.16	179
	34.8	MH	196	4.23	100	1.24	2.05	182
	46.7	MH	150	3.33	100	1.31	2.67	313
SMS-2	13.0	CH	245	5.34	100	1.21	0.49	35
	15.3	CH	231	4.79	100	1.22	0.87	52
	20.3	CH	306	6.4	100	1.17	0.58	74
	26.3	CH	258	5.55	100	1.19	0.92	92
	31.8	CH	208	4.39	100	1.24	1.75	107
	35.3	CH	158	3.15	100	1.32	0.4	50
	39.16	CH	165	3.77	100	1.27	1.68	130
42.8	CH	140	3.19	100	1.32	2.05	115	

Tabla 3. Resultados de ensayos de consolidación . (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007).									
Sondeo	Prof m	SUCS	$\omega$ %	$\gamma$ t/m <sup>3</sup>	$S_s$	$e_0$	$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_0$ kg/cm <sup>2</sup>	OCR
SMS-1	16.7	MH	205	1.21	2.21	4.56	2.3	1.75	1.31
	24.8	MH	139	1.3	2.22	3.09	2.9	2.1	1.38
	29.8	MH	124	1.27	2.37	3.17	3.1	2.53	1.22
	34.8	MH	198	1.17	2.22	4.63	3.7	3.4	1.1
	46.7	MH	135	1.29	2.27	3.13	----	----	----
SMS-2	13.0	CH	302	1.13	2.22	6.86	1.0	1.0	1.0
	15.3	CH	260	1.17	2.14	5.58	1.25	1.24	1.0
	20.3	CH	332	1.14	2.13	7.09	1.7	1.41	1.2
	26.3	CH	258	1.18	2.16	5.56	2.2	1.83	1.2
	31.8	CH	230	1.19	2.18	5.02	2.7	2.75	1.0
	35.3	CH	217	1.2	2.14	4.65	0.9	3.4	----
	39.15	CH	128	1.32	2.3	2.97	4.0	3.6	1.1
	42.8	CH	138	1.32	2.32	3.2	4.0	4.0	1.0
	46.1	CH	154	1.28	2.24	3.47	3.2	----	----

## ➤ Desplomes

Los daños que presenta el Palacio Nacional están en función de los asentamientos diferenciales, presentándose un menor hundimiento al centro, mientras las esquinas, muestran una mayor deformación, lo que ha ocasionado desplomes en muros y columnas, la empresa GTC, Geotecnia S.A. de C.V. obtuvo los desplomes en el año 2007, los cuales se muestran a continuación, en la figura 94.

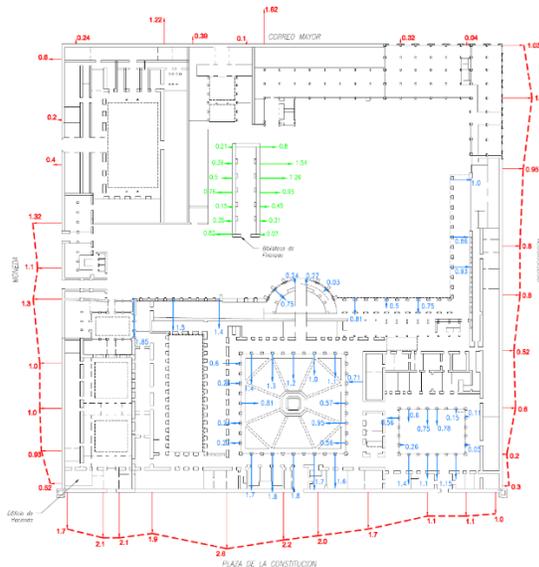


Figura 94. Desplome de fachadas. 22 de diciembre de 2007. Los desplomes están indicados en porcentaje. (TGC, Geotecnia S.A de C.V., 2007).

La figura 94 muestra que la fachada principal presenta una inclinación hacia el poniente que varía entre 1.0% y 2.6 % en una altura de 17 metros, presentándose los valores más grandes hacia la mitad norte de la misma. Mientras la fachada norte, sobre la calle de Moneda, con una altura de 17 metros, muestra una inclinación en dirección norte que varía entre 0.52% al 1.32%, la fachada sur, sobre la calle de Corregidora se encuentra inclinada hacia el sur, con una inclinación que varía entre 0.2% y 1.4% en una altura de 17 metros, por último, la fachada oriente de 12.25 metros, sobre la calle de Correo Mayor no se aprecia un patrón definido.

Queda claro que todos los muros de las fachadas se encuentran inclinados hacia el exterior, lo que coincide con el patrón de hundimiento, mencionado anteriormente.

### 2.6.4 Cimentaciones y obras de rehabilitación realizados en el subsuelo.

Desde el inicio de su construcción el Palacio Nacional, ha sido objeto de varias intervenciones para disminuir la velocidad de los asentamientos.

En 1693 al iniciarse las obras de reconstrucción se construyeron nuevos cimientos, se ahondaron sus zanjas y se puso un nuevo estacado de madera.

Para 1926, época en que se construyó el tercer piso del Palacio Nacional, se realizaron algunas excavaciones y perforaciones en los cimientos del edificio, para asegurar la estructura metálica que soportaría el piso que se iba a agregar. (Castro, 2003)

A finales de la década de los sesentas, el ingeniero Gabriel Moreno Pecero, propuso un método de tratamiento del subsuelo, que consistía en restituir paulatinamente el contenido de agua a la masa del suelo, con la finalidad de disminuir las presiones efectivas que el suelo soporta, y así, reducir la velocidad de hundimiento. Por lo que, se decidió realizar una primera etapa de prueba, que consistió en la inyección de agua durante 30 días, la cual funcionó al principio, sin embargo, fue suspendida su aplicación, ya que los volúmenes de agua que se requerían fueron más difíciles de satisfacer. Este método solo trataba de solucionar el problema de la presión localmente pero el problema del asentamiento es regional, teniéndose que buscar soluciones desde ese punto de vista.

Entre 1993 y 2005 el área noroeste del Palacio Nacional fue recimentada con 212 pilotes apoyados en la capa dura comprendida entre los 36.3 y 38.3 metros, con una longitud efectiva del orden de los 34 metros. Los pilotes están provistos de una funda metálica antifriccionante, que evita la transmisión de fricción negativa a la punta del pilote, por ello soportan por punta el peso total de la estructura. Estos pilotes de punta forman parejas en un arreglo conocido como mancuerna, además cada uno de ellos cuenta con un puente de reacción, que además de transmitir la carga del edificio al pilote permite controlar los asentamientos diferenciales que se puedan presentar. (Terrones, 2001).

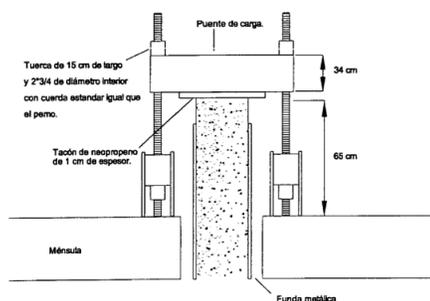


Figura 95. Esquema de un pilote. (Terrones, 2001).

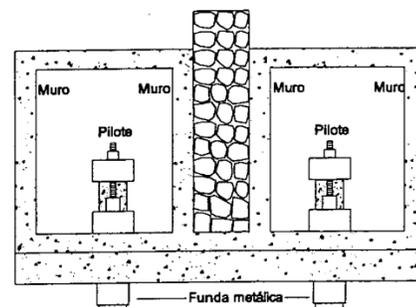


Figura 96. Disposición de los pilotes. (Terrones, 2001).

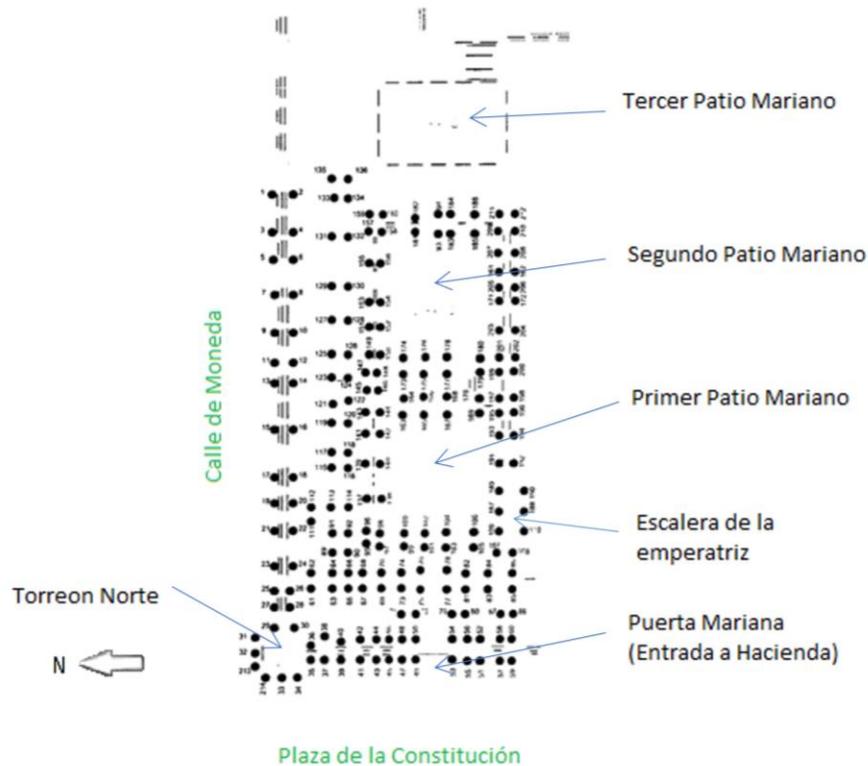


Figura 97. Localización de los pilotes de control instalados en el Palacio Nacional. (Terrones, 2001).

## 2.7 Sistema de Monitoreo Continuo

La palabra monitoreo proviene de monitor y monitorear, que en el diccionario se definen como sigue:

*“Monitor: Aparato, generalmente electrónico, que facilita datos para el control de un proceso. Receptor de televisión usado para controlar la imagen de emisión.”*

*“Monitorear: Supervisar y controlar el desarrollo de una acción o un suceso a través de uno o varios monitores. Instalar monitores en un lugar para someterlo a vigilancia.”*

De aquí se deduce que un sistema de monitoreo tiene la finalidad de observar, supervisar y registrar el curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías.

El Sistema de Monitoreo Continuo en el Palacio Nacional tiene el objetivo de medir los movimientos angulares y los desplazamientos lineales de algunos elementos estructurales, por medio de sensores, los cuales captan la información y la transmiten a una Estación de Monitoreo en el que es almacenada para, posteriormente ser transferida a la Central de Monitoreo, donde un programa realizado por el Instituto de Ingeniería

guarda los datos y los procesa, dando como resultado gráficas de cada uno de los sensores.

Los tipos de sensores empleados en el Sistema de Monitoreo Continuo del Palacio Nacional son los siguientes:

- Extensómetros: tienen como fin determinar un desplazamiento lineal entre dos elementos estructurales. El desplazamiento se manifiesta como abertura o acortamiento. Rango de medición de  $\pm 6.00\text{mm}$ .
- Inclinómetros: Sirven para medir cambios de inclinación. Miden el movimiento angular en dos sentidos Norte-Sur y Este-Oeste. Rango angular  $\pm 3^\circ$ . Cuentan con un sensor de temperatura.

## 2.8 Daños actuales.

Es importante considerar los daños que ha sufrido el Palacio Nacional, para conocer y comprender su comportamiento, el cual, como se ha mencionado, está en función de las condiciones del subsuelo, ya que, la ubicación y magnitud de los daños depende de los esfuerzos que se presentan en los elementos estructurales al ser sometidos a fuerzas ocasionadas por los hundimientos diferenciales.

A continuación, se muestran algunos de los daños presentes en el Palacio Nacional, es necesario mencionar que no fue posible localizar todos los daños, ya que, en el interior del inmueble, algunos de los salones, están completamente decorados con plafón o madera, lo que impide la debida inspección de los elementos estructurales.

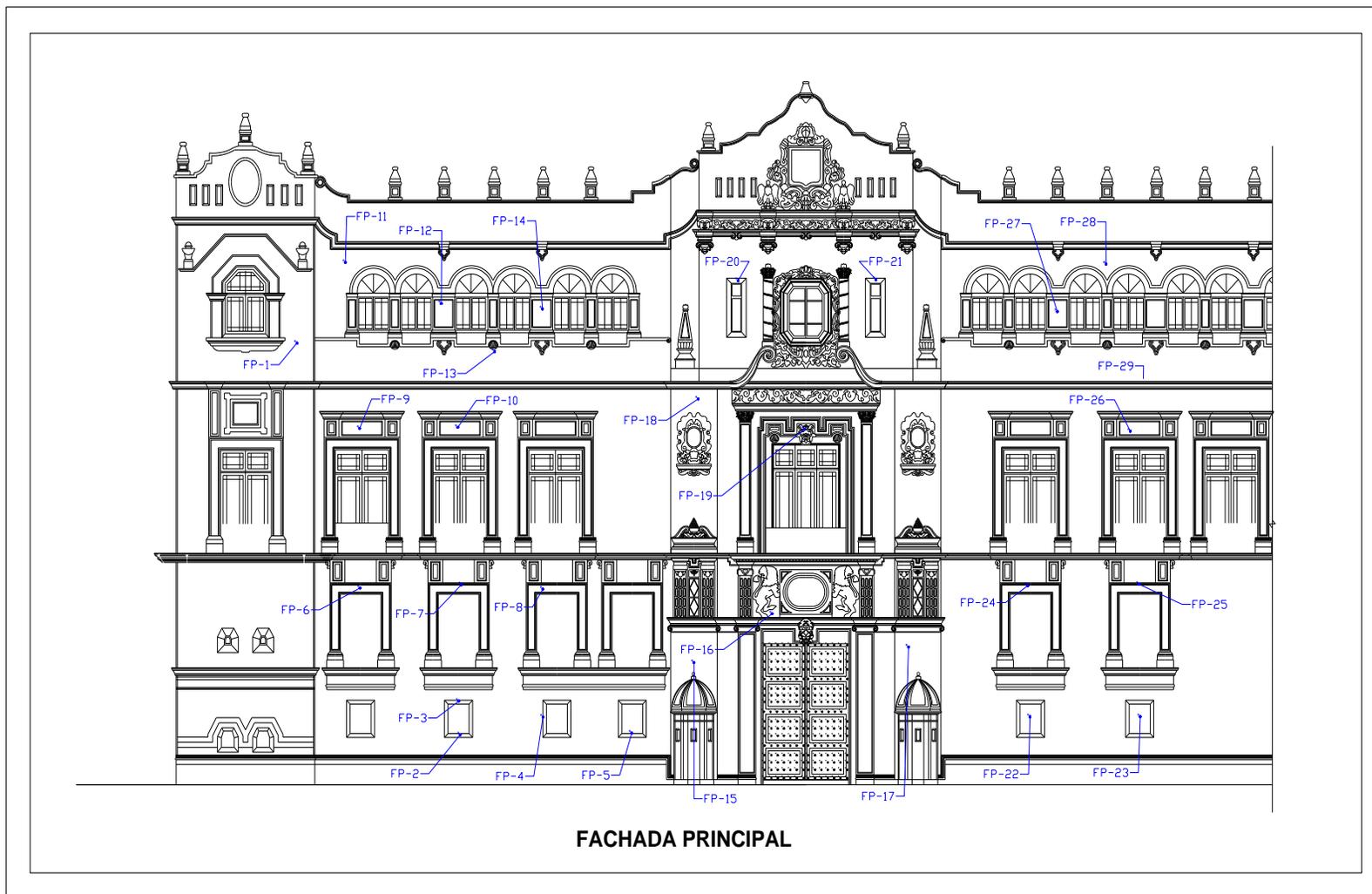
En el siguiente registro, se presentan planos con la ubicación de los daños, los cuales se muestran en fotografías con la siguiente nomenclatura:

- |        |                                       |
|--------|---------------------------------------|
| - FP-1 | Fachada Principal Fotografía 1.       |
| - CM-1 | Calle de Moneda Fotografía 1.         |
| - JE-1 | Jardín de la Emperatriz Fotografía 1. |
| - PB-1 | Planta Baja Fotografía 1.             |
| - 1P-1 | Primer Piso Fotografía 1.             |
| - 2P-1 | Segundo Piso Fotografía 1.            |

Es necesario mencionar que en estas fotografías se marcaron las grietas en color negro para que fueran mejor apreciadas, algunas solo muestran las grietas enmarcadas en recuadros de color rojo.



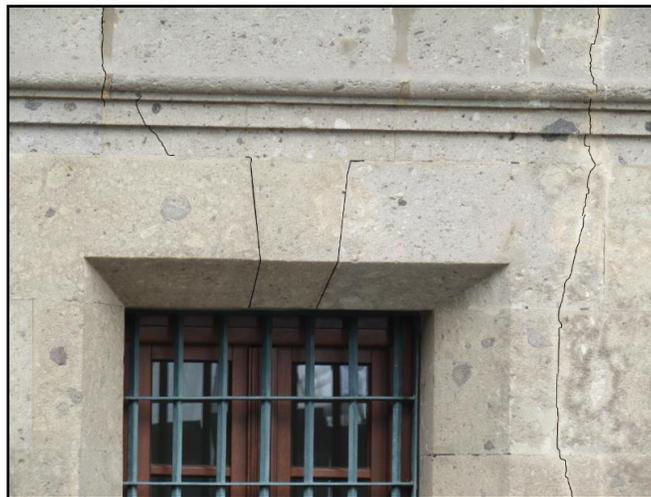
➤ Fachada principal



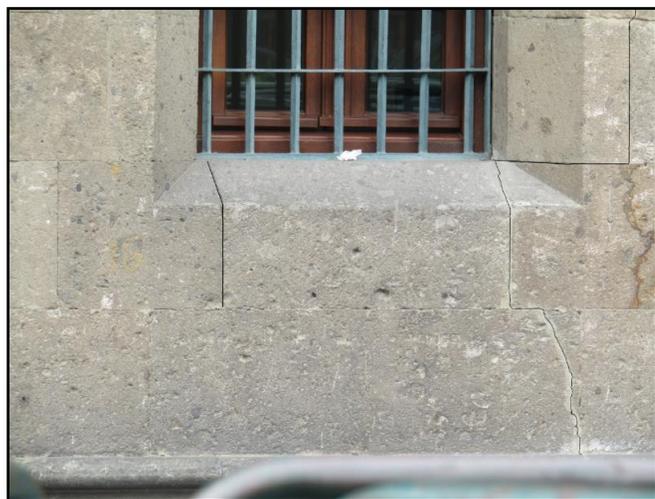
Plano FP. Ubicación de los daños en la fachada principal de la sección en estudio. (Elaborado por la autora a partir del plano proporcionado por la DGSMPC).



*Fotografía FP-1 (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP-3. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -2. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -4. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -5. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -6. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -7. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -8. (Foto tomada por la autora).*



Fotografía FP -9. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -11. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -10. (Foto tomada por la autora).



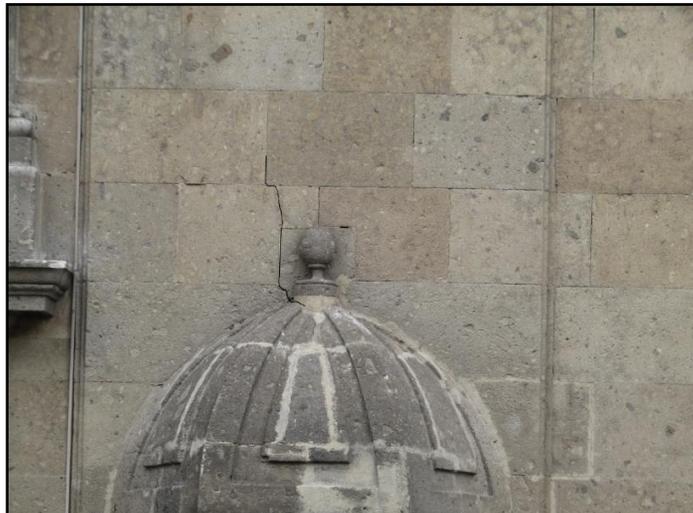
Fotografía FP -11. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -13. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -14. (Foto tomada por la autora).



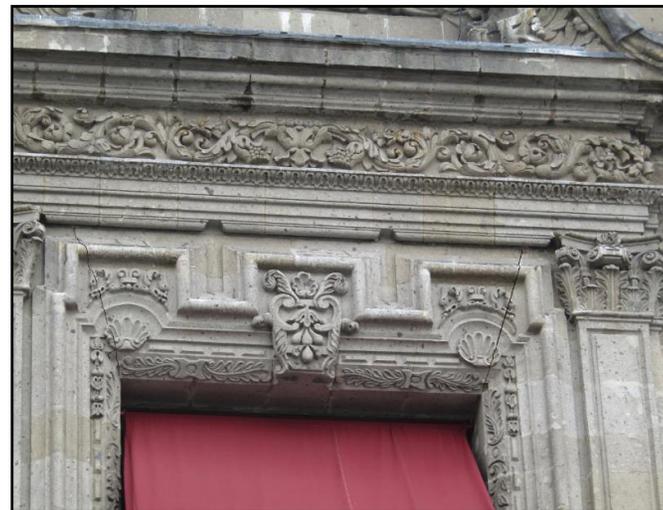
Fotografía FP -15. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -16. (Foto tomada por la autora).



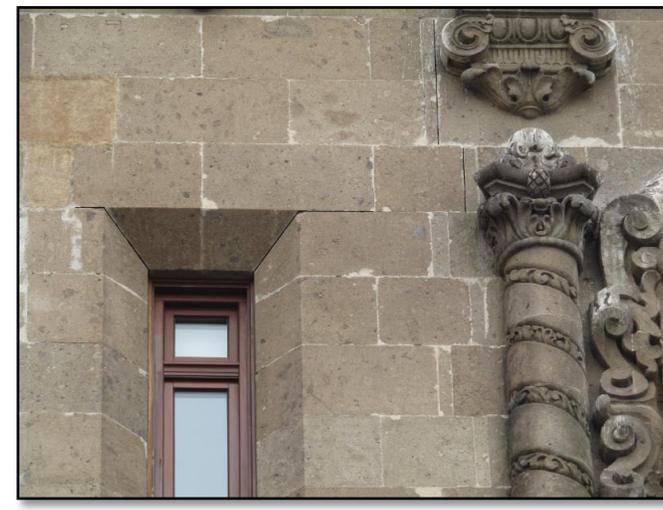
Fotografía FP-17. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -19. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -18. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -20. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -21. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -23. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -22. (Foto tomada por la autora).



Fotografía FP -24. (Foto tomada por la autora).



*Fotografía FP -25. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -27. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -26. (Foto tomada por la autora).*

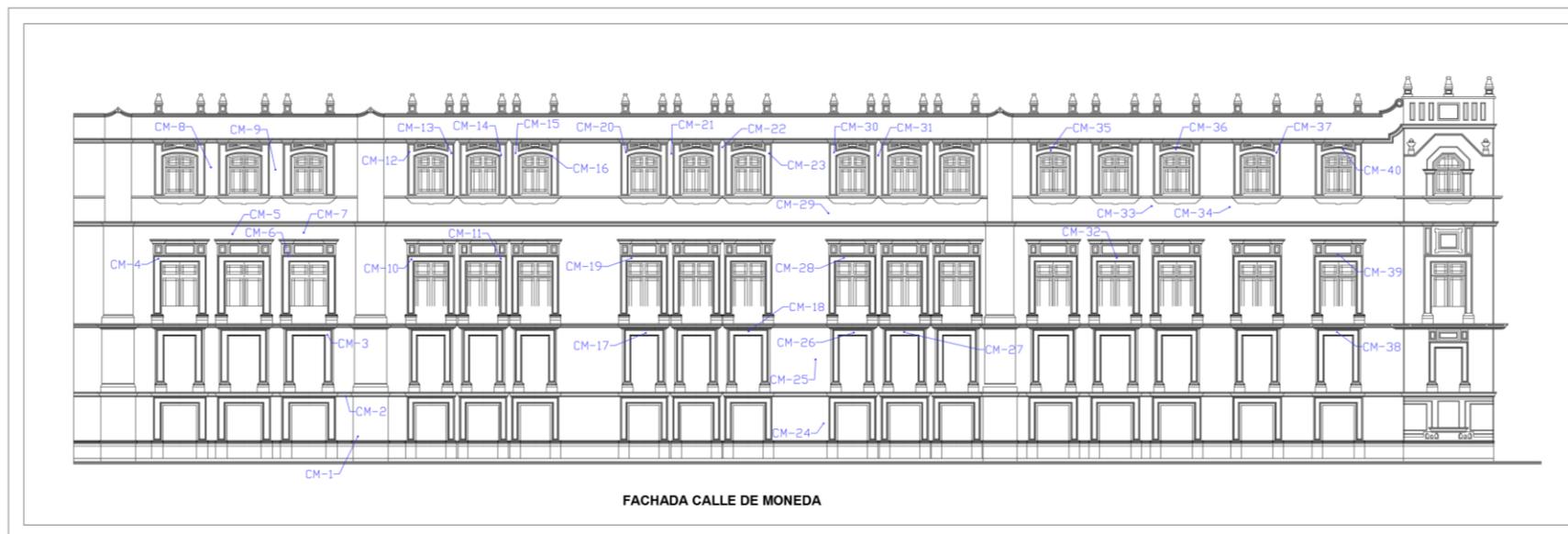


*Fotografía FP -28. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía FP -29. (Foto tomada por la autora).*

## ➤ Fachada Calle de Moneda.



Plano CM. Ubicación de los daños en la fachada sobre la Calle de Moneda de la sección en estudio. (Elaborado por la autora a partir del plano proporcionado por la DGSMPC).



*Fotografía CM-1. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-3. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-2. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-4. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-5. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-7. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-6. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-8. (Foto tomada por la autora).*



Fotografía CM-9. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-11. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-10. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-12. (Foto tomada por la autora).



*Fotografía CM-13. (Foto tomada por la autora).*



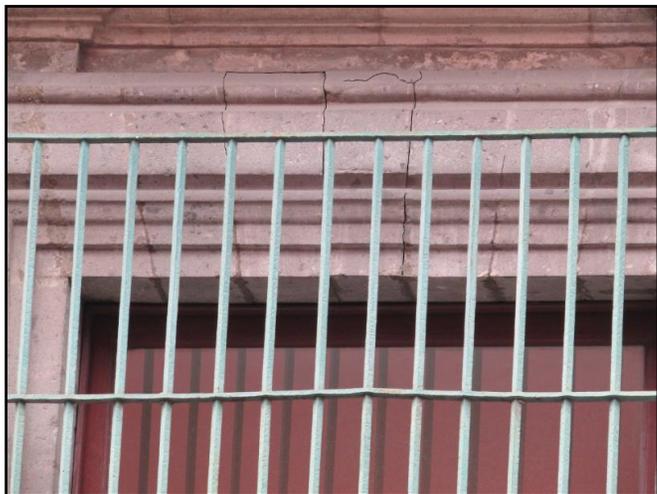
*Fotografía CM-15. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-14. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-16. (Foto tomada por la autora).*



Fotografía CM-17. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-19. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-18. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-20. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-21. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-23. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-22. (Foto tomada por la autora).



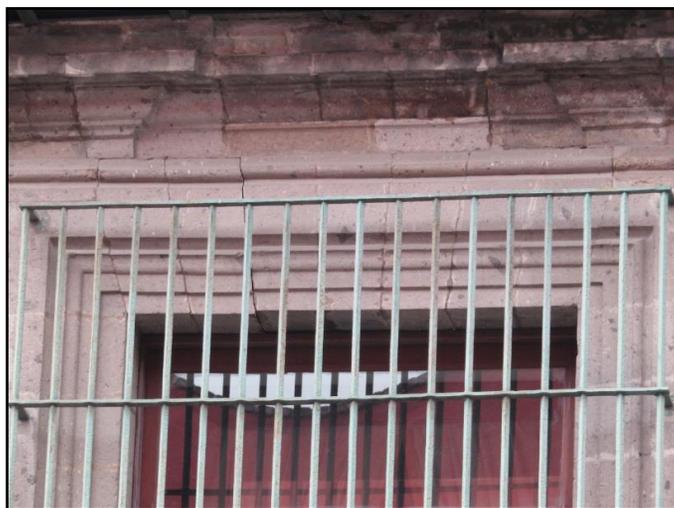
Fotografía CM-24. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-25. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-27. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-26. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-28. (Foto tomada por la autora).



*Fotografía CM-29. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-31. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-30. (Foto tomada por la autora).*



*Fotografía CM-32. (Foto tomada por la autora).*



Fotografía CM-33. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-34. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-35. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-36. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-37. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-39. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-38. (Foto tomada por la autora).



Fotografía CM-40. (Foto tomada por la autora).

➤ Fachada Jardín de la Emperatriz



Plano JE. Ubicación de los daños en la fachada del Jardín de la Emperatriz. (Elaborado por la autora a partir del plano proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional).



Fotografía JE-1. (Foto tomada por la autora).

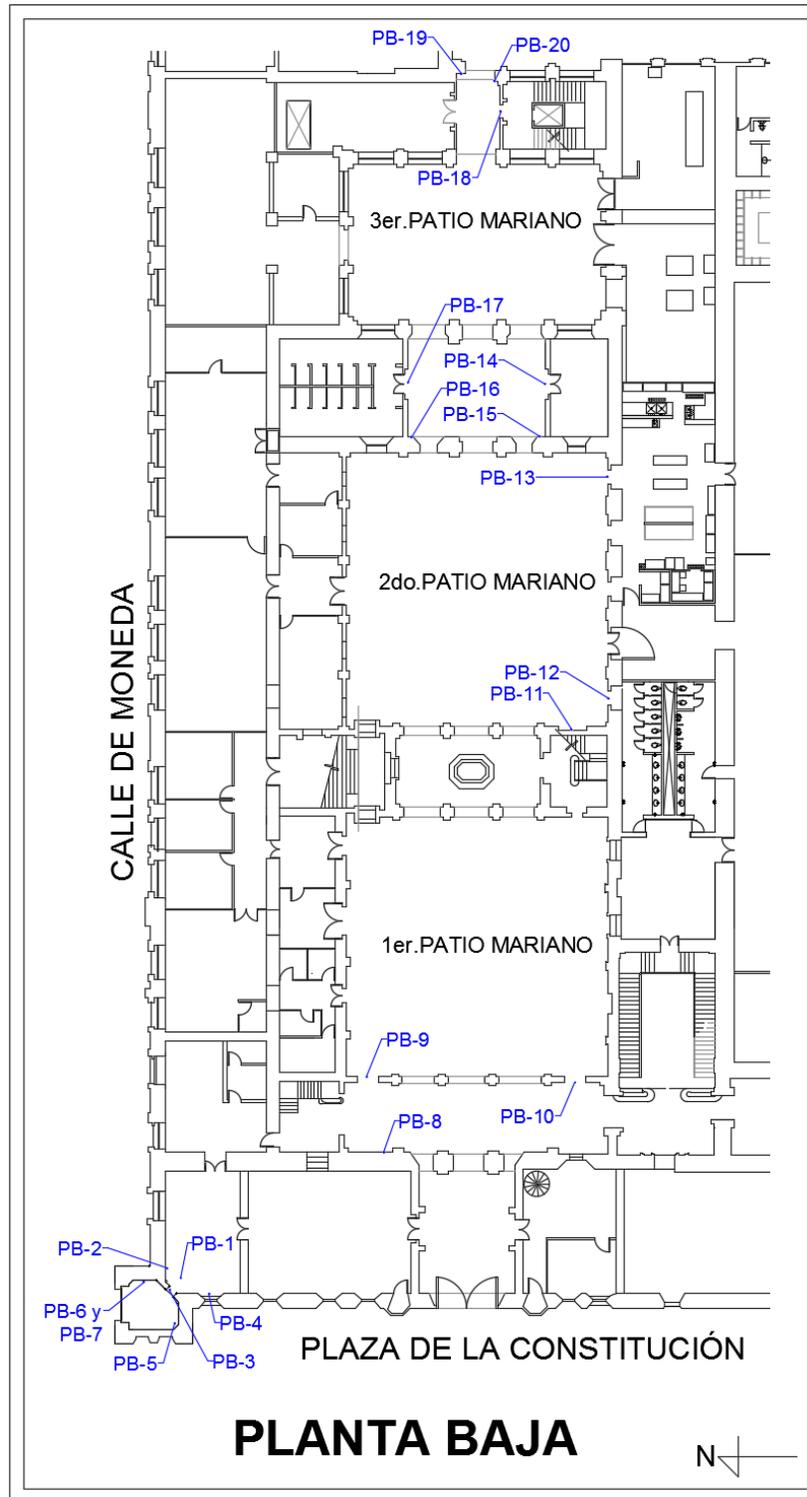


Fotografía JE-3. (Foto tomada por la autora).



Fotografía JE-2. (Foto tomada por la autora).

➤ Planta Baja



Plano PB. Ubicación de los daños en planta baja de la sección en estudio. (Elaborado por la autora a partir del plano proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional).



Fotografía PB-1. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-3. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-2. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-4. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-5. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-7. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-6. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-8. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-9. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-10. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía PB-11. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-12. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-13. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-14. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-15. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-16. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-17. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-18. (Foto tomada por la autora).

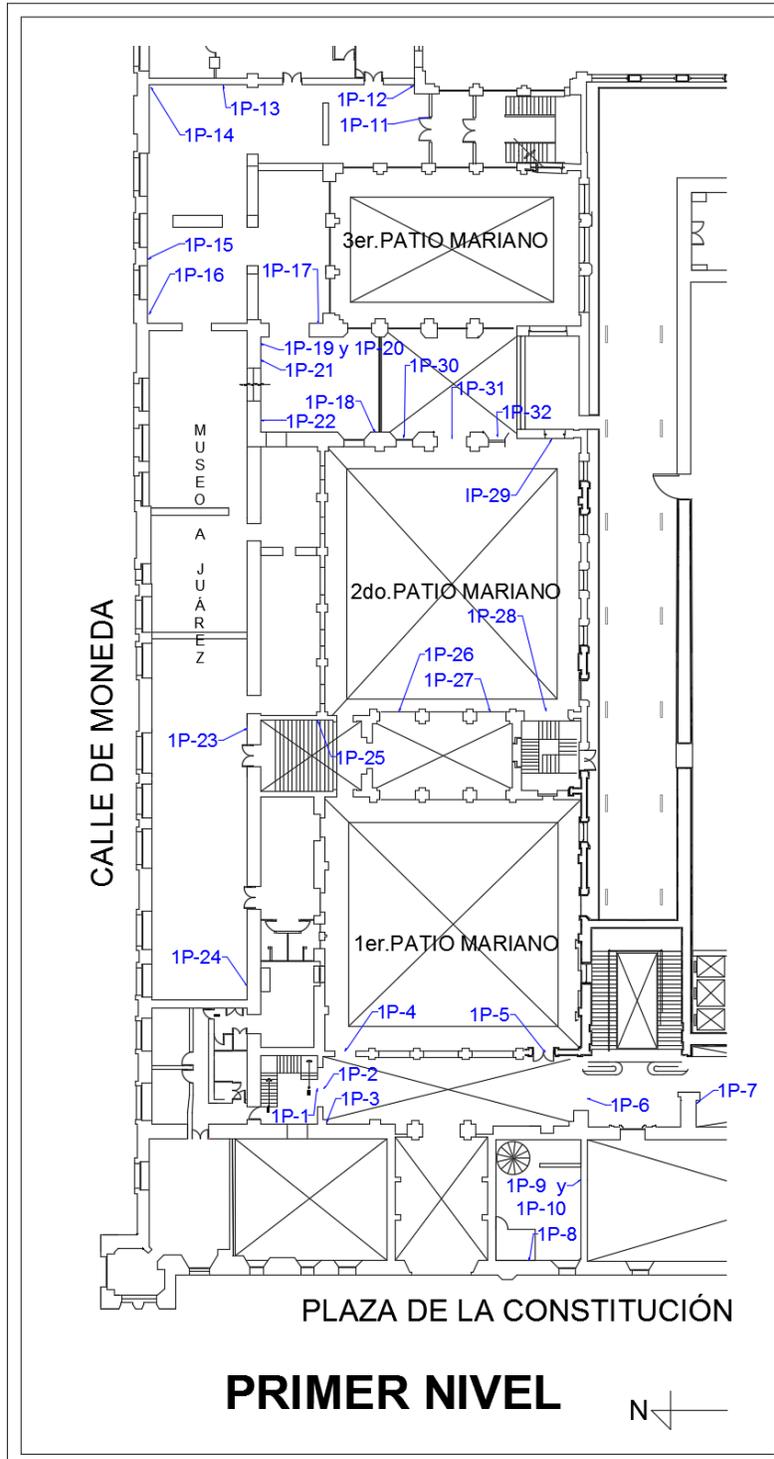


Fotografía PB-19. (Foto tomada por la autora).



Fotografía PB-20. (Foto tomada por la autora).

➤ Primer Piso



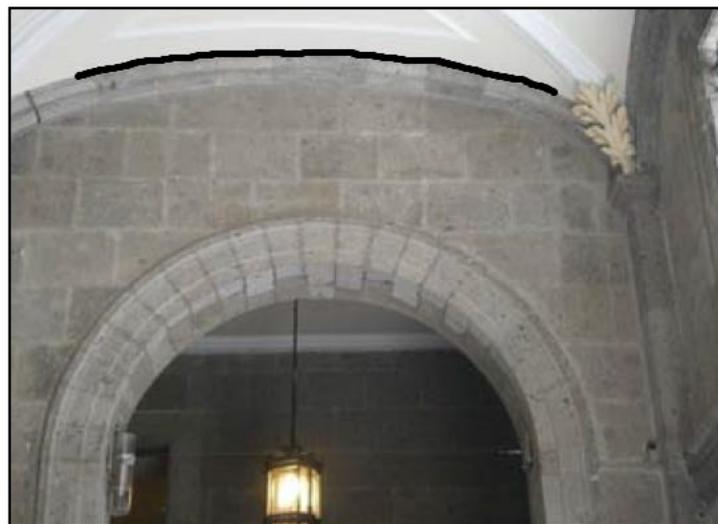
Plano 1P. Ubicación de los daños en el primer nivel de la sección en estudio. (Elaborado por la autora a partir del plano proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional).



Fotografía 1P-1. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P-3. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



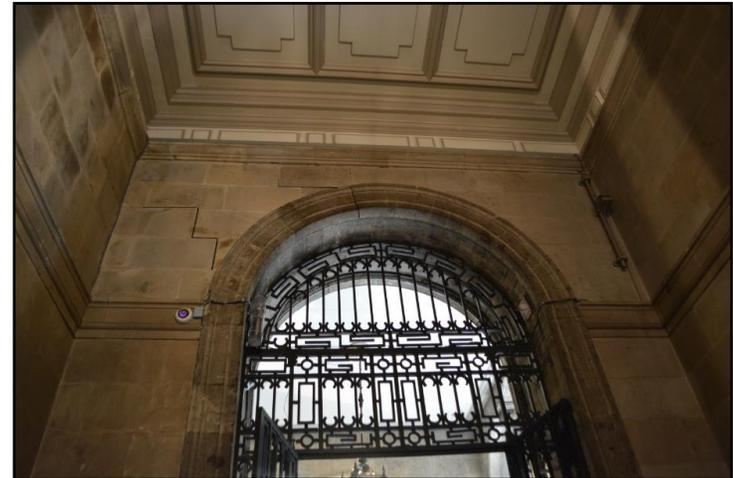
Fotografía 1P-2. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P-4. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P-5. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P-7. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P-6. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P-8. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P -9. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P -11. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -10. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 1P -12. (Foto tomada por la autora).



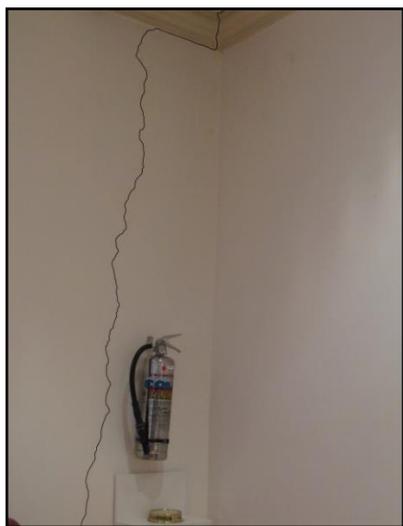
Fotografía 1P -13. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -15. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -17. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -14. (Foto tomada por la autora).



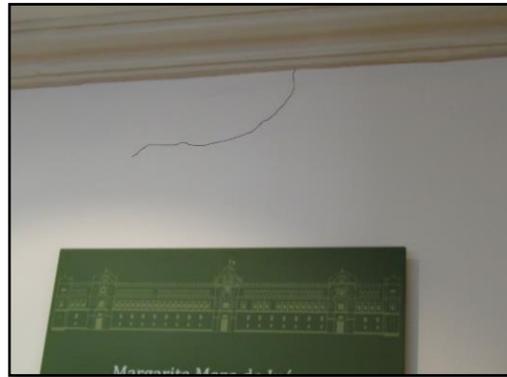
Fotografía 1P -16. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -18. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -19. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -20. (Foto tomada por la autora).



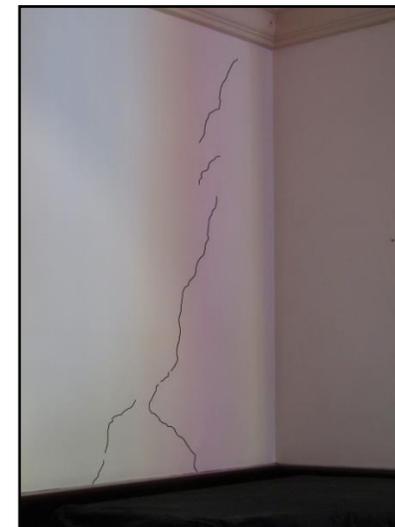
Fotografía 1P -21. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -22. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -23. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -24. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P-25. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P-27. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P-26. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P-28. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -29. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -31. (Foto tomada por la autora).

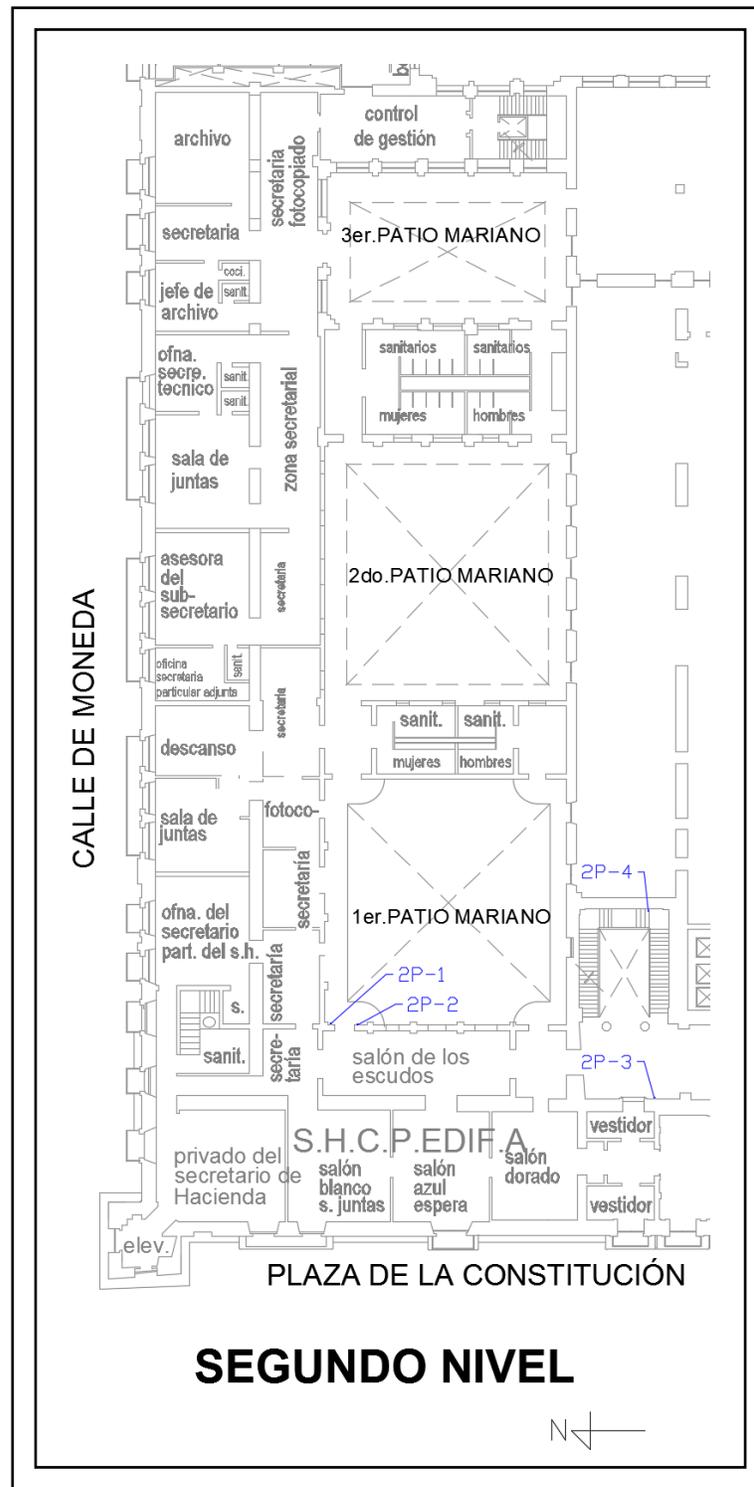


Fotografía 1P -30. (Foto tomada por la autora).



Fotografía 1P -32. (Foto tomada por la autora).

➤ Segundo Piso



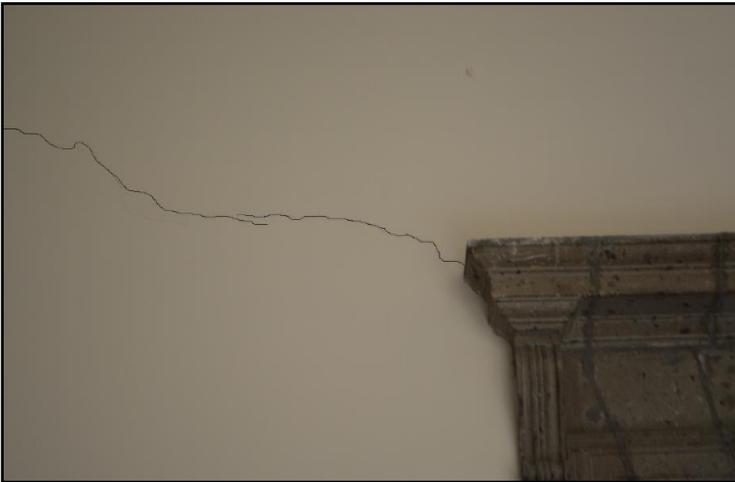
Plano 2P. Ubicación de los daños en el segundo nivel de la sección en estudio. (Elaborado por la autora a partir del plano proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional).



Fotografía 2P-4. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 2P-2. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 2P-3. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).



Fotografía 2P-1. (Foto tomada por el Ing. Sánchez).

## 3. MODELO

### 3.1 Método del Elemento Finito.

El propósito de esta sección es explicar de una manera muy general y sencilla, en que consiste el Método de Elemento Finito, no se pretende explicar con detalle el procedimiento, ni siquiera ejemplificarlo, por lo que, se recomienda buscar libros sobre el tema, actualmente la bibliografía es muy amplia. Para el desarrollo de este apartado se consultaron las referencias: *Deméneghi, 2009, Doblaré y García, 1999, Rubio y Romero, 2010, L. Huston, 1984, Chandrupatla y Belegundu, 2015.*

#### 3.1.1 Origen del método

En la década de los cincuenta comenzó a desarrollarse un método que, partiendo de las ideas variacionales o energéticas ampliamente utilizadas en la primera mitad del siglo para la obtención de soluciones aproximadas, e incluyendo los conceptos de matriz de rigidez y vector de cargas elementales que aparecían en el cálculo matricial de estructuras de barras, permitía establecer, mediante procedimientos intuitivos, las matrices de rigidez elementales de trozos previamente definidos de un medio elástico bidimensional. Este método finalmente conduciría, en los años posteriores, al Modelo de Elemento Finito.

Fue gracias a la aparición del motor de reacción, que la industria aeronáutica se vio en la necesidad de elaborar una herramienta de análisis precisa para poder abordar los complejos problemas de geometría y cargas que se presentan, sin perder las dos condiciones básicas del diseño aeronáutico: la seguridad y la ligereza. En la empresa Boeing, bajo la dirección de Turner, se empiezan a implementar las ideas antes aludidas, plasmadas en un artículo titulado "*Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*", en septiembre de 1956, publicado en el Journal of Aeronautical Sciences.

Durante los años sesenta se establecen las bases matemáticas del método. En el año 1967 se publica el libro *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, de O.C. Zienkiewicz, en el que se recopilan los conocimientos del método, lo que permitió una amplia difusión.

En la década de los setenta, el Método de Elemento Finito alcanza su madurez, con la aplicación a múltiples problemas, no relacionados con el análisis estructural como mecánica de fluidos, transmisión de calor, electricidad, etc. Así mismo aparecen los textos relacionados con los fundamentos matemáticos del método y nuevos algoritmos más eficaces para la resolución de grandes sistemas de ecuaciones algebraicas o problemas no lineales. Es también en esta década cuando aparecen los grandes programas de elementos finitos.

La segunda mitad de los años setenta y la década de los ochenta se caracterizan por el desarrollo de los procesadores gráficos que permiten la visualización inmediata de los datos y resultados del problema en estudio. Asimismo, la aplicación del método a microordenadores con programas computacionales, puso este método al alcance de estudiantes e ingenieros que trabajan en industrias pequeñas.

En la actualidad, el número de publicaciones e investigadores dedicados al método es enorme habiéndose consolidado como la principal herramienta de cálculo en el análisis estructural, que ha permitido el desarrollo de centrales nucleares, naves espaciales, entre otros.

### 3.1.2 Breve descripción del método

El Método de Elemento Finito en general permite la obtención de soluciones aproximadas para ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, el cual se ha aplicado a una gran gama de problemas científicos e ingenieriles.

Este Método consiste básicamente en los siguientes pasos:

- 1) **Discretización:** Dado un problema físico o matemático, se modela dividiéndolo en partes pequeñas llamadas elementos.
- 2) **Planteamiento de funciones:** Se realiza un análisis físico o matemático del problema en los elementos, es decir, para cada elemento se selecciona una aproximación de la función buscada.
- 3) **Ensamble y solución:** Los elementos son ensamblados en un todo para obtener la solución del problema original.

En resumen, el método de elemento finito consiste, básicamente, en discretizar el medio mediante elementos, estudiar el comportamiento de ellos en forma individual, para después acoplarlos y conocer con ello las condiciones generales del medio.

Las ecuaciones del método del elemento finito se obtienen a partir del trabajo de las fuerzas externas y del trabajo acumulado debido a los esfuerzos internos o energía interna de deformación. Para el caso elástico lineal ambos trabajos se igualan, dado que se desprecian las pérdidas de energía, lo que conduce a un sistema de ecuaciones lineales en el que las fuerzas en los vértices de los elementos quedan en función de los desplazamientos en dichos vértices. La resolución de este sistema permite conocer los desplazamientos en los nodos, lo que a su vez determina los esfuerzos dentro de los elementos en los que se dividió el medio. Por lo tanto, este procedimiento nos ayuda a

conocer los desplazamientos, los estados de esfuerzo y deformación, en un medio continuo que puede ser homogéneo y anisótropo.

De forma general, se tiene que, después de discretizar un medio se toma un elemento y se siguen los siguientes puntos para conseguir las ecuaciones:

- 1) Se obtienen los desplazamientos en cualquier punto dentro del elemento, en función de los desplazamientos en los nodos, teniendo como resultado:

$$\bar{U} = \bar{N} \bar{u}^e \quad (1)$$

Donde:

$\bar{U}$  Desplazamiento en cualquier punto dentro del elemento

$\bar{N}$  Matriz de forma

$\bar{u}^e$  Desplazamientos en los nodos

- 2) Se determinan las deformaciones unitarias dentro del elemento en función de los desplazamientos en sus nodos:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{B} \bar{u}^e \quad (2)$$

Donde:

$\bar{\varepsilon}$  Deformaciones unitarias dentro del elemento

$\bar{B}$  Matriz

$\bar{u}^e$  Desplazamientos en los nodos

- 3) Se determinan los esfuerzos dentro del elemento en función de los desplazamientos en sus nodos.

$$\bar{\sigma} = \bar{D} \bar{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = \bar{D} \bar{B} \bar{u}^e \quad (4)$$

Donde:

$\bar{\sigma}$  Esfuerzo dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos

$\bar{D}$  Matriz

$\bar{\varepsilon}$  Deformaciones unitarias dentro del elemento

- 4) Con las expresiones anteriores, se pueden obtener las ecuaciones de elemento finito, para lo cual se obtiene el trabajo de las fuerzas externas y el trabajo interno de deformación acumulado, para después igualarlos.

Recordando que el material analizado se considera elástico lineal se tiene que el trabajo de las fuerzas externas es:

$$W_e = \frac{1}{2} (\overline{u}^e)^T \overline{P}^e \quad (5)$$

Dónde:

$W_e$  Esfuerzo dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos

$\overline{P}^e$  Fuerzas externas

Mientras que el trabajo interno en todo el volumen del elemento tiene un valor de:

$$W_i = \int_{Vol} W'_i dVol = \int_{Vol} \frac{1}{2} \overline{\varepsilon}^T \overline{\sigma} dVol \quad (6)$$

Entonces, igualando las ecuaciones (5) y (6):

$$W_e = W_i$$

$$\frac{1}{2} (\overline{u}^e)^T \overline{P}^e = \int_{Vol} \frac{1}{2} \overline{\varepsilon}^T \overline{\sigma} dVol$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) y (2) queda:

$$(\overline{u}^e)^T \overline{P}^e = \int_{Vol} (\overline{B} \overline{u}^e)^T \overline{\sigma} dVol$$

Simplificando

$$\overline{P}^e = \int_{Vol} \overline{B}^T \overline{\sigma} dVol$$

Sustituyendo la ecuación 4

$$\overline{P}^e = \int_{Vol} \overline{B}^T \overline{D} \overline{B} \overline{u}^e dVol$$

$$\overline{P}^e = \overline{B}^T \overline{D} \overline{B} \overline{u}^e \int_{Vol} dVol$$

Llamando  $K^e$  es la matriz de rigidez del elemento:

$$\bar{K}^e = \bar{B}^T \bar{D} \bar{B} \int_{Vol} dVol$$

Sustituyendo, queda:

$$\bar{P}^e = \bar{K}^e \bar{u}^e \quad (7)$$

La ecuación (7) es válida para un elemento dentro del medio. La podemos aplicar entonces para todos los elementos de la región en estudio. Si llamamos  $\bar{K}$  a la suma de las matrices de rigidez de todos los elementos,  $\bar{u}$  al vector de desplazamientos de todo el medio y  $\bar{P}$  al vector de cargas en todos los nodos del medio, entonces la ecuación (7), válida para un elemento, se puede escribir de la siguiente forma para todo el medio:

$$\bar{K} = \bar{u} \bar{P} \quad (8)$$

$\bar{K}$  se denomina matriz de rigidez en todo el medio.

La ecuación (8) da lugar a un sistema de ecuaciones en el que las incógnitas son los desplazamientos en los nodos de los elementos. La solución de este sistema permite determinar estos desplazamientos para, posteriormente hallar las deformaciones unitarias y los esfuerzos de cada elemento empleando las ecuaciones (2) y (4).

## 3.2 Modelo de elemento finito.

Es necesario mencionar, que el modelo es una idealización de la estructura, donde se busca que sea lo más parecido posible a las características geométricas de los elementos estructurales que conforman el inmueble, tomando en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales empleados para su construcción.

### 3.2.1 Elaboración del Modelo.

El modelo se desarrolló mediante el programa de análisis SAP 2000 v 14.1. Debido a la complejidad geométrica de la estructura, fue necesario utilizar el programa AUTOCAD 2016. A continuación, y de manera sucinta se explica el procedimiento a seguir para la elaboración del modelo.

A partir de los planos proporcionados en AUTOCAD, plantas y fachadas se elaboró una malla tridimensional, tomando en cuenta principalmente los elementos estructurales y los vanos. (Figura 98). Con la finalidad de obtener resultados más fiables y precisos, en este paso fue importante tener presente dos cosas:

- La relación entre los lados de cada sólido debe tener, preferentemente, una relación 1 a 1, es posible considerar una relación de 2 a 1, y esporádicamente 3 a 1.
- Las caras de los elementos tienen que estar conformados por 4 lados.
- Los nodos de cada sólido deben estar unidos a los nodos de los sólidos adyacentes.

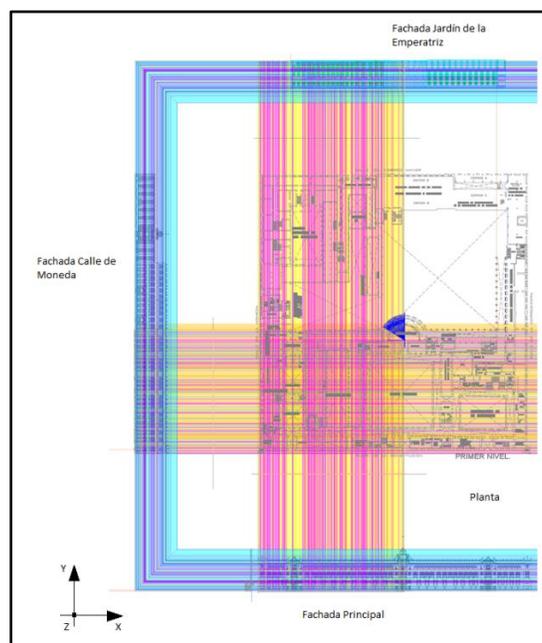


Figura 98. Malla tridimensional. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado con ayuda de los planos proporcionados por la DGSMPC).

Posteriormente se trazaron elementos 3dface en toda la planta (plano X-Y) y donde se requería para la realización de los arcos (planos X-Z y Y-Z), como se muestra en la figura 99, la cual fue exportada al SAP (Figura 100) para revisar que todos los nodos de cada elemento estuvieran conectados a los nodos de los elementos adyacentes, y que los ejes locales de cada elemento tuvieran la misma dirección, esto permitiría que al extruir los elementos para darles un volumen, todos crecieran en la misma dirección.

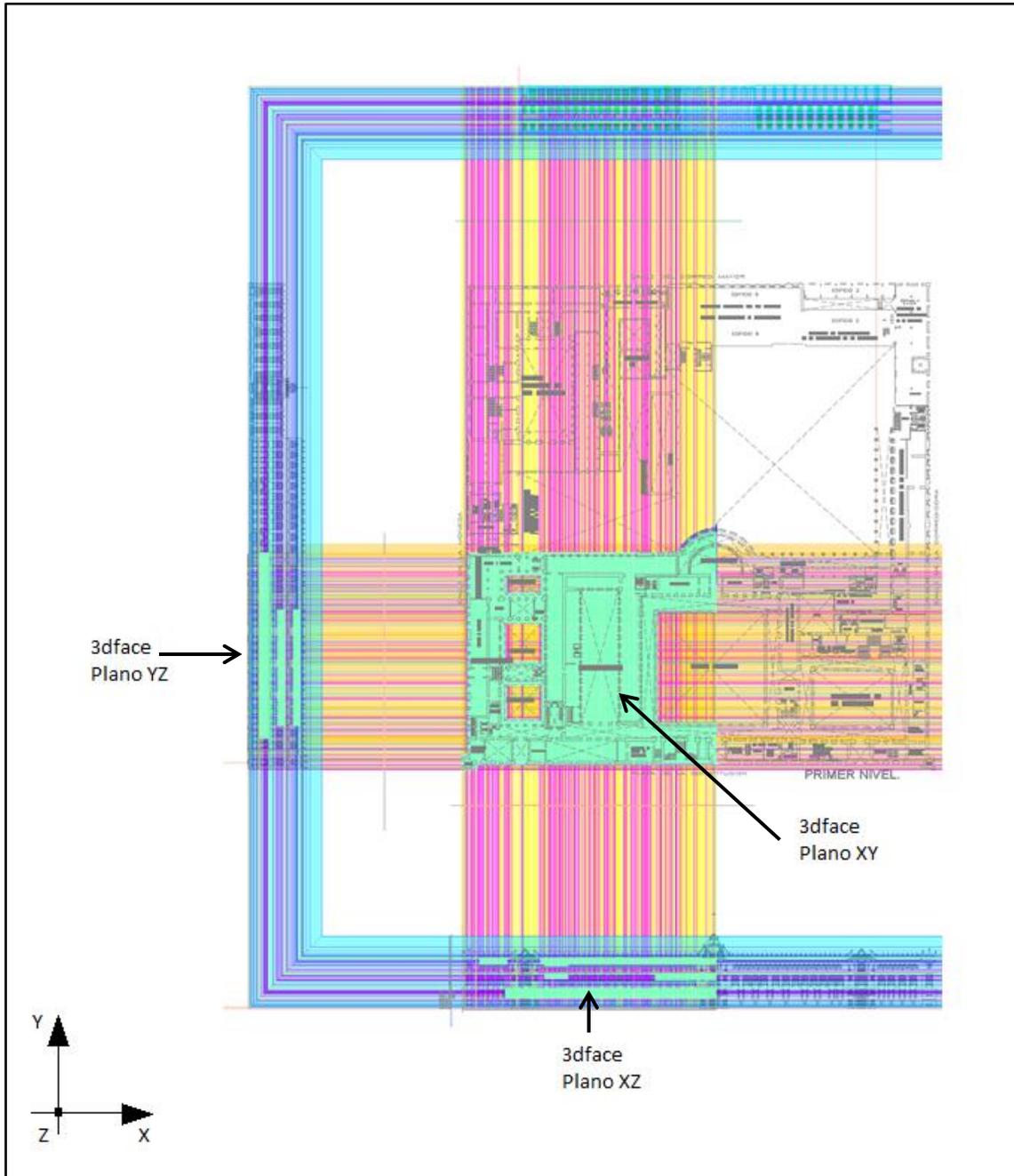


Figura 99. Superficies 3dface que se requirieron para hacer el modelo. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado con ayuda de los planos proporcionados por la DGSMPC).

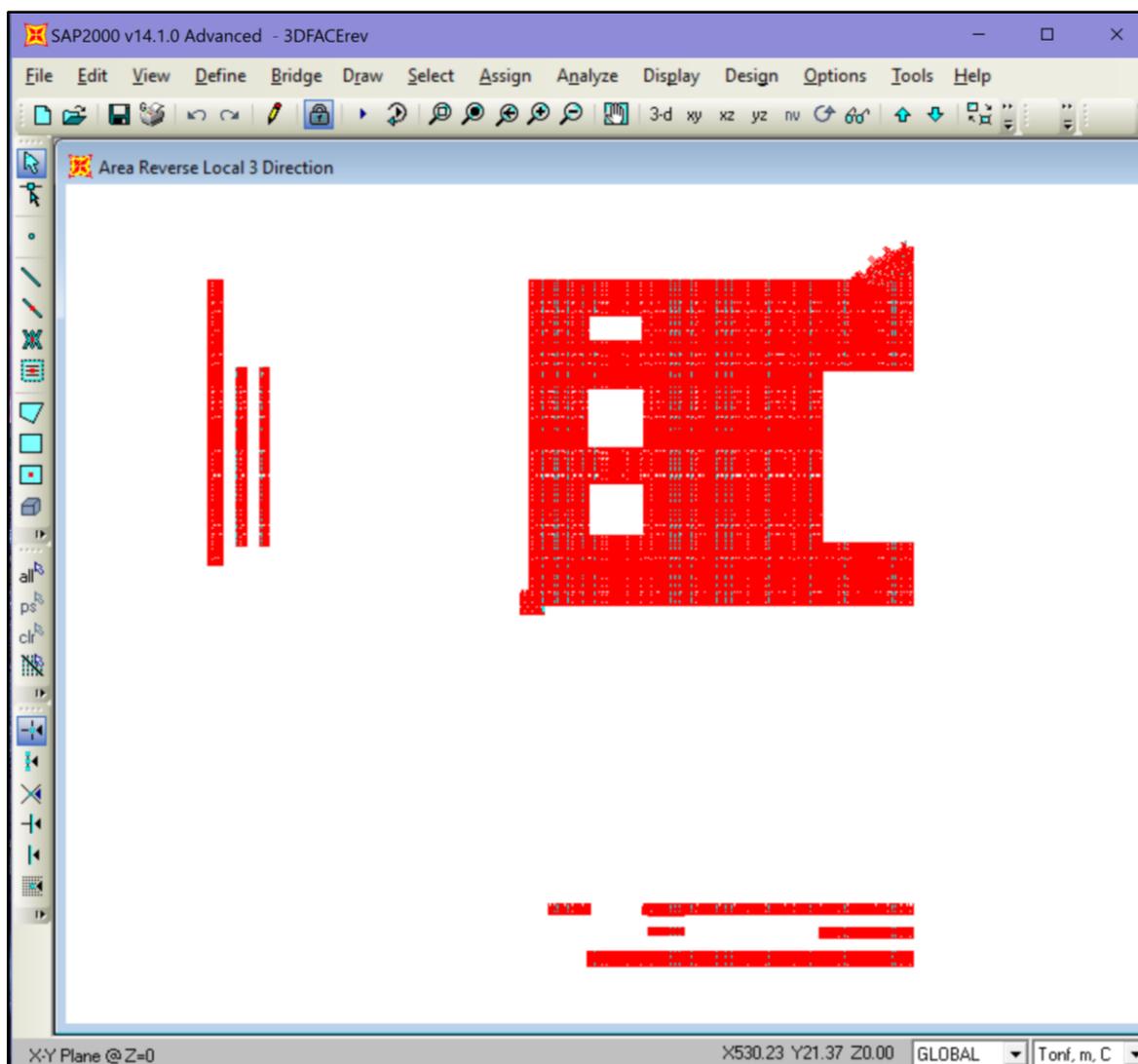


Figura 100. Las superficies 3dface exportados al programa SAP 2000. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

Estos elementos 3dface se exportaron de regreso al AUTOCAD, y a partir de ellos y de las plantas del Palacio Nacional se fue realizando el modelo de abajo hacia arriba, para ir localizando muros y vanos. Para cada  $\Delta z$  (Figura 101) se realizó una planta (Figura 102) las cuales fueron exportadas al SAP (Figura 103) por separado para posteriormente ser extruidos con su correspondiente valor  $\Delta z$  (Figura 104 y 105).

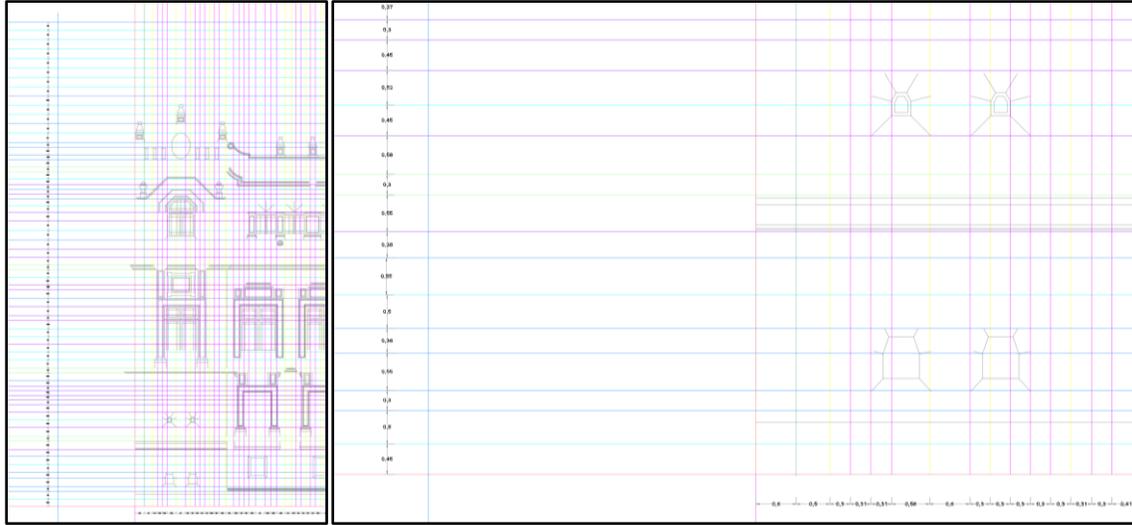


Figura 101. Se muestran las alturas  $\Delta z$ , con las que se trabajaron. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado con ayuda de los planos proporcionados por la DGSMPC).

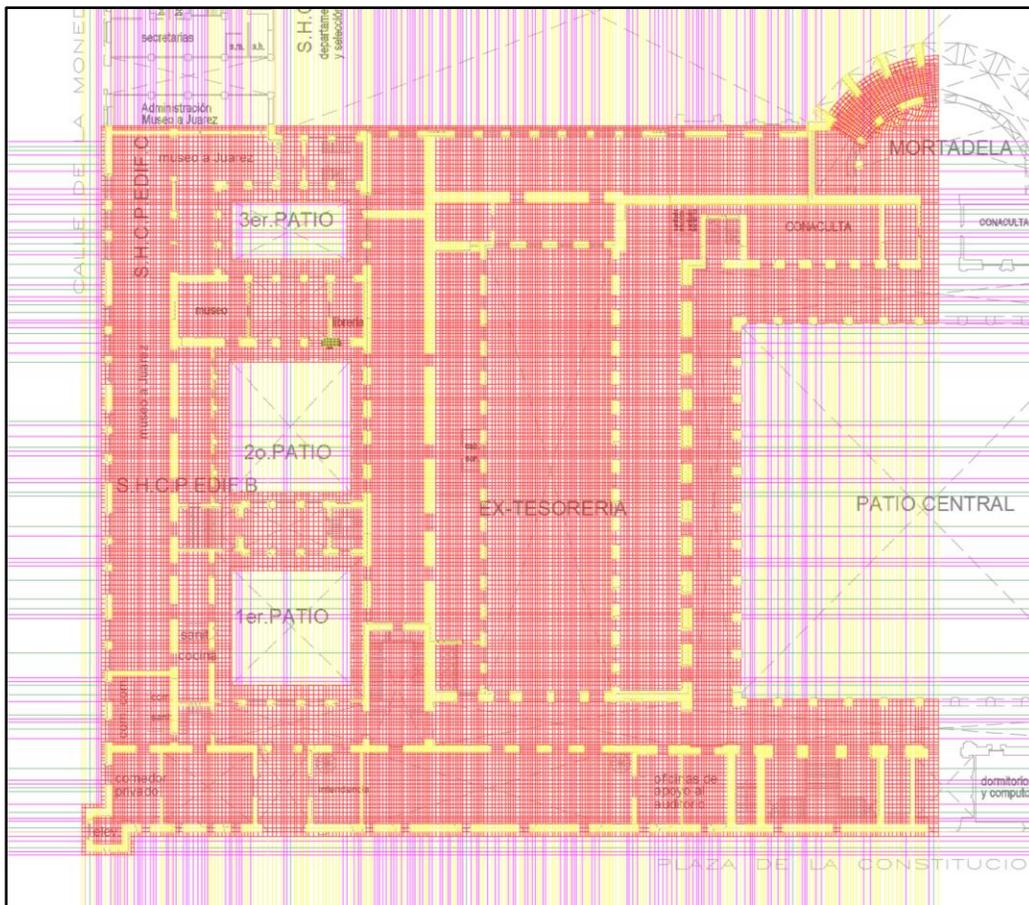


Figura 102. Planta muestra, para una determinada  $\Delta z$ . (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado con ayuda de los planos proporcionados por la DGSMPC).

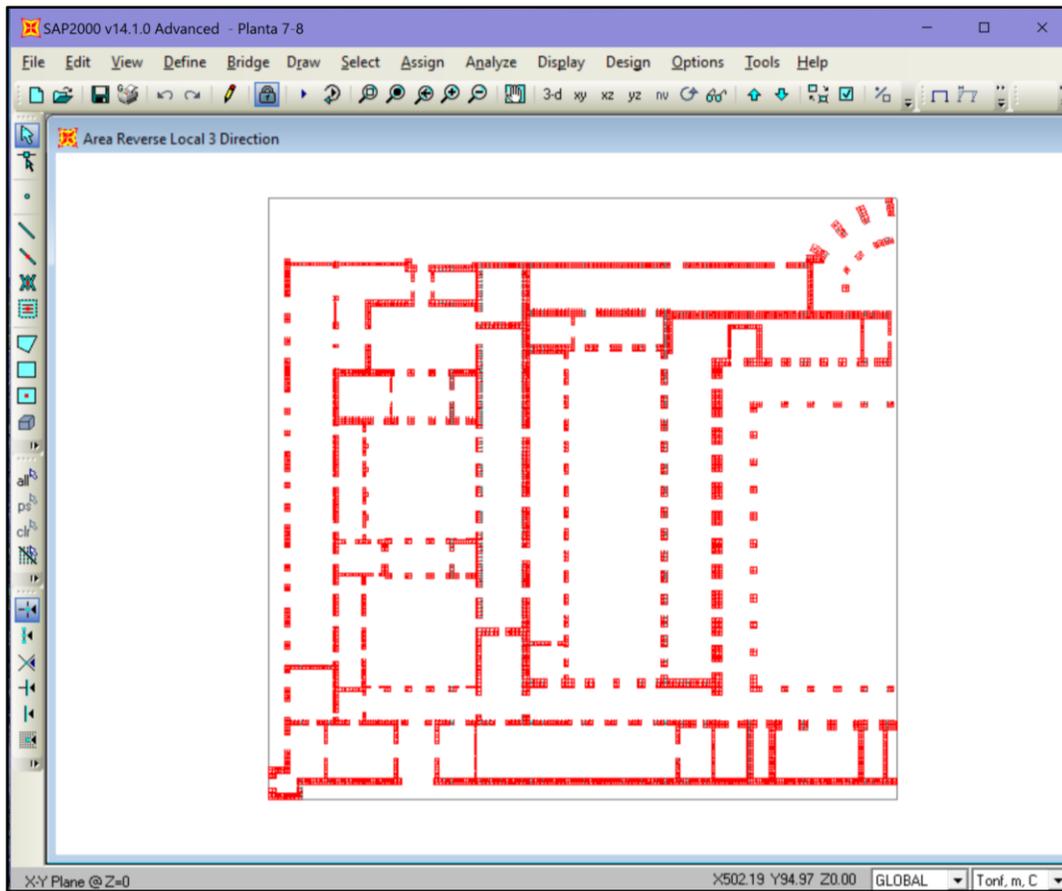


Figura 103. Planta  $\Delta z_n$  exportada al SAP 2000. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

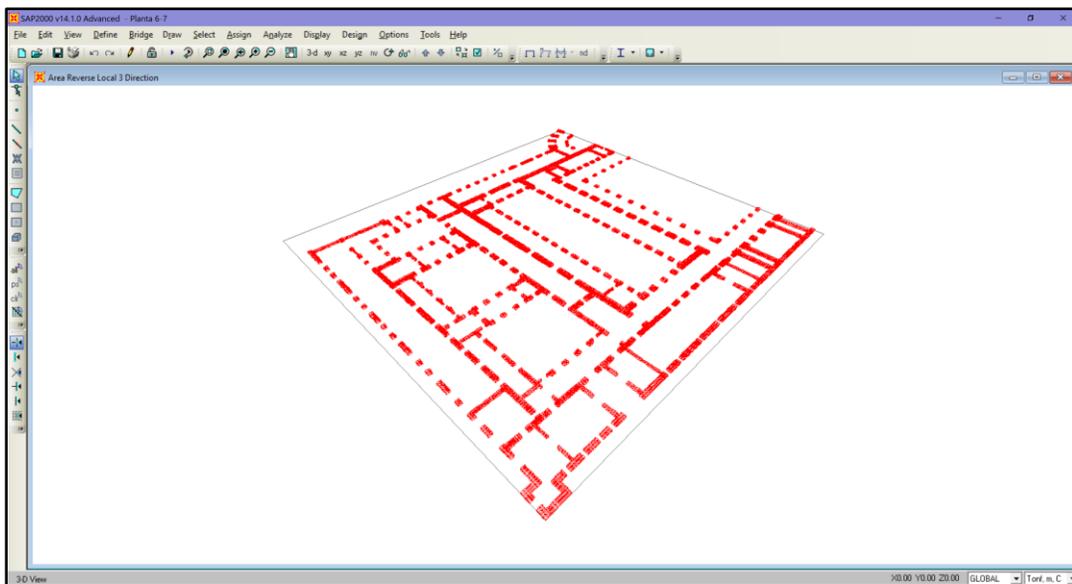


Figura 104. Planta  $\Delta z_n$  extruida en SAP 2000. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

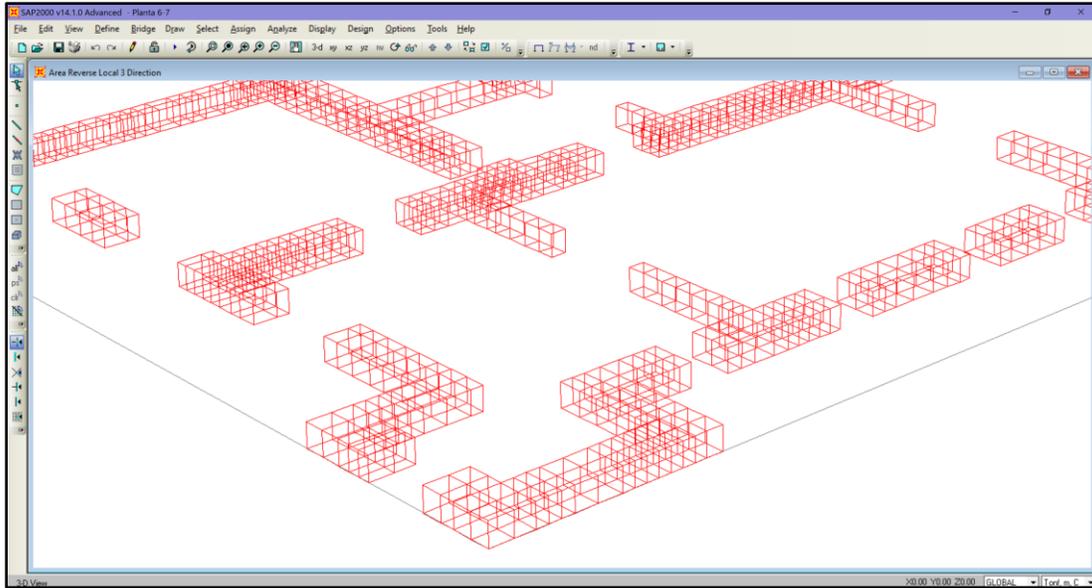


Figura 105. Detalle de la planta  $\Delta z_n$  extruida. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

Al ser extruido cada nivel  $\Delta z$ , fueron exportados una vez más al AUTOCAD para ensamblarlos y poder formar los niveles, esto es, la planta baja, primer piso, segundo piso y tercer piso. (Figuras del 106 al 109).

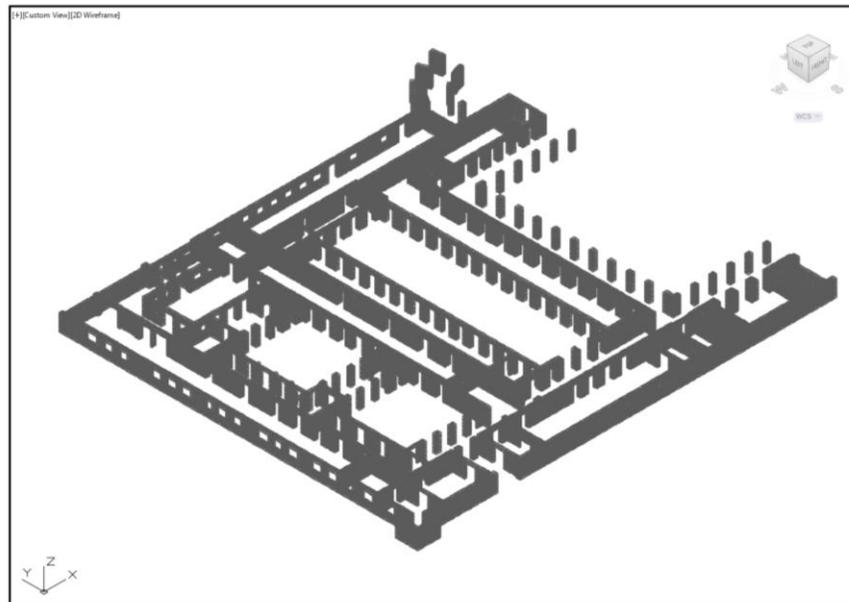


Figura 106. Planta Baja ensamblada. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

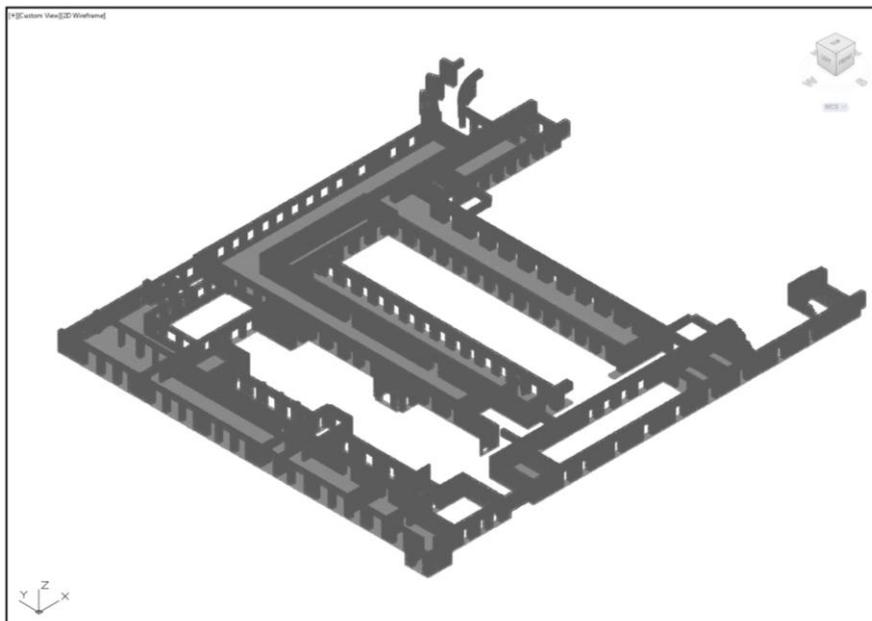


Figura 107. Primer Piso ensamblado. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

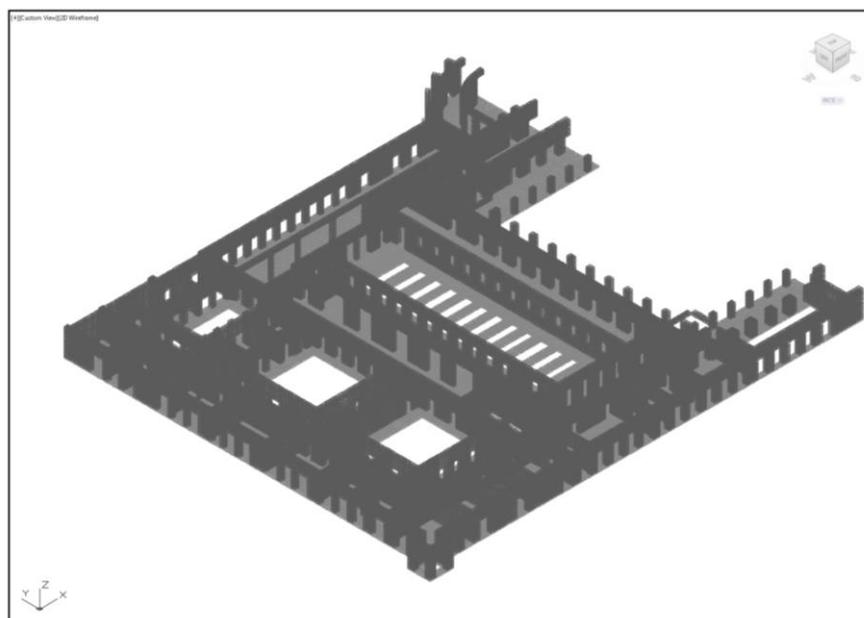


Figura 108. Segundo Piso ensamblado. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

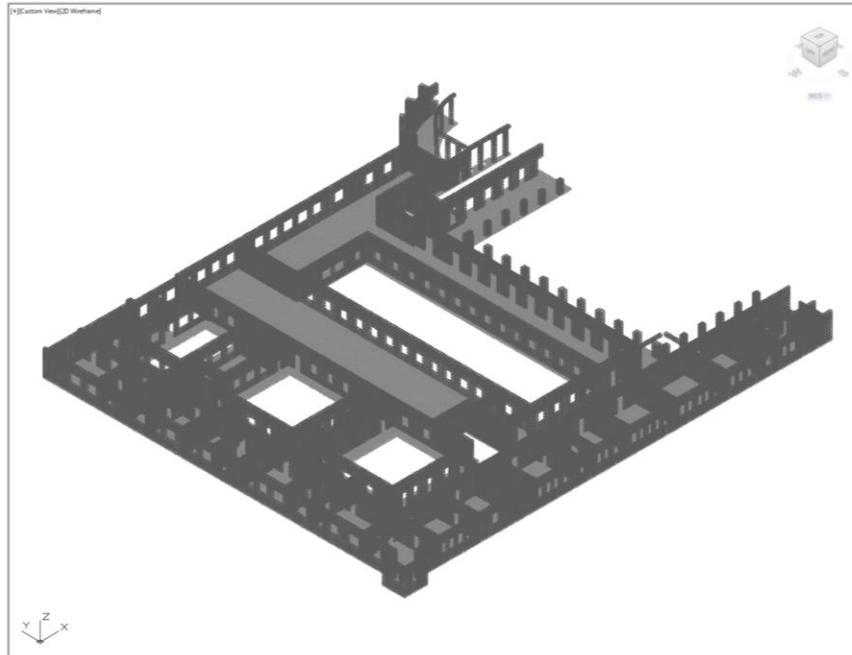


Figura 109. Tercer Piso ensamblado. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

Los arcos fueron elaborados con el mismo procedimiento que las plantas, con una única diferencia que se trabajaron con 3dface en los planos XZ y YZ (Figuras 110 y 111), mientras que la extracción, para convertir los 3dface en sólidos, se realizó en  $\Delta x$  y  $\Delta y$  dependiendo de la orientación de los arcos (Figuras 112 a 114). En este punto se tuvo mucho cuidado de respetar la malla, ya que, todos los nodos de cada elemento deben estar bien unidos a los nodos de los elementos adyacentes para que, al analizar el modelo, los esfuerzos se transmitan correctamente, evitando que el programa de cómputo marque error.

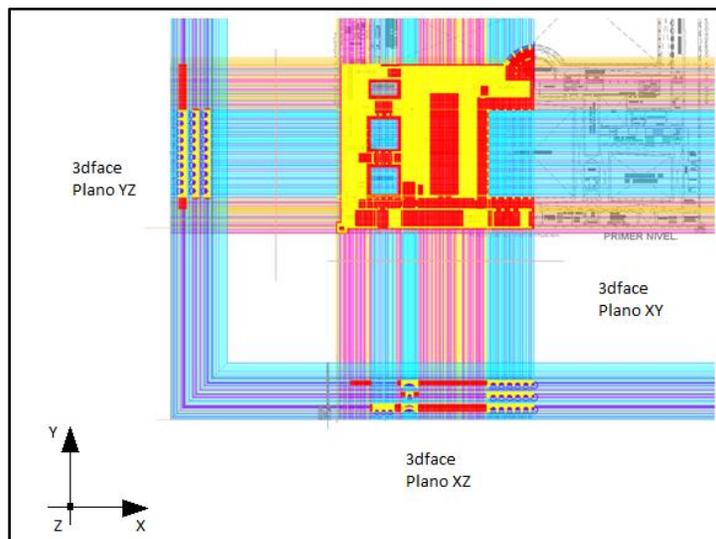


Figura 110. Superficies 3dface de algunos de los arcos del modelo. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado con ayuda de los planos proporcionados por la DGSMPC).

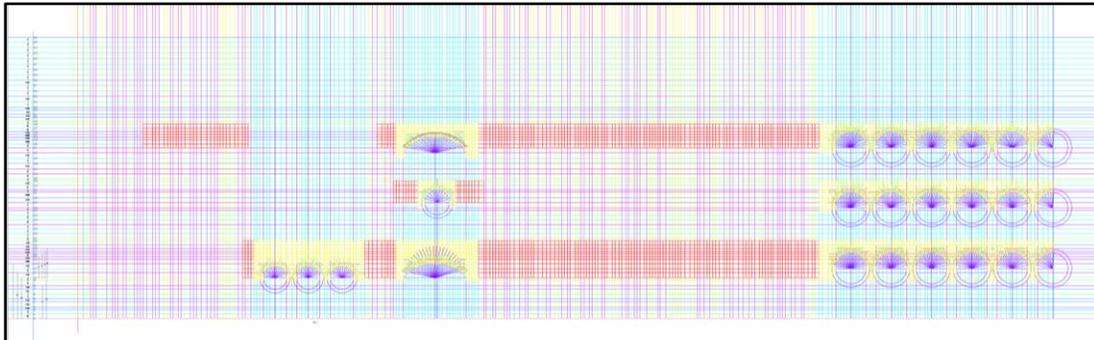


Figura 111. Detalle de las superficies 3dface de algunos de los arcos del modelo. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado con ayuda de los planos proporcionados por la DGSMPC).

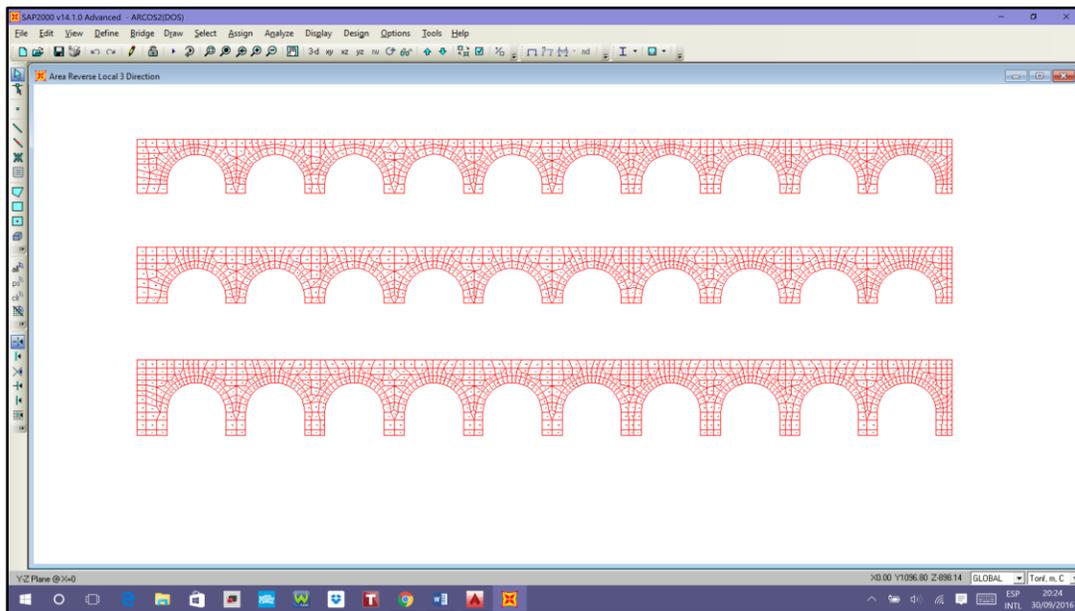


Figura 112. Superficies 3dface de los arcos norte del Patio Principal, exportados al SAP 2000. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

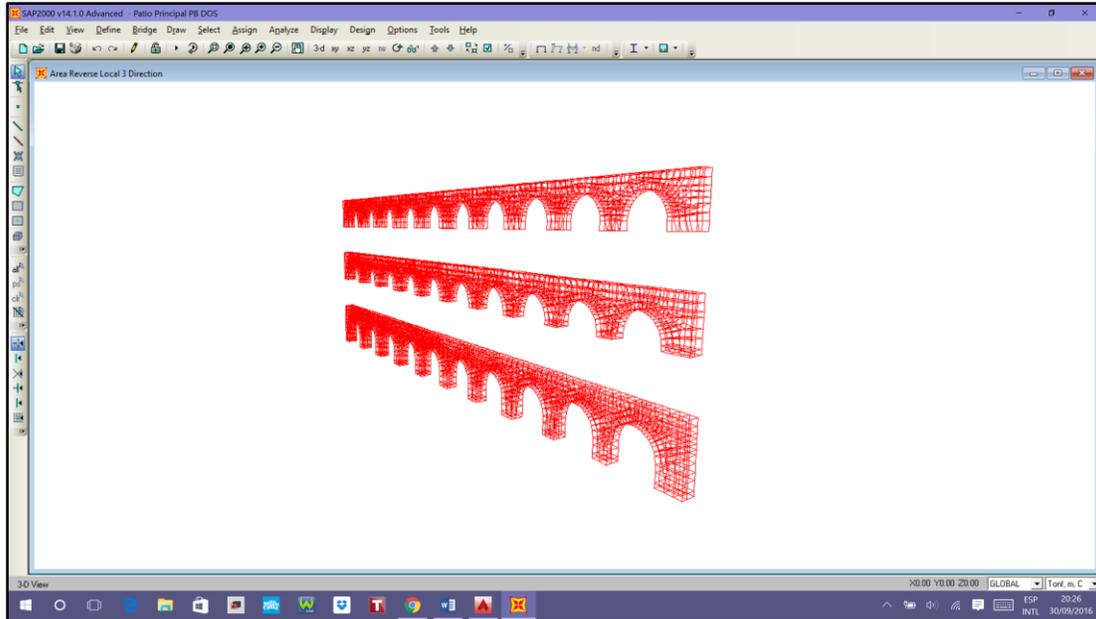


Figura 113. Sólidos de los arcos norte del Patio Principal, en SAP 2000. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

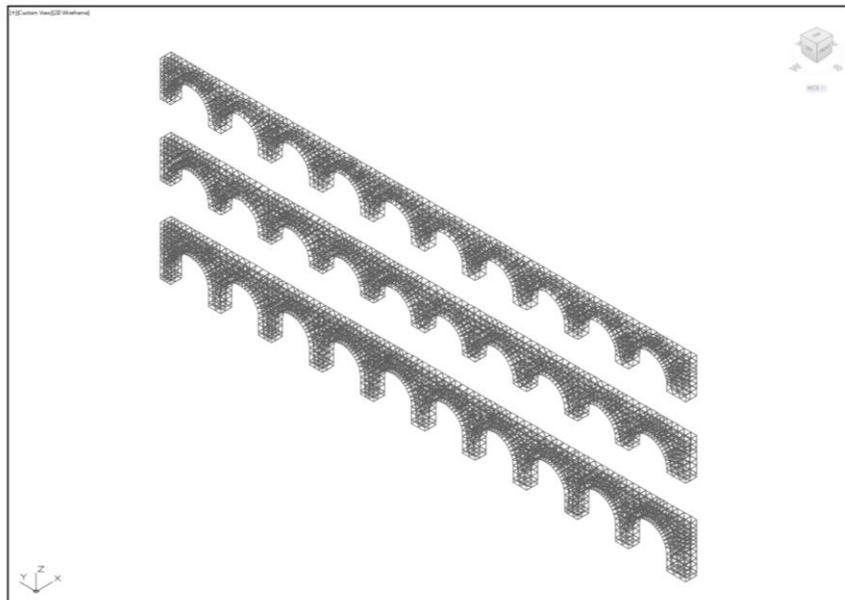


Figura 114. Sólidos de los arcos norte del Patio Principal, exportados al AUTOCAD. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

A continuación, en AUTOCAD los arcos fueron colocados en el lugar preciso en cada uno de los niveles. (Figuras 115 al 117).

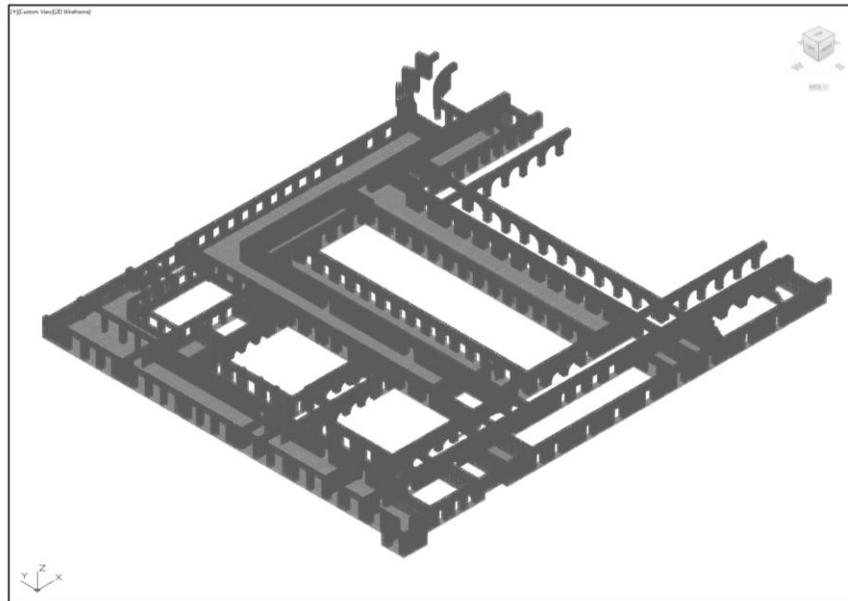


Figura 115. Primer piso ensamblado con los arcos correspondientes al nivel. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

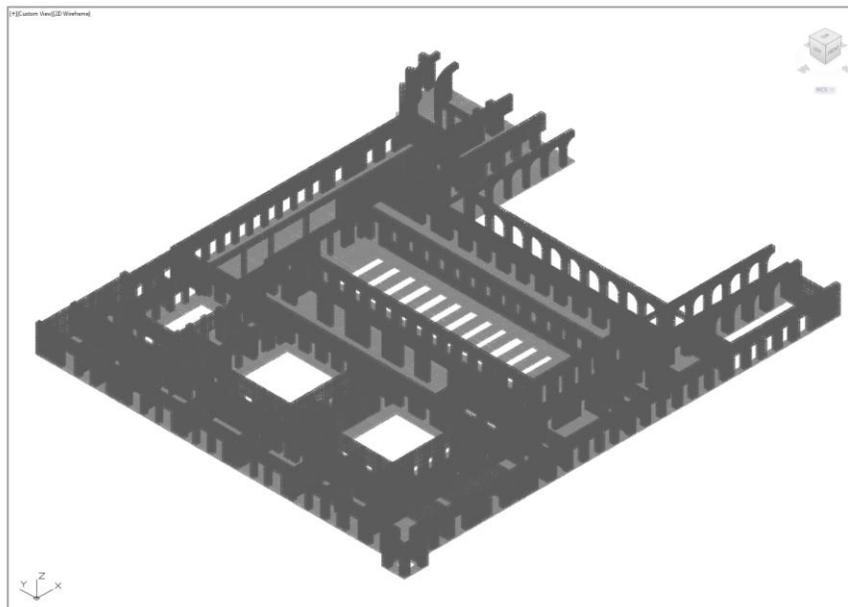


Figura 116. Segundo piso ensamblado con los arcos correspondientes al nivel. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

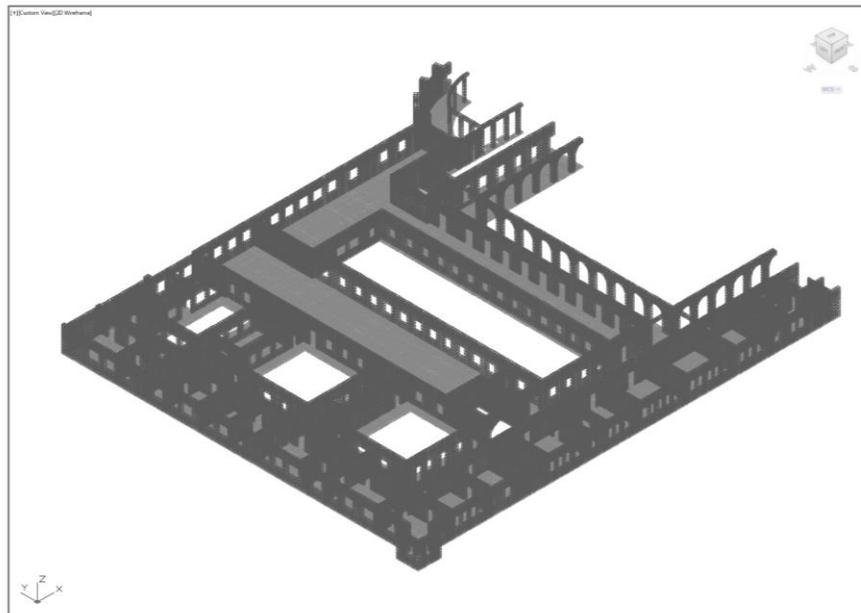


Figura 117. Tercer piso ensamblado con los arcos correspondientes al nivel. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

Para terminar el modelo, se ensamblaron todos los niveles, esto se realizó en AUTOCAD. (Figuras 118 al 120). Posteriormente se exportó por partes al SAP, para analizarlo y obtener resultados.

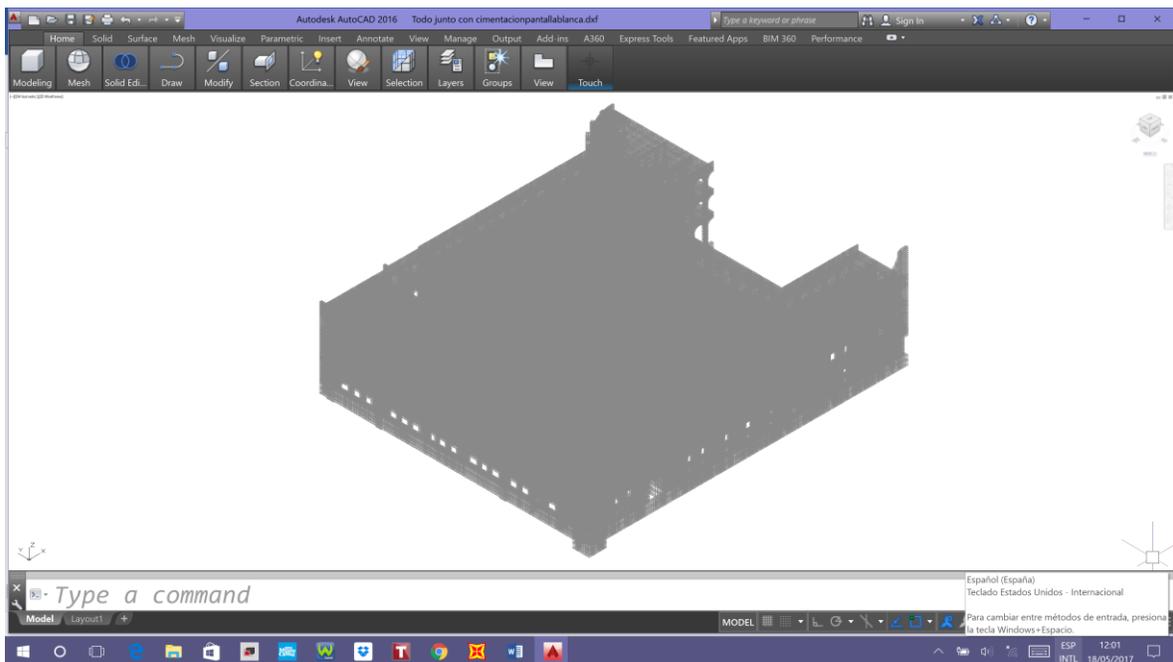


Figura 118. Sección del Palacio Nacional que se modelo. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

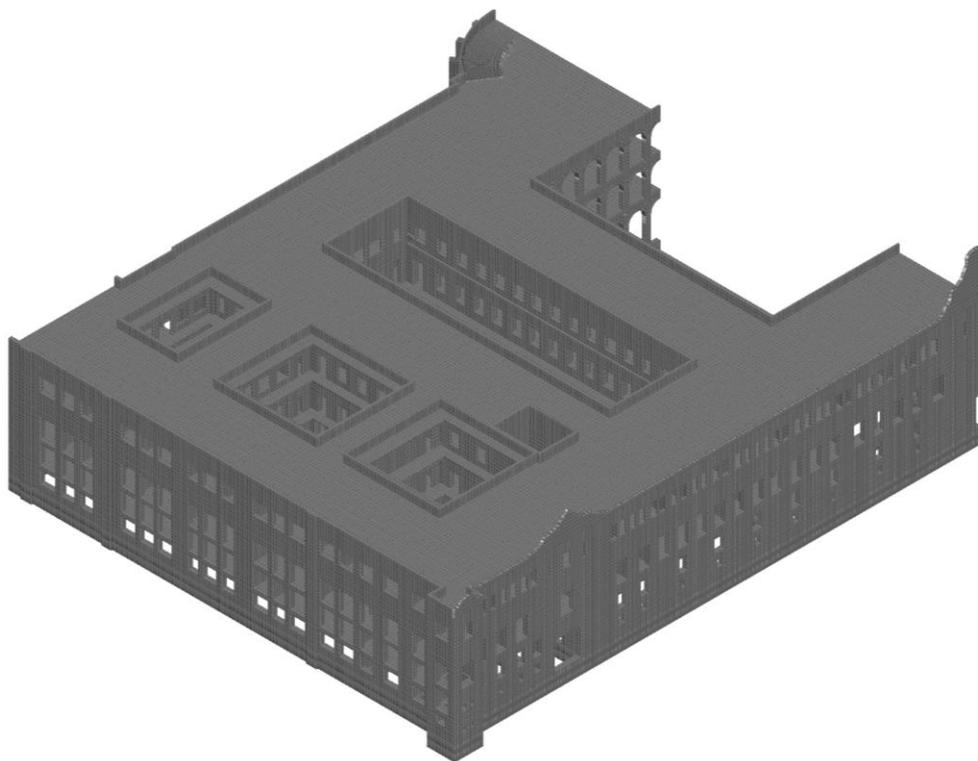


Figura 119. Vista realista del modelo ensamblado en AUTOCAD del Palacio Nacional en perspectiva. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

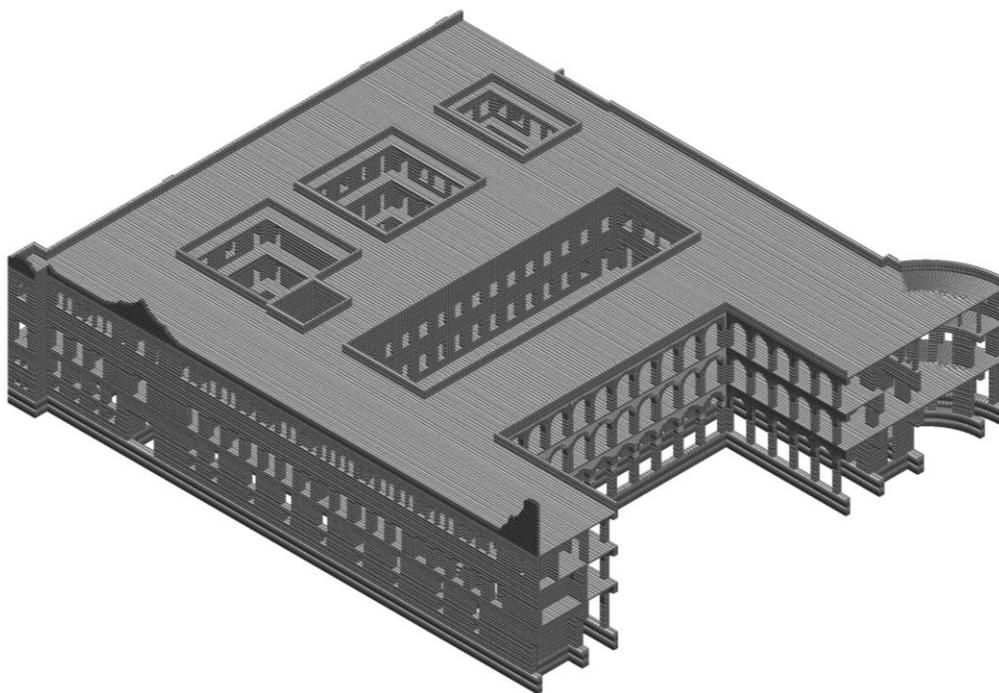


Figura 120. Vista realista del modelo ensamblado en AUTOCAD del Palacio Nacional en perspectiva. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

### 3.2.2 Modelo final.

De todo el modelo realizado, solo se pudo importar al SAP 2000 la esquina norponiente del Palacio Nacional, es decir el espacio que actualmente ocupa la Secretaría de Hacienda, esto aproximadamente representa el 45% de los sólidos.

A continuación, se muestra la sección del modelo del Palacio Nacional que se logró importar, con los materiales y las cargas consideradas, en esta figura, se presenta con los apoyos simples que representan el suelo firme.

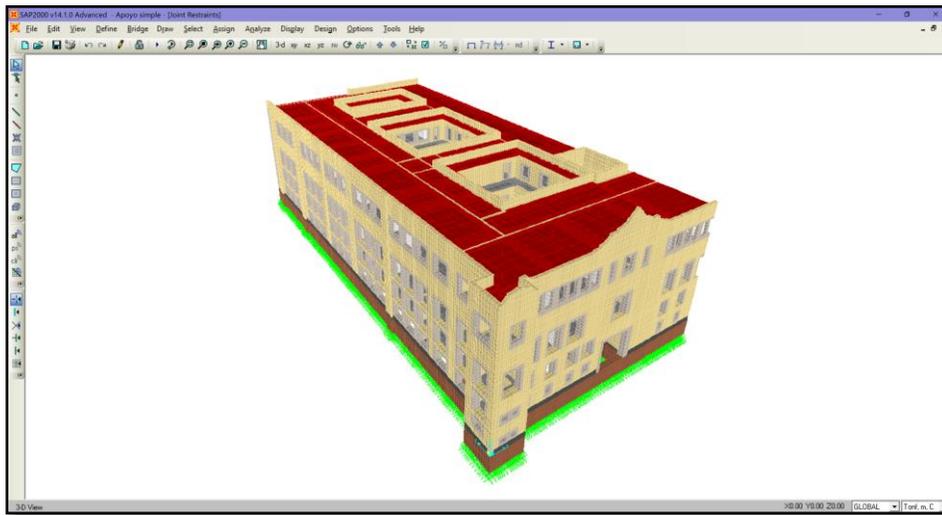


Fig. 121. Modelo de Elemento Finito de una sección del Palacio Nacional, donde se muestran las losas modificadas con menos sólidos. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

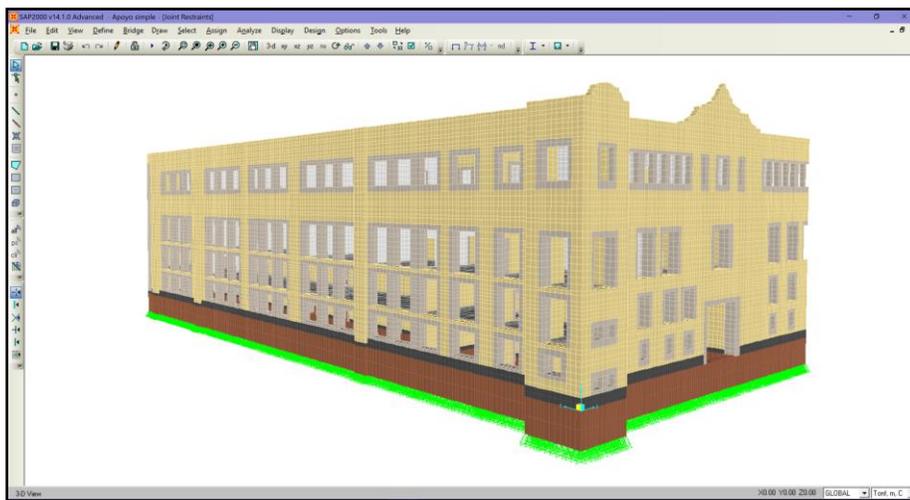


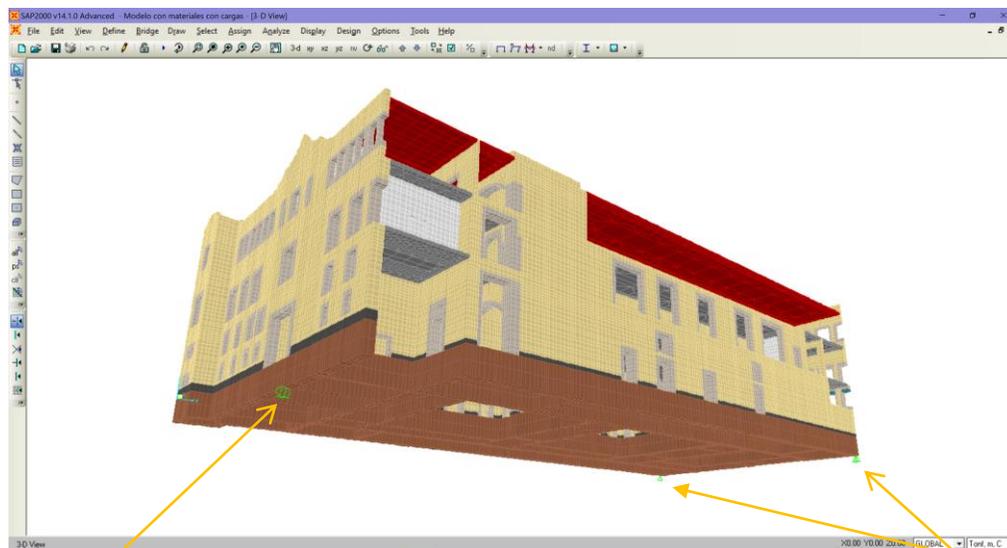
Figura 122. Modelo de Elemento Finito de una sección del Palacio Nacional. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

Como forma de comprobar que esta sección del modelo es representativa de la sección real del Palacio Nacional correspondiente, se realizó una bajada de cargas con el cual se obtuvo el peso de la sección analizada. En la tabla 4 se muestra un resumen de los pesos obtenidos por nivel, se tiene que tener presente que este dato obtenido es aproximado, ya que no se tiene información precisa del edificio, como se menciona en la siguiente sección.

**Tabla 4. Peso total de la sección analizada del Palacio Nacional. (Tabla obtenida por la autora).**

NIVEL	PESO
	ton
Planta Baja	3969.06
Primer Nivel	3585.44
Segundo Nivel	5441.55
Tercer Nivel	2654.31
Pretiles	398.50
Losas	4142.90
Cimentación	3381.64
<b>TOTAL</b>	<b>23573.40</b>

Por otro lado, se obtuvo el peso de la sección del modelo analizado, considerando únicamente tres apoyos (Figura 123), ya que, en los 3 análisis realizados, el programa no permite la visualización de las tablas con los resultados, debido, posiblemente, a la gran cantidad de sólidos que tiene el modelo. En este análisis, para la obtención de peso, se establecieron 2 apoyos simples y 1 apoyo restringido, únicamente, en la dirección z. En la tabla 5 se presentan las reacciones en los apoyos, junto con el peso del modelo, obtenido al sumar las reacciones verticales.



Apoyo con restricción vertical.

Apoyos simples.

Figura 123. Apoyos empleados en la obtención del peso del modelo de elemento finito del Palacio Nacional. (Imagen obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

**Tabla 5. Reacciones de los apoyos y obtención del peso del modelo de elemento finito del Palacio Nacional. (Tabla obtenida por la autora).**

<b>APOYO</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
	<b>ton</b>	<b>ton</b>	<b>ton</b>
1	2170.6	24.81	7822.682
2	-2170.6	-24.81	4203.988
3	0	0	12392.184
<b>TOTAL</b>			<b>24418.854</b>

Entre los datos obtenidos se tiene una diferencia de 845 toneladas, con lo que se concluye que el modelo realizado si es representativo de la sección analizada del edificio.

## 3.3 Consideraciones

### 3.3.1 Cargas

Siendo el primer modelo de elemento finito que se realiza del Palacio Nacional se intenta, en primera instancia, entender el comportamiento del edificio tomando en cuenta únicamente su peso propio, el cual, tiene una mayor relevancia con respecto a otras cargas debido al sistema estructural empleado y por ende a las dimensiones de sus elementos.

Por lo anteriormente mencionado, para el análisis del modelo no se consideró ni la carga viva, ni cargas accidentales, solo se tomó en cuenta la carga muerta.

El análisis con las diferentes combinaciones de carga que marca el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, se realizará posteriormente, al mejorar el modelo, disminuyendo la cantidad de sólidos y aumentando el área de estudio.

### 3.3.2 Materiales

Cabe recordar que el Palacio Nacional es un edificio histórico de grandes dimensiones que, en toda su historia, ha sufrido innumerables cambios, remodelaciones e intervenciones constructivas y arquitectónicas. Como consecuencia de este destruir, construir y reconstruir, no se tiene toda la información sobre la estructura del edificio, como lo siguiente:

- No se cuenta con Planos estructurales del edificio, solo se tienen Planos Arquitectónicos.
- Se sabe que el tercer piso tiene estructura de acero, sin embargo, no se posee ni la ubicación precisa, ni las secciones de los elementos estructurales de dicho piso.
- Tampoco se tiene conocimiento del material del que están elaborados sus muros, ya que, se tiene noticia que el ladrillo rojo recocido se utilizó desde la época colonial, desgraciadamente se ignora en qué muros fue empleado.
- Se tiene conocimiento que la gran mayoría de las losas tienen un sistema de viguetas y losacero, pero se desconoce con precisión las secciones y características que conforman cada losa.
- Tampoco se cuenta con información de las cimentaciones y recimentaciones precedentes al realizado entre los años de 1993 y 2005.

Por lo tanto, se tomaron algunas consideraciones para poder analizar el modelo, que son las siguientes:

- Todos los muros principales son de mampostería de tezontle, ya que, al parecer, gran parte de los muros fueron construidos con este sistema.
- Los muros divisorios son de mampostería de ladrillo rojo recocido.
- Las columnas y los arcos, así como las jambas y platabandas de los vanos son de cantera.
- Todas las losas se supusieron de losacero, con las mismas características, presentadas en la figura 124. Las vigas metálicas del sistema se consideraron con una sección W12x26, que equivale a una sección IR 305x38.7, se pudo observar y medir esta sección en unas oficinas de Conservaduría, cerca de la Estación Central del Sistema de Monitoreo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el Palacio Nacional, donde se retiró una parte del plafón al realizarse obras de adaptación y mantenimiento.

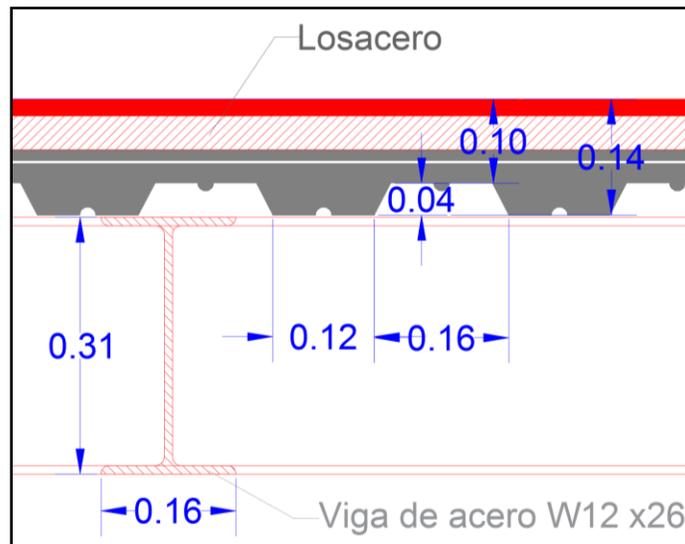


Figura 124. Esquema del sistema de losa considerado para el análisis del modelo, obtenido de un plano proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional, en el que se muestra un corte en la zona de Presidencia.

Para realizar el análisis fue necesario, obtener el peso equivalente a partir del peso real por metro cuadrado de las losas (tabas 6 y 7), donde se incrementó  $40 \text{ kg/m}^2$  de acuerdo a lo que se menciona en la sección 5.1.2 de la Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las

Edificaciones 2004. El peso equivalente se calculó dividiendo el peso real por metro cuadrado entre la altura de la viga equivalente empelada en el modelo.

<b>TABLA 6. Peso del entrepiso por metro cuadrado. (Obtenida por la autora).</b>				
<b>Peso real.</b>				<b>Peso equivalente</b>
	Altura	Peso volumétrico	Peso por metro cuadrado	Peso volumétrico
	m	ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>2</sup>	ton/m <sup>3</sup>
Losa acero	0.12	2.4	0.288	
Piso (marmol)	0.03	2.85	0.0855	
Instalaciones			0.05	
Viga metálica			0.038	
NTC- Concreto			0.04	
		<b>TOTAL=</b>	0.502	<b>1.67</b>

<b>TABLA 7. Peso del piso de azotea por metro cuadrado. (Obtenida por la autora).</b>				
<b>Peso real.</b>				<b>Peso equivalente</b>
	Altura	Peso volumétrico	Peso por metro cuadrado	Peso volumétrico
	m	ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>2</sup>	ton/m <sup>3</sup>
Losa acero	0.12	2.4	0.288	
Relleno	0.15	1.25	0.1875	
Impermeabilización			0.02	
Instalaciones			0.05	
Viga metálica			0.038	
NTC- Concreto			0.04	
		<b>TOTAL=</b>	0.624	<b>2.08</b>

También fue necesario emplear el método de viga equivalente para la obtención de un módulo de elasticidad que representara, en el modelo, el sistema de piso considerado. El módulo depende del claro de la losa, por lo que se vio en la necesidad de obtener varios módulos representativos, ya que las losas en el Palacio tienen diferente claro, por lo que se requirió generalizar. A continuación, se muestran la tabla 8 en la que se presentan los módulos empleados en el modelo y la tabla 9, donde se presenta la forma en que se obtuvo uno de los módulos, mientras en la figura 125, se observa esquemáticamente el proceso que se realiza para obtener los módulos de reacción.

**Tabla 8. Módulo de elasticidad equivalente empelado en las losas del modelo.**  
(Tabla obtenida por la autora a partir del trabajo realizado).

Claro	Módulo de elasticidad equivalente
m	kg/cm <sup>2</sup>
1.8	345,419.00
3.89	599,400.20
5.12	748,872.00
5.38	780,467.70
5.83	835,152.50
6.61	929,939.50
6.9	965,180.80
7.29	1,012,574.30
8.97	1,215,731.00
14.79	1,584,942.00

**Tabla 9. Obtención del módulo de elasticidad equivalente de una losa con un claro de 8.97m.** (Tabla elaborada por la autora).

DATOS					
<b>ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PISO</b>					
Viga de acero W12X26 (IR305X38.7)			Losacero		
Peso=	38.7 kg/m		h=	12 cm	(altura promedio de la losacero)
Area=	49.4 cm <sup>2</sup>		b=	150 cm	(separación entre vigas)
I <sub>v</sub> =	8491 cm <sup>4</sup>		claro=	897 cm	(claro de la losa)
d=	31 cm				
<b>MATERIALES</b>					
Concreto			Acero		
f <sub>c</sub> =	200 kg/cm <sup>2</sup>		E <sub>s</sub> =	2100000 kg/cm <sup>2</sup>	(Para convertir el concreto en acero)
E <sub>c</sub> =	197,989.90 kg/cm <sup>2</sup>				n=E <sub>c</sub> /E <sub>s</sub> = 0.0942809
<b>OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD</b>					
<b>Obtención del ancho efectivo y área efectiva de la losacero</b>					
b <sub>e</sub> =	112.125 cm		Si claro/8 < b entonces b <sub>e</sub> =claro/8, sino es así entonces b <sub>e</sub> =b.		
A <sub>v</sub> =b <sub>e</sub> *h	1345.5 cm <sup>2</sup>				
<b>Área y ancho equivalentes</b>					
Convirtiendo el área efectiva de la losacero en acero					
A <sub>eq</sub> =A <sub>v</sub> *n	126.8549565 cm <sup>2</sup>				
b <sub>eq</sub> =A <sub>eq</sub> /h	10.57124638 cm				
<b>Obtención de la inercia de la Viga equivalente</b>					
I <sub>req</sub> =	195546.045 cm <sup>4</sup>		I <sub>req</sub> =(b <sub>eq</sub> *h <sup>3</sup> )/12+(A <sub>eq</sub> *(d+(h/2)) <sup>2</sup> )+I <sub>v</sub> +(Area*(d/2) <sup>2</sup> )		
<b>Losa equivalente en el modelo</b>					
Datos del modelo			Modulo de elasticidad		
h en el modelo(cm)	b(cm)	I <sub>mod</sub> (cm <sup>4</sup> )	E <sub>eqmod</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	E <sub>eqmod</sub> (ton/m <sup>2</sup> )	E <sub>eqmod</sub> =(E <sub>s</sub> *I <sub>req</sub> )/I <sub>mod</sub>
30	150	337500	1216730.947	12167309.47	

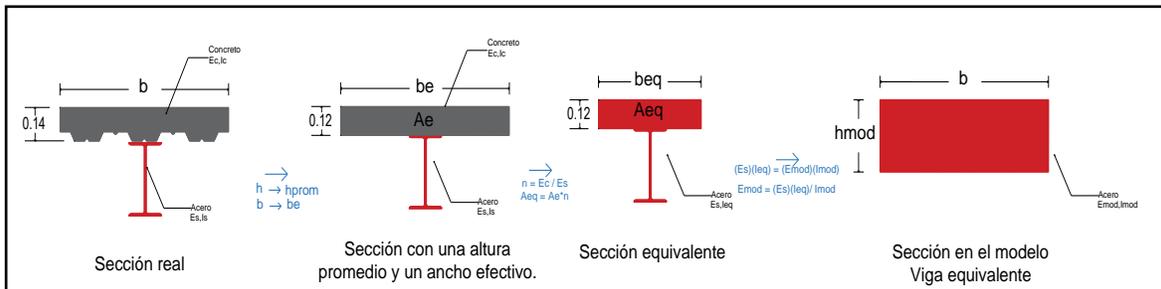


Figura 125. Representación esquemática para la obtención de la viga equivalente. (Imagen elaborada por la autora).

- En los muros donde se encuentran inmersas vigas de acero (Figura 126) se obtuvo un módulo de elasticidad equivalente de las vigas ya que en el modelo de elemento finito las vigas tienen una sección rectangular. El módulo de elasticidad se obtuvo con la siguiente expresión:

$$E_{MODELO} = \frac{E_{REAL DE LA VIGA} * I_{REAL DE LA VIGA}}{I_{MODELO}}$$



Figura 126. Se puede observar las vigas de acero W 12x16 en las ventanas que dan al Jardín de la Emperatriz en el Palacio Nacional. (Foto tomada por la autora).

- En cuanto a la cimentación, se consideró de tipo corrida, de mampostería de tezontle, con 3 metros de profundidad, el ancho de la cimentación varía dependiendo de las dimensiones del elemento estructural que soporta.

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas de los materiales empleados (Tabla 10, Gómez, 2016).

*Tabla 10. Materiales utilizados para el análisis del modelo de elemento finito del Palacio Nacional. (Gómez, 2016).*

Material	Peso volumétrico	Resistencia a Compresión	Resistencia a Tensión	Módulo de elasticidad
	ton/m <sup>3</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Cantera	2.0	65.0	7.0	30,000.00
Mampostería de tezontle	1.6	30.0	3.0	20,000.00
Mampostería de tabique rojo recocido	1.3	15.0	1.0	5,250.00

### 3.3.3 Características del subsuelo.

Como se ha observado a lo largo del trabajo, los hundimientos diferenciales se han presentado en el Palacio Nacional desde la época colonial, provocado varios problemas, como los desplomes y las grietas. Esto se ha acentuado a través del tiempo a pesar de los esfuerzos por minimizar estos hundimientos.

Ante esta situación, se ha planteado la necesidad de conocer el comportamiento estructural del Palacio Nacional, en función del tipo de suelo, por lo que, se realizaron tres análisis, considerando:

1. Suelo firme.

En el primer análisis se representa este tipo de suelo como apoyo simple, restringiendo los nodos de los sólidos presentes en toda la planta de la cimentación. Con esta clase de apoyo se impiden los movimientos en las direcciones de los ejes X, Y y Z, permitiéndose los giros alrededor de dichos ejes.

2. Suelo uniformemente compresible.

En el segundo análisis se representa este tipo de suelo con un módulo de reacción constante a compresión, en la cara inferior de los sólidos presentes en la planta de la cimentación, simulando un suelo que se consolida de forma uniforme. Se decidió que el módulo de reacción tuviera un valor de  $2.0 \text{ kg/cm}^3$ .

3. Suelo con diferentes grados de compresibilidad.

En este punto, es importante explicar brevemente que es el módulo de reacción. De acuerdo a *Melli, 2000*, uno de los procedimientos para el análisis de cimentaciones continuas sobre suelos compresibles se basa, en la suposición de una relación lineal esfuerzo-deformación del suelo, es decir, la presión con que reacciona el suelo ante la carga transmitida por la cimentación, es proporcional al hundimiento que ésta presenta en el punto en cuestión, estableciéndose la relación:

$$p = k_s s$$

Donde

$p$ = presión ejercida por la cimentación (carga por unidad de área)

$s$ = es el asentamiento en el punto considerado

$k_s$ = es el módulo de reacción (fuerza entre longitud al cubo)

Por lo tanto, utilizar módulos de reacción es una forma en que el suelo se sustituye por una cama de resortes que actúan independientemente unos de otros. (Figura 127)

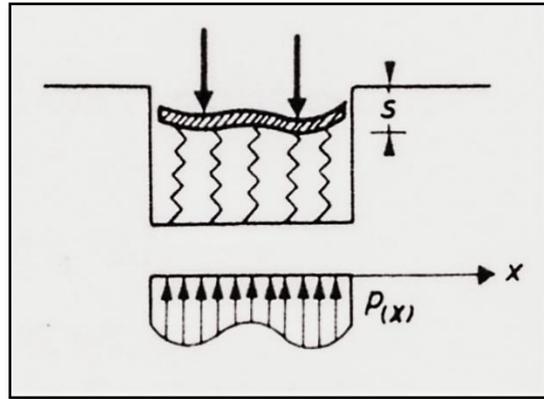


Figura 127. Modelo del suelo, utilizando el módulo de reacción. (<https://es.slideshare.net>, presentación "Diseño de cimentaciones superficiales").

El módulo de reacción se suele determinar con una prueba de placa (Figura 128), el cual generalmente resulta no lineal, teniéndose que determinar una rigidez secante para considerarla como un módulo de reacción unitario (para un área cargada de un pie cuadrado). Posteriormente a través de expresiones propuestas por Terzaghi, y que se pueden consultar en *Melli, 2000*, se determina el módulo de reacción aplicable a un área cuadrada cualquiera. El mismo Terzaghi, propuso valores del módulo de reacción (Tabla 11), los cuales deben considerarse aproximados ya que las propiedades elásticas de los suelos tienen grandes variaciones debido un gran número de factores, como ejemplo, la rigidez del suelo, el cual, varía considerablemente dependiendo del tiempo en que actúan las cargas.

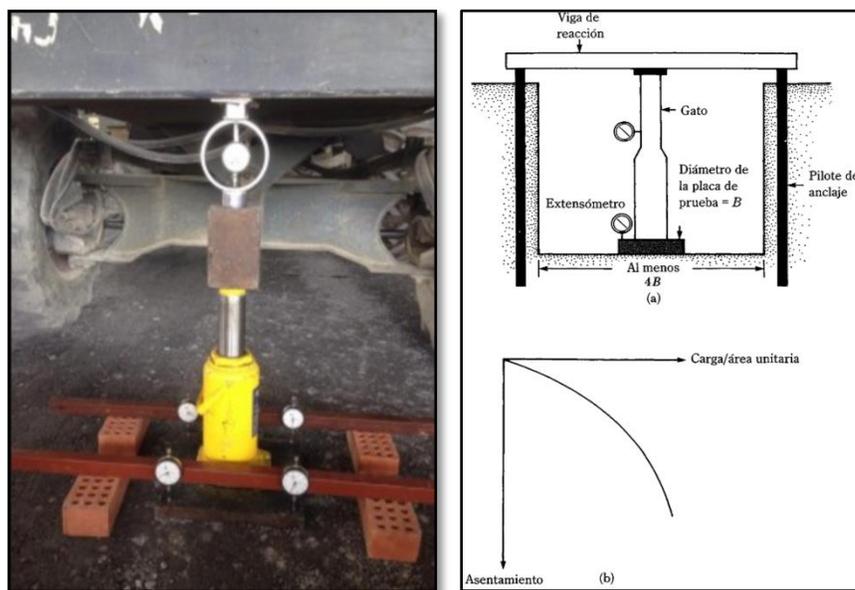
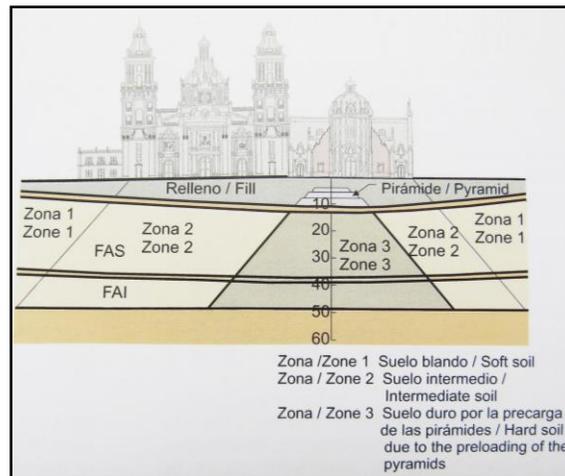


Figura 128. a) Prueba de placa de carga (<http://www.apico.com.mx/prueba-de-placa/>) y b) curva carga asentamiento. (<http://www.elconstructorcivil.com>, "Cimentaciones, prueba de carga de campo").

Ante la falta de pruebas de placa en la zona de estudio se decidió tomar, valores supuestos entre los propuestos por Terzaghi, con la finalidad de considerar la variabilidad en la capacidad de compresión del subsuelo.

Tipo de suelo	$E_s$		$ks_1$		
	kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>3</sup>		
Suelo fangoso	11	a 33	0.5	a	1.5
Arena seca o húmeda, suelta (Ns 3 a 9)	0.16H	a 0.48H	1.2	a	3.6
Arena seca o húmeda, media (Ns 9 a 30)	0.48H	a 1.60H	3.6	a	12
Arena seca o húmeda, densa (Ns 30 a 50)	1.60H	a 3.20H	12	a	24
Grava fina con arena fina	1.07H	a 1.33H	8	a	10
Grava media con arena fina	1.33H	a 1.60H	10	a	12
Grava media con arena gruesa	1.60H	a 2.00H	12	a	15
Grava gruesa con arena gruesa	2.00H	a 2.66H	15	a	20
Grava gruesa firmemente estratificada	2.66H	a 5.32H	20	a	40
Arcilla blanda (qu 0.25 a 0.50 kg/cm2)	15	a 30	0.65	a	1.3
Arcilla media (qu 0.5 a 2.00 kg/cm2)	30	a 90	1.3	a	4
Arcilla compacta (qu 2.00 a 4.00 kg/cm2)	90	a 180	4	a	8
Arcilla margosa dura (qu 4.00 a 10.00 kg/cm2)	180	a 480	8	a	21
Marga arenosa rígida	481	a 1000	21	a	44
Arena de miga y tosco	501	a 2500	22	a	110
Marga	501	a 50000	22	a	2200
Caliza margosa alterada	3501	a 5000	150	a	220
Caliza sana	20000	a 800000	885	a	36000
Granito meteorizado	700	a 200000	30	a	9000
Granito sano	40000	a 800000	1700	a	3600

Es así como, en el tercer análisis se representa, de forma aproximada, el suelo en el que está realmente desplantado el edificio, tomando en cuenta que existen diferentes grados de preconsolidación del subsuelo debido a la presencia de las estructuras prehispánicas (Figura 129). Para esto fue necesario asignar un módulo de reacción a compresión en la cara inferior de los sólidos presentes en la planta de la cimentación, que varían de una zona a otra, de acuerdo a la figura 132, en el que se supusieron curvas de igual rigidez del suelo. Este plano, como se explica a continuación, fue elaborado a partir de la localización de los edificios prehispánicos y de sus etapas constructivas, así como de los perfiles topográficos de las banquetas.



*Figura 129. Corte estratigráfico ilustrativo en la Catedral Metropolitana y el Sagrario, en el que se observa los diferentes grados de preconsolidación del subsuelo, debido a la presencia de las estructuras prehispánicas. (Santoyo y Ovando, 2008).*

Para la obtención de los módulos de reacción se asignó un valor máximo de  $7.0 \text{ kg/cm}^3$ , correspondiente a una arcilla compacta, en la zona donde se ubica el Basamento A y de  $7.5 \text{ kg/cm}^3$ , entre el Basamento A y el Patio Hundido, en la zona del Segundo Patio Mariano, esto a partir de la Evaluación Geotécnica realizada en 2007 donde se muestra que estas zonas presentan una menor velocidad de hundimiento con respecto a otras zonas del área en estudio, además de ser los Basamentos prehispánicos con mayores etapas constructivas, para ser precisos 4 y 3 respectivamente.

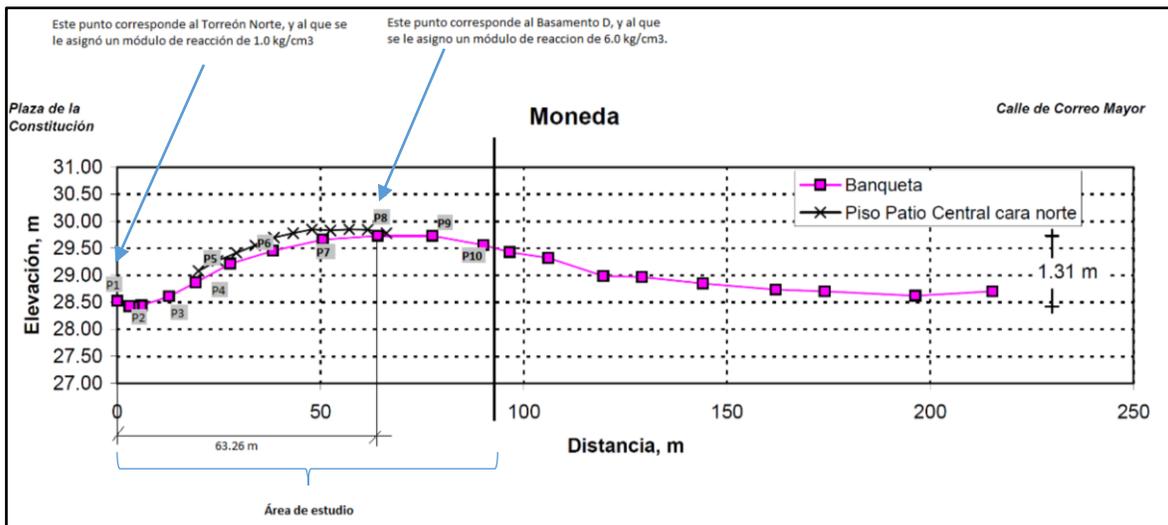
Por otro lado, siendo el Torreón Norte el sitio de mayor velocidad de hundimiento en el entorno, antes de la recimentación realizada entre 1993 y 2005, se consideró un módulo de reacción mínimo de  $1.00 \text{ kg/cm}^3$ , correspondiente a una arcilla blanda.

En cuanto a los demás basamentos prehispánicos se tomaron los siguientes valores, en la zona del Basamento D (estructura con 2 etapas constructivas, que correspondía al templo de Tezcatlipoca) se le asignó un módulo de reacción de  $6.0 \text{ kg/cm}^3$  y de  $5.64 \text{ kg/cm}^3$  en el Basamento C (estructura con 2 etapas constructivas).

Mientras, las demás zonas, los módulos de reacción varían de acuerdo al nivel topográfico de las banquetas, obtenidas por interpolación (Tabla 12), y de acuerdo a las figuras 131 y 132. Estos niveles son representativos del hundimiento que se ha generado en el transcurso del tiempo en las fachadas norte del Palacio, sin embargo, los puntos P1 y P2, no corresponden a lo que sucede en el Torreón Norte, ya que el nivel de la banqueta está por encima del nivel del Torreón, por lo que, al obtener los módulos de reacción por interpolación, se decidió tomar sus elevaciones con un valor de 28.3m y 28.5m respectivamente. Lo mismo se realizó con la fachada principal que da a la Plaza de la Constitución, en la que las elevaciones en los puntos P11, P12 y P13, fueron modificados como se muestra en la tabla 12.

**Tabla 12. Módulos de reacción, obtenidos por interpolación, a partir de los niveles de las banquetas. Tabla obtenida a partir del Perfiles topográficos de la banquetas perimetrales a Palacio Nacional, diciembre 2007. (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007) y del trabajo realizado por la autora.**

Punto	Elevación m	Modulo de reacción kg/cm <sup>3</sup>
P1	28.3	1
P2	28.5	1.71
P3	28.6	2.07
P4	28.9	3.14
P5	29.25	4.39
P6	29.45	5.11
P7	29.6	5.64
P8	29.7	6
P9	29.6	5.64
P10	29.55	5.46
P11	28.3	1
P12	28.4	1.36
P13	28.5	1.71
P14	28.55	1.89
P15	28.6	2.07



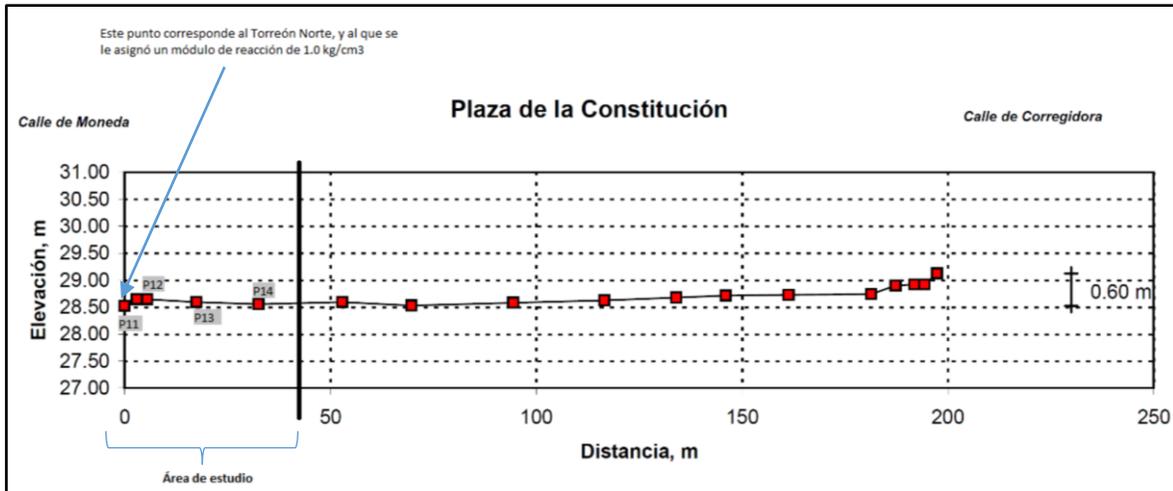


Figura 130 y 131. Perfiles topográficos de la banquetas perimetrales a Palacio Nacional, diciembre 2007, donde se muestran los puntos que fueron empelados para la obtención de los módulos de reacción. Imagen obtenida a partir del Perfiles topográficos de la banquetas perimetrales a Palacio Nacional, diciembre 2007. (TGC, Geotecnia S.A de C.V. ,2007) y modificados por la autora al realizar su trabajo.

Posteriormente a partir de los módulos de reacción obtenidos y mostrados en la tabla 12, se realizó de forma aproximada, tomando en cuenta las curvas de igual asentamiento (Figura 89) así como lo que se puede observar en el edificio, los trazos de las curvas de igual rigidez mostrados en la figura 132, representando a un suelo con diferentes grados de compresibilidad. Posteriormente estos datos fueron ingresados en el modelo para realizar el tercer análisis.

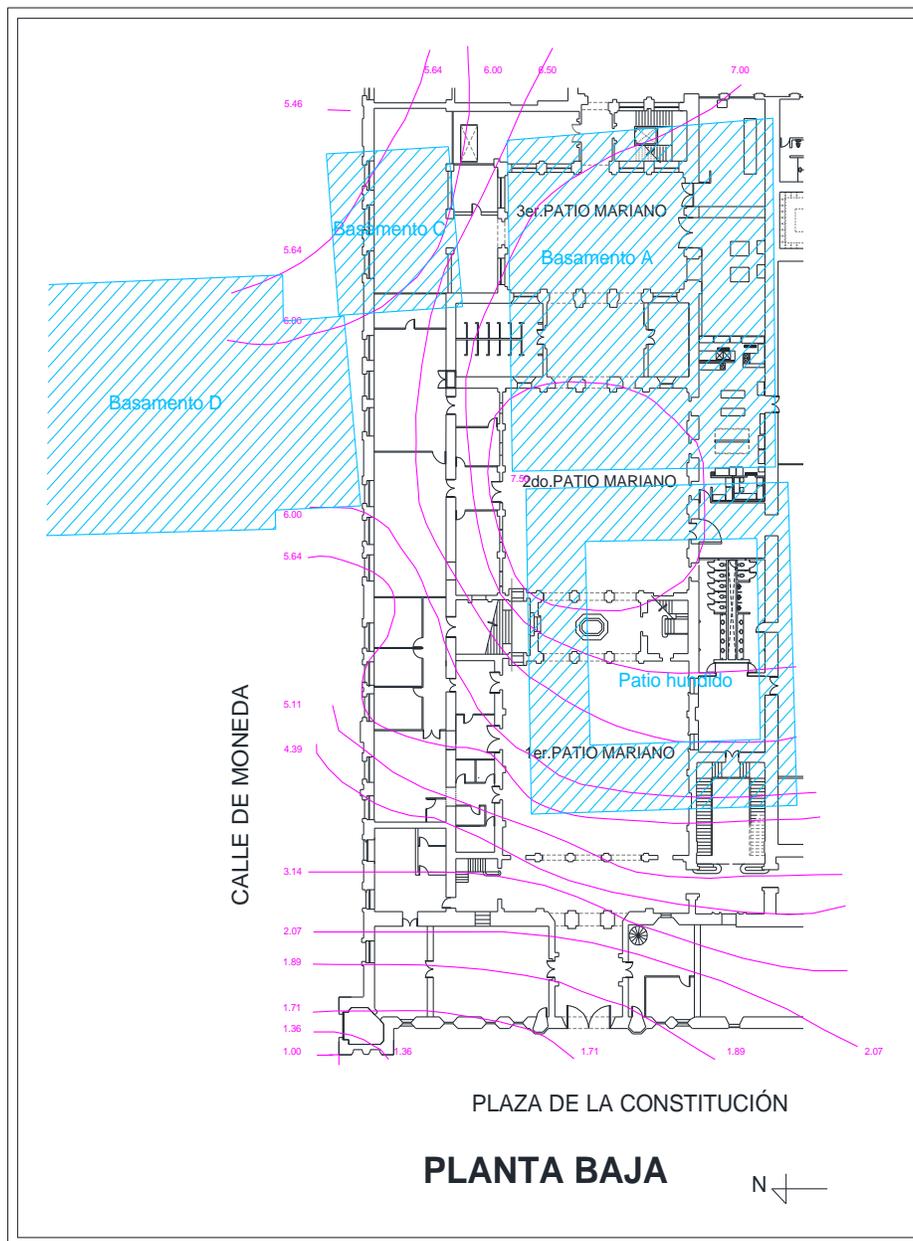


Figura 132. Curvas de igual rigidez del suelo, las cuales se obtuvieron a partir de valores supuestos en función de la presencia de los restos prehispánicos y de los perfiles topográficos. Los valores mostrados en color magenta son los valores de los módulos de reacción del suelo, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Las zonas achuradas corresponden a la ubicación de los basamentos prehispánicos, descubiertos por el INAH. (El plano fue proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional, las ubicaciones de las estructuras prehispánicas se obtuvieron a partir de la tesis de Islas y Barrera del 2010).

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta el análisis de la estructura, comparando los esfuerzos debidos al efecto del peso propio obtenidos del modelo de elemento finito, con los daños observados en la estructura real del edificio, con la finalidad de comprender el comportamiento estructural del Palacio Nacional.

Para esto es necesario, en primer lugar, plantear el comportamiento que se observa en el Palacio a partir de los daños presentes en el edificio, en segundo lugar, se compararán y analizarán los resultados de los tres diferentes tipos de apoyo, por último, se confrontarán los resultados del suelo de diferentes grados de compresibilidad con el comportamiento del Palacio, tomando en cuenta los datos obtenidos en la Evaluación Geotécnica del 2007.

### 4.1 Interpretación del comportamiento estructural a partir de los daños.

Para este análisis se realizaron las figuras 133 y 134, en la que se muestra la ubicación, y la dirección o pendiente de las grietas, que fueron registradas en la sección 3.2.2.

En la figura 133 se pueden observar las grietas, presentes en las fachadas del Palacio Nacional. Las grietas de color verde son aquellas que son visibles en el exterior, mientras las de color magenta se encuentran localizadas dentro del inmueble.

En la figura 134 se muestra la planta baja con las ubicaciones y pendientes de las grietas localizadas en los muros al interior del inmueble, al no contar con cortes de la sección analizada, se decidió representarlos todos juntos en una sola planta, lo que ayudará a tener una mejor comprensión del comportamiento del edificio. El criterio que se utilizó fue el siguiente, los muros con dirección norte-sur, siempre se analizarían en dirección oeste-este, es decir, mirando al este desde la Plaza de la Constitución, es así como las grietas representadas con el símbolo “/” en el plano, representan una pendiente positiva, mientras las grietas con el símbolo “\”, presentan una pendiente negativa. Este mismo criterio se utilizó en los muros con dirección este-oeste, con la diferencia que fueron analizados en dirección norte-sur, mirando al sur desde la calle de Moneda. En esta figura los círculos representan grietas verticales. Hay grietas que son horizontales y también se encuentran señalados en el plano.

Los colores en la figura 134 corresponden a lo siguiente: *azul- grietas en muros de la planta baja con dirección norte-sur, cian- grietas en muros de la planta baja con dirección este-oeste, magenta- grietas en muros del primer piso con dirección norte-sur, anaranjado- grietas en muros del primer piso con dirección este-oeste, verde- grietas en muros del segundo piso con dirección norte-sur.*

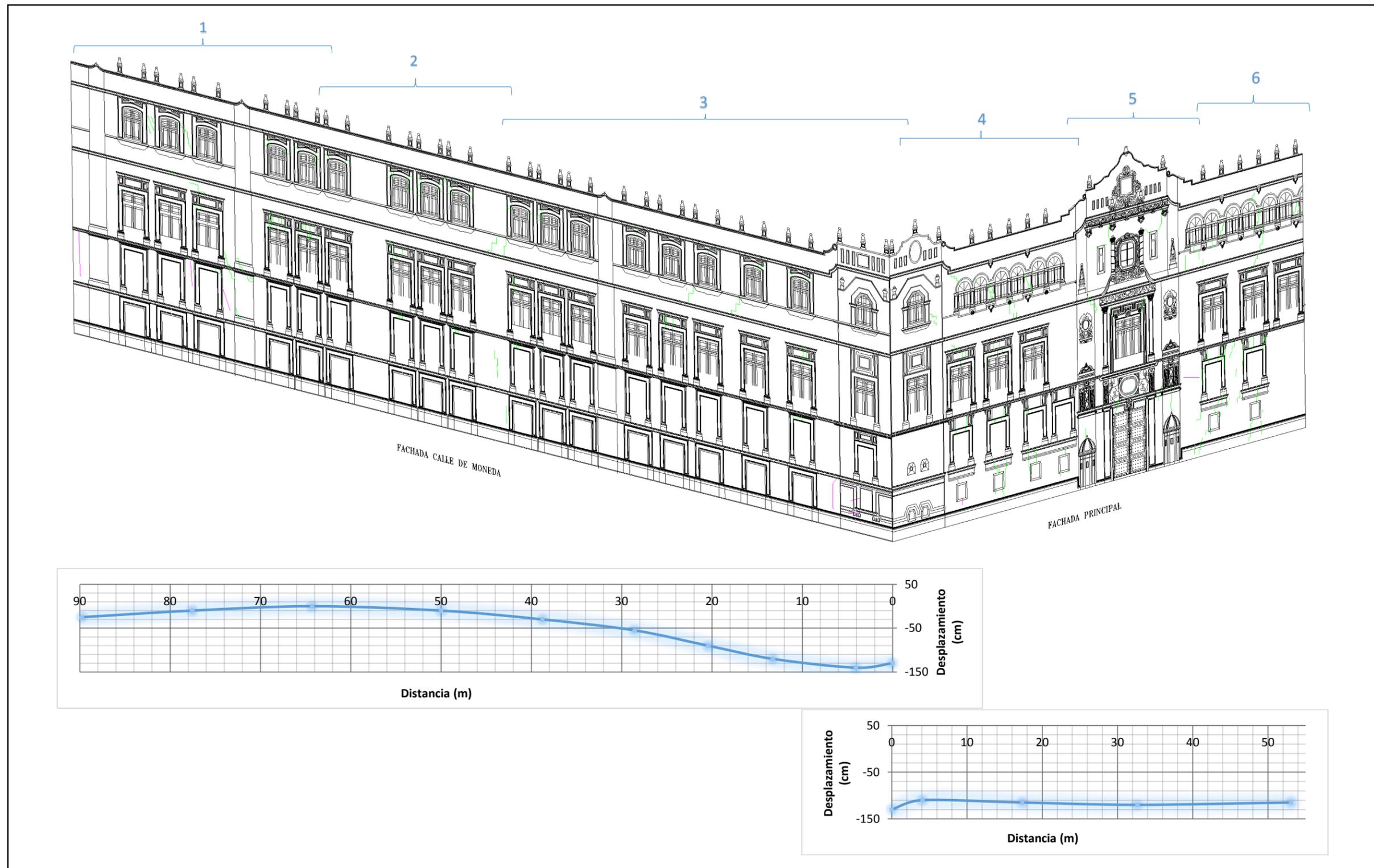


Figura 133. Grietas presentes en las fachadas de la sección analizada del Palacio Nacional. Las grietas de color verde se encuentran al exterior del inmueble, las grietas en color magenta son visibles en el interior. También se presentan los Perfiles topográficos de la banquetas perimetrales a Palacio Nacional, Evaluación Geotécnica, diciembre 2007. (Las fachadas fueron proporcionadas por la DGSMP y modificados por la autora para el presente trabajo).

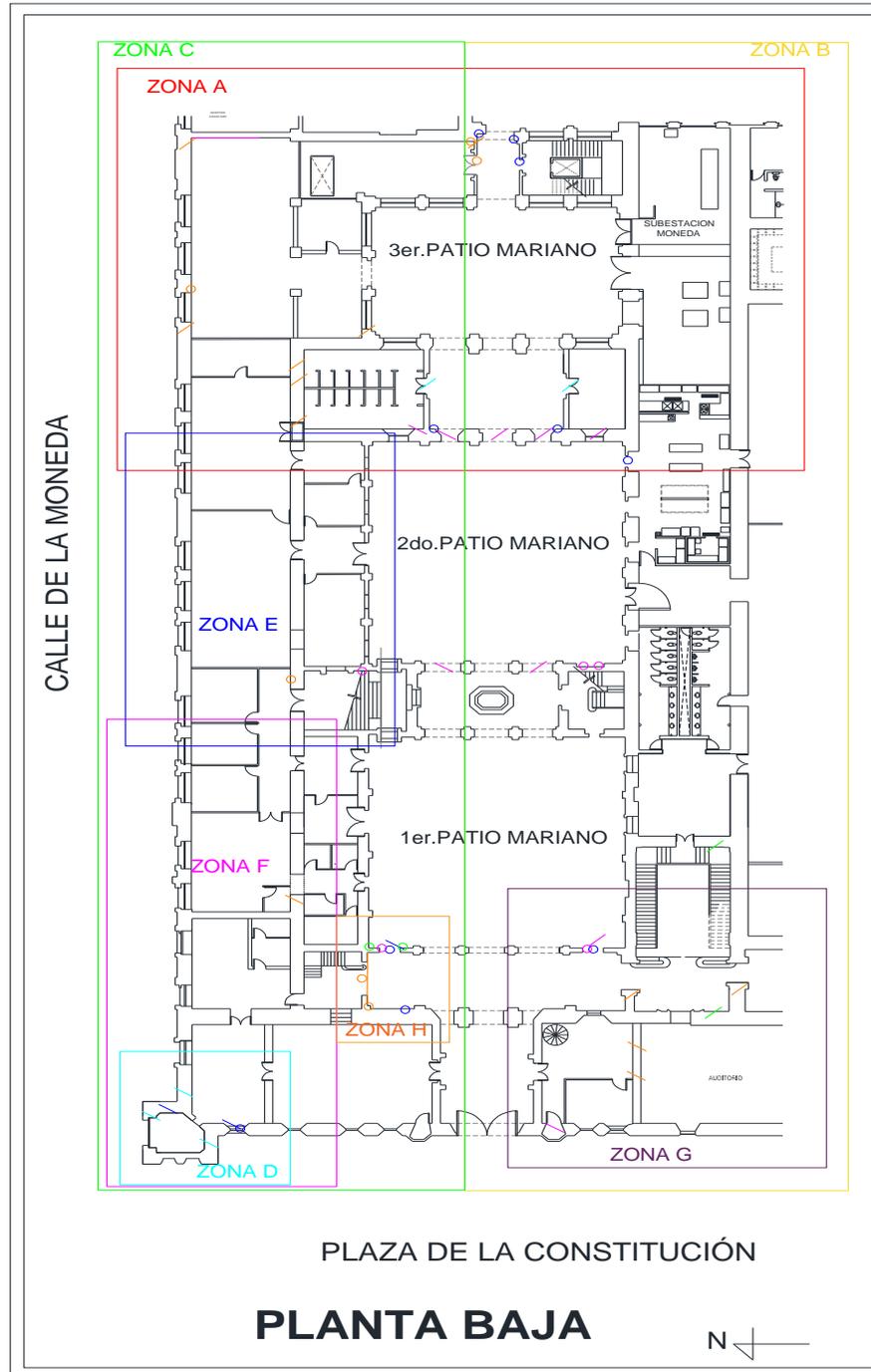


Figura 134. Grietas al interior de inmueble en la sección analizada. Los colores corresponden a: azul- grietas en muros de la planta baja con dirección norte-sur, cian- grietas en muros de la planta baja con dirección este-oeste, magenta- grietas en muros del primer piso con dirección norte-sur, anaranjado- grietas en muros del primer piso con dirección este-oeste, verde- grietas en muros del segundo piso con dirección norte-sur. (El plano fue proporcionado por la Conservaduría del Palacio Nacional y modificado por la autora, para el presente trabajo).

Con estas figuras es posible percatarse del movimiento que ha sufrido el edificio a través del tiempo, el cual podemos describir como sigue:

- 1) La zona 1 de la figura 133, en la fachada sobre la calle de Moneda, presenta grietas a tensión con una “pendiente negativa” debidas al hundimiento en dirección este, mientras, la zona 3 de la misma figura, exhibe grietas de tensión con “pendiente positiva”, indicando que esta sección de la fachada presenta un hundimiento en dirección oeste.
- 2) La zona 4 de la figura 133, en la fachada Principal, muestra grietas a tensión con “pendiente negativa” a consecuencia del hundimiento en dirección norte, en cambio en la zona 6, se observan grietas por tensión con “pendiente positiva”, las cuales son de tensión a causa del hundimiento presentado en dirección sur de esta sección.
- 3) Mientras las zonas 2 y 5 de la figura 133 manifiestan grietas que tienden a ser verticales. Mostrando que estas zonas quedan por arriba de lo que se encuentra a su alrededor, lo que implica que, su velocidad de hundimiento es menor con respecto a su entorno.
- 4) En los muros que tienen una dirección este a oeste de la figura 134, la Zona A, presenta grietas por tensión con “pendiente negativa”, esto revela como el Tercer Patio Mariano junto con la parte del edificio adyacente, se están asentando hacia el este, por otro lado, las grietas con “pendiente positiva” en la zona F de la misma figura, también con grietas por tensión, indican que se está presentando un hundimiento de esa sección hacia el oeste. Lo cual coincide con lo expuesto en el punto 1, al observar las fachadas.
- 5) La zona G de la figura 134, muestra 2 grietas en el muro con dirección este a oeste, las grietas presentan una “pendiente positiva”, lo que sugiere que la fachada principal se está hundiendo en dirección oeste, causando el desplome del muro en dicha dirección.
- 6) Analizando los muros en dirección norte-sur, se puede observar que en la zona B, las grietas tienden a ser de tensión con “pendiente positiva”, lo cual alude a un hundimiento hacia el sur de esta zona, por otro lado, en la zona C se presentan grietas a tensión con “pendiente negativa”, por lo que esta zona tiende a inclinarse hacia el norte, lo que ha provocado el desplome de la fachada de la calle de Moneda, en esa dirección.
- 7) La zona E de la figura 134, muestra 2 grietas verticales, lo cual corrobora lo mencionado sobre la zona 2 en el punto 2, en que esta zona tiende a tener una menor velocidad de asentamiento que su entorno.

- 8) La zona D, que corresponde al Torreón Norte, se puede observar claramente como las grietas muestran una inclinación hacia el noroeste, lo cual concuerda con los registros históricos, previos a la recimentación de 1993, en el que la esquina norponiente del Palacio Nacional, era el sitio de mayor velocidad de hundimiento en el entorno.
- 9) Por último, la Zona H presenta una mayor cantidad de agrietamiento, además de la tendencia de estas a ser verticales.

Con estos puntos se intenta dar una descripción general del comportamiento de la estructura, a partir de la configuración de agrietamiento que presenta actualmente el inmueble.

## **4.2 Análisis de los resultados.**

En este apartado, se lleva a cabo un análisis general de los resultados obtenidos a partir de las 3 condiciones de apoyo, recordando que en el primer caso se consideró un suelo firme, mientras el segundo se tomó en cuenta un suelo uniformemente compresible y, en el tercero, un suelo con diferentes grados de compresibilidad, con el cual se intentó representar el subsuelo presente en la zona de estudio.

Posteriormente, se mostrarán las zonas al interior del inmueble donde se concentran los daños, esto es, las que presentan un mayor número de grietas, así mismo, se compararán los esfuerzos máximos obtenidos en los modelos con la resistencia de los materiales empleados.

### **4.2.1. Análisis general con las tres condiciones de apoyo.**

En este análisis es importante aclarar la nomenclatura utilizada de acuerdo a la dirección de los ejes empleados en el modelo. Para este propósito, se presenta la figura 135, en la que se muestra, que el eje x, corresponde al número 1, el eje y, al número 2 y el eje z, corresponde al número 3. Es así como los esfuerzos normales  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  y  $S_{33}$ , son respectivamente  $S_X$ ,  $S_Y$  y  $S_Z$ , mientras los esfuerzos cortantes  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  y  $S_{23}$ , corresponden a  $S_{XY}$ ,  $S_{XZ}$  y  $S_{YZ}$ , respectivamente. Los esfuerzos que se presentan son positivos de acuerdo a la convención.

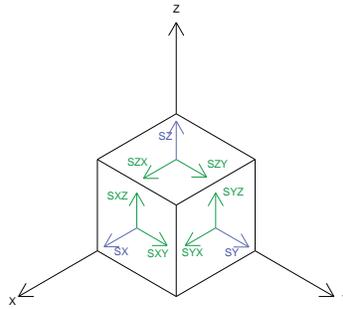


Figura 135. Convención de signos para los esfuerzos normales y cortantes en un sólido. En el modelo los ejes 1, 2, 3 corresponden a los ejes x, y, z respectivamente. (Imagen elaborada por la autora).

- Esfuerzos normales.

En las siguientes figuras, 136-144, se presentan los esfuerzos normales en  $kg/cm^2$  obtenidos con las tres condiciones de apoyo, en los cuales se pueden observar los siguientes puntos:

- 1) En los muros paralelos al eje x, la magnitud de los esfuerzos S11 (SX) son mayores a los que se presentan en los muros paralelos al eje y, mientras ocurre a la inversa en cuanto a los esfuerzos S22 (SY), es decir, en los muros paralelos al eje y, los esfuerzos S22 (SY) son mayores en comparación con los presentes en los muros paralelos al eje x.
- 2) En todos los casos, la cimentación está sujeta a esfuerzos normales de compresión S11, S22 y S33, muy altos con respecto a la superestructura, pero, las magnitudes van cambiando de modelo a modelo, esto es muy notorio alrededor del torreón, en donde se puede apreciar que, en el modelo con suelo firme los esfuerzos de compresión, son mayores que en el modelo con un módulo de reacción constante, mientras que en el modelo con módulos de reacción variables, el esfuerzo de compresión al que son sujetos los sólidos en la cimentación es menor que en los otros dos modelos.
- 3) La diferencia entre los modelos, expuesta en el punto 2, provoca que la distribución y la magnitud de los esfuerzos normales en la superestructura varíen de un modelo a otro. Por ejemplo, en el modelo con módulos de reacción variable, claramente se observa un aumento de las zonas sujetas a tensión, mientras disminuye la magnitud de los esfuerzos en zonas sujetas a compresión.

NOTA: Las figuras 136 a 144 fueron obtenidas por la autora a partir de los resultados del trabajo realizado.

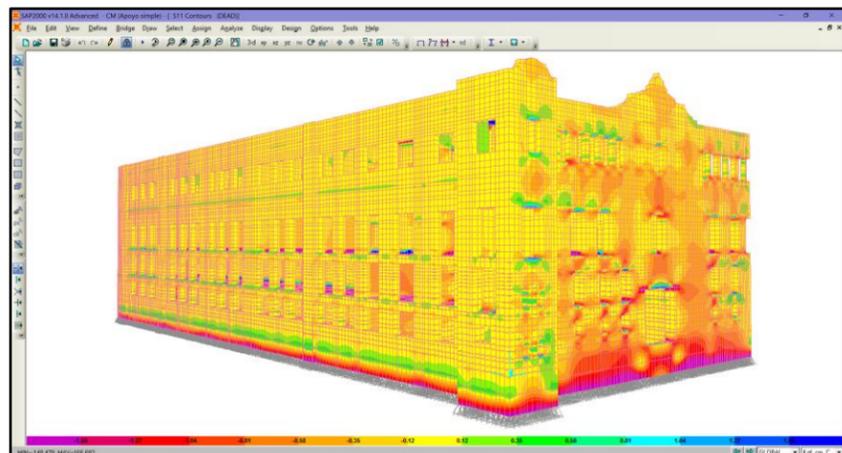


Figura 136. Modelo con suelo firme. Esfuerzos S11.

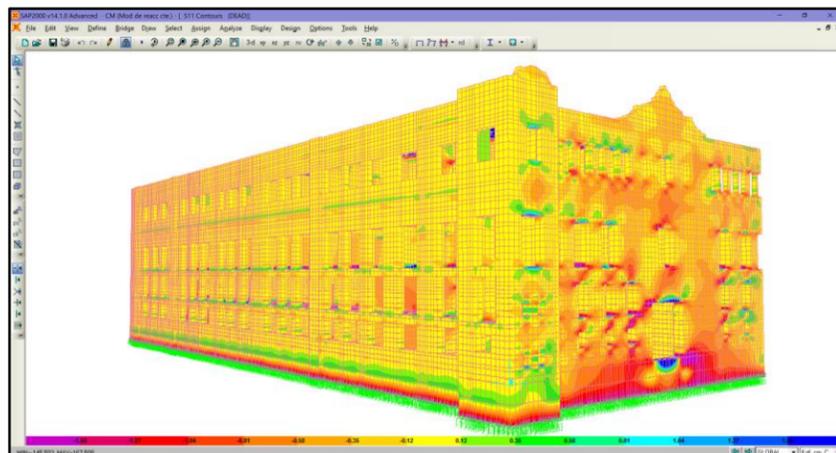


Figura 137. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos S11.

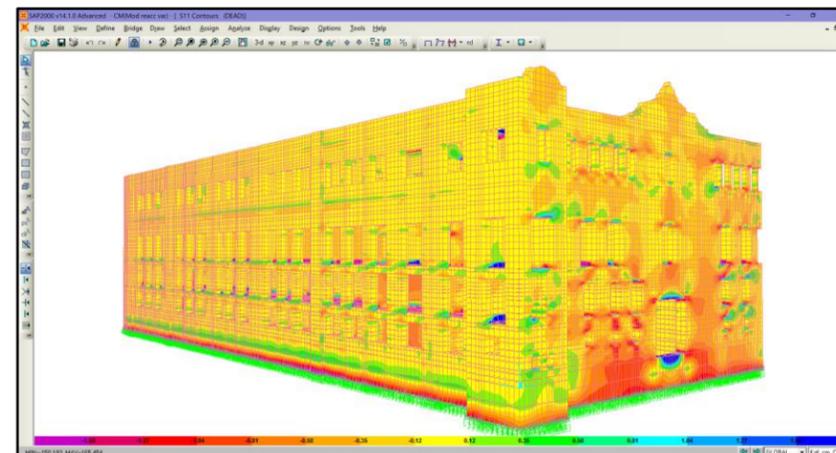


Figura 138. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos S11.

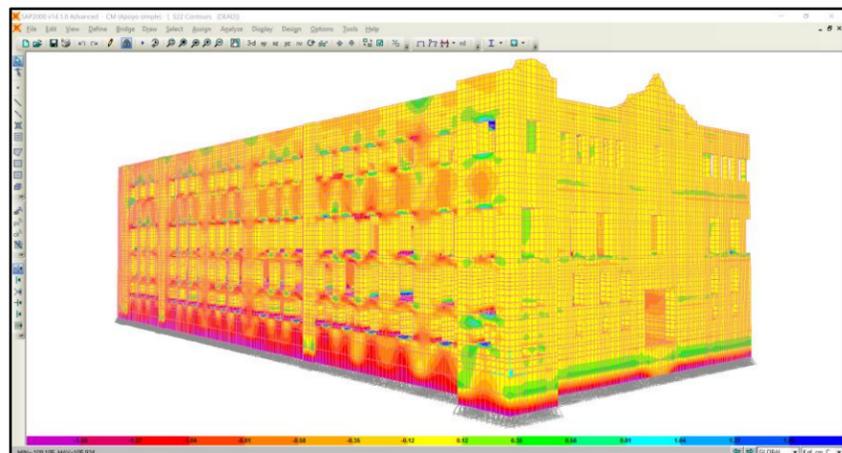


Figura 139. Modelo con suelo firme. Esfuerzos S22.

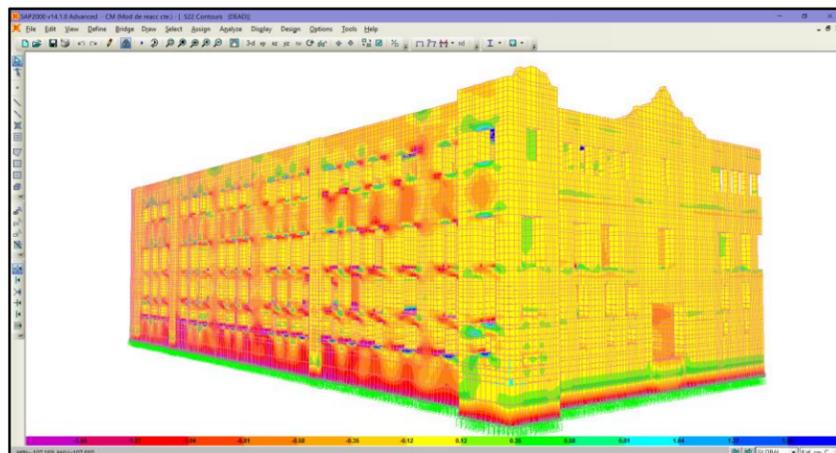


Figura 140. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos S22.

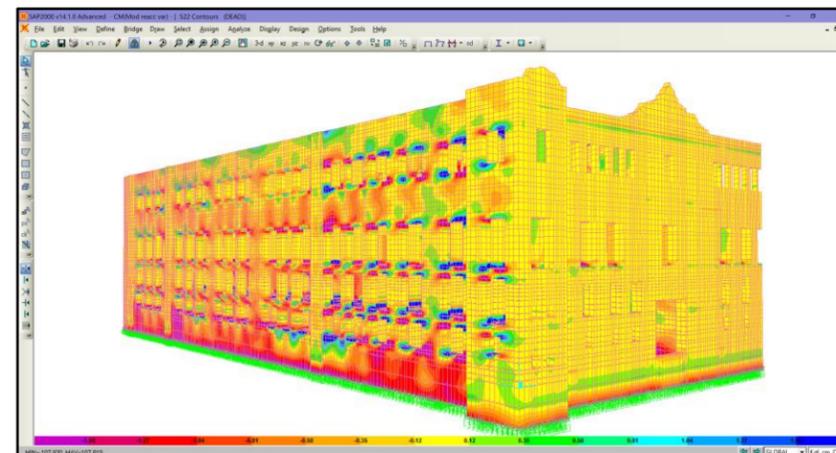


Figura 141. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos S22.

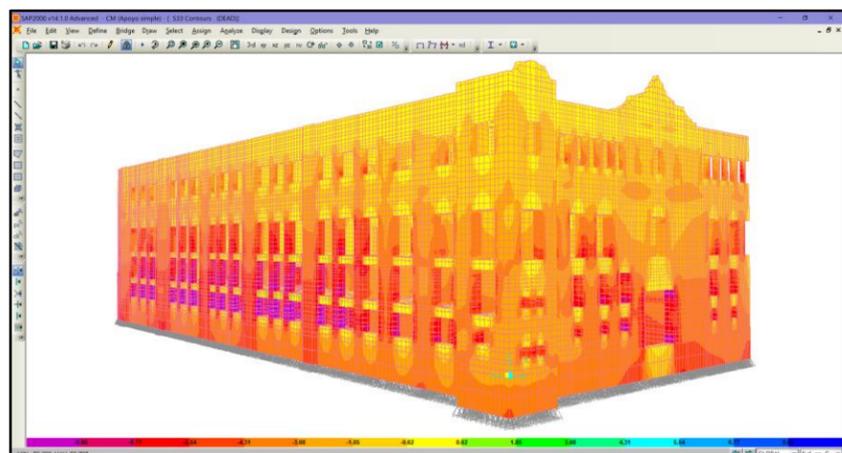


Figura 142. Modelo con suelo firme. Esfuerzos S33.

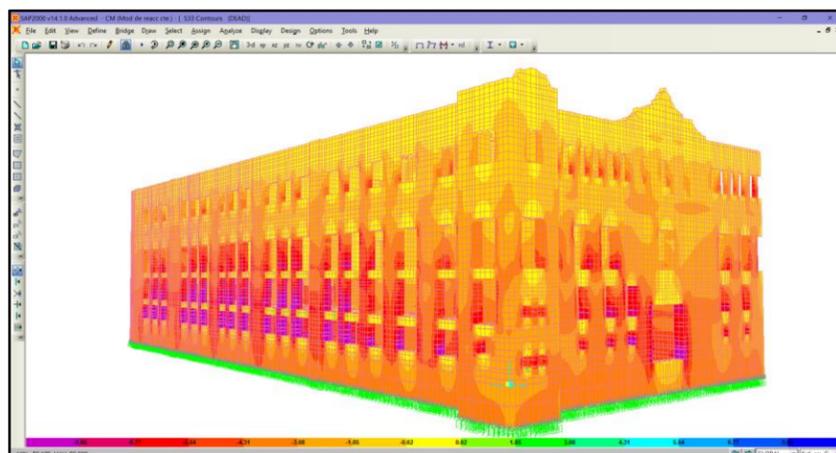


Figura 143. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos S33.

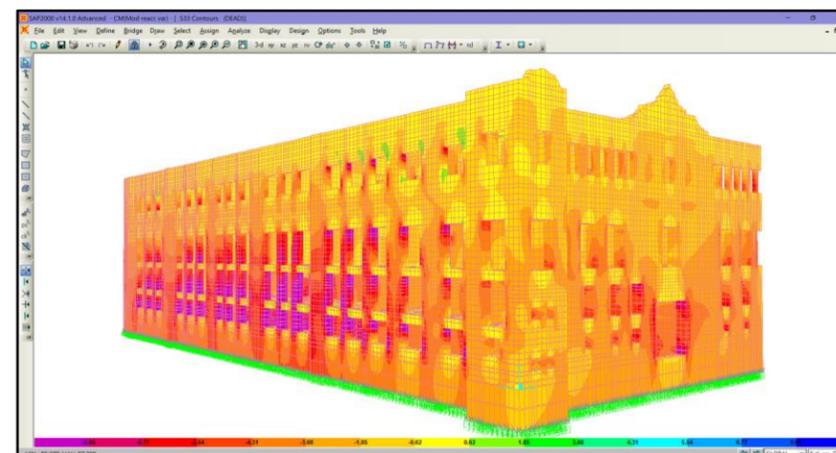


Figura 144. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos S33.

Estos puntos, pueden explicarse a través de conceptos fundamentales de la mecánica de materiales, como la rigidez, el esfuerzo, la deformación, así como su interacción, con la ley de Hooke y el Módulo de Poisson.

Se sabe que un sólido sometido a compresión axial (Figura 145), presentará deformaciones en todas las direcciones y que, entre mayor carga sea aplicada, el sólido sufrirá una mayor deformación.

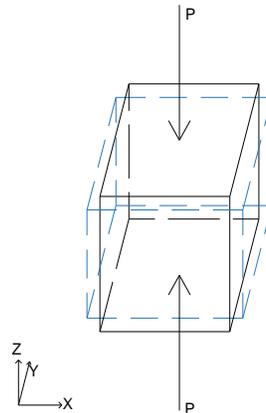


Figura 145. Deformación que presenta un sólido sometida a una carga axial. (Imagen elaborada por la autora).

Si ahora, este sólido, es acompañado de otros, cada uno sometido a la misma carga a compresión, como se muestra en la figura 146.

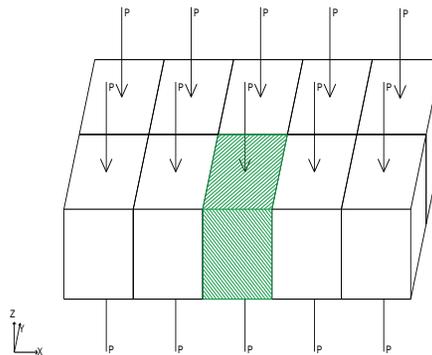


Figura 146. Varios sólidos sujetos a compresión axial en dirección del eje z. (Imagen elaborada por la autora).

Analizando en la dirección del eje x, se puede observar como el sólido original (de color verde), no puede deformarse libremente en esa dirección, debido a que los otros sólidos lo confinan, restringiendo su deformación, presentándose esfuerzos normales de compresión  $S_x$ , como se ve en la figura 147.

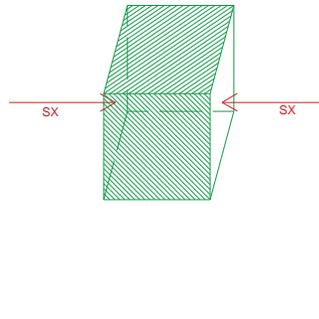


Figura 147. Sólido que presenta esfuerzos de compresión. (Imagen elaborada por la autora).

Por otro lado, analizando en la dirección del eje y, el sólido se encuentra restringido únicamente con otro sólido, ambos, al estar sometidos a carga a compresión pueden deformarse de una forma más libre en dirección del eje y, por lo que no existe un confinamiento como en el caso del eje x, presentándose, esfuerzos normales de compresión SY menores a los esfuerzos SX.

El ejemplo anterior, lleva a la conclusión de que, en el conjunto de sólidos de la figura 146, existe mayor rigidez en la dirección del eje x que en el eje y, provocando que existan menores deformaciones en la dirección del eje x y mayores esfuerzos normales SX, al contrario de lo que ocurre en dirección del eje y, donde, al deformarse más en dirección del eje y, los esfuerzos normales SY, serán menores a los esfuerzos SX.

Por tanto, el punto 1, queda explicado, es decir, en el modelo de elemento finito se puede observar que, en un muro paralelo al eje x, presenta esfuerzos S11 (SX) mayores a los esfuerzos S22 (SY), debido a que el elemento estructural, el muro, presenta una rigidez mayor en la dirección X que en la dirección Y. Esto ocurre de forma inversa en los muros paralelos al eje y, en los que presentan esfuerzos S22 (SY) mayores que los S11 (SX), por su mayor rigidez en la dirección Y que en la dirección X.

La siguiente tabla presenta un resumen de lo expuesto.

*Tabla 13. Relación entre la rigidez de los muros y los esfuerzos normales S11 (SX) y S22 (SY). (Tabla elaborada por la autora).*

Muros paralelos al eje	Rigidez en dirección del eje x	Rigidez en dirección del eje y	S11 (SX)	S22 (SY)
X	+	-	+	-
Y	-	+	-	+

En cuanto al punto 2, en la mecánica de materiales, se conoce que, en una prueba a compresión axial, al aumentar la carga, aumentan los desplazamientos, de forma proporcional, considerando un análisis elástico lineal. Es así como, los sólidos sujetos a una carga mayor se deformarán más que, si son sometidos a una carga menor. (Figura 148).

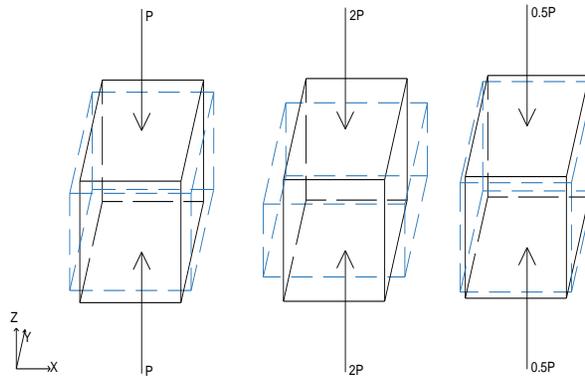


Figura 148. Deformaciones que presentan los sólidos al estar sujetos a diferentes cargas axiales. (Imagen elaborada por la autora).

Esto, nos lleva a la conclusión, en que los elementos de la figura 146, al estar sujetos a una mayor carga de compresión, se deformarán más y aumentarán los esfuerzos normales de compresión  $S_X$ . Por otro lado, si la carga a compresión disminuye, los elementos, se deformarán menos, por lo que los esfuerzos normales de compresión  $S_X$  serán menores.

Es así como, al observar los esfuerzos normales  $S_{33}$  ( $S_Z$ ) de los tres modelos, con diferentes tipos de suelo, la estructura está en su gran mayoría sometida a esfuerzos de compresión, pero las magnitudes difieren de un modelo a otro, esto, se puede apreciar principalmente, en la zona de la cimentación alrededor del torreón norte. Lo que dio un indicio, de que las reacciones son diferentes en los modelos, para esto se decidió graficar tanto las reacciones como las deformaciones, en ambas fachadas, en la calle de Moneda y en la Fachada Principal. (Figura 149).

En estas gráficas se ve claramente, como las reacciones varían de un modelo a otro, como si al variar el tipo de suelo, la carga se redistribuyera, modificándose las reacciones y por ende las deformaciones. Esto se aprecia, con mayor facilidad, en la zona del torreón norte.

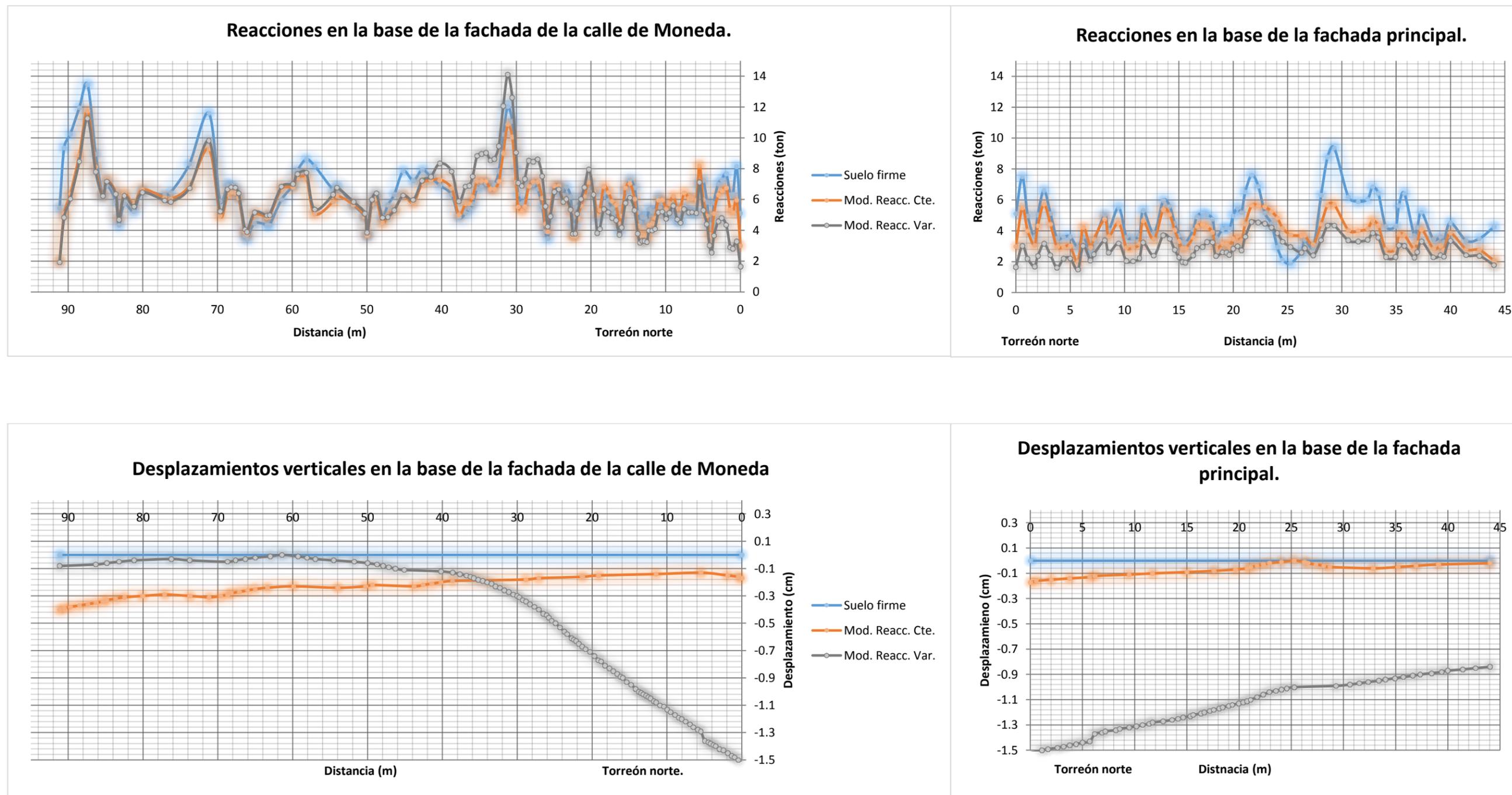
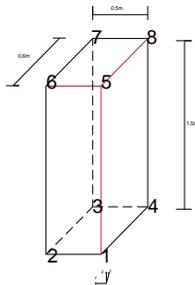


Figura 149. Reacciones y desplazamientos en la base de la fachada de la Calle de Moneda y la Fachada Principal. (Gráficas obtenidas por la autora a partir de los resultados del modelo de elemento finito de la sección analizada del Palacio Nacional).

Al modificarse las reacciones, de un modelo a otro, los sólidos de la cimentación están sometidos a diferentes cargas, de esta forma van variando los esfuerzos normales S11, S22 Y S33 de un modelo a otro. Como ejemplo, se muestra el siguiente sólido, el cual corresponde a la esquina inferior del torreón norte, con sus respectivos esfuerzos y deformación total, en cada modelo. (Figura 150).



Desplazamientos de cada uno de los nodos del sólido en centímetros.										
Punto	Modelo con suelo firme			Modelo con Mod. De reacc. Cte.			Modelo con Mod. De reacc. Var.			
	u1	u2	u3	u1	u2	u3	u1	u2	u3	
1	0	0	0	0	0	0	-2.0023	0	0	-2.2163
2	0	0	0	0	0	0	-1.9972	0	0	-2.1998
3	0	0	0	0	0	0	-1.9885	0	0	-2.1887
4	0	0	0	0	0	0	-1.9937	0	0	-2.2052
5	-0.0109	-0.0096	-0.0221	-0.0225	-0.0147	-2.0147	-0.0278	-0.0491	-2.2227	
6	-0.0108	-0.0072	-0.0195	-0.0225	-0.0129	-2.0116	-0.0287	-0.0482	-2.2076	
7	-0.0081	-0.0075	-0.0162	-0.0202	-0.0131	-2.0049	-0.0275	-0.0473	-2.1977	
8	-0.0082	-0.0097	-0.0189	-0.0203	-0.0151	-2.0082	-0.0267	-0.0483	-2.2129	

Deformación total del sólido en centímetros, obtenidos a partir de los desplazamientos de los nodos 1,5,6 y 8.			
	Modelo con suelo firme	Modelo con Mod. De reacc. Cte.	Modelo con Mod. De reacc. Var.
$\Delta x$	0.0027	0.0022	0.0011
$\Delta y$	0.0024	0.0018	0.0009
$\Delta z$	-0.0221	-0.0124	-0.0064

Esfuerzos normales S11 (SX)	Esfuerzos normales S22 (SY)	Esfuerzos normales S33 (SZ)
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

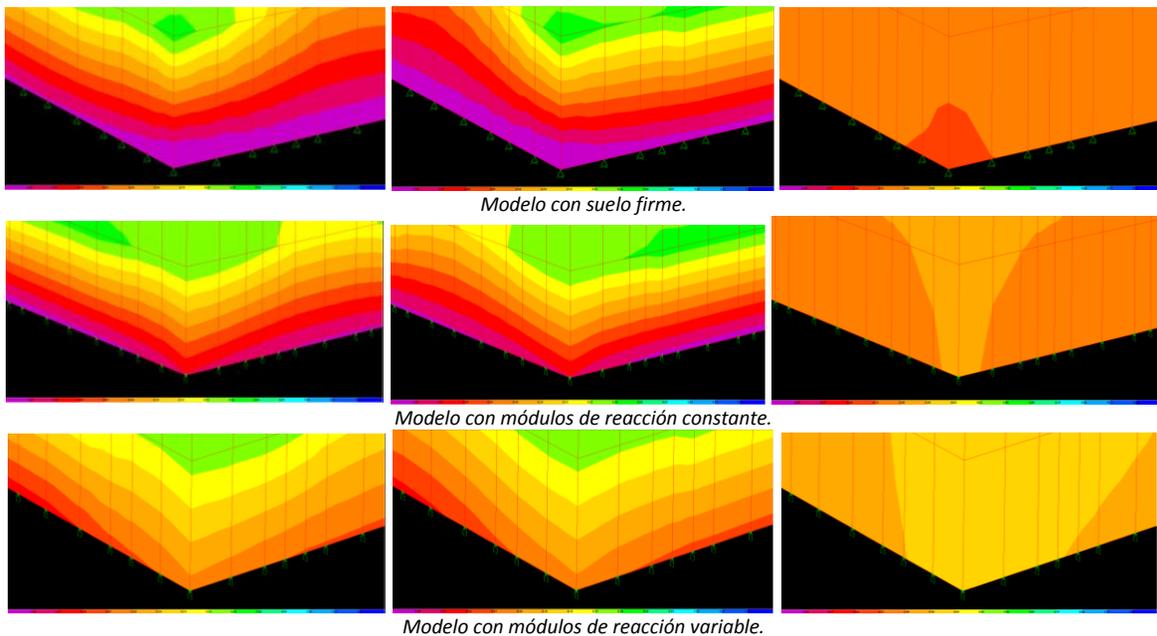


Figura 150. Relación entre los esfuerzos ( $kg/cm^2$ ) y las deformaciones totales (cm) del sólido que se encuentra en la cimentación del Torreón norte. (Tablas y gráficas obtenidas por la autora a partir de los resultados del modelo de elemento finito de la sección analizada del Palacio Nacional, la imagen del sólido fue elaborada por la autora).

Con lo expuesto anteriormente, el punto 3 se explica, ya que, al variar, de un modelo a otro, los esfuerzos presentes en la cimentación, también varía la distribución de esfuerzos en la superestructura, esto es lógico ya que, en conjunto, toda la estructura tiende al equilibrio.

- Esfuerzos cortantes

Para este análisis es necesario tener presente tres cosas, la primera, la convención de signos, mostrado en la figura 135, la segunda el sentido de los ejes en el modelo, y el tercero, la deformación que presenta un sólido al estar sujeto a esfuerzos cortantes, como se muestra en la figura 151, donde se observa, como se presentan esfuerzos de tensión diagonal, los cuales, generalmente, son los causantes de la presencia de grietas en las estructuras. Claro está, que en el modelo de elemento finito no es posible visualizar grietas, pero si se pueden, interpretar los resultados obtenidos.

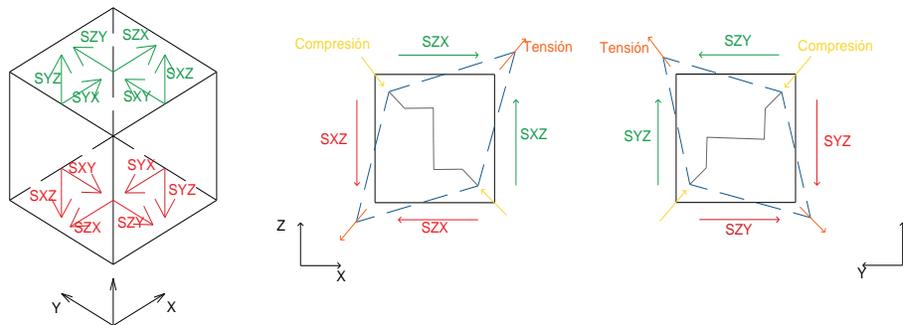


Figura 151. Deformaciones que presenta un sólido al estar sujeto a esfuerzos cortantes. Color verde y rojo representan los esfuerzos cortantes, color azul marino deformaciones, color gris grietas que pueden aparecer en un sólido sometido a esfuerzos cortantes. (Imagen elaborada por la autora).

Se omitirán los esfuerzos  $S_{12}$  ( $S_{XY}$ ), ya que, son muy pequeños, en comparación con  $S_{13}$  ( $S_{XZ}$ ) y  $S_{23}$  ( $S_{YZ}$ ), como se puede apreciar en las figuras 152-160, esto debido a que el modelo se analizó únicamente por cargas muertas, si se hubiera considerado una acción accidental como el sismo, estos esfuerzos cortantes  $S_{12}$  ( $S_{XY}$ ), hubieran sido mayores a los del análisis presente.

Continuando con los esfuerzos  $S_{13}$  ( $S_{XZ}$ ) y  $S_{23}$  ( $S_{YZ}$ ) en  $kg/cm^2$ , figuras 155-160, se puede observar cómo se presenta una situación muy parecida a los esfuerzos normales  $S_{11}$  ( $S_X$ ) y  $S_{22}$  ( $S_Y$ ), en que, los muros paralelos al eje  $x$ , al tener una mayor rigidez en esa dirección, los esfuerzos cortantes  $S_{13}$  ( $S_{XZ}$ ) son mayores a los esfuerzos  $S_{23}$  ( $S_{YZ}$ ), mientras los muros paralelos al eje  $y$ , presentan una mayor rigidez en la dirección del eje  $y$ , y por tanto los esfuerzos cortantes  $S_{23}$  ( $S_{YZ}$ ) son mayores a los  $S_{13}$  ( $S_{XZ}$ ).

Nota: Las figuras 152 a 188 fueron obtenidas por la autora a partir de los resultados del trabajo realizado.

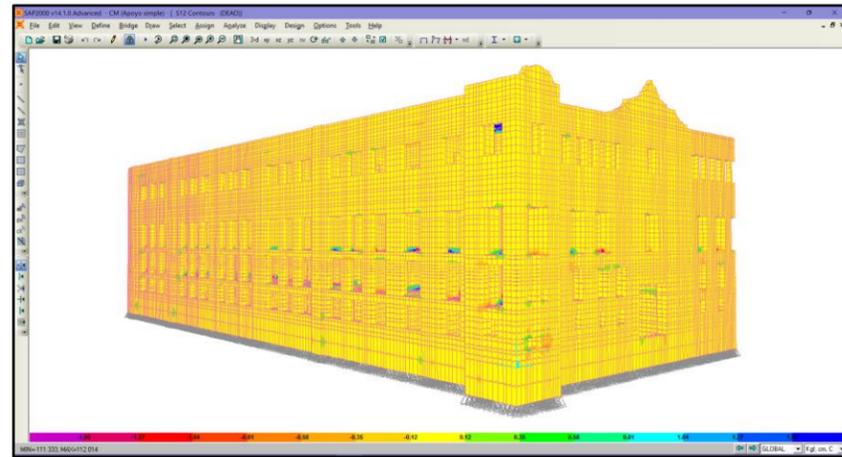


Figura 152. Modelo con suelo firme. Esfuerzos S12.

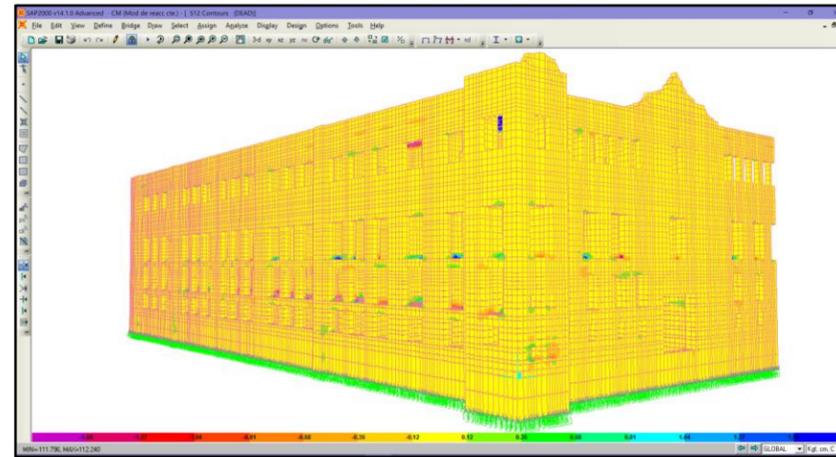


Figura 153. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos S12.

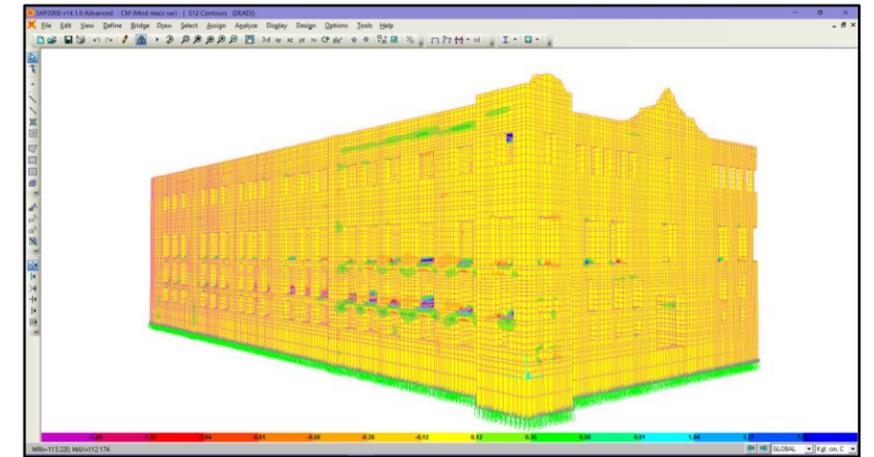


Figura 154. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos S12.

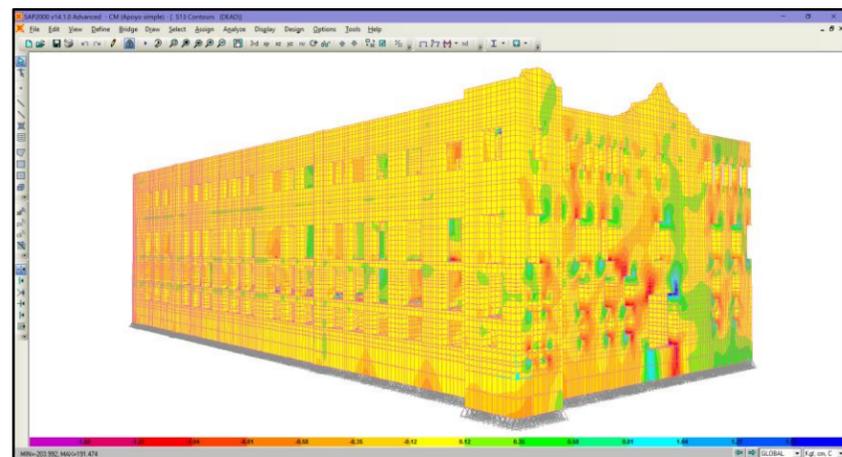


Figura 155. Modelo con suelo firme. Esfuerzos S13.

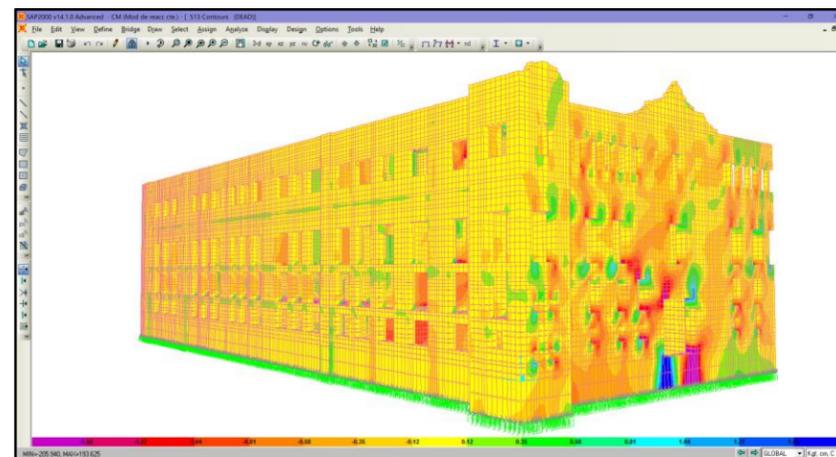


Figura 156. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos S13.

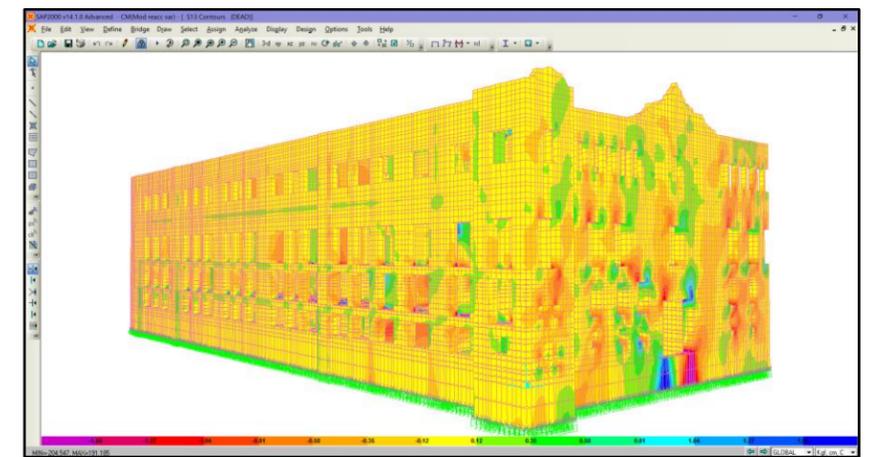


Figura 157. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos S13.

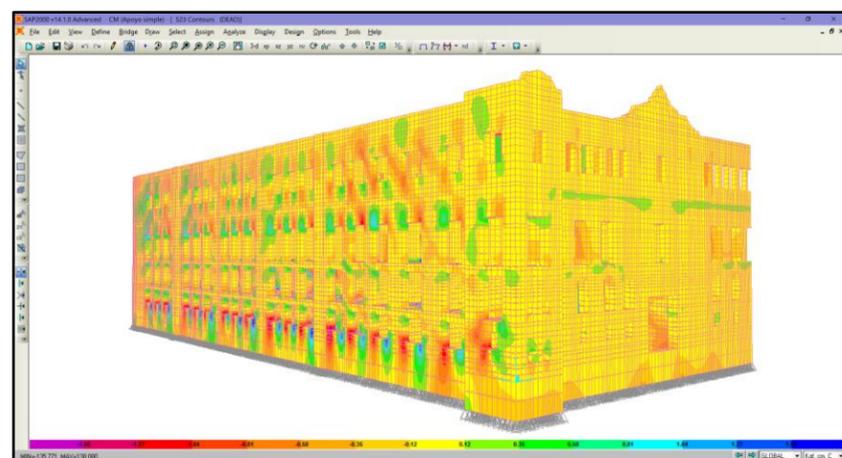


Figura 158. Modelo con suelo firme. Esfuerzos S23.

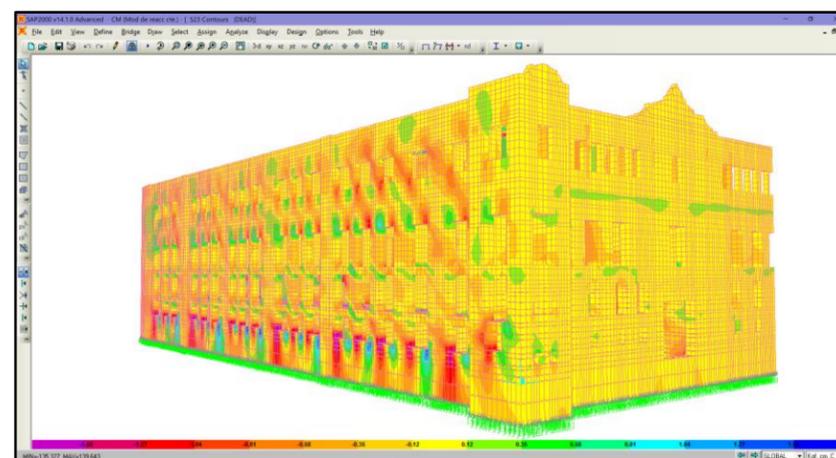


Figura 159. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos S23.

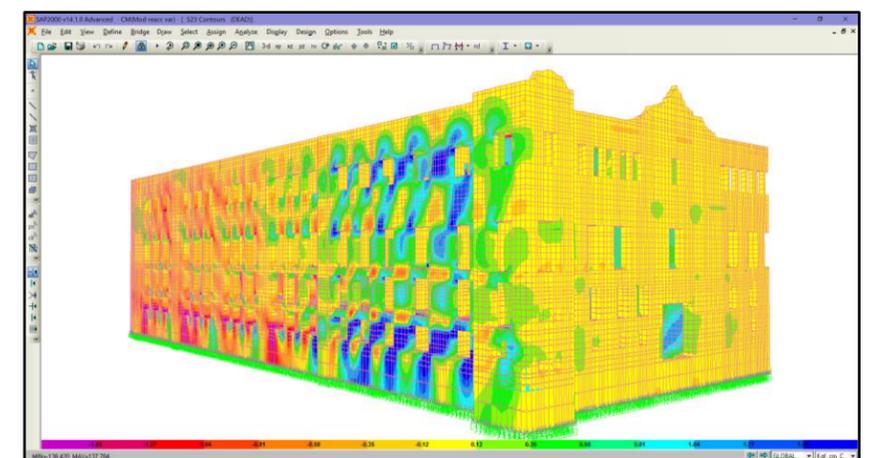


Figura 160. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos S23.

- Esfuerzos máximos

En cuanto a los esfuerzos máximos se puede observar que, en los tres modelos, se presentan esfuerzos de compresión en la cimentación, mientras que, en la superestructura, los esfuerzos presentes son de tensión. Algo también importante, que es necesario resaltar, es que, en el modelo con módulos de reacción variable, los esfuerzos de tensión son más grandes en comparación con los otros dos modelos, debido al hundimiento diferencial que se presenta, esto se observa principalmente en la fachada que da a la calle de Moneda, en la que se ve que la zona con esfuerzos de tensión más altos corresponde a la zona con mayor hundimiento

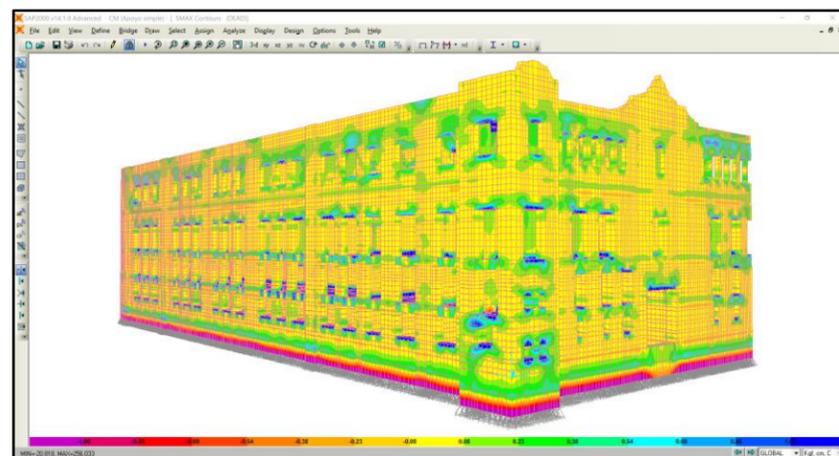


Figura 161. Modelo con suelo firme. Esfuerzos máximos.

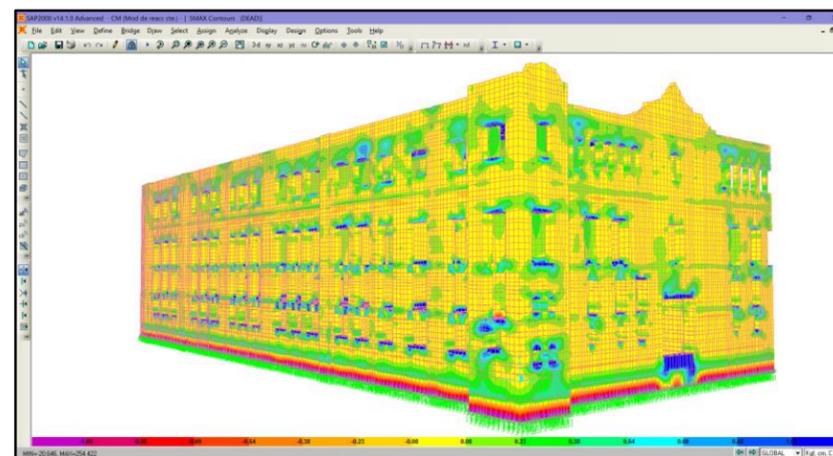


Figura 162. Modelo con suelo uniformemente compresible. Esfuerzos máximos.

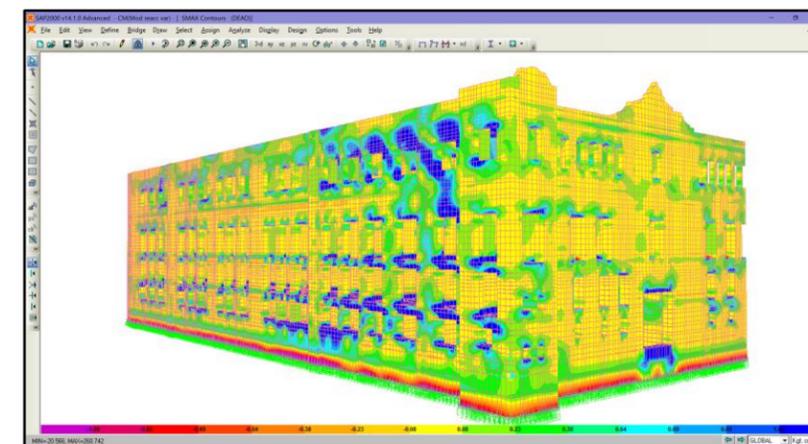


Figura 163. Modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad. Esfuerzos máximos

#### 4.2.2 Zonas con mayor concentración de daños.

Se revisaron varias áreas del modelo al interior del inmueble, para ubicar los esfuerzos más grandes, especialmente en las zonas con mayor agrietamiento. En esta sección se presentan los resultados obtenidos de algunas de las zonas, posteriormente se presentan los esfuerzos máximos a compresión y a tensión encontrados en los elementos estructurales, y se compararon con los esfuerzos permisibles de los materiales empleados.

La primera zona que se muestra a continuación, corresponde al torreón norte, planta baja, los daños que se observan, se encuentran en el registro de daños y corresponden a las fotografías de la PB-1 a la PB-7.

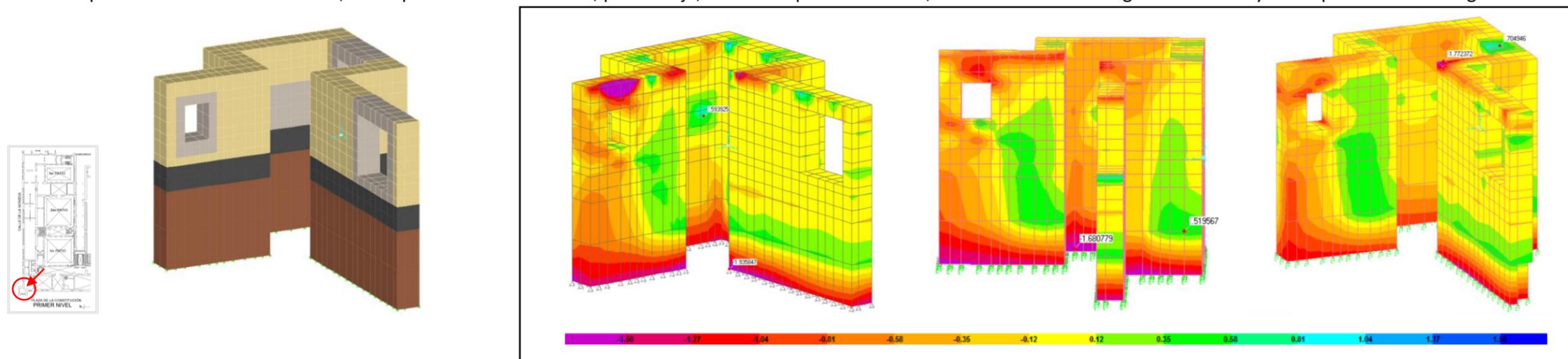


Figura 164. Esfuerzos normales S11 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

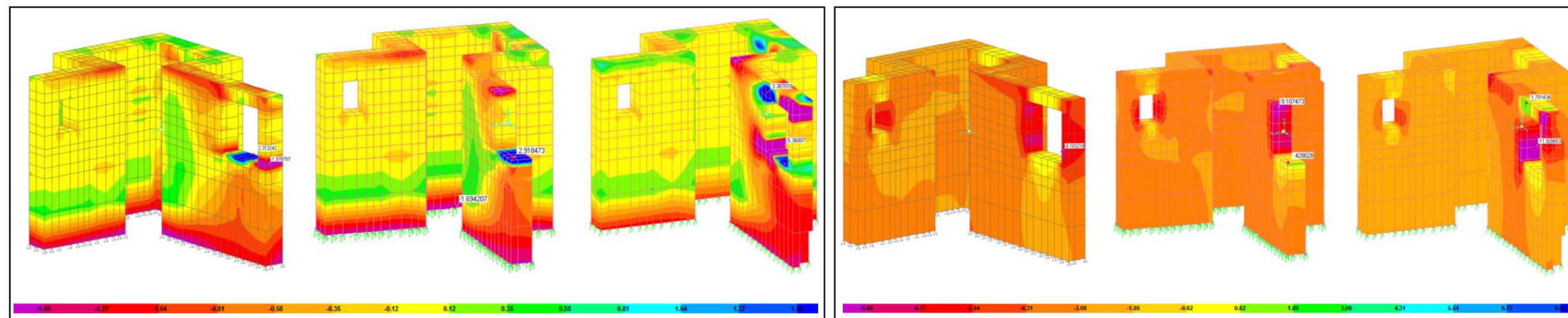


Figura 165. Esfuerzos normales S22 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

Figura 166. Esfuerzos normales S33 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

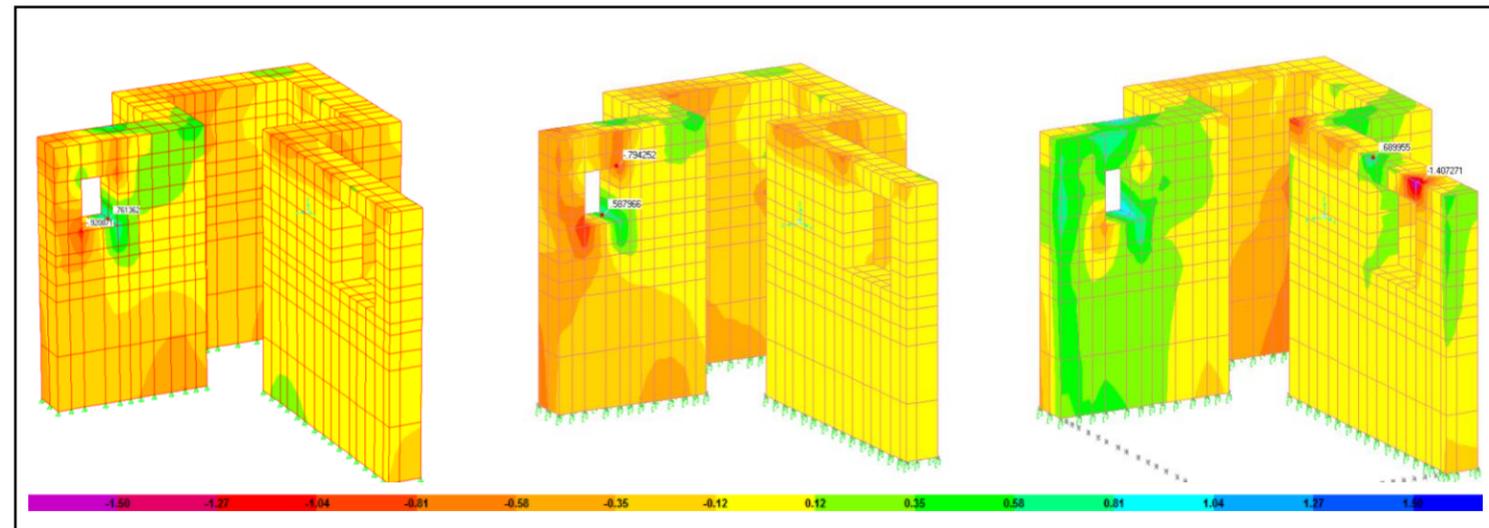


Figura 167. Esfuerzos cortantes S13 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

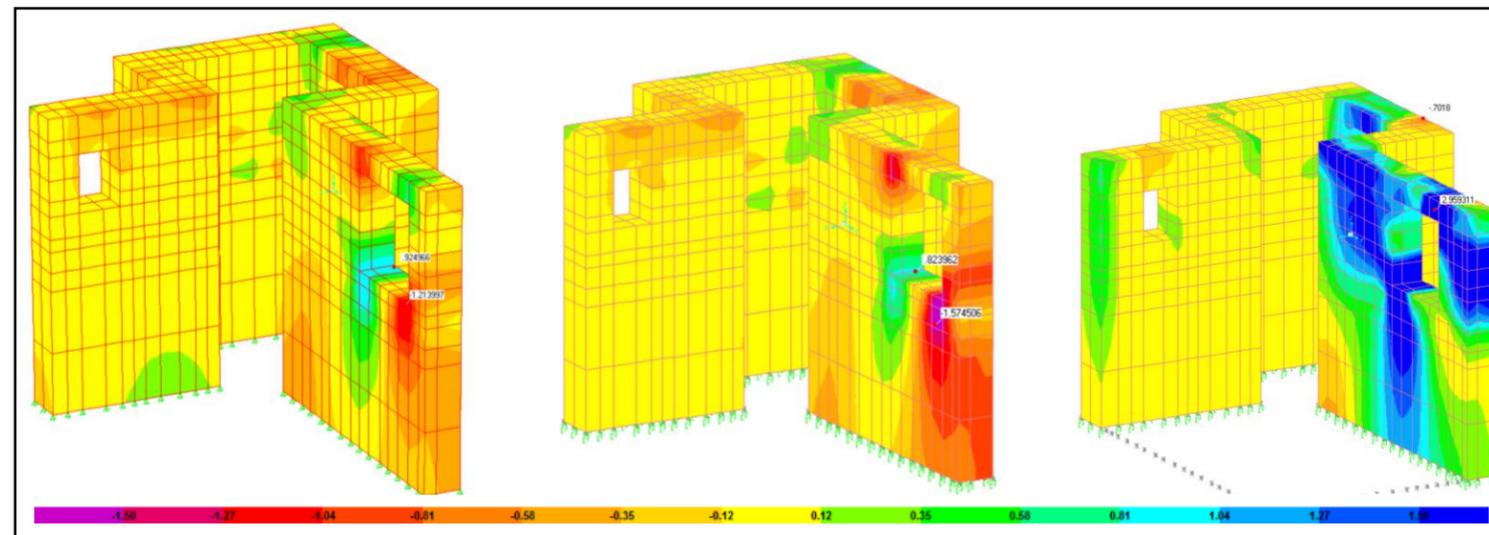


Figura 168. Esfuerzos cortantes S23 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

La siguiente zona, corresponde a los daños mostrados en las fotografías PB-8 en la planta baja, 1P-1 y 1P-2, en el primer piso.

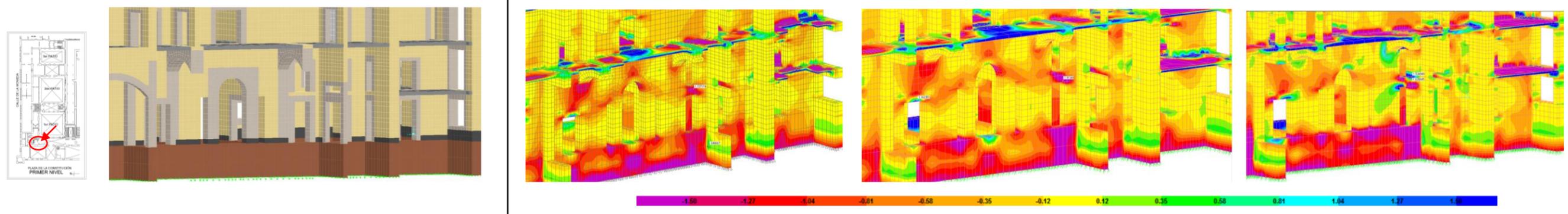


Figura 169. Esfuerzos normales S11 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

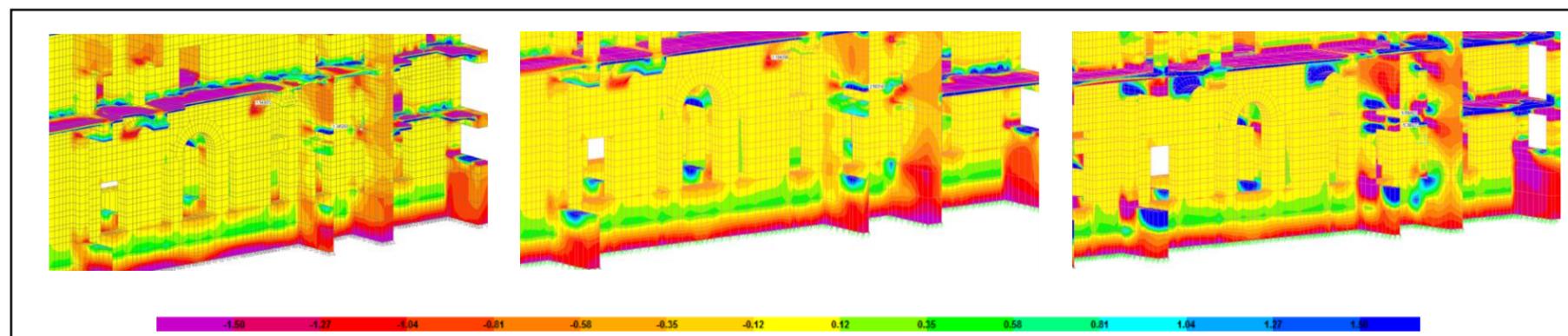


Figura 170. Esfuerzos normales S22 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

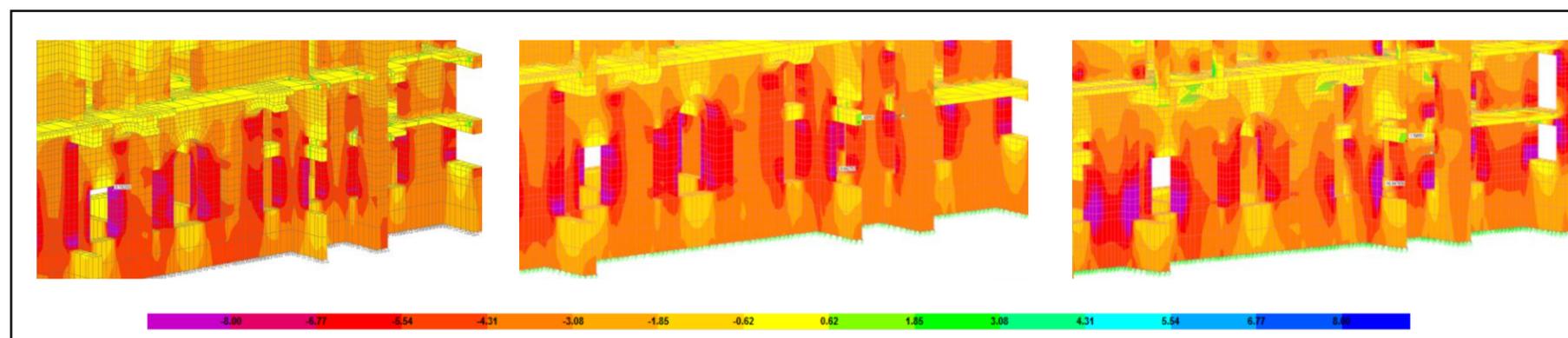


Figura 171. Esfuerzos normales S33 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

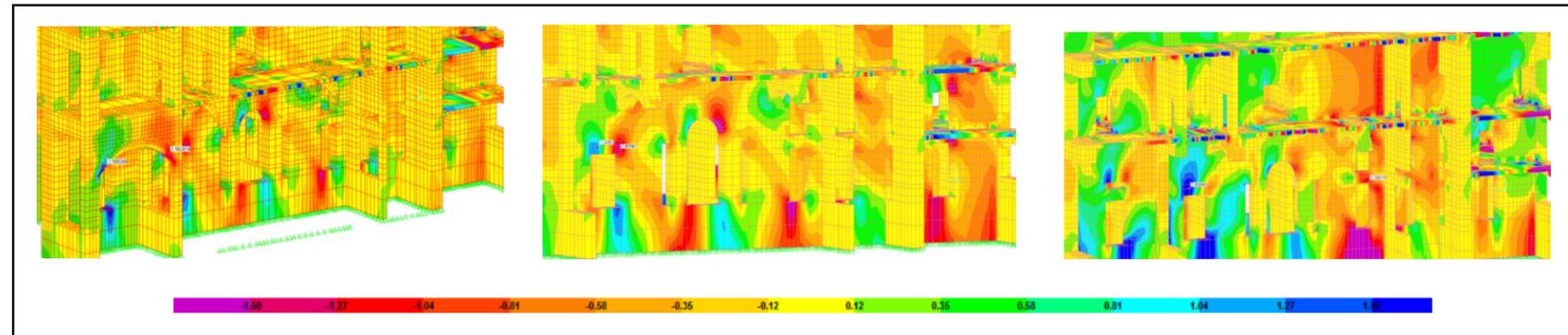


Figura 172. Esfuerzos cortantes S13 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

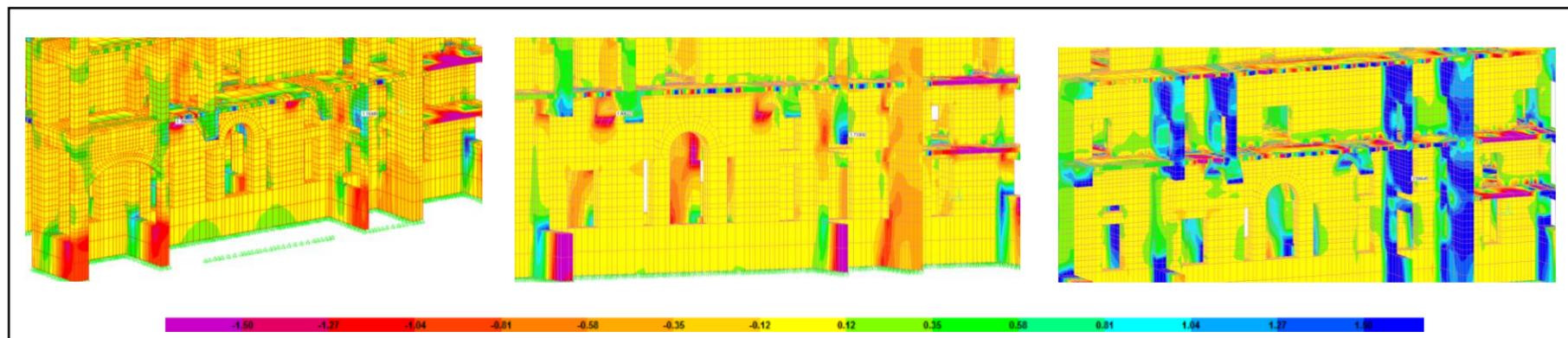


Figura 173. Esfuerzos cortantes S23 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

La zona que se muestra corresponde a los daños de las fotografías PB-9 Y PB-10, en la planta baja, y de 1P-4 a la IP-5, en el primer piso.

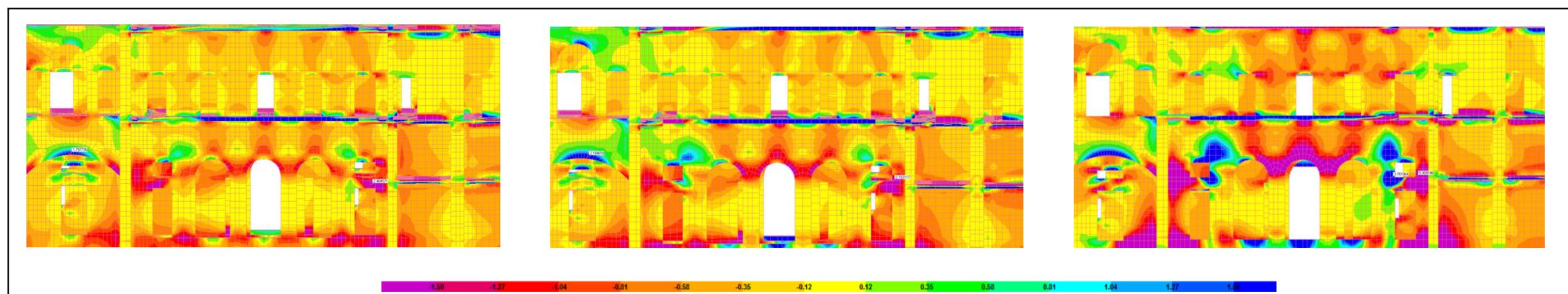


Figura 174. Esfuerzos normales S22 en  $\text{kg/cm}^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

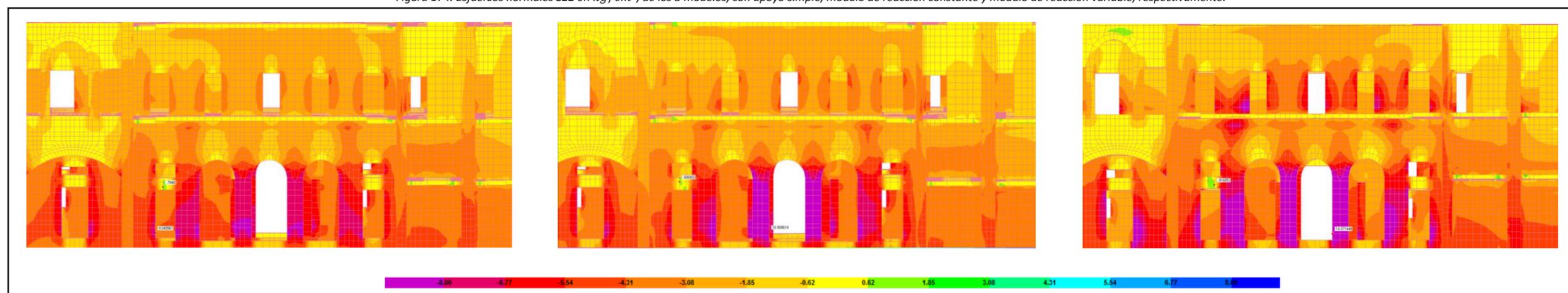


Figura 175. Esfuerzos normales S33 en  $\text{kg/cm}^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

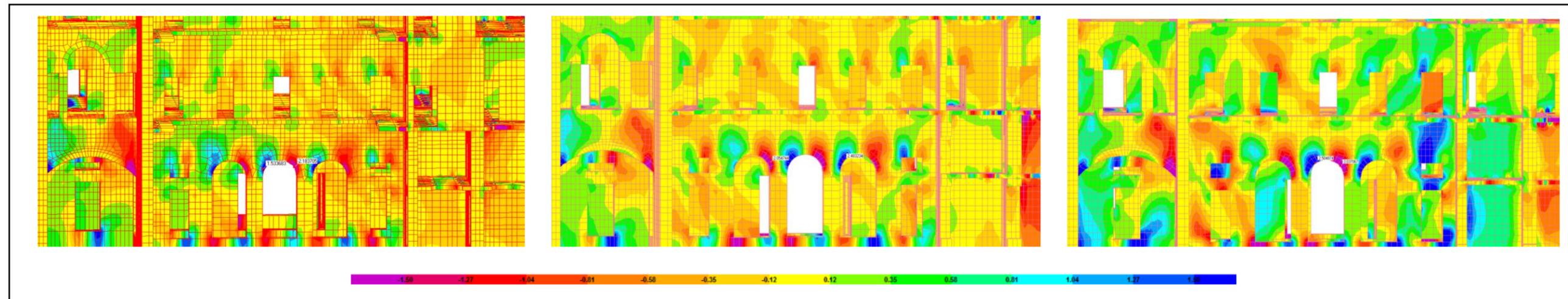


Figura 176. Esfuerzos cortantes  $S_{13}$  en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

Los daños de la siguiente zona, son las fotografías de la PB-11 a la PB-13, en la planta baja, 1P-27 Y 1P-28 en el primer piso, así como 2P-1 y 2P-2, para el segundo piso.

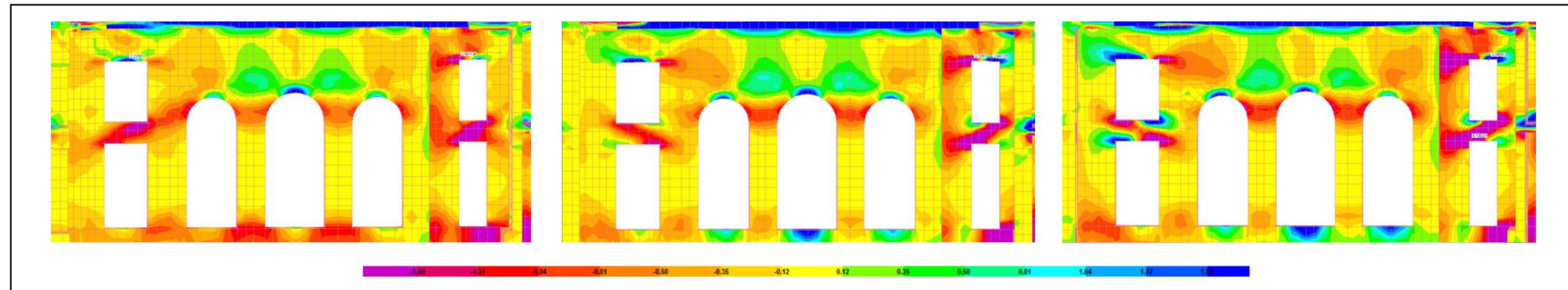
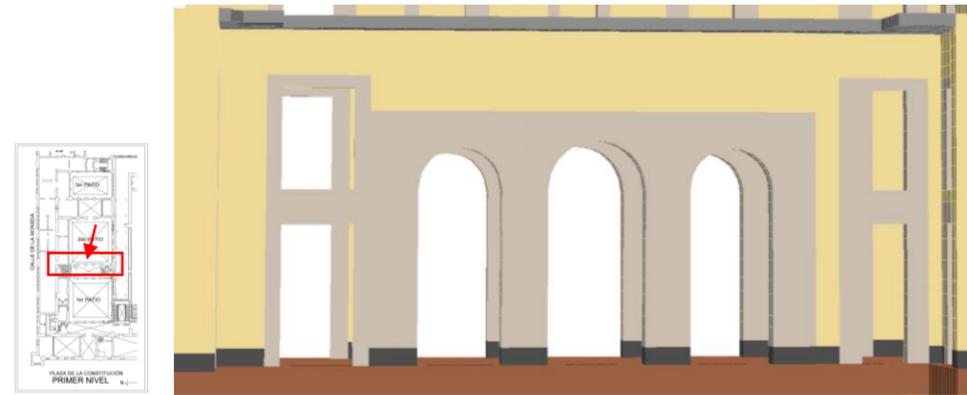


Figura 177. Esfuerzos normales S22 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

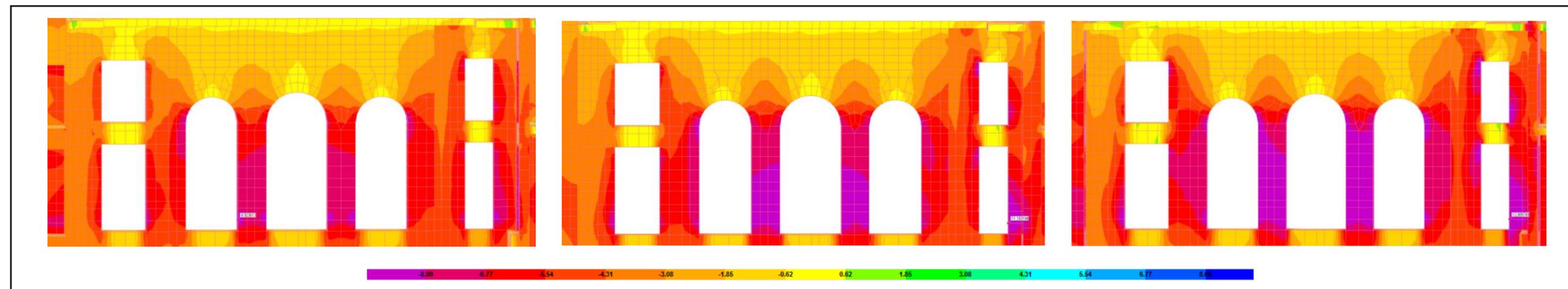


Figura 178. Esfuerzos normales S33 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

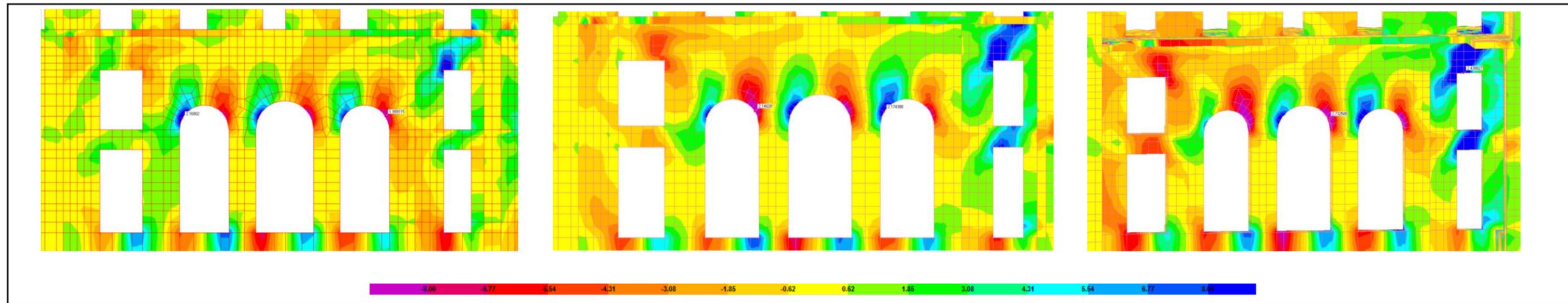


Figura 179. Esfuerzos cortantes  $S_{13}$  en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

Los siguientes resultados corresponden a las fotografías PB-13 y 1P-29.

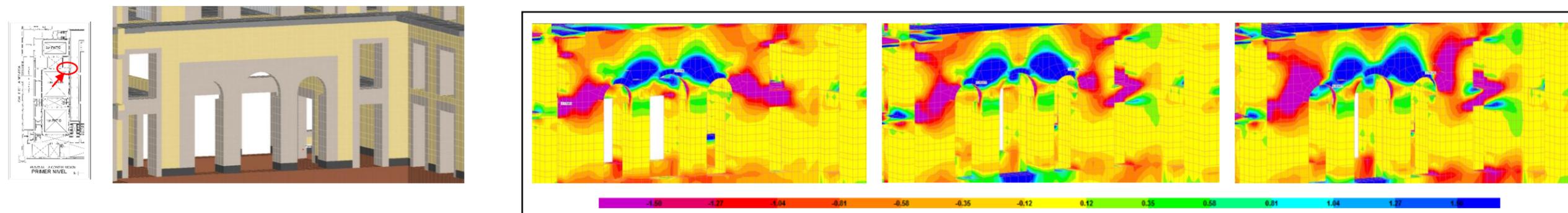


Figura 180. Esfuerzos normales S11 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

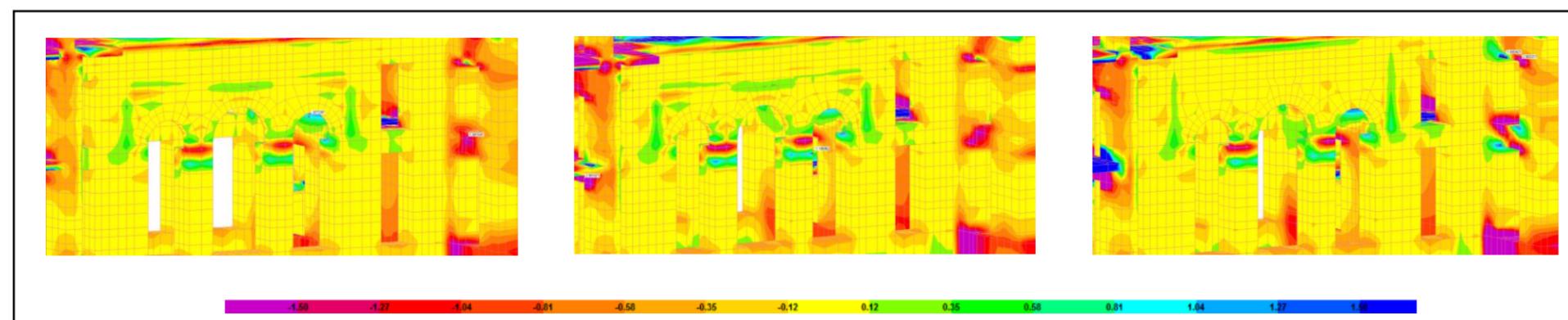


Figura 181. Esfuerzos normales S22 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

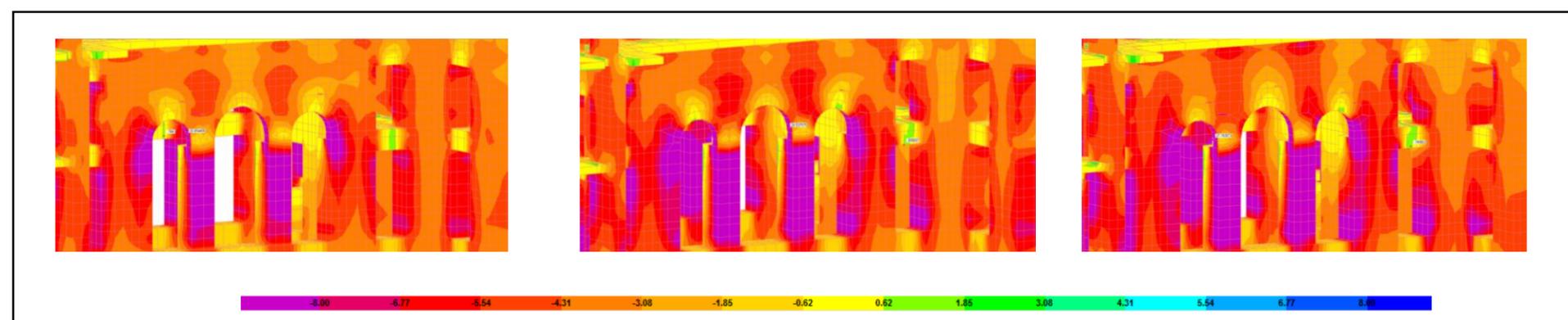


Figura 182. Esfuerzos normales S33 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

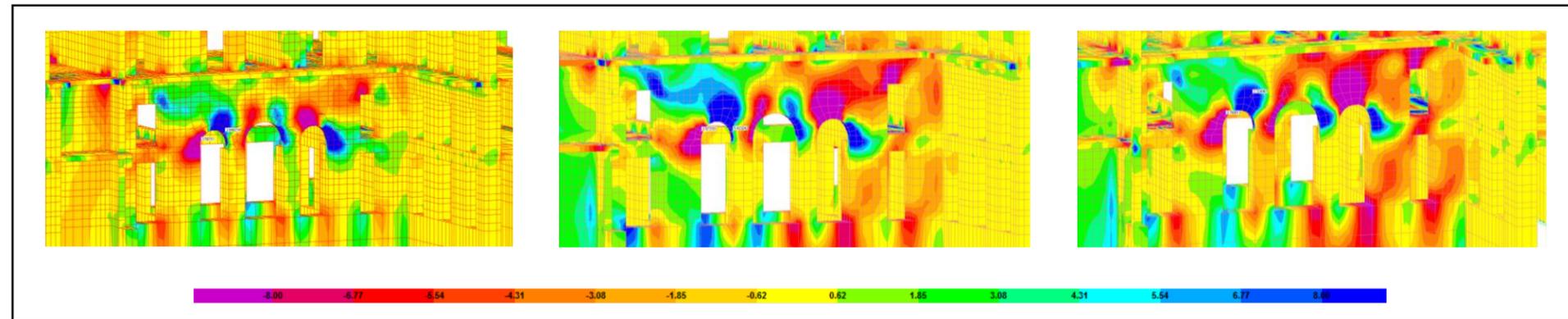


Figura 183. Esfuerzos cortantes S13 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

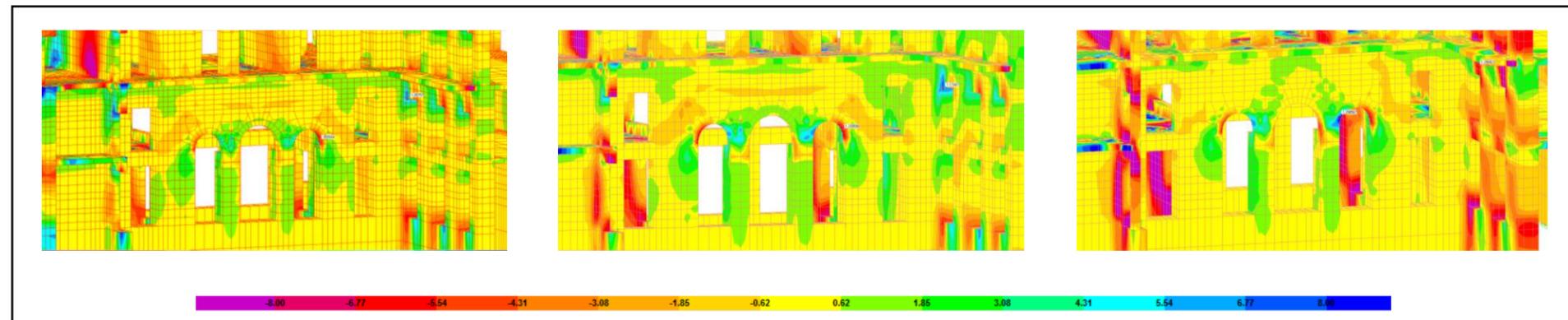


Figura 184. Esfuerzos cortantes S23 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

La última zona que se muestra corresponde a las fotografías PB-15, PB-16, 1P-31 Y 1P-32 de los daños.

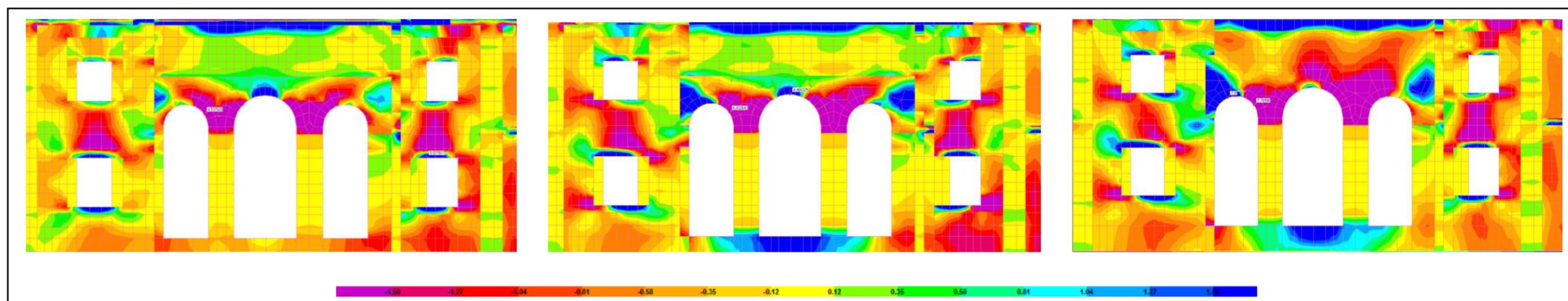
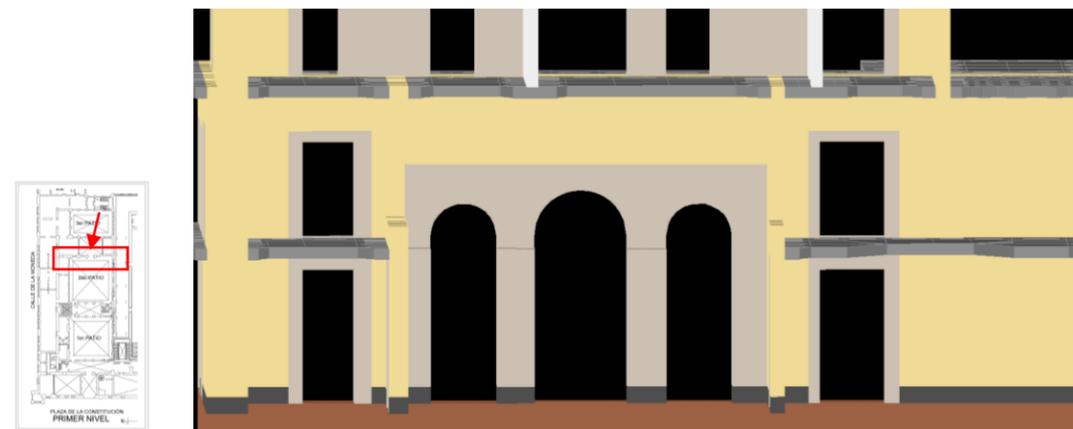


Figura 185. Esfuerzos normales S11 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

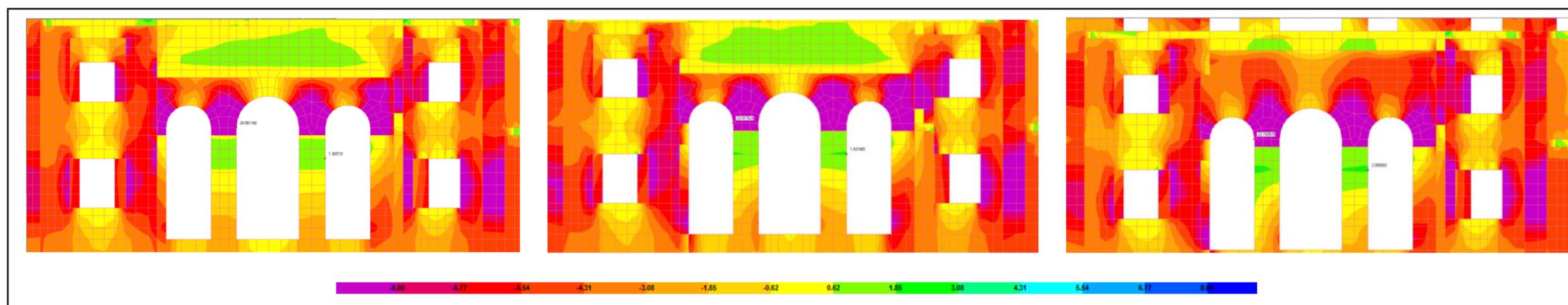


Figura 186. Esfuerzos normales S33 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

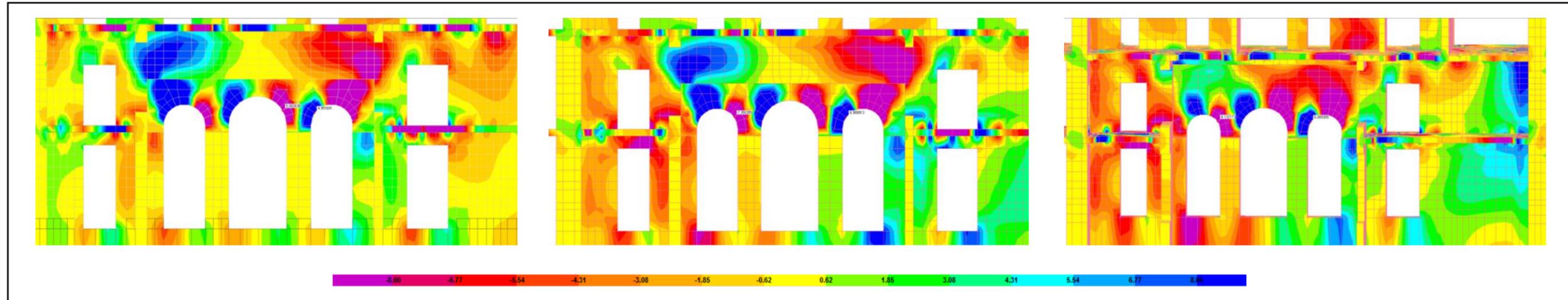


Figura 187. Esfuerzos cortantes S13 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

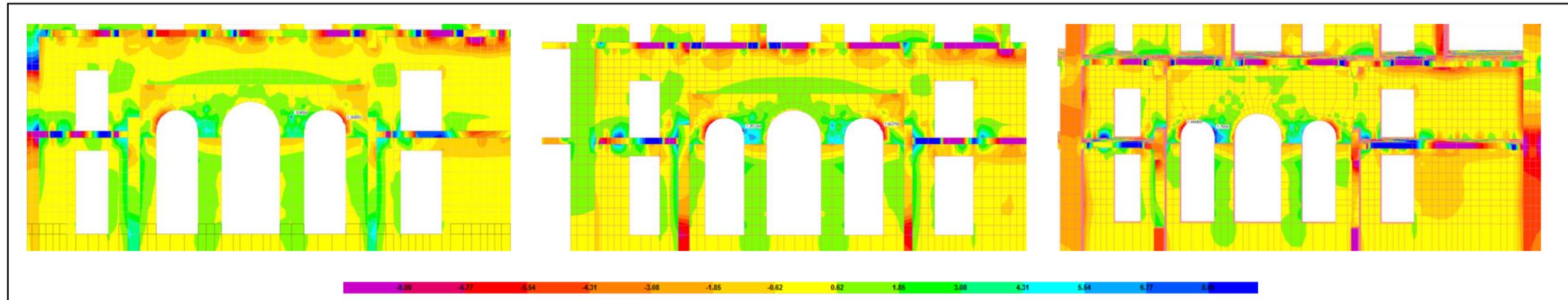


Figura 188. Esfuerzos cortantes S23 en  $kg/cm^2$ , de los 3 modelos, con apoyo simple, módulo de reacción constante y módulo de reacción variable, respectivamente.

Las tablas 14 y 15 presentan los esfuerzos más grandes, tanto de compresión como de tensión, encontrados en los elementos estructurales, los cuales son comparados con la resistencia de los materiales, presentado anteriormente en la tabla 10.

**Tabla 14. Comparación de los esfuerzos a compresión con la resistencia a compresión de los materiales. (Tabla elaborada por la autora a partir de los resultados obtenidos).**

Modelo	Ubicación	Material	Esfuerzo de compresión	>	Resistencia a compresión	Material
			kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>	
Apoyo simple	Arco	Cantera	24.56	>	15	Mampostería tabique rojo recocido
Mod. Reacc. Cte.	Arco	Cantera	33.01	>	30	Mampostería de tezontle
Mod. Reacc. Var.	Arco	Cantera	33.74	>	30	Mampostería de tezontle

**Tabla 15. Comparación de los esfuerzos a tensión con la resistencia a tensión de los materiales. (Tabla elaborada por la autora a partir de los resultados obtenidos).**

Modelo	Ubicación	Material	Esfuerzo de tensión	>	Resistencia a tensión	Material
			kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>	
Apoyo simple	Muro de mampostería	Tabique rojo recocido	8.82	>	7	Cantera
Mod. Reacc. Cte.	Muro de mampostería	Tabique rojo recocido	9.24	>	7	Cantera
Mod. Reacc. Var.	Muro de mampostería	Tabique rojo recocido	13.93	>	7	Cantera

Con estos resultados se puede observar los siguiente:

- En los esfuerzos de compresión
  - a) Los muros de tabique rojo recocido presentarían daños, aun si el inmueble se encontrara sobre un suelo firme, lo cual no es de gran importancia, por el hecho de que estos muros son divisorios y no tienen una función estructural.
  - b) Los muros de mampostería de tezontle no presentarían daños en un suelo firme, ya que la resistencia es mayor al esfuerzo de compresión máximo que se encontró en los muros. Sin embargo, en un suelo uniformemente compresible, así como en un suelo de diferentes grados de compresibilidad, se encontraron esfuerzos de compresión mayores al que resiste el material, por lo que, aun si el edificio se hundiera uniformemente, se presentarían daños leves en estos muros o posiblemente ninguno, ya que, este tipo de elementos trabajan a compresión.
  - c) En cuanto a los elementos de cantera, como columnas o arcos, no presentarían daño por esfuerzos de compresión, en ninguno de los 3 casos, ya que la cantera presenta una resistencia a la compresión alrededor de los  $65 \text{ kg/cm}^2$ , superior a cualquiera de los valores máximos encontrados.
  - d) La diferencia entre las magnitudes de los esfuerzos a compresión, entre el modelo con suelo firme y los modelos con módulos de reacción, es de un 37%.

- En los esfuerzos de tensión
  - a) Todos los elementos estructurales presentarían algún tipo de daño debido a los esfuerzos de tensión, ya que los valores máximos encontrados en los 3 casos, superan la resistencia a tensión de la cantera. Se tiene que recordar que, la resistencia a los esfuerzos de tensión, que presentan los muros de mampostería de tezontle, así como los elementos de cantera labrada, es muy pequeña.
  - b) Los esfuerzos a tensión que se presentan en un suelo uniformemente compresible con respecto a los encontrados en el modelo con suelo firme, son 57% mayores, lo cual indica que, se presentarían menores daños por estos esfuerzos en la estructura, si el Palacio se encontrara en un suelo firme.

En general, se observa que, la magnitud de los esfuerzos, ya sean de compresión o de tensión, son mayores en un modelo con suelo compresible en comparación con los presentes en el modelo con suelo firme, lo que lleva a pensar que, al aumentar los hundimientos en el subsuelo, los elementos estructurales se ven sometidos a mayores esfuerzos cortantes y por ende a mayores deformaciones, lo que lleva a la aparición de grietas. Concluyendo, el Palacio Nacional, no presentaría daños significativos si se encontrara desplantado sobre un suelo firme.

### **4.3 Comparación entre los daños observados y los resultados obtenidos en el modelo con módulo de reacción variable.**

Esta comparación, se enfoca en el tercer caso, es decir, en el modelo con módulos de reacción variable, donde se puede observar una similitud con el comportamiento real de la estructura, a saber, que la ubicación y pendiente de los esfuerzos cortantes máximos presentes en el tercer caso coinciden con el patrón de agrietamiento presente en las fachadas de la estructura.

En la figura 189, se muestran, paralelamente, el perfil topográfico de las banquetas de la Evaluación Geotécnica del 2007 y los desplazamientos verticales en la base del tercer caso, donde, a pesar del cuidado que se tuvo en la asignación de los módulos de reacción, se puede apreciar la gran diferencia que existe entre el hundimiento real de 1.31m y el desplazamiento en el modelo, el cual es casi 90 veces menor, con un valor de 1.5cm. Por otra parte, en la figura 190, se tienen los desplomes de la Evaluación Geotécnica y el obtenido en el modelo. En este caso se observa, que los porcentajes en el modelo son 100 veces menores a los que presenta el Palacio, aun así, la tendencia en ambos casos es similar; es decir, las fachadas tienden a inclinarse hacia el exterior.

Lo anterior se debe principalmente, al tipo de análisis que se realizó, el cual corresponde a un análisis elástico lineal, donde las deformaciones son proporcionales a las fuerzas aplicadas, es

así que, aunque se modifiquen los módulos de reacción variable, las deformaciones no cambiarían considerablemente a lo ya obtenido.

Todo esto nos indica que, el modelo con módulos de reacción variable, tiende a un comportamiento similar al edificio real, a pesar de las diferencias en cuanto a las magnitudes de los resultados.

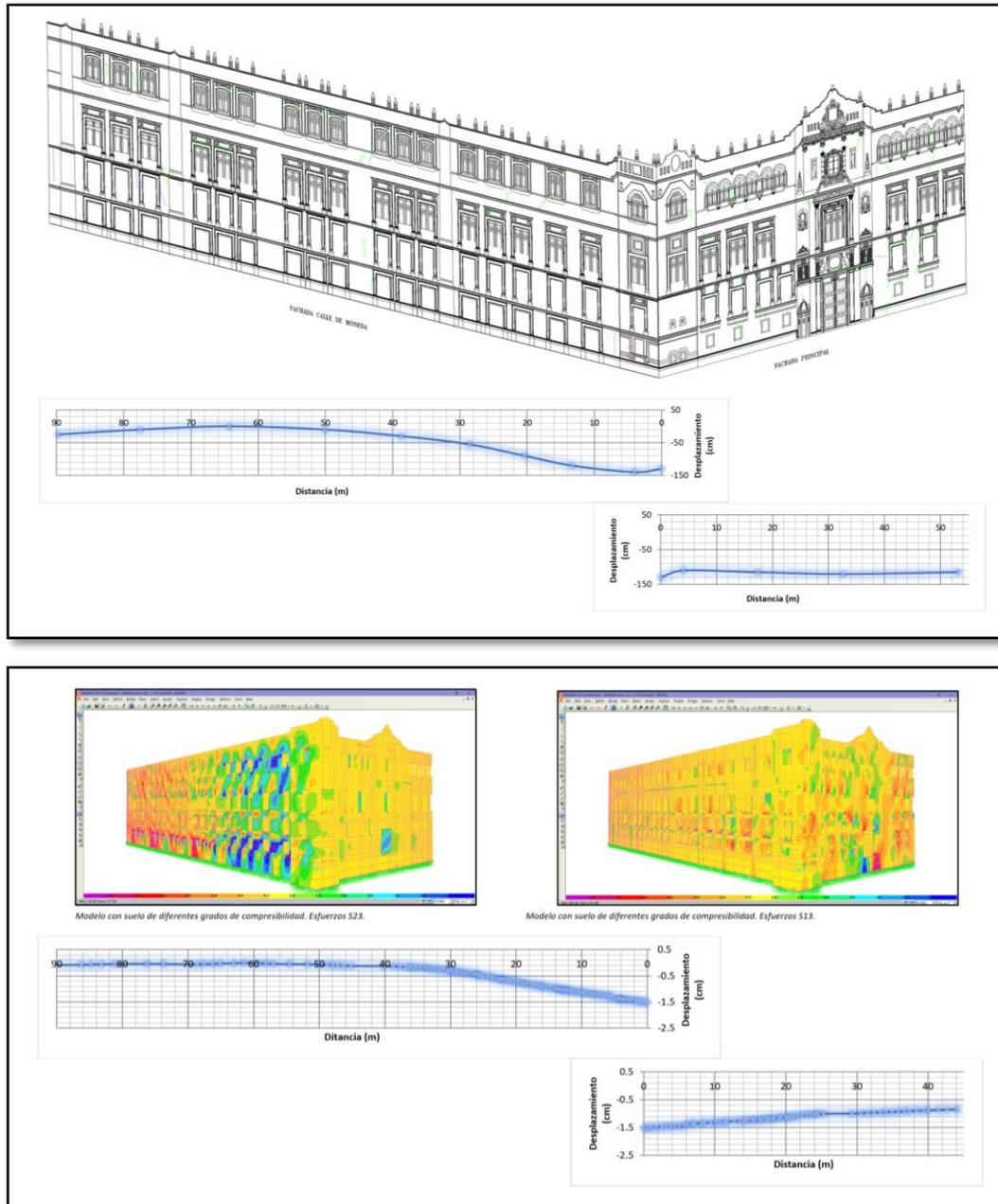


Figura189. Comparación entre los daños presentes en el Palacio Nacional y los resultados obtenidos en el Modelo con un suelo de diferentes grados de compresibilidad. (La primera Imagen corresponde a la imagen 133 del presente trabajo, la segunda imagen fue elaborada por la autora a partir de los resultados obtenidos).

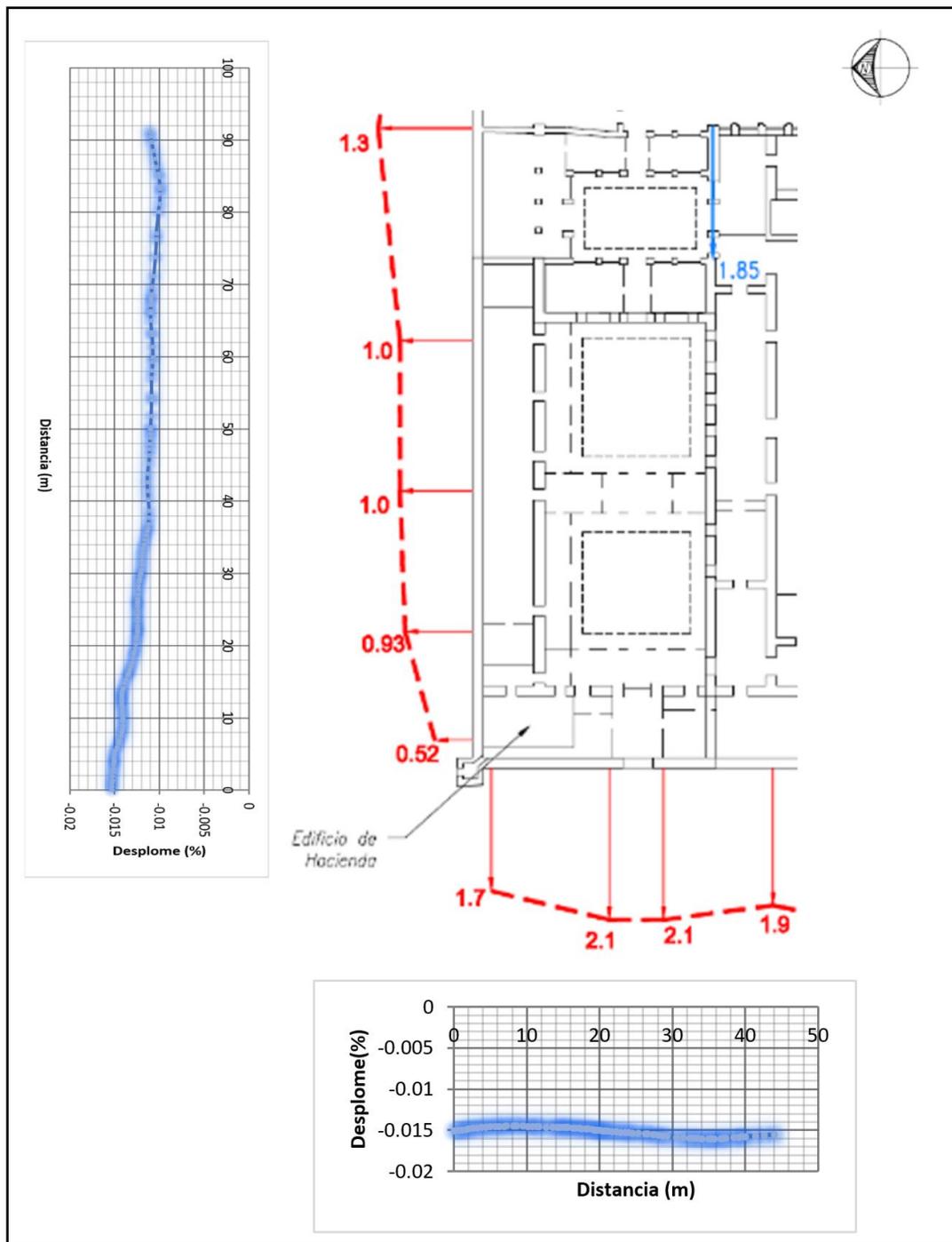


Figura 190. Desplomes (%) obtenidos en la evaluación geotécnica del 2007 (GTC, Geotecnia S.A. de C.V., 2007) y los desplomes obtenidos por la autora, del modelo con suelo de diferentes grados de compresibilidad.

## 5. CONCLUSIONES

Del análisis realizado se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Los esfuerzos que se presentan en la estructura varían en función de la rigidez del suelo, de esto se deduce que, si el Palacio Nacional se encontrara en un suelo firme, el comportamiento del edificio sería satisfactorio, ya que, la gran mayoría de los daños en el Palacio se deben a los esfuerzos inducidos en la estructura por los hundimientos diferenciales.
- También se puede advertir que, de las grietas registradas en este trabajo, gran parte coincide con la ubicación de los mayores esfuerzos obtenidos en el modelo, independientemente de las condiciones de apoyo; siendo el modelo con módulo de reacción variable el que ofrece mayor similitud con la situación real del inmueble.
- Tanto los esfuerzos principales como los daños, suelen presentarse alrededor de los vanos, por la discontinuidad que provocan, así como, por la diferencia de rigideces entre la mampostería del muro y los enmarcamientos de piedra en los mismos vanos.
- Las situaciones en que los esfuerzos máximos no coinciden con los daños, se atribuyen a: por una parte, a que el análisis realizado es elástico lineal; por otra parte, existen muchas variables que han influido en el comportamiento estructural del edificio, las cuales, no siempre pueden ser consideradas en dichos programas, como: la historia constructiva del Palacio, la gran cantidad de intervenciones realizadas tanto en la superestructura como en su cimentación, la diversidad de materiales y procesos constructivos, así como las modificaciones que ha sufrido el subsuelo, ante la historia de cargas a las que ha sido sometido y la extracción del agua del acuífero, lo cual ha cambiado sus características a través del tiempo.
- A pesar de las diferencias, entre la información registrada en el 2007 y los resultados obtenidos, en cuanto a las magnitudes en los desplazamientos y desplomes, el modelo es una herramienta útil para el estudio del comportamiento estructural de esta importante construcción.
- Por tanto, es recomendable: en primer lugar, realizar una inspección más detallada del cuarto nivel, para identificar las características del sistema estructural y los principales detalles constructivos; en segundo lugar, elaborar un estudio de mecánica de suelos para realizar un diagnóstico que justifique la configuración en la que se deforma la base de la estructura y poder proponer una solución que atenúe la velocidad del hundimiento diferencial; tercer lugar, ampliar el modelo para el estudio integral del conjunto; en cuarto lugar, estudiar el comportamiento estructural ante

los hundimientos diferenciales, tomando como referencia los datos del Sistema de Monitoreo Continuo y los levantamientos de daños, lo cual ayudará en la toma de decisiones para la conservación del Palacio Nacional.

- Por último, conviene tener presente, todo lo que se requiere para la conservación de un Edificio Histórico, como ha sido el Palacio Nacional de México, no solo desde el punto de vista, económico, científico, social o político, sino también desde el punto de vista humano, pues es imposible imaginar, la enorme cantidad de personas que, a través de los siglos, contribuyeron o, en muchos casos, fueron obligados a contribuir, con su tiempo, su esfuerzo, e incluso su vida, en la construcción y mantenimiento de este Monumento. Es necesario reconocer y recordar, la labor de estas personas, pues su ejemplo debe inspirar a todos los mexicanos, a buscar, por medio del trabajo honesto y una paga justa, un futuro mejor para nuestro País.

## BIBLIOGRAFÍA

### Referencia 1

Islas Domínguez, Alicia  
Barrera Rivera, José Álvaro  
*"Arqueología Urbana en la reconstrucción arquitectónica del recinto Sagrado de México"*  
INAH 2010

### Referencia 2

Castro Morales Efraín  
*"Palacio Nacional de México"*  
Museo Mexicano, S.A. de C.V.  
México 2003

### Referencia 3

Coordinación Nacional de Monumentos Históricos,  
INAH  
*"Palacio Nacional"* (Reporte)  
1996

### Referencia 4

Artemio Valle- Arizpe  
*"El Palacio Nacional de México: monografía histórica y anecdótica."*  
Cía. Gral de Ediciones. S.A.  
México 1952

### Referencia 5

Enrique Krauze  
*"El Palacio Nacional. La sede del Poder"*  
Secretaría de Hacienda y Crédito Público.  
Telmex  
México 2005

### Referencia 6

Revista: Relatos e historias en México.  
Año: VIII, No. 85  
Artículo: *"Palacio Nacional. Origen y destino del poder"*

### Referencia 7

TGC, Geotecnia S.A de C.V.  
*"Evaluación Geotécnica del Palacio Nacional"*  
Elaborado para el Consejo Nacional para la Cultura y las Artes  
México, D.F.  
Diciembre de 2007

### Referencia 8

Palomino Aguado José Luis  
*"Sistema de Monitoreo Continuo del Palacio Nacional, procesamiento y análisis de registros"*  
UNAM, 2013

### Referencia 9

Enrique Tamez, Enrique Santoyo, Roberto Meli, Roberto Sánchez, Fernando López Carmona, Evangelina Gutiérrez, Hilario Prieto, Jorge Díaz Padilla, Sergio Zaldívar.  
*"Catedral Metropolitana: corrección geométrica, informe técnico."*  
Asociación Amigos de la Catedral Metropolitana de México, A.C.  
México, 1995

### Referencia 10

Enrique Santoyo Villa  
Efraín Ovando Shelley  
*"Catedral y Sagrario de la Ciudad de México"*  
Resumen del informe geotécnico final de los trabajos realizados en el subsuelo de la Catedral.  
TGC, Geotecnia  
México 2008

### Referencia 11

Lesser Illiades, Juan Manuel  
Cortés Pérez, Miguel Ángel  
*"El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje"*  
Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIII, No. 3, páginas de la 13 a la 18.  
Septiembre – diciembre de 1998.

### Referencia 12

Dr. Juan Félix Rodríguez Rebolledo  
*"Visión del futuro de la práctica de la Ingeniería Geotécnica en la Ciudad de México, y su interrelación con los reglamentos de diseño y construcción."*  
Presentación del 17 de noviembre de 2011, en el 26º Congreso Nacional de Ingeniería Civil.

**Referencia 13**

Terrones Mares, Juan Carlos  
*"Algunos aspectos acerca de los hundimientos diferenciales en el Palacio Nacional."*  
Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón,  
UNAM  
México, 2001

**Referencia 14**

Deméneghi Colina Agustín  
*"Método del elemento finito. Análisis lineal."*  
Facultad de Ingeniería, UNAM  
Segunda reimpresión.  
México, 2009

**Referencia 15**

Doblaré Castellano, Manuel  
García Villa, Luis  
*"Fundamentos de la Elasticidad Lineal"*  
Editorial SINTESIS  
España, 1999

**Referencia 16**

Rubio González, Carlos  
Romero Muñoz, Víctor  
*"Método del elemento finito. Fundamentos y aplicaciones con ANSYS"*  
Editorial LIMUSA  
Primera edición.  
México 2010

**Referencia 17**

L. Huston, Ronald  
Passerello, Chris E.  
*"Finite Element Methods an Introduction"*  
Marcel Dekker, INC.  
USA, 1984

**Referencia 18**

Chandrupatla, Tirupathi R.  
Belegundu, Ashok D.  
*"Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería"*  
PEARSON, Prentice Hall  
Segunda edición  
México, 2015.

**REFERENCIA 19**

Melli Piralla  
*Diseño Estructural*  
Editorial Limusa  
Segunda Edición  
México, D.F. 2000

**REFERENCIA 20**

Gómez Salgado, Alan  
*Tesis "Análisis Estructural y propuesta de rehabilitación de un edificio del siglo XVII denominado "Las Cárceles de la Perpetua"*  
UNAM, FES ACATLÁN  
Abril 2016