

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado. Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

C. A. Torres Montes de Oca^{1*} , J. E. Rosas Valencia² 

*Autor de Contacto: ktcate2@hotmail.com; ctorresmo@ipn.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.784>

Recibido: 25/10/2024 | Correcciones recibidas: 02/06/2025 | Aceptado: 05/08/2025 | Publicado: 01/09/2025

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de las torres campanario de un templo histórico construido con mampostería irregular, se analiza por medio de un modelo de elementos finitos tipos shell y bloques de volteo. Los resultados mostraron relación coherente del comportamiento respecto a los cambios de sección. Los hundimientos diferenciales incrementaron drásticamente los desplazamientos. Como limitación se tuvo la interrupción del acceso, por actividades de intervención al inmueble. La singularidad de este trabajo se basa en la superposición gráfica de los desplazamientos calculados ante diferentes combinaciones de acciones aisladas y combinadas. En conclusión, los desplazamientos obtenidos con señales en el tiempo son menos críticos que los determinados con espectros de respuesta.

Palabras clave: torres campanario, hundimientos diferenciales, análisis dinámico, análisis lineal modificado, edificios históricos.

Citar como: Torres Montes de Oca, C. A., Rosas Valencia, J. E. (2025), “*Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado. Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.*”, Revista ALCONPAT, 15 (3), pp. 249 – 298, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.784>

¹ Profesor investigador en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco (ESIA UT), Instituto Politécnico Nacional (IPN), 53950, Naucalpan de Juárez, Estado de México, México, <http://www.sepi.esiatec.ipn.mx>.

² Alumno de nivel maestría en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco (ESIA UT), Instituto Politécnico Nacional (IPN), 53950, Naucalpan de Juárez, Estado de México, México, <http://www.esiatec.ipn.mx>.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el Carlos Alberto Torres Montes de Oca contribuyó con el 100% de la idea original, dirección y escritura final, y José Eduardo Rosas Valencia contribuyó con el 100% del escrito inicial del documento y con el dibujo y edición de figuras.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2026.

Virtual determination of displacements in bell towers of historic buildings subjected to seismic actions and subsidence, using shell elements, linear and modified linear dynamic analysis. Case study: Templo de la Santa Veracruz.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the behavior of the bell towers of a historical temple built with irregular masonry, it is analyzed by means of a finite element model of shell types and turning blocks. The results showed a coherent relationship of the behavior with respect to section changes. Differential subsidence drastically increased the displacements. One limitation was the interruption of access, due to intervention activities in the building. The uniqueness of this work is based on the graphic superposition of the displacements calculated for different combinations of isolated and combined actions. In conclusion, the displacements obtained with time signals are less critical than those determined with response spectrum.

Keywords: bell towers, differential subsidence, dynamic analysis, modified linear analysis, historic buildings.

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edifícios históricos sujeitos a ações sísmicas e subsidência, utilizando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada. Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das torres sineiras de um templo histórico construído com alvenaria irregular, analisado através de um modelo de elementos finitos de tipos de concha e blocos de torneamento. Os resultados mostraram uma relação coerente do comportamento em relação às mudanças de secção. O aluimento diferencial aumentou drasticamente os deslocamentos. A limitação foi a interrupção do acesso, devido a actividades de intervenção no edifício. A singularidade deste trabalho baseia-se na sobreposição gráfica dos deslocamentos calculados para diferentes combinações de ações isoladas e combinadas. Em conclusão, os deslocamentos obtidos com sinais temporais são menos críticos do que os determinados com espectros de resposta.

Palavras-chave: torres de sino, subsidência diferencial, análise dinâmica, análise linear modificada, edifícios históricos.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

1. INTRODUCCIÓN

En la práctica profesional se usan herramientas computacionales para el trazo geométrico, mallado y análisis numérico con el método de elementos finitos (MEF) tipo shell para representar sistemas estructurales de edificios completos de una forma eficiente y rápida, por lo que, se vuelve indispensable conocer el comportamiento estructural virtual en este tipo de modelaciones con elementos finitos tipo shell, con análisis lineales y lineales modificados. En este trabajo se comparan los análisis lineales y cuasi no-lineales del Templo de la “Santa Veracruz”, el cual se fundó en el siglo XVI y se reemplazó por una nueva construcción en el siglo XVIII, la cual fue edificada en su totalidad con mampostería irregular, dicho templo se sitúa en el Centro Histórico de la Ciudad de México, una zona altamente sísmica y con un suelo compresible, que ha perjudicado a la edificación, presentado hundimientos diferenciales considerables. La modelación de edificaciones antiguas conlleva una complejidad mayor en comparación con inmuebles contemporáneos en varios aspectos, tales como: las propiedades mecánicas de los materiales, la homogenización de éstos y la aproximación a la realidad geométrica. Por lo que se requiere una serie de decisiones para determinar los componentes esenciales y así lograr una modelación adecuada de la estructura, dichos componentes pueden ser: los sistemas constructivos, los materiales, geometría, propiedades mecánicas, acciones internas o externas que contengan un impacto sobre la estructura. Este trabajo busca que dichos modelos sean relativamente rápidos, por lo que se llevan a cabo a través de análisis lineales y/o lineales modificados, para que muestren resultados confiables, aunque requieren mayor pericia para su lectura e interpretación en comparación con otros tipos de análisis, por lo que son idóneos para modelar y analizar sistemas estructurales que no presentan deterioro o daño crítico, lo que deja un margen de prevención para realizar todos los análisis y procedimientos necesarios para proponer acciones adecuadas.

2. TENDENCIA DE COMPORTAMIENTO Y DETERIORO ESTRUCTURAL EN TORRES

En las torres campanario tiende a cambiar su rigidez conforme se incrementa su altura, dados los cambios de dimensiones y secciones. En la figura 1 se ilustran tendencias comunes de deterioro y fallas en las torres campanarios que forman parte de los sistemas estructurales de templos típicos mexicanos con mampostería histórica irregular junteada con argamasa de cal y arena.



Fig. 1. Tendencia de deterioro y falla en torres campanario adosadas a cuerpos adyacentes, a) falla horizontal por sismo con tendencia al volteo en la parte superior por cambio abrupto de volumen. Imagen retomada de Secretaría de Cultura, Gobierno de México (2024), b) falla diagonal por sismo por cambio abrupto de sección. Imagen retomada de: De la Torre R. O., et. al. (2004).

Con la finalidad de comprender el comportamiento estructural de este tipo de torres, es común que se analicen de manera aislada, donde se evita modelar cuerpos aledaños para llevar a cabo simulaciones con mayor rapidez. En las figuras 2 y 3 se muestran las tendencias de concentraciones de esfuerzos, volteos y patrones de deterioros debido al efecto que provocan las fuerzas inerciales sísmicas. En las figuras 2b y 2c se presenta la modelación de una torre campanario de manera aislada y considerando un comportamiento tipo péndulo invertido, con base fija y base de contacto respectivamente, donde la figura 2b presenta una concentración de esfuerzos con mayor magnitud en el cambio de sección brusco respecto a su base, mientras que la figura 2c expone un comportamiento de volteo tipo bloque rígido. Las figuras 2d y 2e ilustran el comportamiento de la torre considerando restricciones laterales en la parte baja de la misma, simulando el contacto con un cuerpo aledaño por medio de resortes, sin modelar el sistema completo con método de elementos finitos. En la figura 2e se observa un comportamiento de volteo en el cambio de rigidez. En las figuras 3c y 3d se presentan los patrones de deterioro estructural cuando se modelan las torres como péndulo invertido sin restricción lateral y con restricción lateral en la zona baja respectivamente.

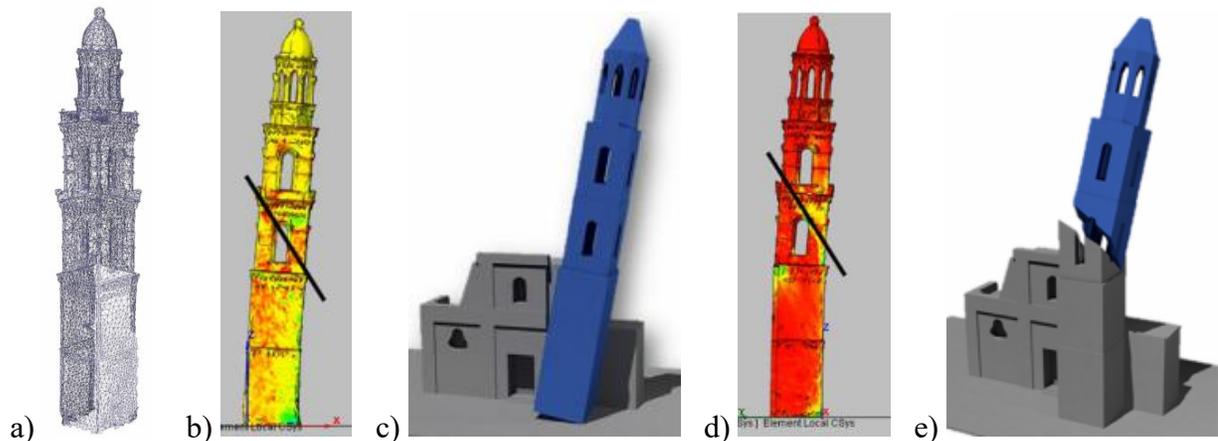


Fig. 2. Tendencia de concentración de esfuerzos y volteos en torre campanario, a) modelo con elementos finitos (EF), b) concentración de esfuerzos en torre aislada, c) volteo en la base, d) concentración de esfuerzos en torre con interacción de cuerpo adyacente en la parte baja, e) volteo en cambio abrupto de sección. Retomado de Francesco M., et. al. (2020).

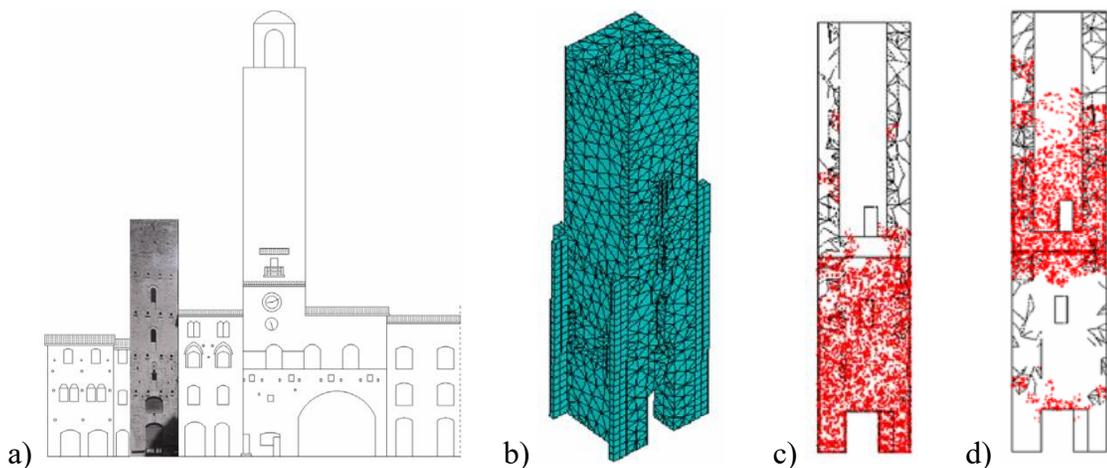


Fig. 3. Patrones de deterioro en torre campanario debido a fuerzas sísmicas, a) vista frontal e interacción de la torre con otros cuerpos adyacentes, b) modelo con EF aislado y con restricciones laterales, c) zona de agrietamiento en torre aislada, d) zona de agrietamiento en torre restringida lateralmente. Retomado de: Gianni B., et. al. (2019).

En la figura 4 se muestra la tendencia de concentración de esfuerzos debido a los desplazamientos laterales. La figura 4c exhibe dicha concentración a partir de la zona intermedia hacia la parte superior, debido a la modelación estructural de la torre aislada con restricciones en la zona baja. La figura 4d presenta la concentración de esfuerzos en la zona inferior, dado que existen elementos que restringen los desplazamientos en esa dirección, sin embargo, la zona lateral que se encuentra en contacto con el cuerpo adyacente tampoco está completamente desligada del cuerpo adyacente, lo cual no se observa en la modelación.

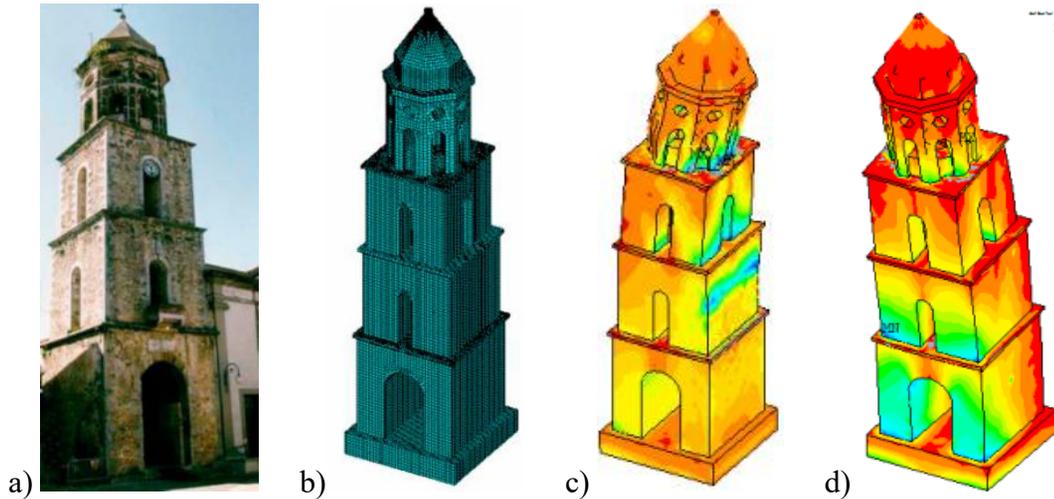


Fig. 4. Tendencia de concentración de esfuerzos en torre campanario, a) torre campanario física, b) modelo EF, c) concentración de esfuerzos en la torre campanario con restricción lateral en la parte baja, d) concentración de esfuerzos en la torre campanario aislada. Retomado de: Massimiliano F., et. al. (2023).

En las figuras 5a y 5b se muestra una torre campanario física y su modelación digital con EF, mientras que en la figura 5c se aprecian los efectos de sus desplazamientos provocados por fuerzas sísmicas, y en la figura 5d se grafican dichos desplazamientos con respecto a su altura para visualizar el comportamiento de la torre.

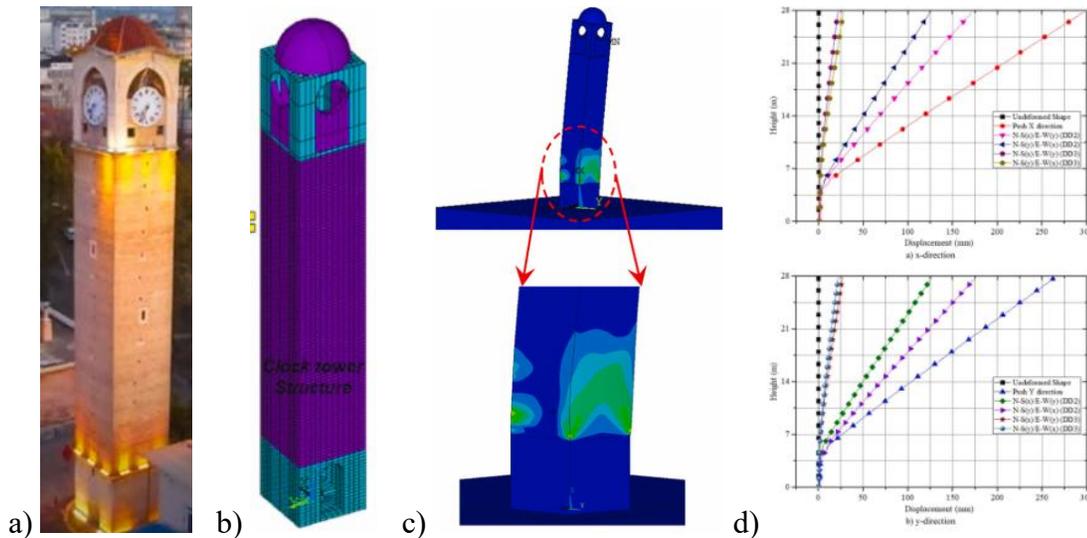


Fig. 5. Tendencia de desplazamientos en torre campanario con cambio de sección brusco en la base, a) torre real, b) modelo EF, c) concentración de deformaciones debido a los desplazamientos laterales, d) graficas de desplazamiento con relación a la altura. Retomado de: Hakan E., et. al., (2024).

En las figuras 2 a 5 se presentan cuatro casos digitales, dichos casos tienen en común la tendencia de presentar desplazamientos laterales significativos como resultados de exposición a eventos sísmicos, así mismo, se observan concentraciones de esfuerzos en los cambios bruscos de secciones y con el incremento de altura o en la base cuando las torres se modelan de manera aislada. Por otra parte, en la figura 5, se muestra que dicho comportamiento se puede graficar linealmente para simular la tendencia de los desplazamientos y su interacción con cuerpos adyacentes o bases rígidas. Este tipo de modelos digitales con EF se pueden utilizar para simular los comportamientos de desplazamientos en torres que pertenecen a sistemas completos de edificaciones históricas o incluso torres aisladas, y para agilizar el proceso se propone utilizar elementos tipo shell. Además de ello, los principios y directrices ISCARSAH (2003, 2004) fomentan que los estudios estructurales se lleven a cabo en el sistema completo y no de manera aislada.

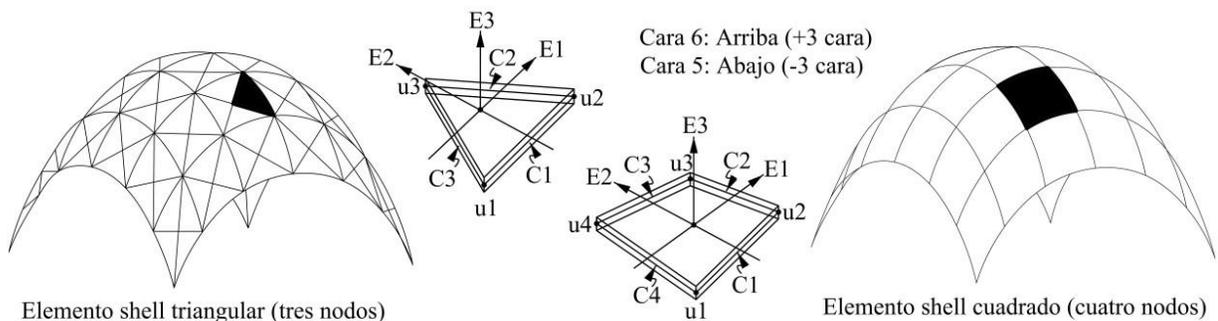
En la figura 6 se presenta un modelo a escala de un templo típico en México construido con mampostería histórica irregular con mortero cal-arena, así como sus patrones de daño simulados en una mesa vibratoria (retomado de Chávez M., 2010). Una vez sometido a aceleraciones en la base, este modelo presentó tendencia de agrietamiento muy similar a lo mostrado en la figura 1, las cuales son edificaciones históricas de mampostería irregular junteadas con mortero cal-arena, bajo efectos que les dejó el sismo del 2017 en México. En el modelo a escala se observan patrones de fisuración en forma diagonal en la torre izquierda (ver figura 6a), similar a la figura 1b, mientras que la torre derecha presenta un agrietamiento horizontal (ver figura 6b), similar a la figura 1a.



Fig. 6. Principales daños en el modelo a escala sometido a acciones sísmicas, a) tendencia de deterioro y agrietamiento en diagonal en torre izquierda, b) tendencia de falla horizontal en el bloque superior de la torre campanario derecha. Retomada de Chávez M., (2010).

3. LOS ELEMENTOS FINITOS TIPO SHELL

Los elementos finitos (Figura 7) pueden estar compuestos tanto de 3 nodos ($u_1 \dots u_3$) dando una forma triangular ($C_1 \dots C_3$) teniendo solo 5 caras (la cara 4 no es contada), o puede estar compuesto de 4 nodos ($u_1 \dots u_4$) y 6 caras ($C_1 \dots C_4$), estos elementos tienen sus ejes locales situados en el centro de la figura representado los ejes X, Y y Z siendo representados como E1, E2 y E3 en la figura respectivamente, además cuentan con sus nodos los cuales interactúan con otros elementos finitos tipo shell como uniones para representar un elemento más grande que se asemeje, en este caso, a una bóveda vahída, dando la libertad de modelado utilizando solo dos tipos de elementos shell. El motivo de modelar un elemento tipo shell triangular o cuadrado es principalmente por la convergencia y racionalidad de los resultados obtenidos, ya que los nodos muestran desplazamientos en los 3 ejes, siendo posible detectar dichos desplazamientos en cada nodo. Para visualizar el comportamiento, también el tamaño del mallado afecta a los resultados, ya que una malla fina al tener muchos elementos consume mayores recursos computacionales para obtener resultados de un solo modelo, por lo que es una decisión del modelador si priorizar la precisión del modelo o la rapidez de los resultados. Por otra parte, los elementos tipo shell con formas rectangulares son más implementados en edificaciones ortogonales, modernas y modulares, mientras que los elementos tipo shell con forma triangulares se ajustan de mejor manera a formas irregulares y curvas, por lo que son más prácticas para la modelación de templos históricos.



Elemento shell triangular (tres nodos)

Elemento shell cuadrado (cuatro nodos)

Fig. 7. Modelo de bóveda vahída basado en elementos finitos tipo shell triangulares y cuadrados; representación de ejes, caras y uniones. Retomado y redibujado de SAP2000v23 (2017), Torres C. A., et. al. (2023).

4. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio es el templo de la Santa Veracruz, cuenta con un par de torres campanario de aproximadamente 30m de altura, compuestas de piedra de cantera, el material principal de esta edificación es la mampostería irregular, y los muros que conforman la estructura tienen una variación de espesores llegando a tener espesores de 60cm hasta 170cm en diversas zonas de la misma. En la figura 8 se pueden apreciar los elementos arquitectónicos que la componen y sus medidas tanto en alzado como en planta arquitectónica. El levantamiento del templo se retomó del trabajo efectuado por los alumnos de la Especialidad en Restauración Arquitectónica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco del Instituto Politécnico Nacional. Este levantamiento geométrico estructural se llevó a cabo por medio de cintas métricas, distanciómetros láser y plomadas.

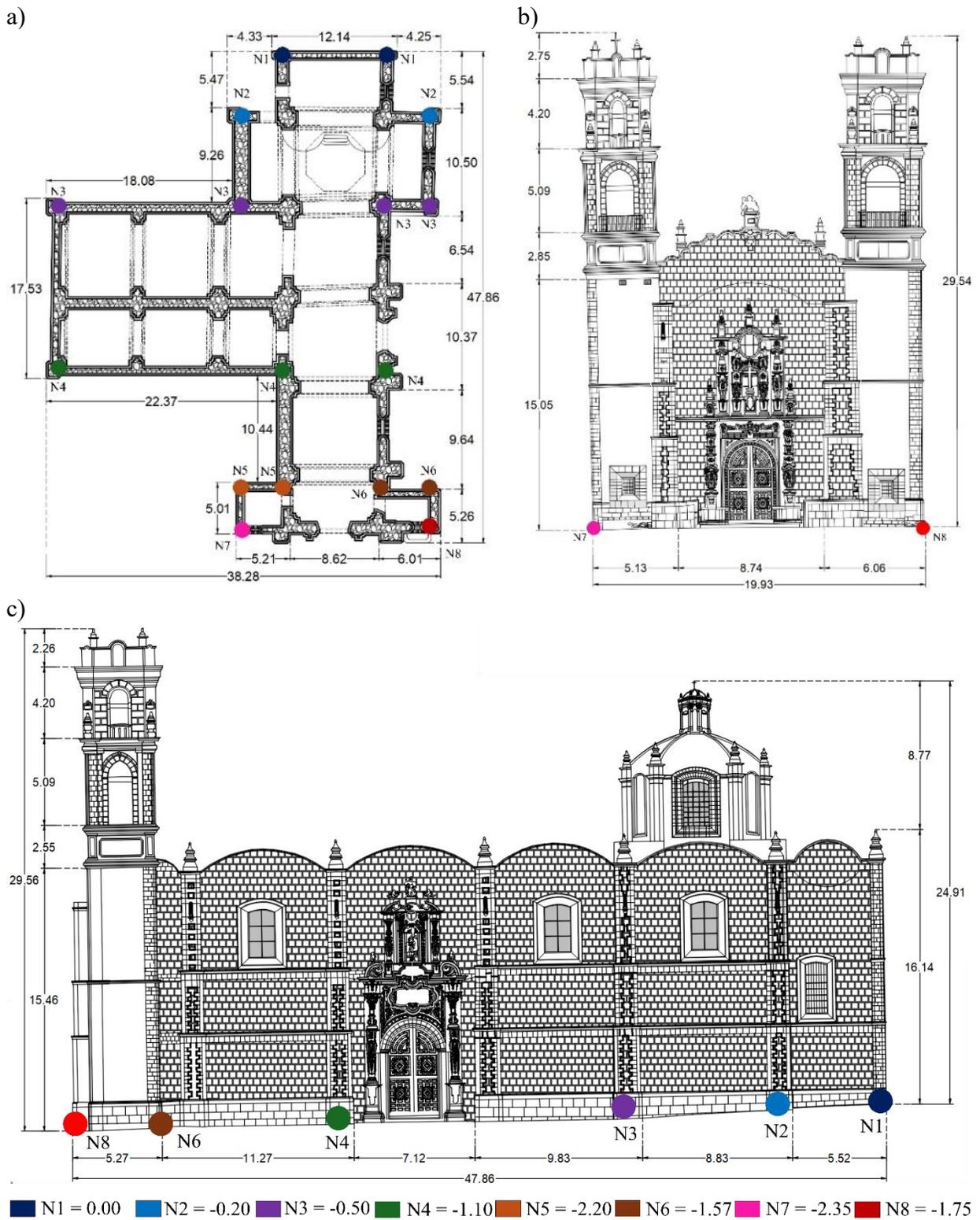


Fig. 8. Templo de la Santa Veracruz. a) planta arquitectónica general, b) fachada principal, c) alzado lateral longitudinal. Retomado y adaptado de Zepeda A., et. al. (2014).

Donde: N = Nivel de altura con relación a 0.00. NOTA: todas las cotas están en metros.

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

5. MODELACIÓN ESTRUCTURAL DIGITAL

La modelación digital de un templo histórico es compleja por la morfología que tienen estas edificaciones, por lo que, la metodología que se implementa para el desarrollo de estas estructuras también es compleja, ya que se deben tener en cuenta los sistemas constructivos que componen a cada sección físico-geométrica y las propiedades mecánicas de los materiales. El modelo del caso de estudio está desarrollado con elementos finitos tipo shell con diversos espesores para representar a la edificación como se puede apreciar en las figuras 9 y 10.

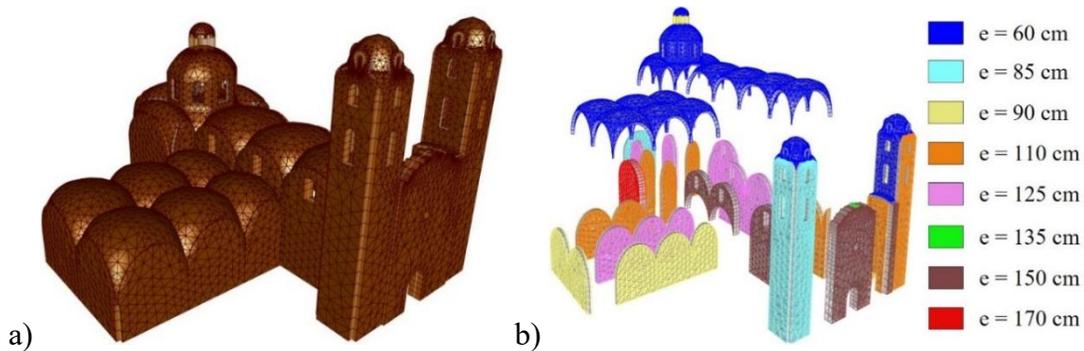


Fig. 9. Modelos, a) original con elementos finitos; b) modelo explotado del templo de la Santa Veracruz elaborado con elementos finitos tipo shell. Donde: e = espesor de los elementos.

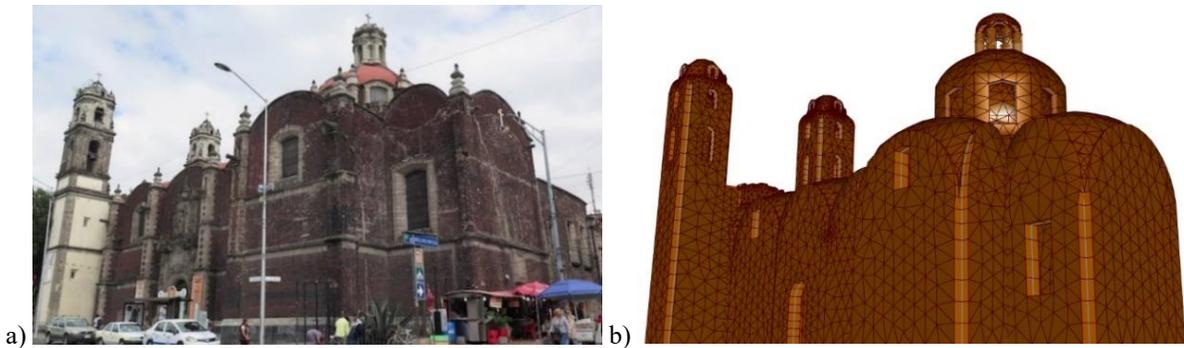


Fig. 10. Foto del inmueble físico y modelo digital, a) foto del templo de la Santa Veracruz, b) modelo digital del Templo de la Santa Veracruz. Imagen retomada de Fernández M. (2024).

El módulo elástico utilizado para la modelación estructural fue de $7,063 \text{ kg/cm}^2$, el módulo de Poisson de 0.17, el peso volumétrico de $1,627 \text{ kg/m}^3$ (Torres C., et. al., 2024). Muchos autores, tales como: García N. (2007), Angelillo M. (2014), Chávez M. (2005, 2010), Peña F. et. al. (2010), Meli R., (1998), reportan y utilizan valores de esfuerzos resistentes a tracción sumamente bajos oscilando entre 0.2 kg/cm^2 y 3 kg/cm^2 .

6. HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES

Los hundimientos considerados para la modelación del caso de estudio llegan a tener hasta -2.35 m de diferencia respecto al nivel 0.00 m, provocando afectaciones en la estructura, dichos cambios son visibles en la figura 11 donde se pueden apreciar tanto a la edición física como el modelo digital con los hundimientos aplicados en su base, los hundimientos también están representados

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

en la figura 8 con un código de colores que muestran su magnitud de hundimiento desde $N1=0.00\text{m}$ que se encuentra en la parte derecha de la figura 8c, incrementando el desnivel hasta $N7$ y $N8$ (puntos con mayores hundimientos que se encuentran en la base de las torres campanario) que tienen -2.35m y -1.75m de hundimientos diferenciales respecto al $N1$. Por otra parte, en la figura 11a se aprecian los hundimientos diferenciales en la edificación física en una fotografía, mientras que en la figura 11b se visualiza el modelo digital con elementos finitos el cual está siendo sometido a los hundimientos diferenciales aplicando los hundimientos de $N1$ a $N8$ de forma diferencial, disminuyendo el hundimiento con relación a la distancia de cada nodo, para simular el comportamiento del inmueble físico, los colores de la figura 11b exponen el comportamiento del inmueble en cuanto a deformaciones verticales.

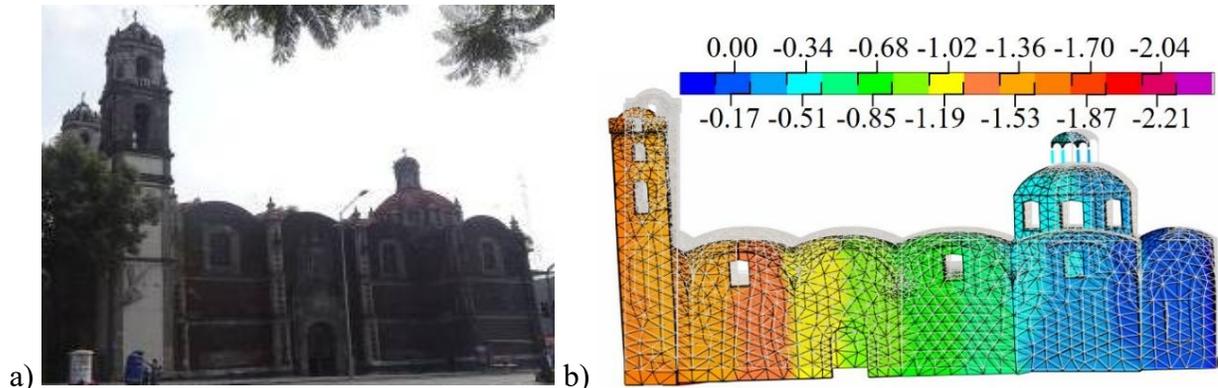


Fig. 11. Hundimientos diferenciales, a) edificación real, b) modelo digital del templo de la Santa Veracruz elaborado con elementos finitos tipo shell. Imagen retomada de MexicoCity (2024).

7. ACCIONES SISMICAS

Para simular los efectos sísmicos se utilizaron acelerogramas retomados de estaciones cercanas al sitio donde se encuentra desplantado el caso de estudio. Los acelerogramas mostrados en las figuras 12 y 13 corresponden a señales sísmicas seleccionadas: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) B1 y B2 con coordenadas 19.394694 LAT N y 94.148678 LONG W, Centro Cultural Universitario Tlatelolco Campo Libre (CCUT-CL) con coordenadas 19.449858 LAT N y 99.137919 LONG W. Dado que los acelerogramas muestran mayores amplitudes en las direcciones $N90E$ y $N90W$, se consideraron dichas aceleraciones actuando paralelas al sentido corto del edificio, el cual debería ser más desfavorable de acuerdo con la configuración geométrica vista en planta del inmueble. Por lo que, en dirección “X” del modelo se aplicaron las aceleraciones $N90E$ y $N90W$ y en la dirección “Y” se aplicaron las aceleraciones $N00E$ y $N00W$. Uno de los objetivos de este trabajo es agilizar el proceso de análisis de torres campanario que formen parte de sistemas, por lo que, se procedió a buscar los periodos de tiempo con mayor amplitud en los acelerogramas y se cortaron las señales. Se determinaron 80 segundos de fase intensa para cada una de éstas (ver figuras 14 a 18). Asimismo, para acortar aún más los tiempos de análisis, se seleccionaron 12 puntos con las mayores amplitudes en los acelerogramas, en los cuales, las amplitudes mayores (ver figura 19) respetaron los pasos de tiempo (Δt) entre éstos, despreciando los picos de aceleraciones con menor amplitud.

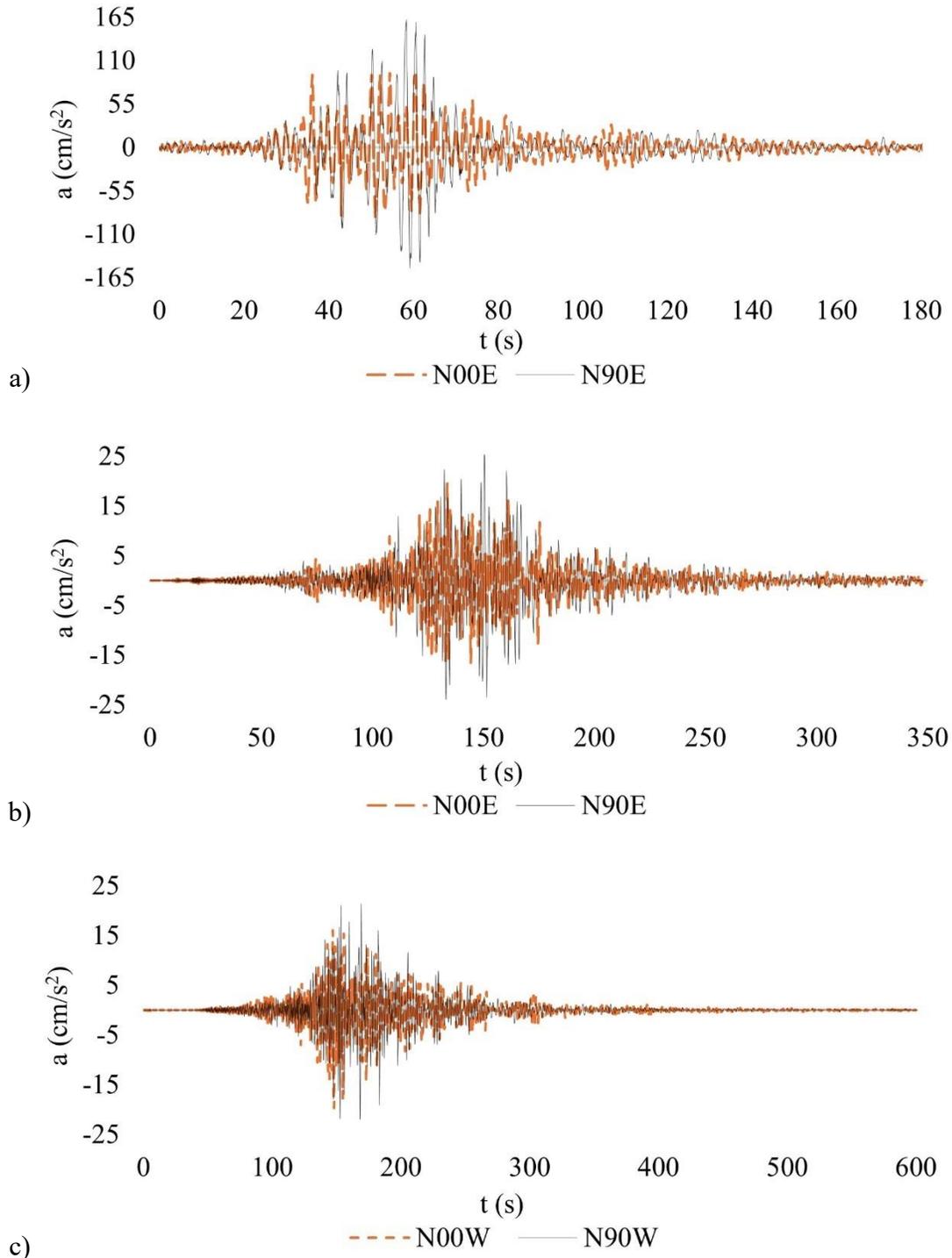


Fig. 12. Acelerogramas completos, a) sismo de 19/09/1985 en la estación SCT B-1, b) sismo del 09/09/2017 en la estación SCT B-2, c) sismo del 09/09/2017 en la estación CCUT-CL. Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s²). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

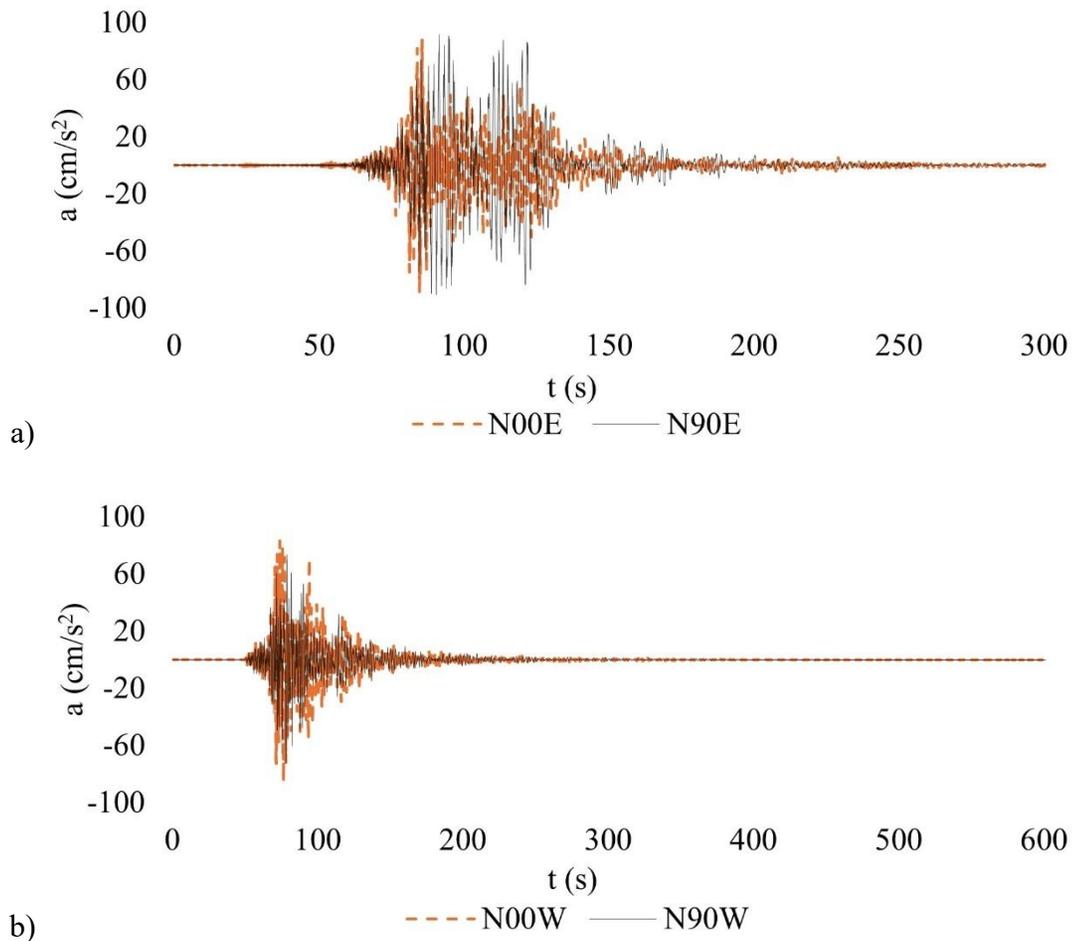


Fig. 13. Acelerogramas completos, a) sismo del 19/09/2017 en la estación SCT B-2, b) sismo del 19/09/2017 en la estación CCUT-CL. Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s^2). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

Se determinaron cinco sismos para hacer los análisis, el primero fue detectado por la estación SCT-B1 el 19/09/1985 con una magnitud de 8.1, el segundo y tercero fueron detectados por las estaciones SCT-B2 y CCUT-CL el 09/09/2017 con magnitud de 8.2, el cuarto y quinto historiales de aceleraciones fueron detectados por las estaciones SCT-B2 y CCUT-CL el 19/09/2017 con magnitud 7.1. Se optó por implementar los cuatro historiales de aceleraciones en el tiempo del año 2017 (SCT-B2 09, SCT-B2 19, CCUT-CL 09 y CCUT-CL 19) en los análisis, debido a que se observaron variaciones considerables en las aceleraciones máximas entre las dos fechas, siendo destacable el hecho de que el sismo con magnitud 8.2 (09/09/2017) resultó con aceleraciones menores al sismo con magnitud 7.1 (19/09/2017), siendo éstas de 25cm/s^2 y 100cm/s^2 respectivamente en sus picos más altos. En las figuras 14 a 18 se muestran los umbrales a partir de los cuales se consideraron los picos de aceleraciones más grandes correspondientes a la selección de los 12 pasos, con la finalidad de acortar los tiempos de análisis.

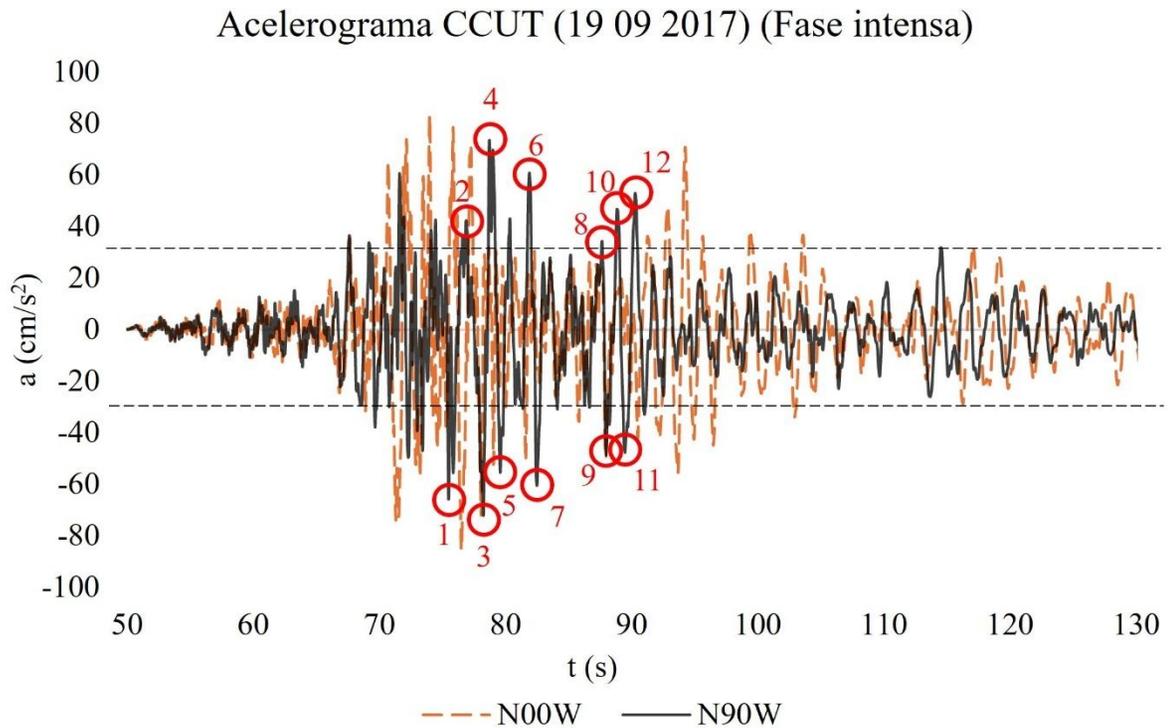


Fig. 14. Acelerograma en fase intensa con duración de 80 segundos del sismo del 19/09/2017 en la estación CCUT-CL. Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s²). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

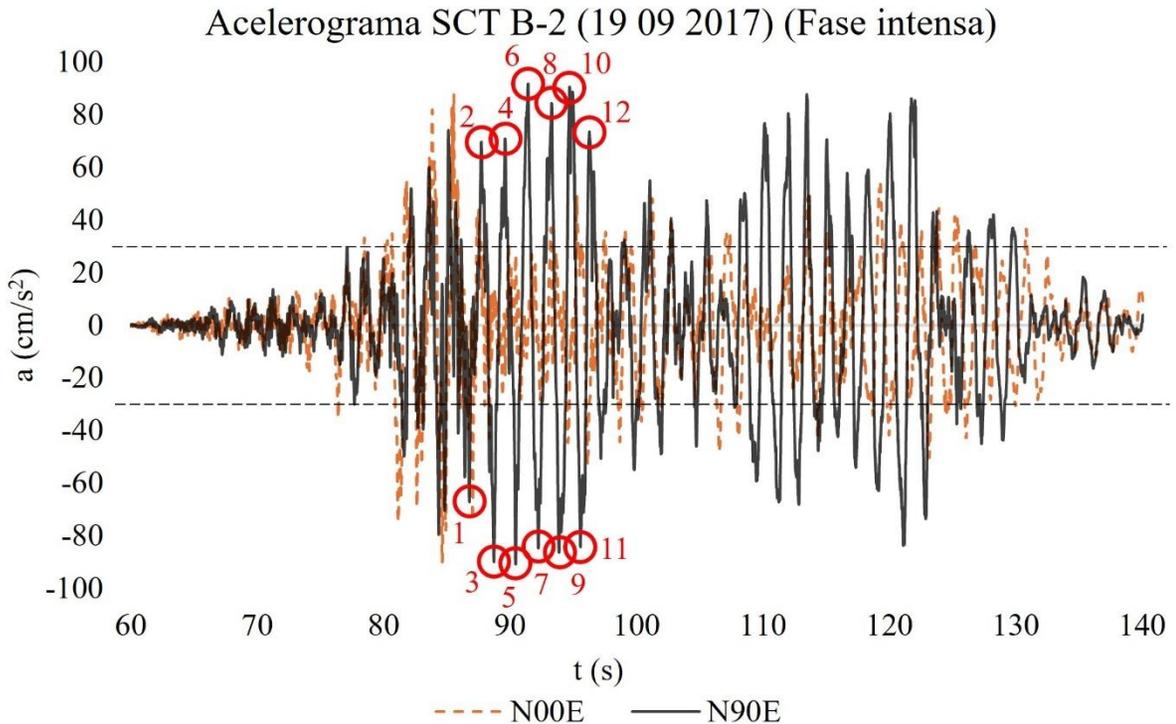


Fig. 15. Acelerograma en fase intensa con duración de 80 segundos del sismo del 19/09/2017 en la estación SCT B-2, Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s²). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

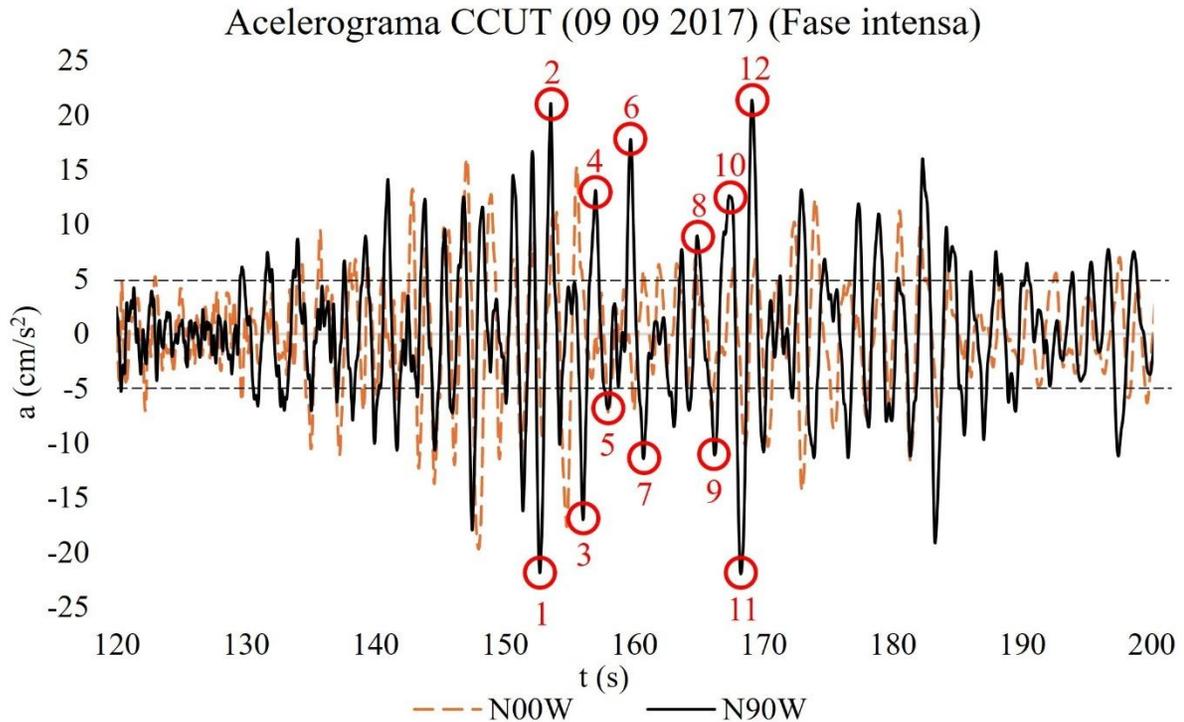


Fig. 16. Acelerograma en fase intensa con duración de 80 segundos del sismo del 09/09/2017 en la estación CCUT-CL. Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s^2). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

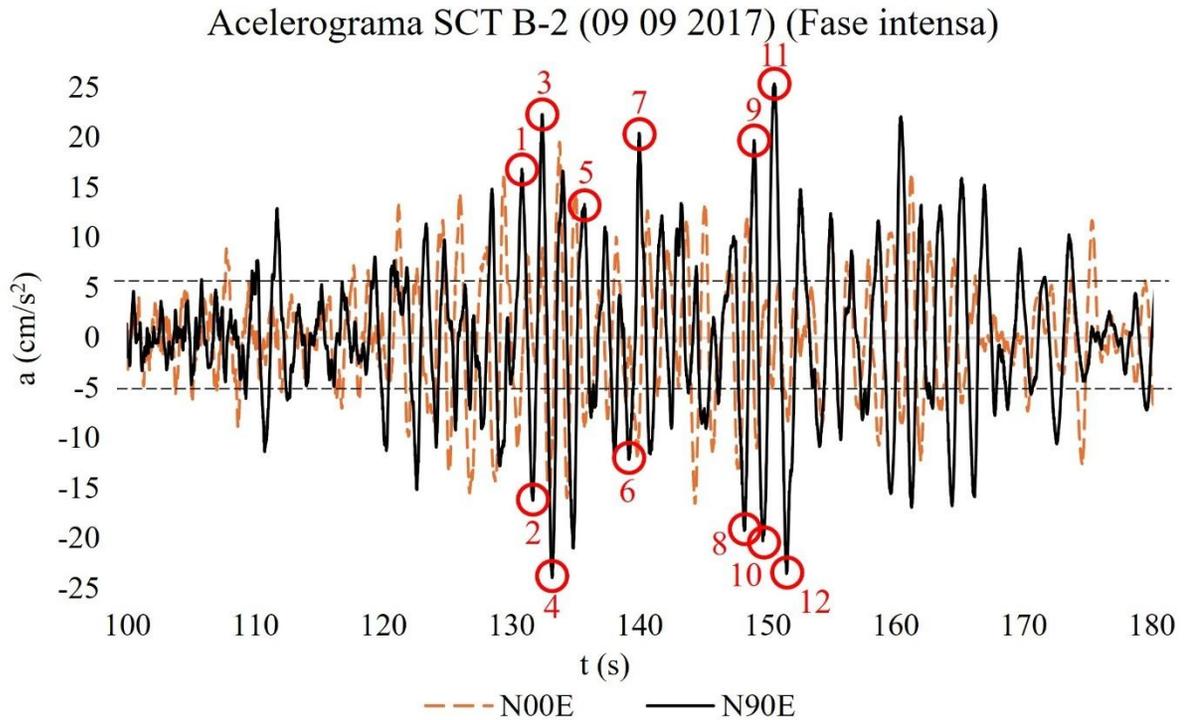


Fig. 17. Acelerograma en fase intensa con duración de 80 segundos del sismo del 09/09/2017 en la estación SCT B-2, Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s^2). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

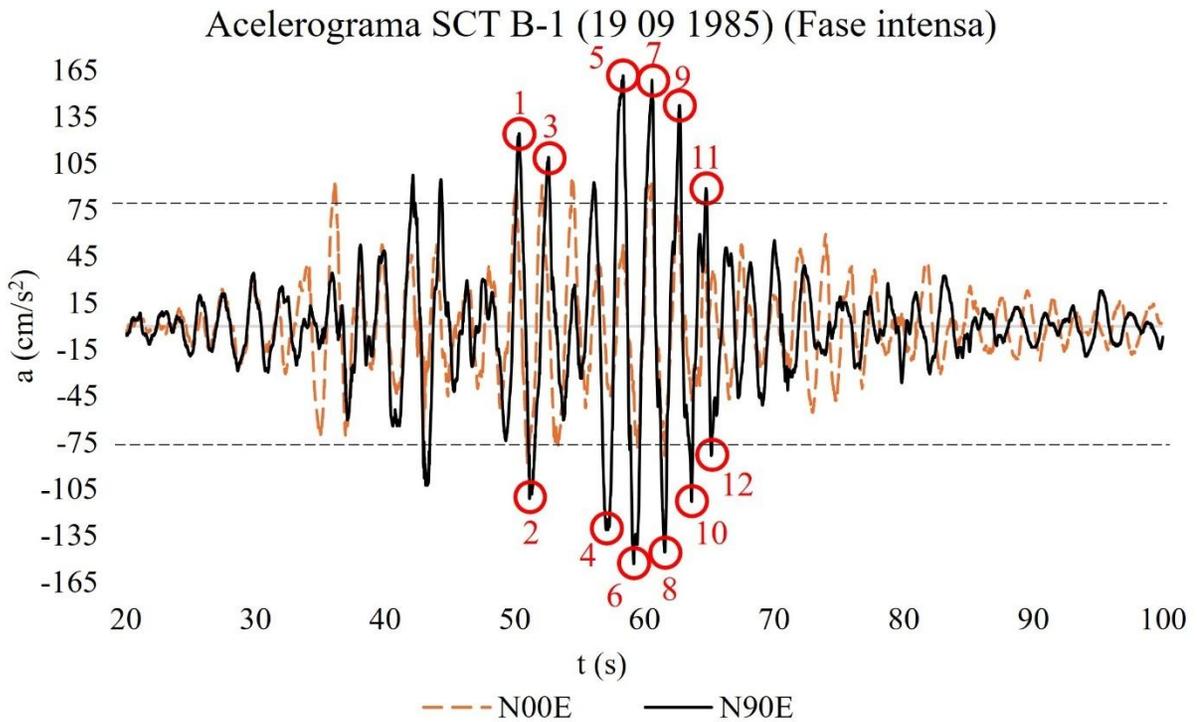


Fig. 18. Acelerograma en fase intensa con duración de 80 segundos del sismo del 19/09/1985 en la SCT B-1, Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s^2). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

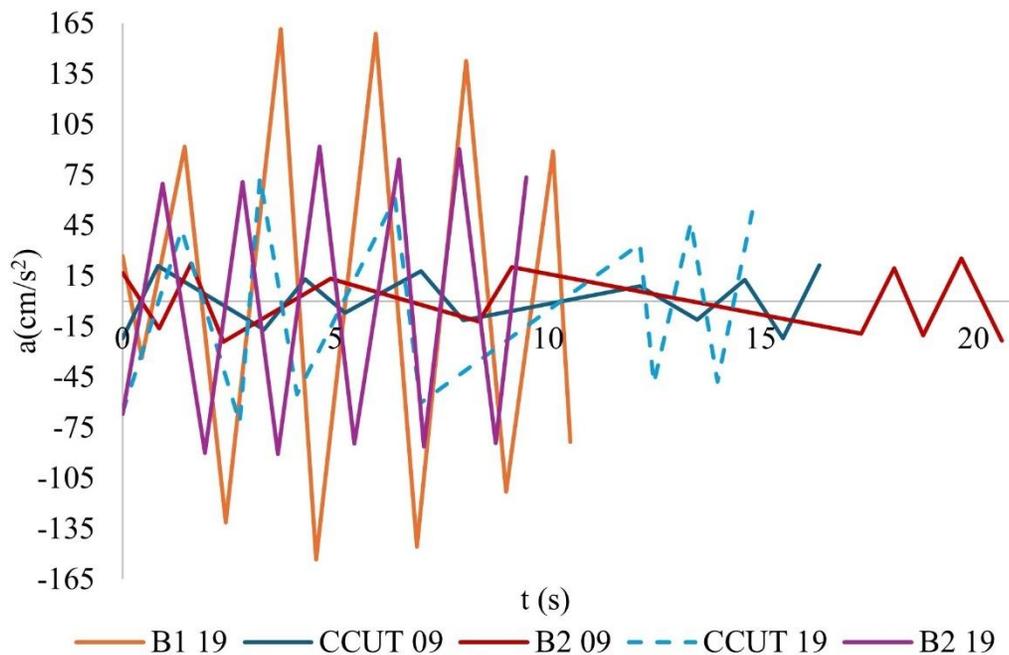


Fig. 19. Acelerogramas de 12 Pasos Cada Tiempo Medido (PCTM) entre los picos de aceleración seleccionados de cada sismo. Donde: t = tiempo (s), a = aceleraciones (cm/s^2). Acelerogramas retomados y adaptados de RAII-UNAM (2014).

Actualmente el acceso al inmueble se encuentra restringido por trabajos de intervención, asimismo, se encuentra resguardado por instituciones públicas, lo cual imposibilita su libre acceso y/o su instrumentación temporal. Con la finalidad de validar los análisis sísmicos utilizando espectros de respuesta y acelerogramas en el tiempo, se configuró un péndulo invertido para comparar y validar los desplazamientos respecto a un procedimiento analítico. El péndulo invertido se considera empotrado en la base, modelado con elementos finitos tipo shell, en el cual se desprecia el peso propio del fuste, solo se toma en cuenta la rigidez de éste, una altura de 5m (h) y una sección transversal de 50x50cm, con una carga puntual de 30 toneladas en la parte superior, y un módulo elástico igual al considerado en la mampostería irregular del caso de estudio. Al péndulo se le aplicaron las aceleraciones de las figuras 14 a 18. El caso analítico (CA) para analizar dicho péndulo se retomó de Torres C. (2023). En las figuras 20 a 29 se muestran los desplazamientos en dicho péndulo bajo acciones de acelerogramas o sismos de señal completa (SC) y fase intensa (FI), adicionalmente se propusieron señales alternativas que se conforman por 12 pasos con puntos seleccionados con $\Delta t = 1s$ (12PCS), y por 12 pasos con puntos seleccionados con Δt medida entre dichos puntos (12PCTM).

En la figura 20, 22, 24, 26 y 28 se presentan los casos SC y FI en los incisos a y b respectivamente, en los cuales se observan desplazamientos prácticamente iguales, mientras que en las figuras 21, 23, 25, 27 y 29 se exponen los casos 12PCS y 12PCTM en los incisos a y b respectivamente, estos últimos dos casos tienen un comportamiento que difiere con los dos primeros casos SC y FI. En las figuras 30 a 34 se muestran los desplazamientos del péndulo con cada sismo analizado, en su tiempo completo, fase intensa y en el rango de tiempo de los 12 puntos seleccionados, correspondiendo con los incisos a, b y c respectivamente, además, en el inciso c se muestran con puntos negros los desplazamientos determinados con el caso analítico (CA). Con base en los resultados obtenidos y mostrados en las figuras 20 a 34, se decidió llevar a cabo los análisis solo con la FI para el análisis del sistema completo.

Con la finalidad de comparar los desplazamientos y validarlos, se presentan los espectros de respuesta del sitio en la figura 35, éstos fueron obtenidos del SASID (2020), el cual pertenece a las NTCDS-CDMX-2023. Los espectros cuentan con las siguientes especificaciones: factor de hiperestaticidad $k_1=0.80$, factor de importancia (grupo) A1, factor de irregularidad = 0.7, así mismo, se presentan los espectros con factores de ductilidad $Q=1.0$ y $Q=1.5$. EPU = espectro de peligro uniforme.

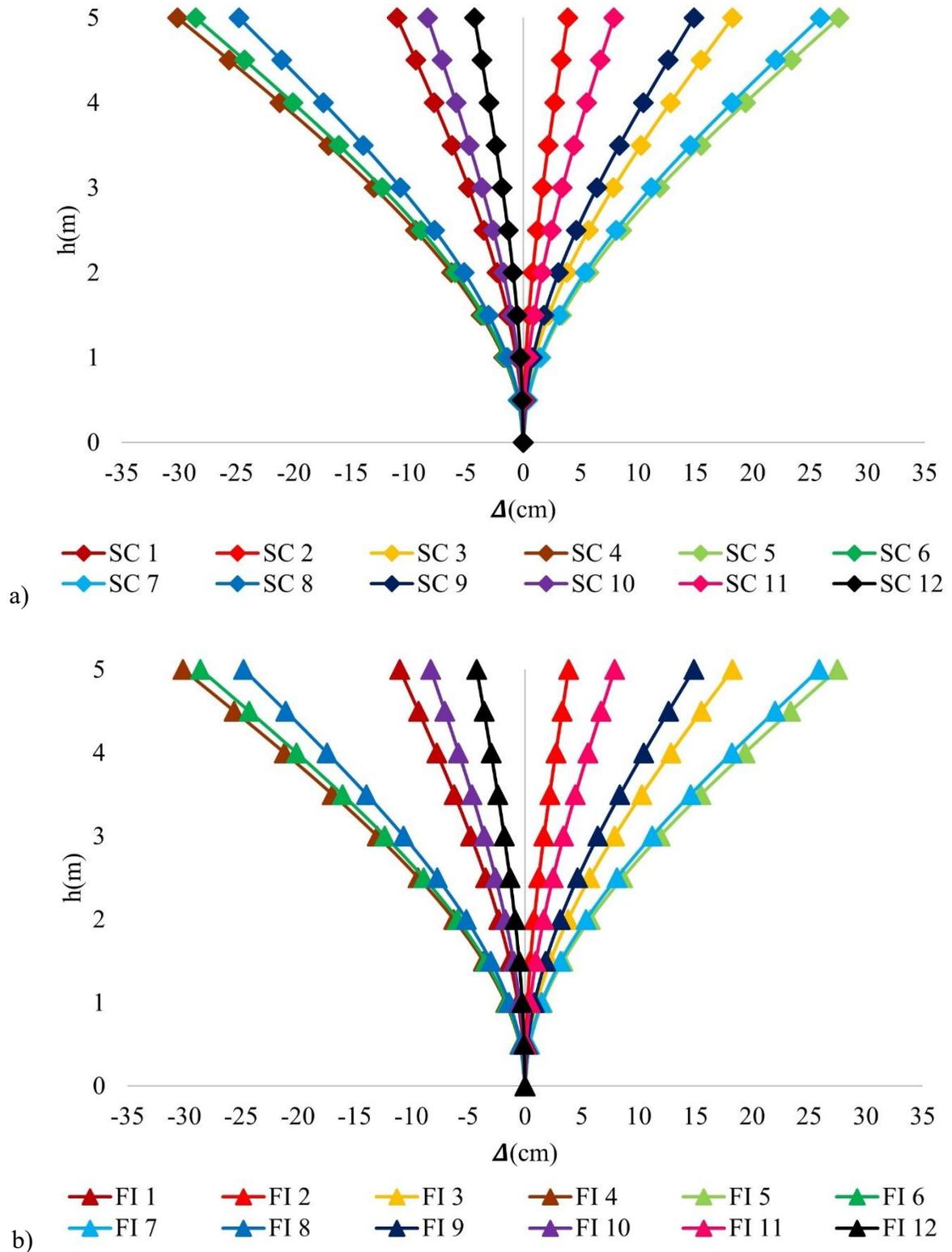


Fig. 20. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de SCT-B1(19/09/1985), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Desplazamientos.

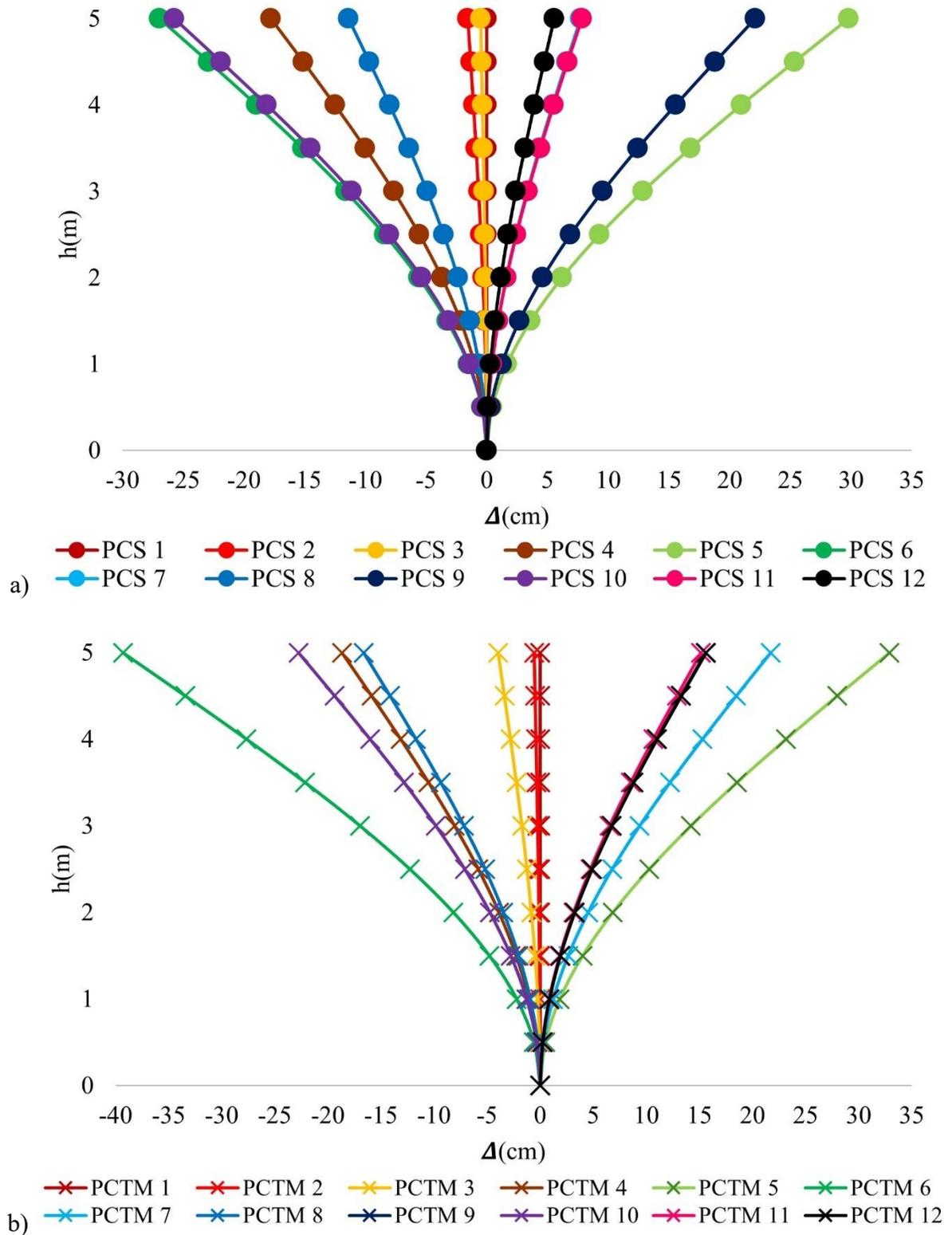


Fig. 21. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de SCT-B1(19/09/1985), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa. Donde: PCS = Pasos Cada Segundo, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido, Δ = Desplazamientos

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

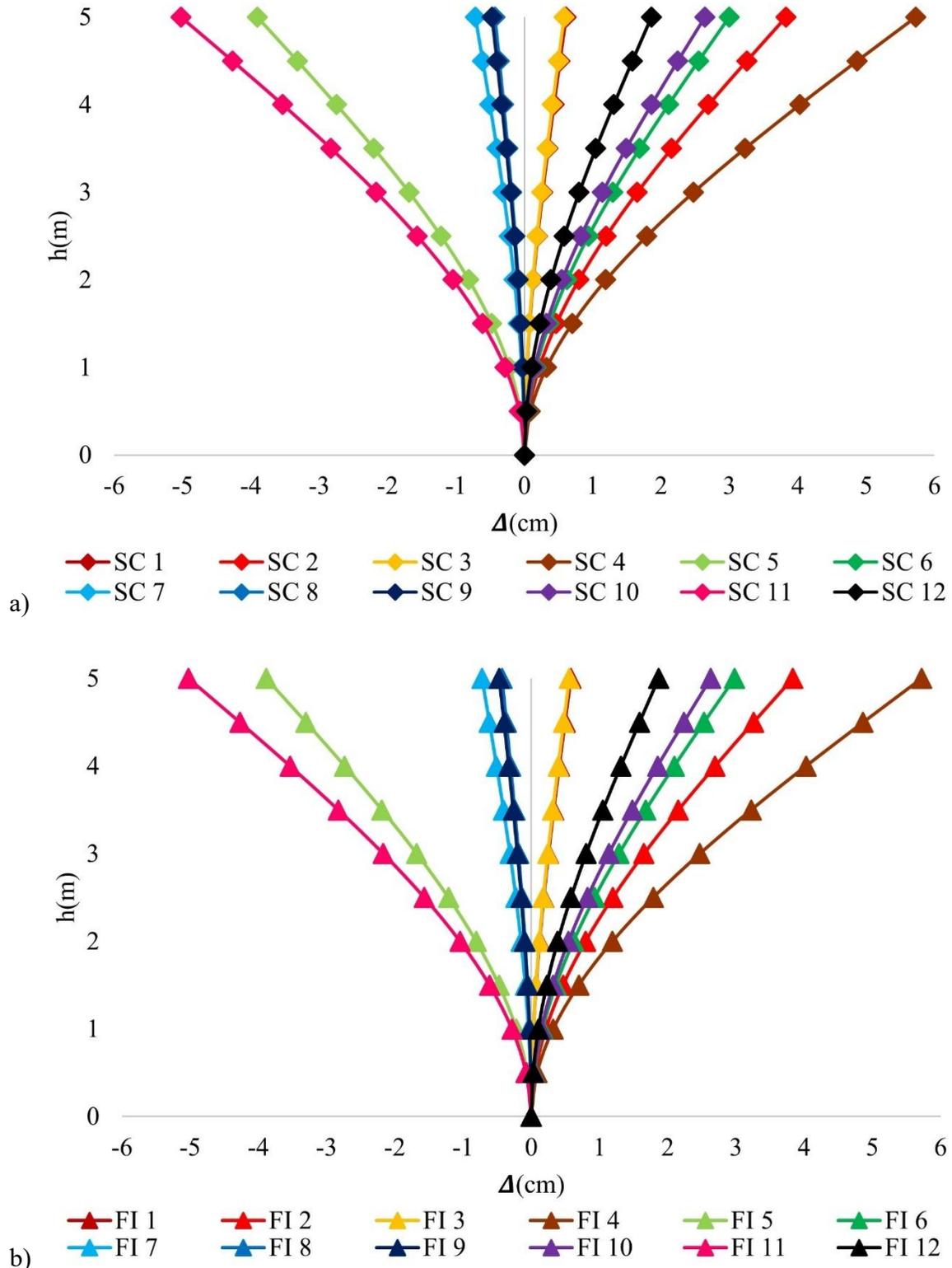
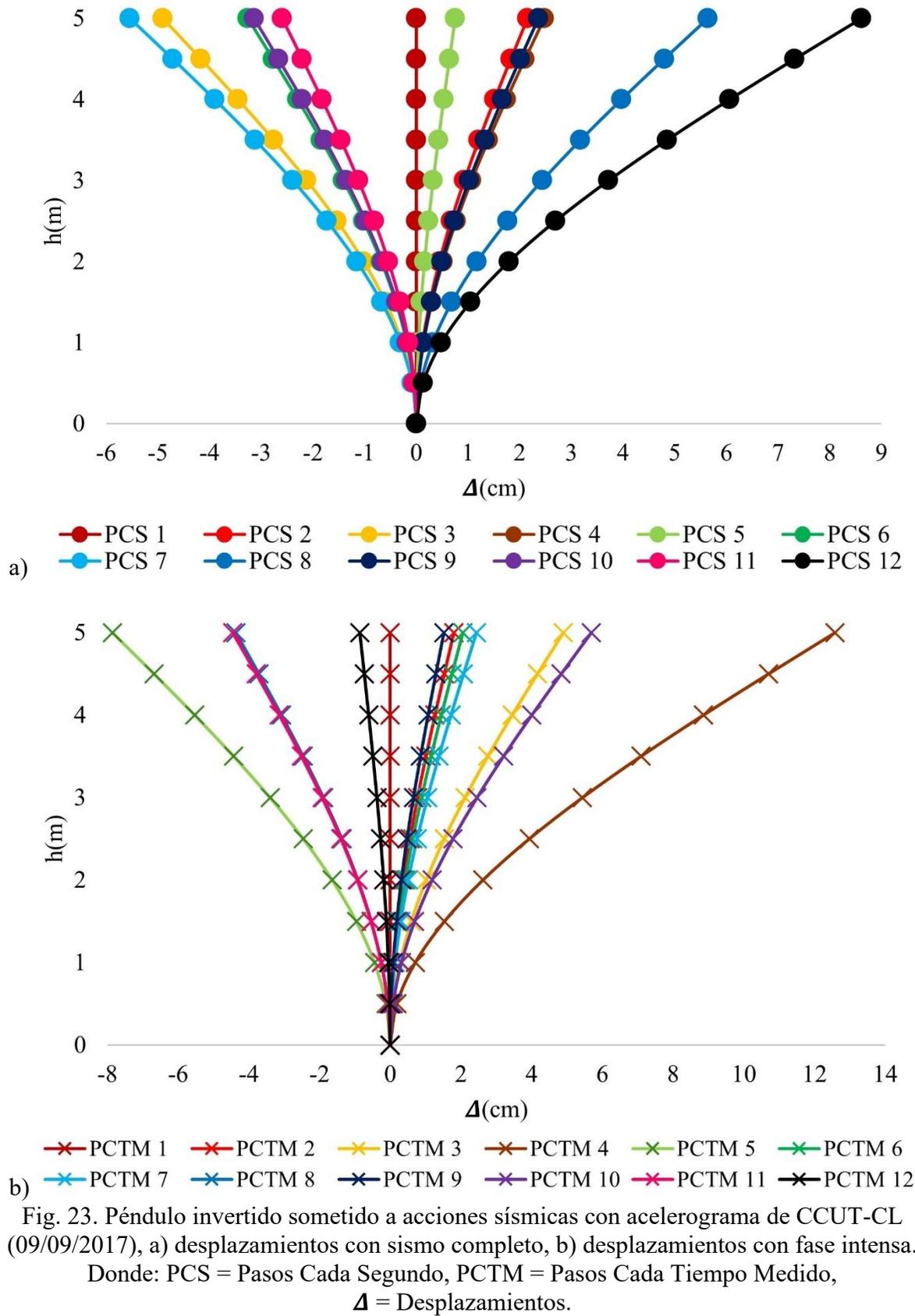


Fig. 22. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de CCUT-CL (09/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa. Donde: SC = señal completa, FI = fase intensa, Δ = desplazamientos laterales.



Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

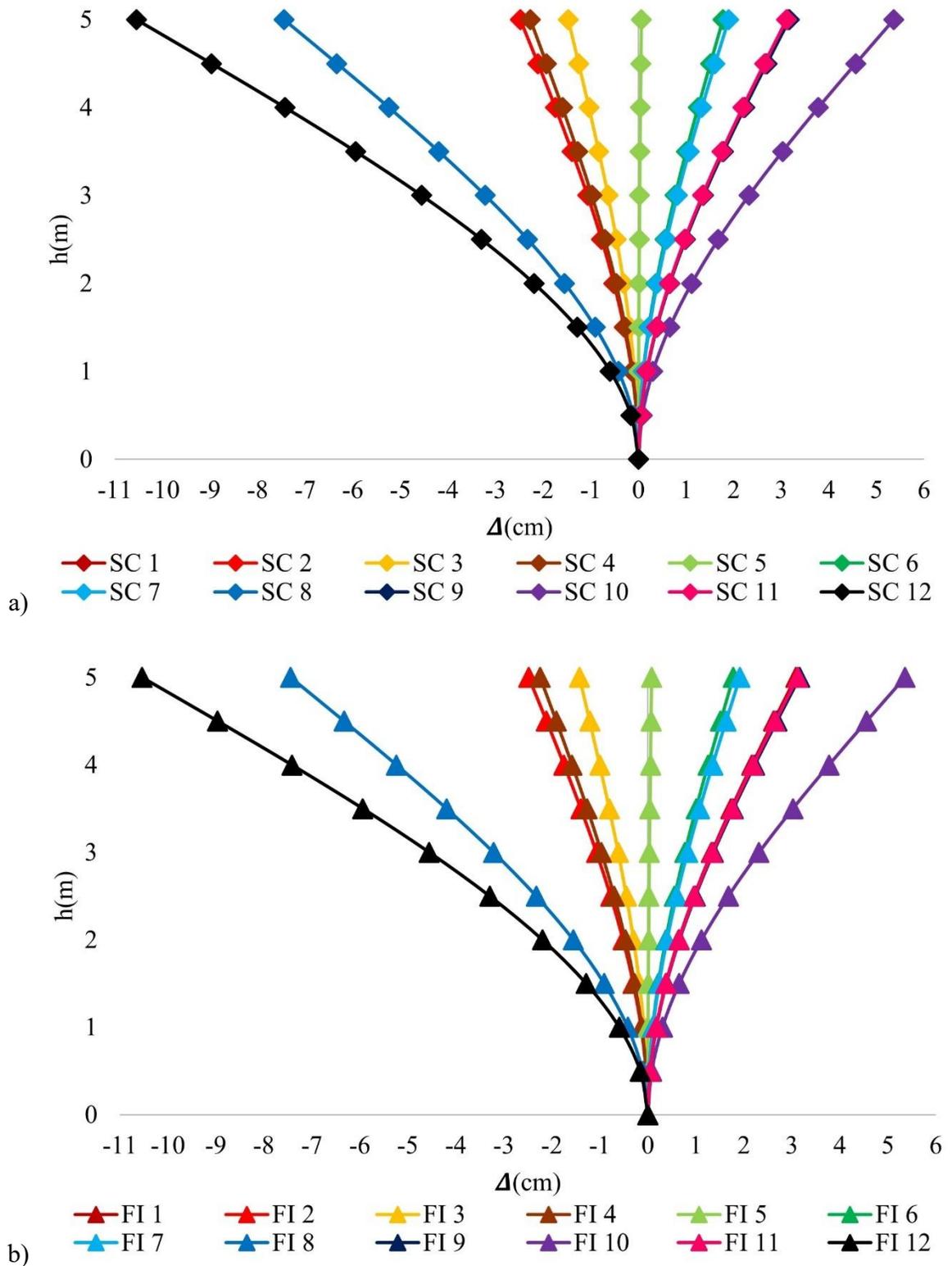


Fig. 24. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de SCT-B2 (09/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Desplazamientos.

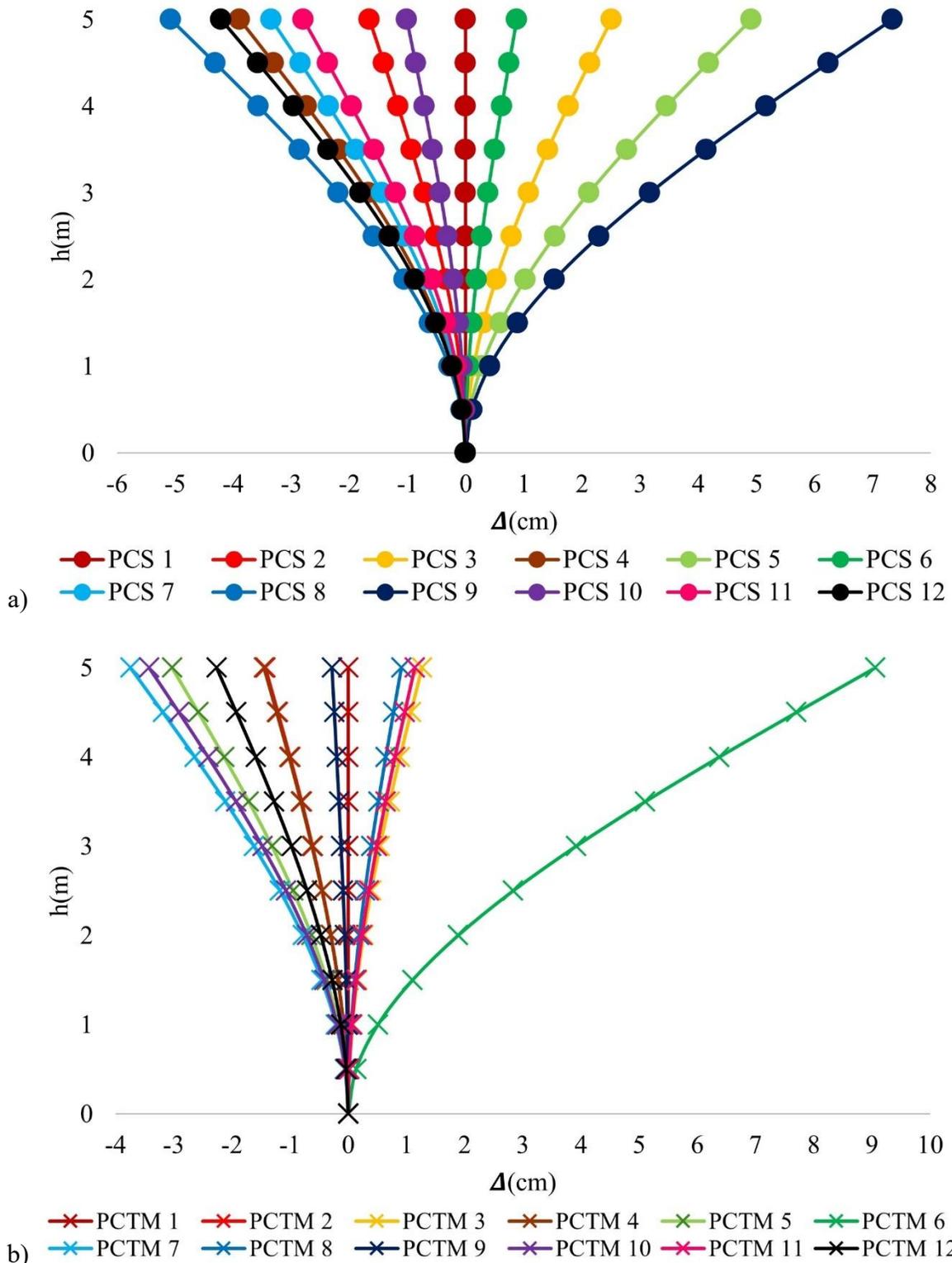


Fig. 25. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de SCT-B2 (09/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa.

Donde: PCS = Pasos Cada Segundo, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido,
 Δ = Desplazamientos.

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

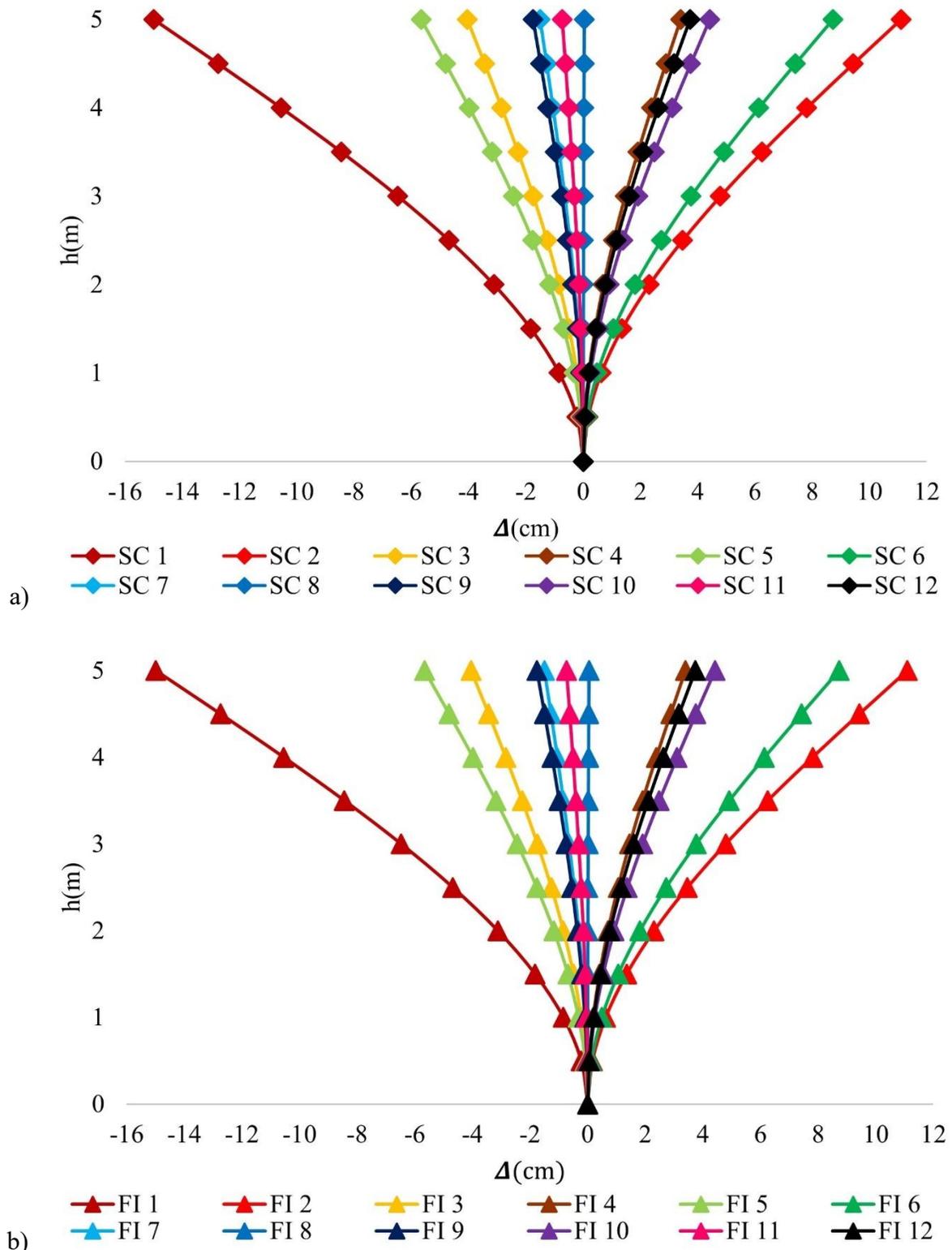


Fig. 26. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de CCUT-CL (19/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Desplazamientos.

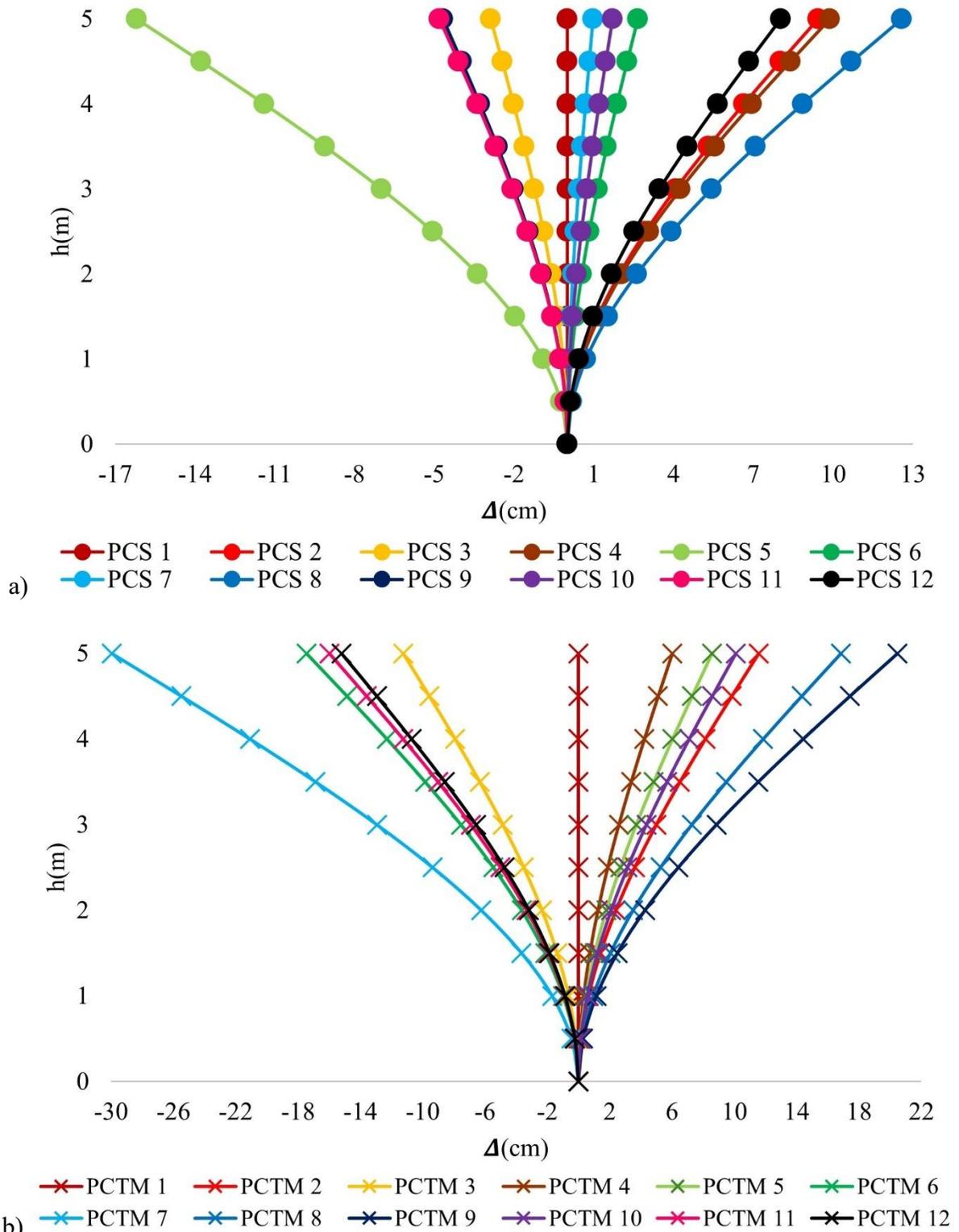


Fig. 27. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de CCUT-CL (19/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa.

Donde: PCS = Pasos Cada Segundo, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido,

Δ = Desplazamientos

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

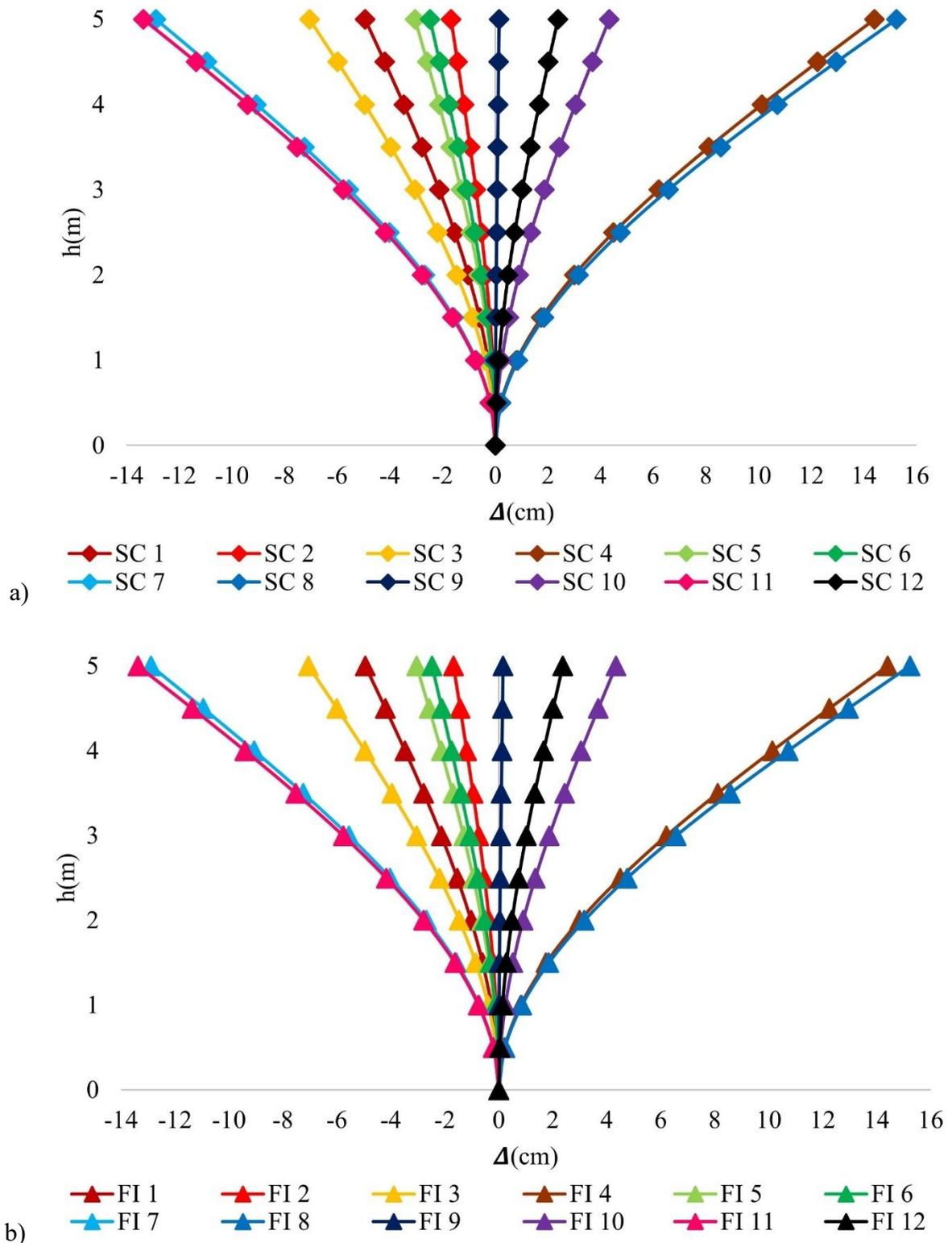


Fig. 28. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de SCT-B2 (19/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Desplazamientos.

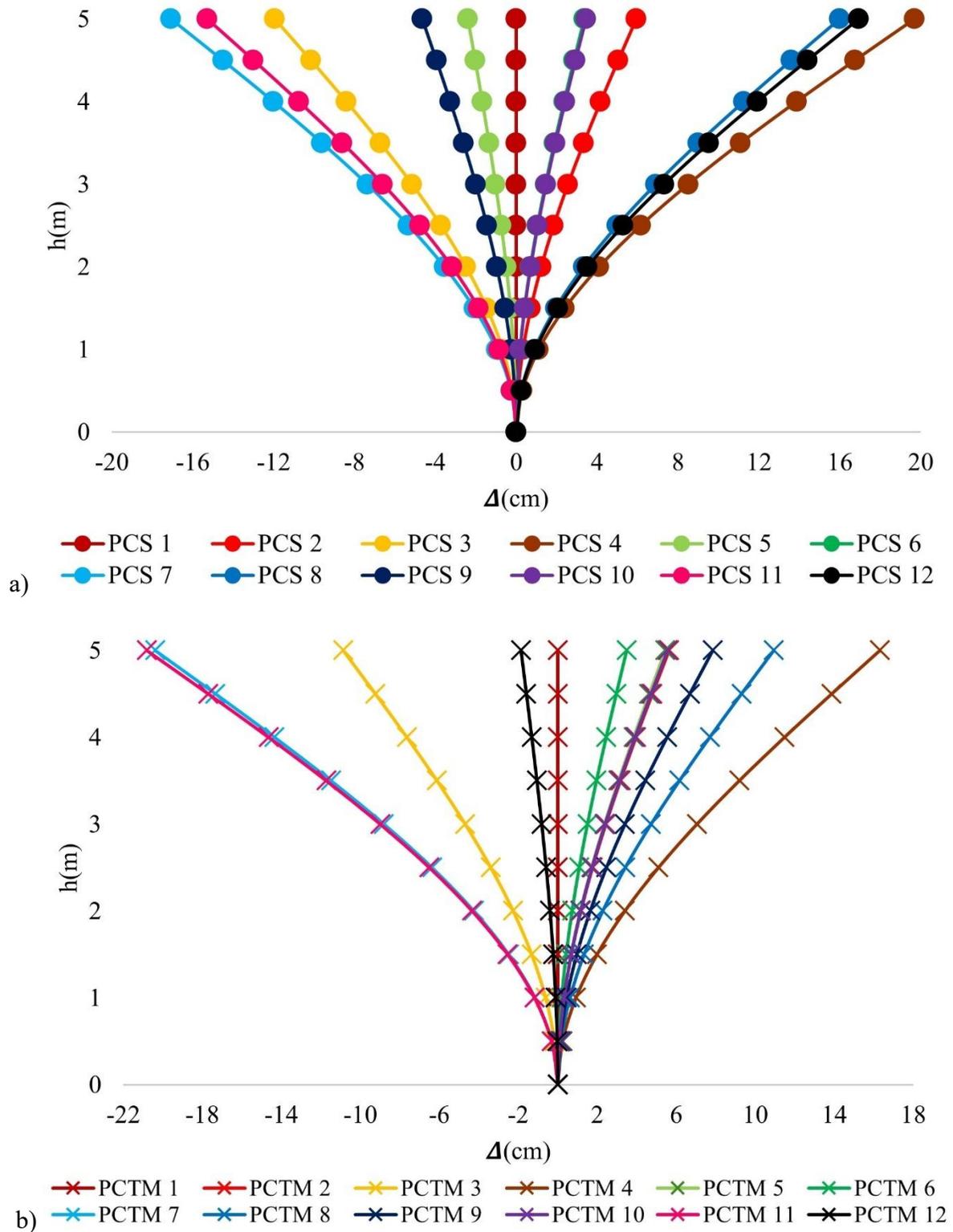


Fig. 29. Péndulo invertido sometido a acciones sísmicas con acelerograma de SCT-B2 (19/09/2017), a) desplazamientos con sismo completo, b) desplazamientos con fase intensa.

Donde: PCS = Pasos Cada Segundo, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido,

Δ = Desplazamientos.

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

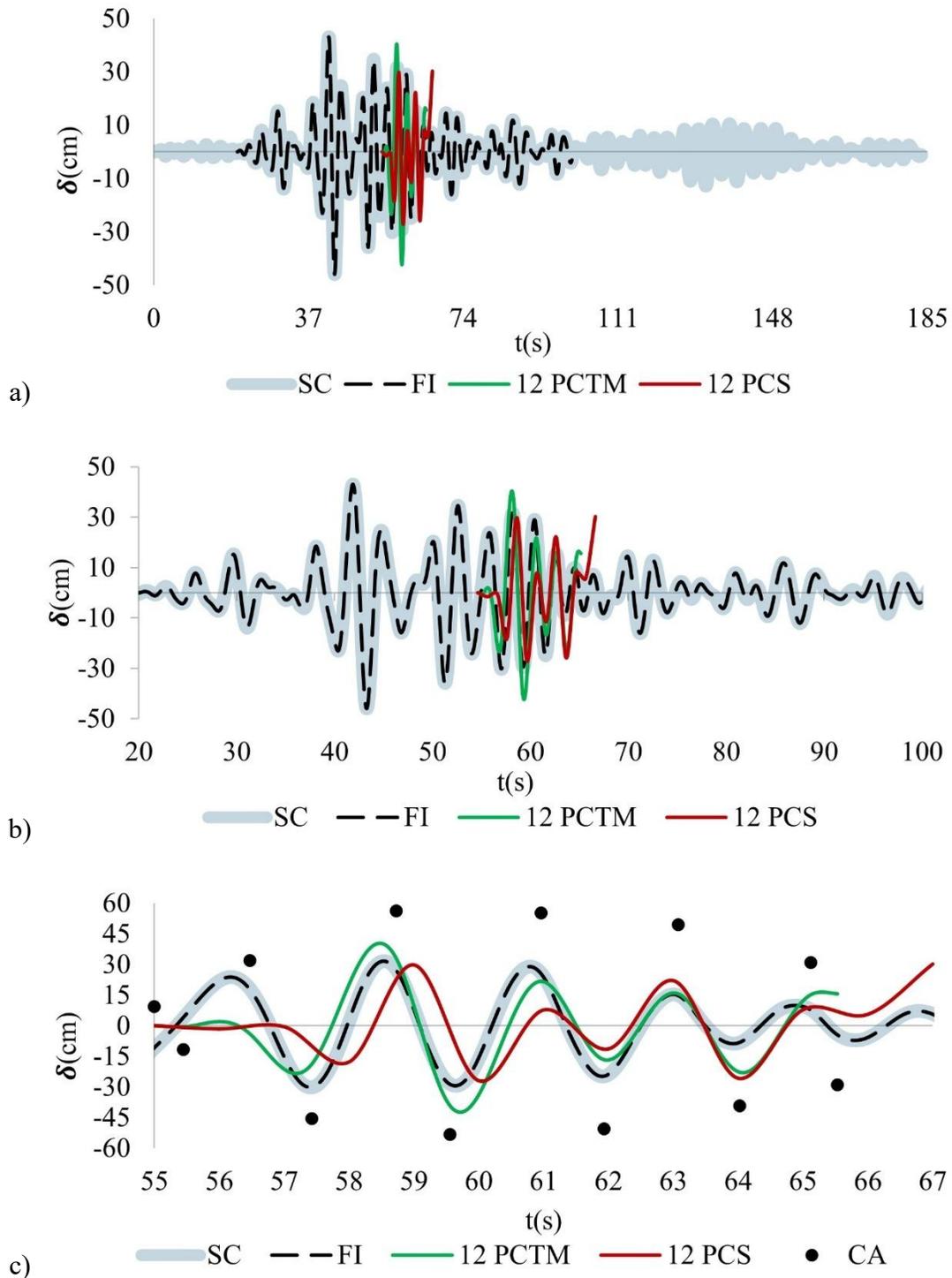


Fig. 30. Superposición de desplazamientos en el tiempo, determinados con SCT-B1 (09/09/1985), a) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en el tiempo completo de la señal, b) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en la fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM y CA en el rango de tiempo de los 12 puntos seleccionados. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido, PCS = Pasos Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

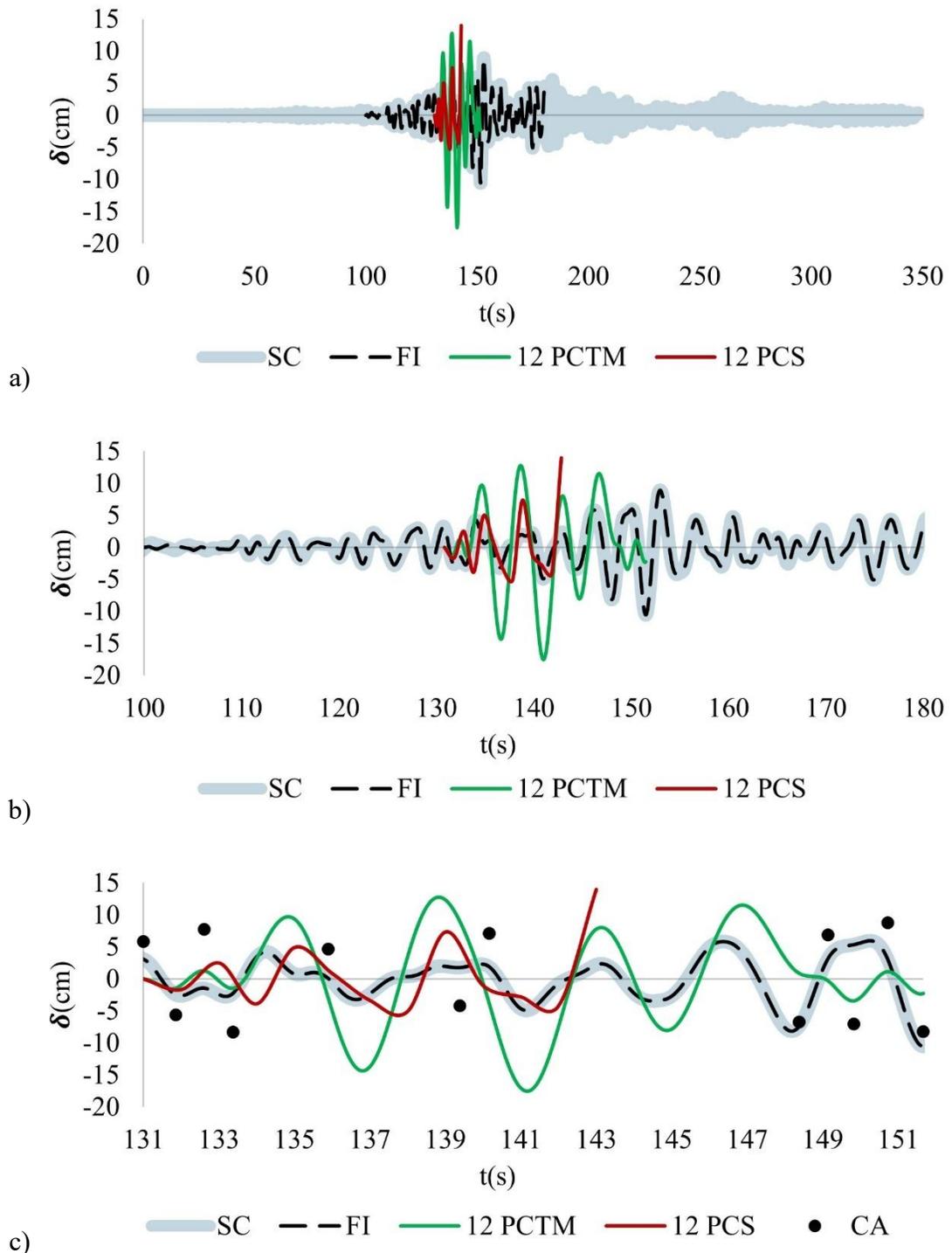


Fig. 31. Superposición de desplazamientos en el tiempo determinados con SCT-B2 (09/09/2017), a) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en el tiempo completo, b) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en la fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM y CA en el rango de tiempo de los 12 puntos seleccionados. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido, PCS = Pasos Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

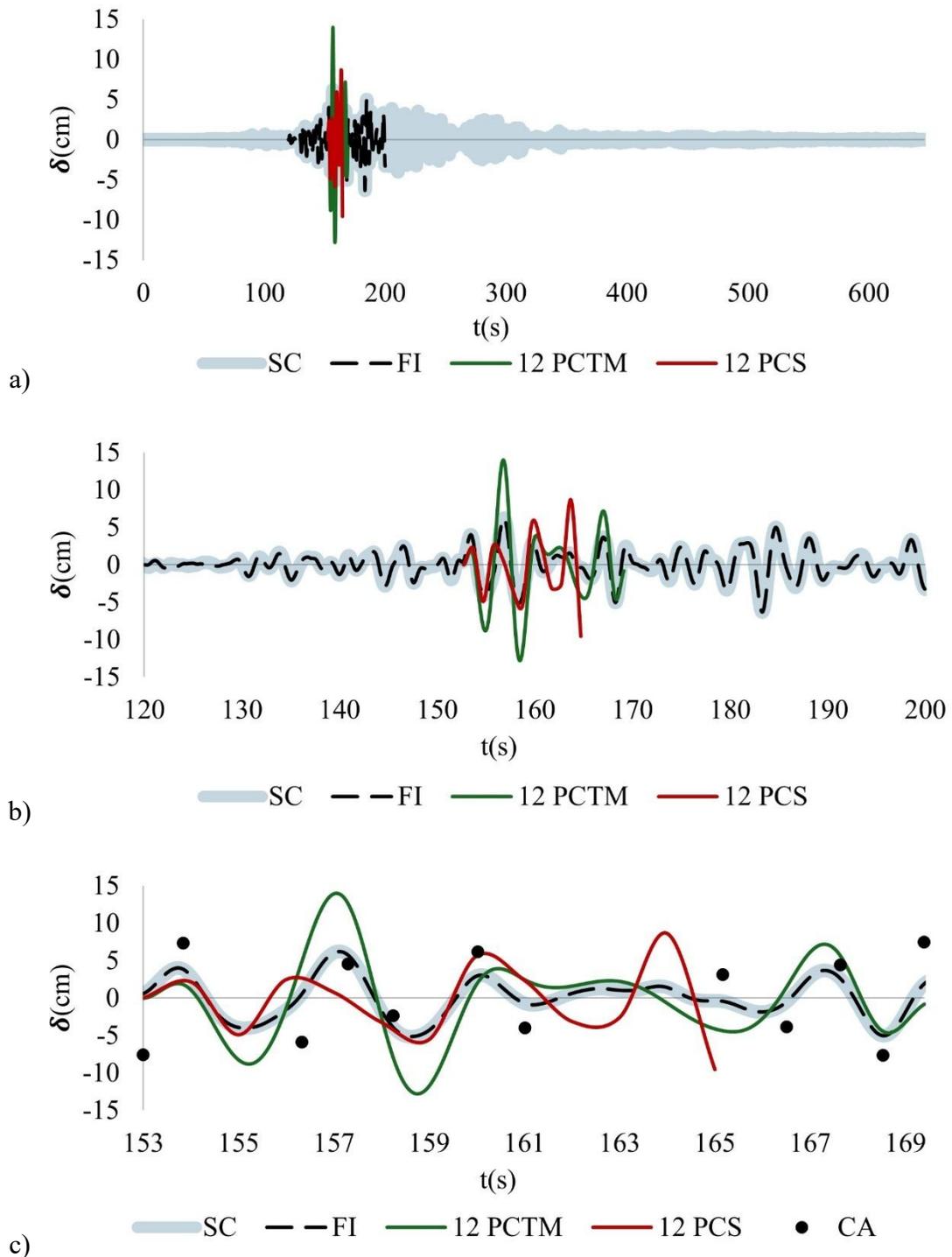


Fig. 32. Superposición de desplazamientos en el tiempo determinados con CCUT-CL (09/09/2017), a) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en el tiempo completo de la señal, b) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en la fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM y CA en el rango de tiempo de los 12 puntos seleccionados. Donde: SC = señal completa, FI = fase intensa, PCTM = pasos cada tiempo medido, PCS = pasos cada segundo, CA = caso analítico.

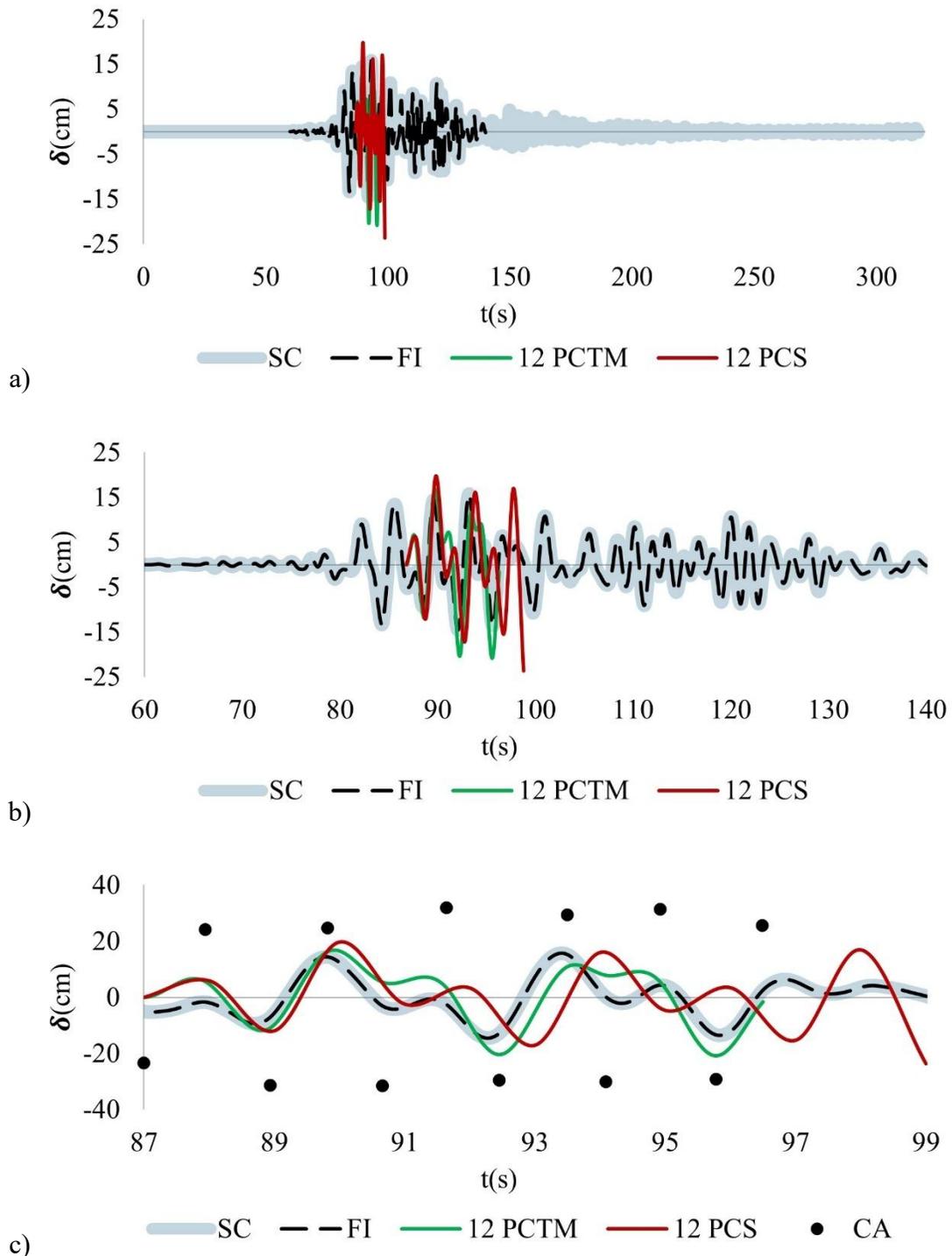


Fig. 33. Superposición de desplazamientos en el tiempo determinados con SCT-B2 (19/09/2017), a) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en el tiempo completo de la señal, b) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en la fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM y CA en el rango de tiempo de los 12 puntos seleccionados. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido, PCS = Pasos Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

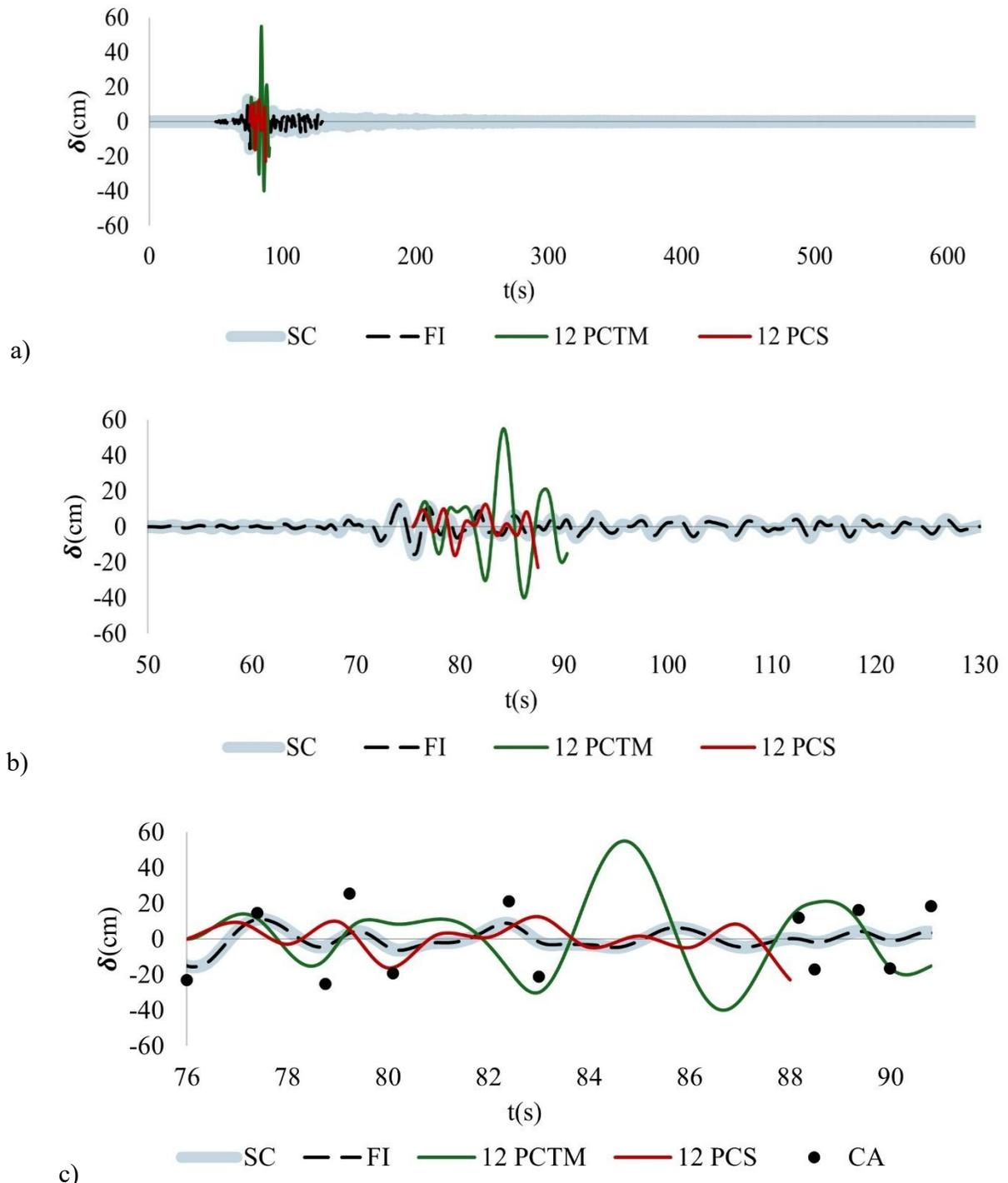


Fig. 34. Superposición de desplazamientos en el tiempo determinados con CCUT-CL (19/09/2017), a) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en el tiempo completo de la señal, b) SC, FI, 12PCS y 12 PCTM en la fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM y CA en el rango de tiempo de los 12 puntos seleccionados. Donde: SC = Sismo Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Pasos Cada Tiempo Medido, PCS = Pasos Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

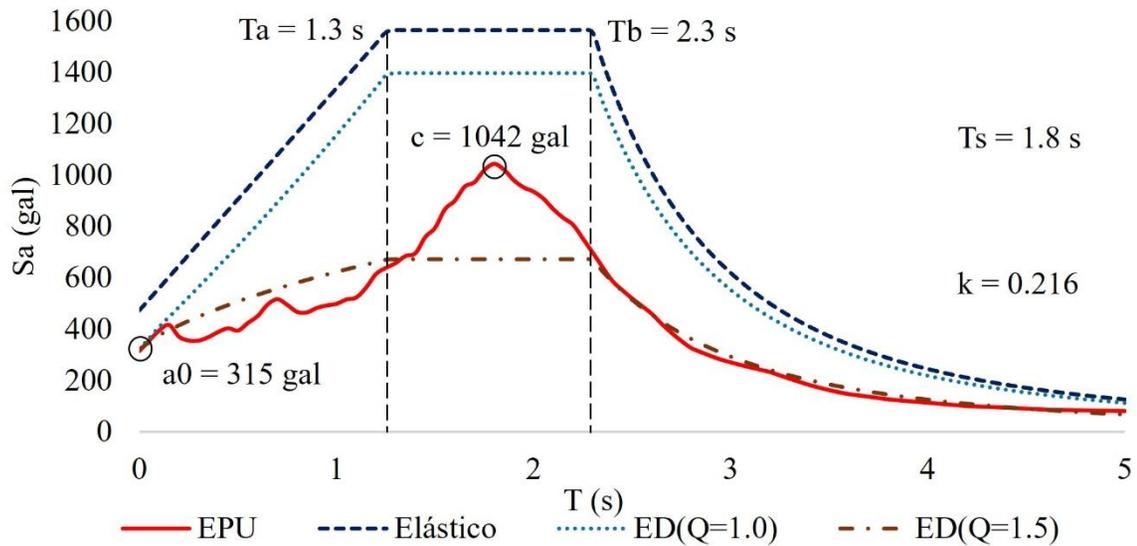


Fig. 35. Espectros de respuesta en el sitio donde se desplanta el inmueble. Retomado y adaptado de SASID (2020). Donde: S_a = pseudoaceleración (gal), T = Periodo natural de la estructura (s), T_a y T_b = Inicio y final respectivamente de la meseta, c = Aceleración máxima del espectro, T_s = Periodo del suelo, k = cociente entre desplazamientos máximos del suelo y la estructura, a_0 = valor de S_a que corresponde a $T = 0$ (aceleración máxima del terreno).

En la figura 36 se muestran las deformaciones en el péndulo previamente mencionado, pero ahora sometido a acciones debidas a espectros de respuesta, los diferentes casos se pueden clasificar con $Q = 1.0$, $Q = 1.5$ (los cuales fueron afectados por Q después de obtener los resultados) y espectro de respuesta elástico (ERE), cada caso fue analizado mediante software de elementos finitos (S) y por el método analítico (A) para contrastar los desplazamientos y los ángulos de giro máximos que determinan el posible volteo de los bloques.

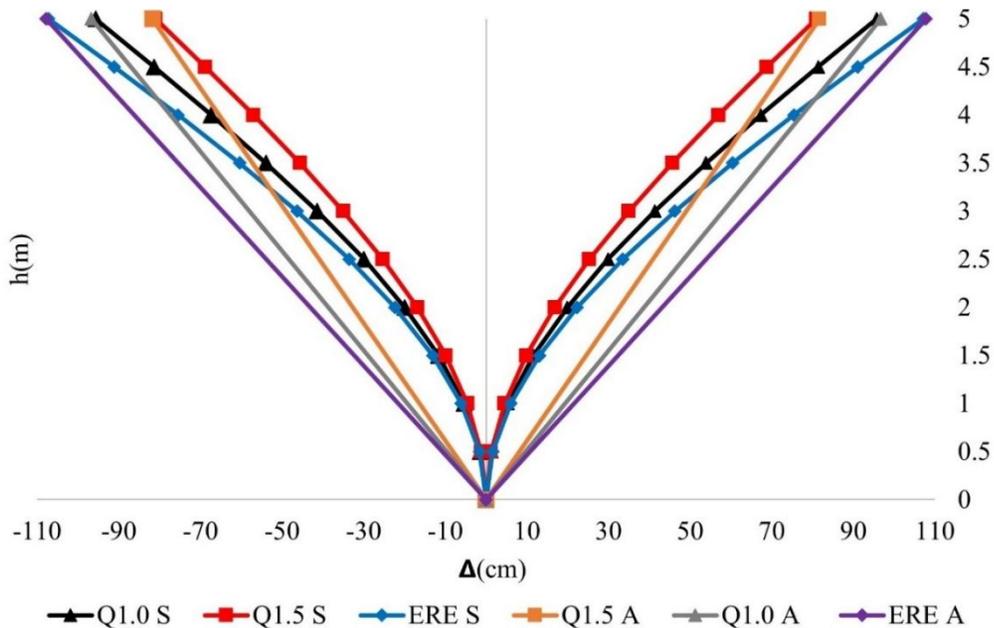


Figura 36. Péndulo invertido sometido a espectros de respuesta con ductilidad Q1.0, Q1.5 y ERE. Donde: S = Software de elementos finitos, A = Analítico, ERE = Espectro de Respuesta Elástico.

En la figura 37 se presentan las líneas de tendencia de volteo de un bloque de mampostería histórica, donde la línea negra representa los desplazamientos generados en un elemento tipo péndulo invertido con elementos finitos continuos, ya sean lineales o cuasi no lineales, en contraste con el giro de bloques rígidos (representado con la línea gris), donde θ_{br} es el ángulo que se produce en la parte superior del elemento como bloque rígido, mientras que con el caso de los elementos finitos se obtienen dos ángulos diferentes, el primero pasando por el punto de tendencia de falla de volteo generando θ_f , el segundo se genera posterior a dicho punto de falla, generando $\theta < \alpha$, donde θ_L es el ángulo medido entre la tendencia del bloque inicial y la tendencia de volteo a partir del punto de falla y θ_{er} es el ángulo error medido entre la línea de tendencia de volteo como bloque rígido y la tendencia de la línea de volteo del bloque de falla.

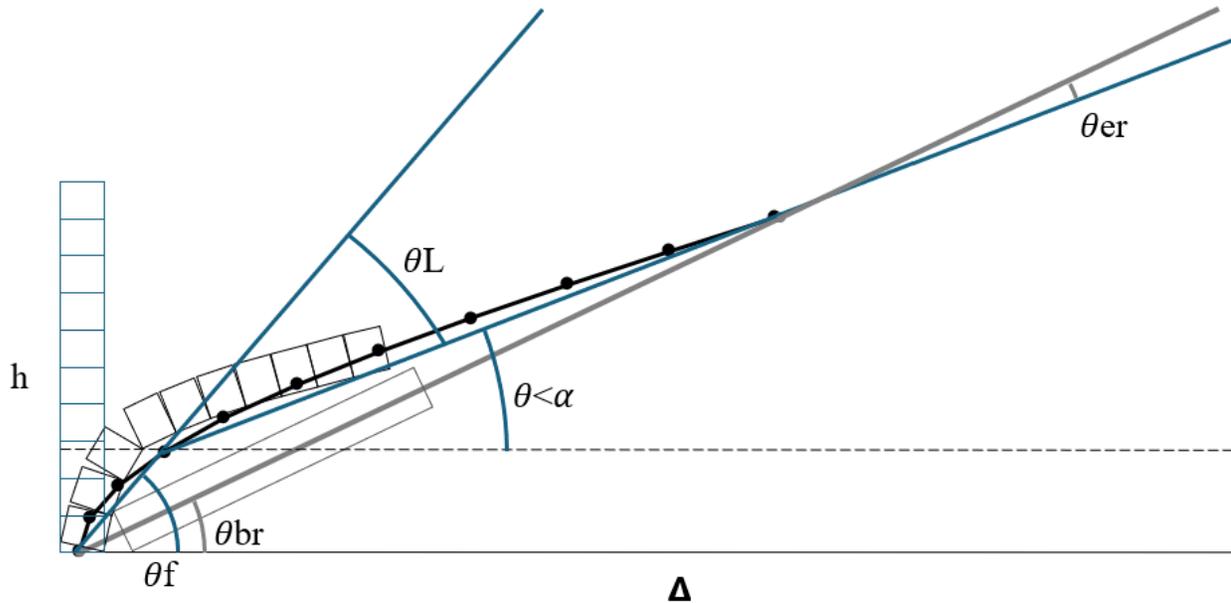


Figura 37. Elemento de mampostería sometido a desplazamientos laterales con simulación de tendencia al volteo sin resistencia a la tracción. Donde: θ_{br} = ángulo de giro como bloque rígido, θ_f = ángulo entre la línea horizontal y la tendencia de giro desde la base del elemento al punto de tendencia de falla por volteo, θ_{er} = ángulo error medido entre la línea de tendencia de volteo como bloque rígido y la tendencia de la línea de volteo del bloque de falla, θ_L = ángulo medido entre la tendencia del bloque inicial y la tendencia de volteo a partir del punto de falla, $\theta < \alpha$ = ángulo de giro menor que el ángulo máximo a partir del cual se produce el volteo, h = altura del elemento, Δ = desplazamiento lateral.

8. DESPLAZAMIENTOS LATERALES EN LAS TORRES CAMPANARIO DEL SISTEMA COMPLETO ANTE ACCIONES COMBINADAS

Para las combinaciones de acciones sísmicas y hundimientos, se plantearon cuatro casos: $C1 = D + S_x + (0.3)S_y$, $C2 = D + S_y + (0.3)S_x$, $C3 = D + H + S_x + (0.3)S_y$, $C4 = D + H + S_y + (0.3)S_x$. Para medir los desplazamientos, se procedió a seleccionar nodos consecutivos en la parte lateral en toda la altura de cada una de las torres (TI=Torre izquierda, TD=Torre derecha). Los desplazamientos se analizaron y graficaron en las direcciones X y Y (ver figuras 38 a 45), asimismo, en los análisis con espectros de respuesta, se consideraron factores de ductilidad $Q=1.0$ y $Q=1.5$ con sus desplazamientos máximos y mínimos. Por otra parte, se etiquetaron a los acelerogramas como: SCT-B1, SCT-B2 09, SCT-B2 19, CCUT-CL 09, CCUT-CL 19 (ver figuras 14 a 18).

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

Los desplazamientos mostrados en las figuras 38 a 45 pueden ser difíciles de observar y determinar las variaciones entre éstos, por lo que, en la tabla 1 se presentan los desplazamientos máximos de cada combinación en el nodo superior (altura 29.2m) de cada torre, con ello se pueden apreciar de mejor manera los resultados y ver los desplazamientos críticos para cada caso.

Tabla 1. Desplazamientos máximos en la parte superior de las torres campanario.

Torres	Aceleración /Espectro	Dirección X				Dirección Y			
		C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
TIA	B1	-9.80	-4.71	-105.65	-100.56	5.15	-7.50	-125.76	-129.27
	B2 09	-3.56	-2.80	-99.41	-98.65	1.56	2.46	-122.90	-123.89
	CCUT 09	-3.68	-2.97	-99.53	-98.81	1.58	2.11	-122.88	-123.35
	B2 19	-8.62	-4.86	-104.46	-100.71	4.03	7.78	-125.06	-128.27
	CCUT 19	-7.53	-4.99	-103.38	-100.83	-5.02	9.27	-126.79	-130.14
TDA	B1	5.29	-1.63	-89.53	-87.22	-3.80	-3.96	-124.31	-124.47
	B2 09	-0.83	-0.38	-86.42	-85.97	-0.74	-1.11	-121.25	-121.61
	CCUT 09	0.85	-0.37	-86.37	-85.95	-0.67	-0.99	-121.17	-121.49
	B2 19	-5.54	-1.83	-91.13	-87.41	-2.50	-3.48	-123.00	-123.98
	CCUT 19	-2.43	-1.12	-88.01	-86.70	-2.34	-5.00	-122.84	-125.50
TIE	Q = 1.0 max	43.74	32.10	-52.10	-63.75	48.28	56.70	-73.49	-65.07
	Q = 1.0 min	-48.00	-36.36	-143.85	-132.21	-47.88	-56.30	-169.65	-178.07
	Q = 1.5 max	36.20	25.99	-107.57	-117.78	39.18	45.90	-143.48	-136.75
	Q = 1.5 min	-42.59	-32.38	-186.36	-176.15	-38.57	-45.30	-221.22	-227.95
TDE	Q = 1.0 max	21.10	12.46	-64.48	-73.13	19.23	27.61	-101.27	-92.90
	Q = 1.0 min	-21.20	-12.55	-140.18	-98.14	-19.68	-28.05	-140.18	-148.56
	Q = 1.5 max	20.68	11.70	-107.70	-116.67	17.32	25.06	-163.44	-155.69
	Q = 1.5 min	-20.82	-11.85	-149.19	-140.22	-17.99	-25.73	-198.74	-206.49

En las figuras 46 a 49 es evidente que los desplazamientos máximos en sus valores absolutos no inician en la línea base de cero, ya que algunos de estos comienzan con deformaciones previas debido a los hundimientos de la base.

En las figuras 38 a 41 se observa que algunas líneas de tendencia de desplazamientos con acciones sísmicas espectrales tienden a permanecer verticales en la parte superior, esto se debe a que en algunos instantes del sismo se desplaza a la estructura en sentido opuesto a los hundimientos y trata de verticalizar a las torres campanario cuando los desplazamientos son positivos (en las gráficas se muestran como máximos).

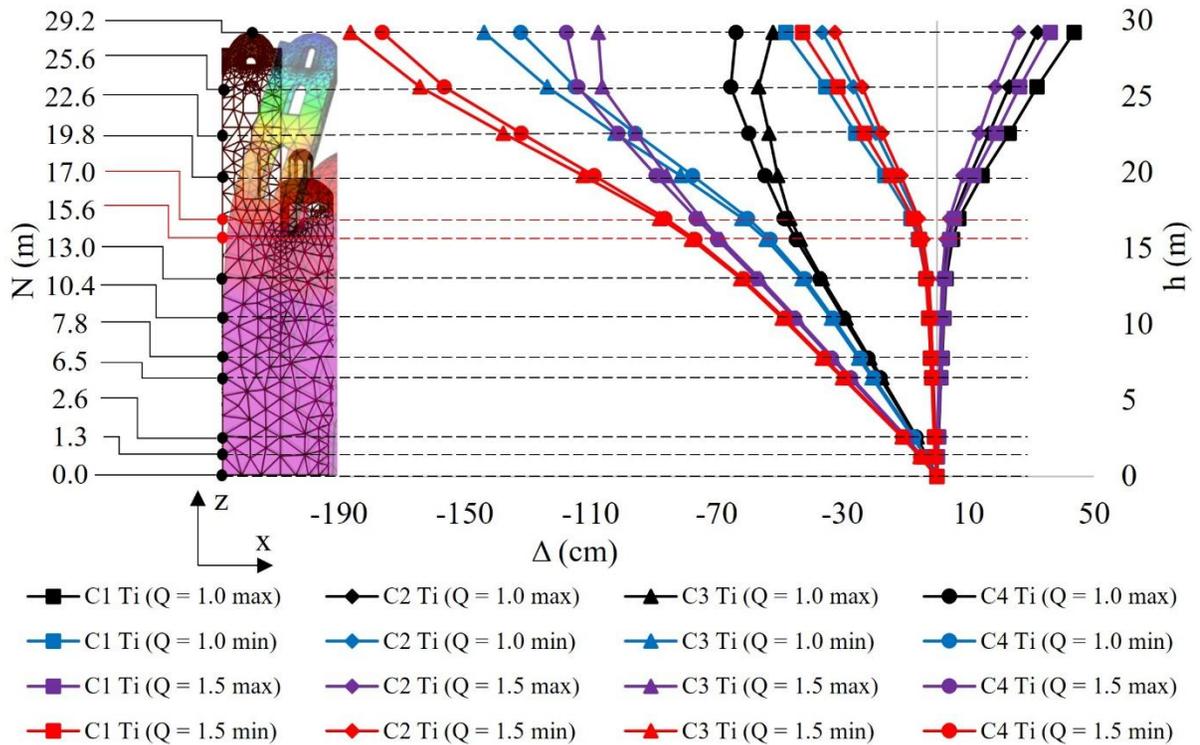


Fig. 38. Desplazamientos en dirección X en torre izquierda (Ti).

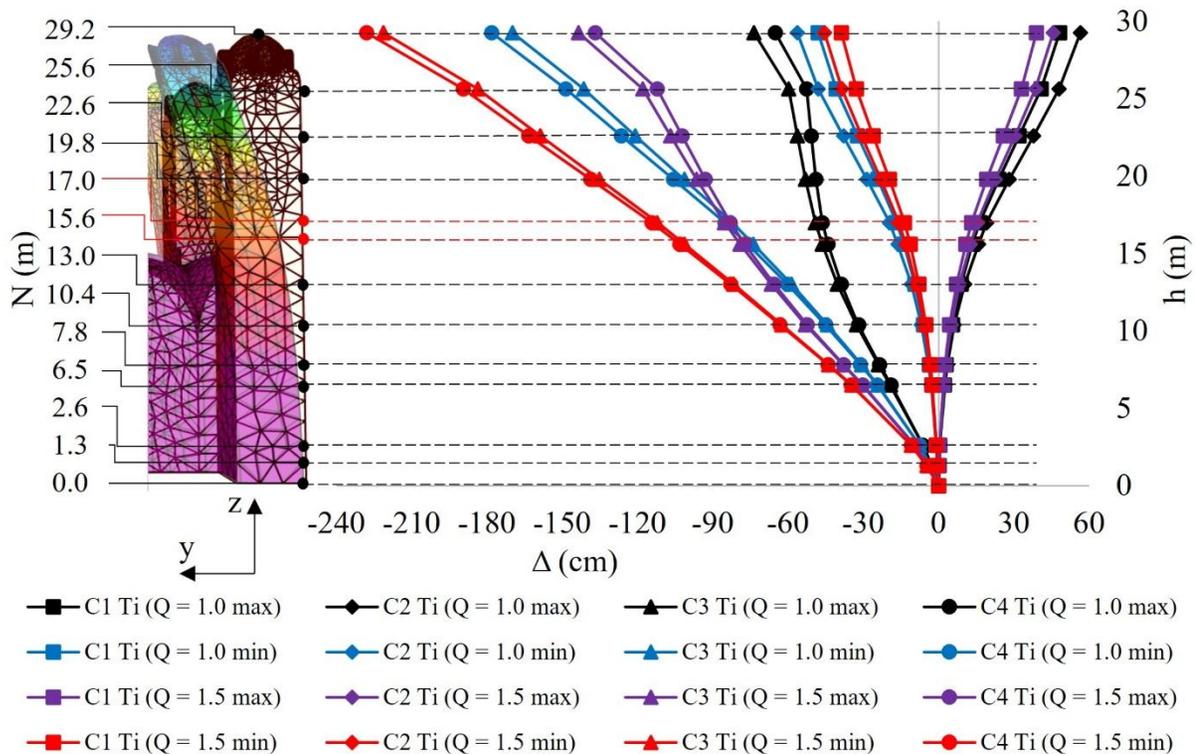


Fig. 39. Desplazamientos en dirección Y en torre izquierda (Ti).

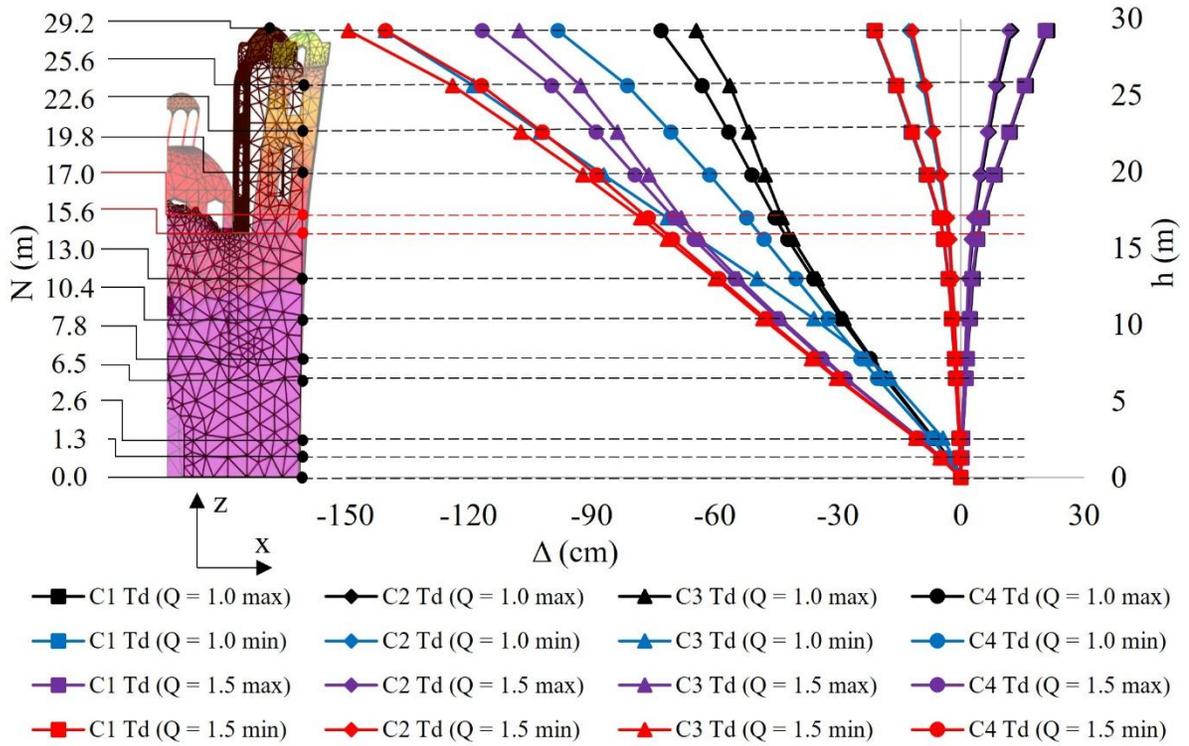


Fig. 40. Desplazamientos en dirección X en torre derecha (Td).

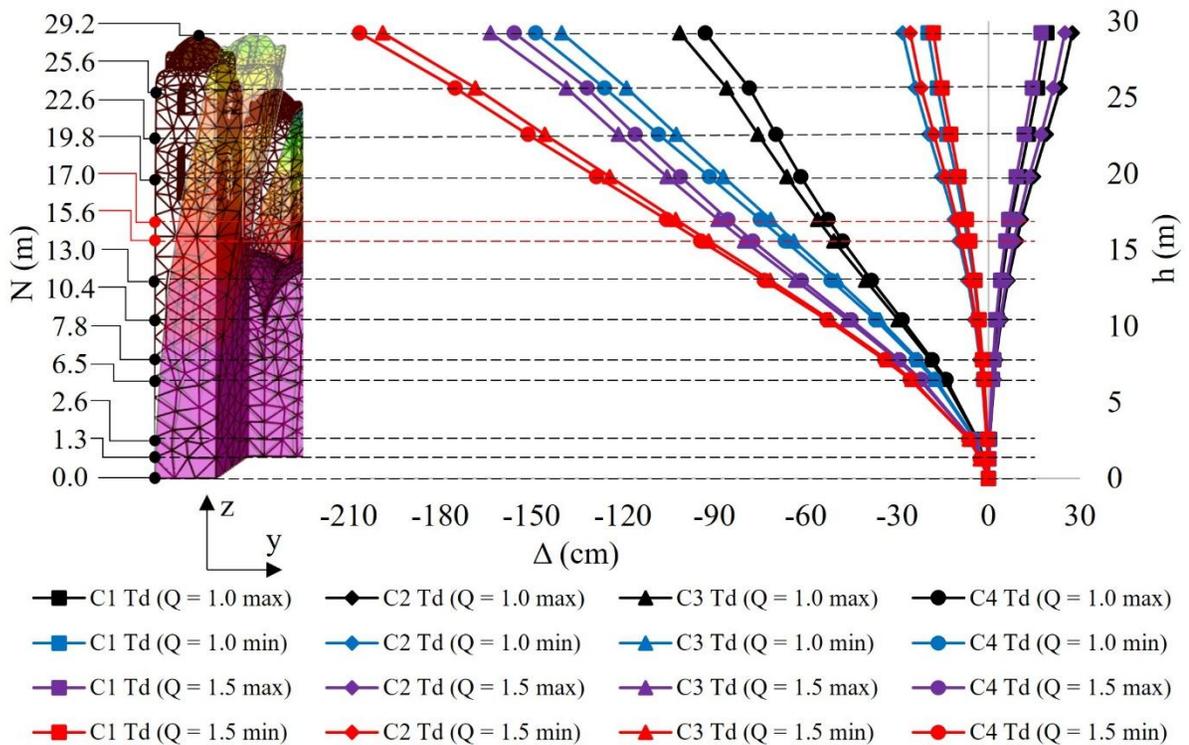


Fig. 41. Desplazamientos en dirección Y en torre derecha (Td).

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

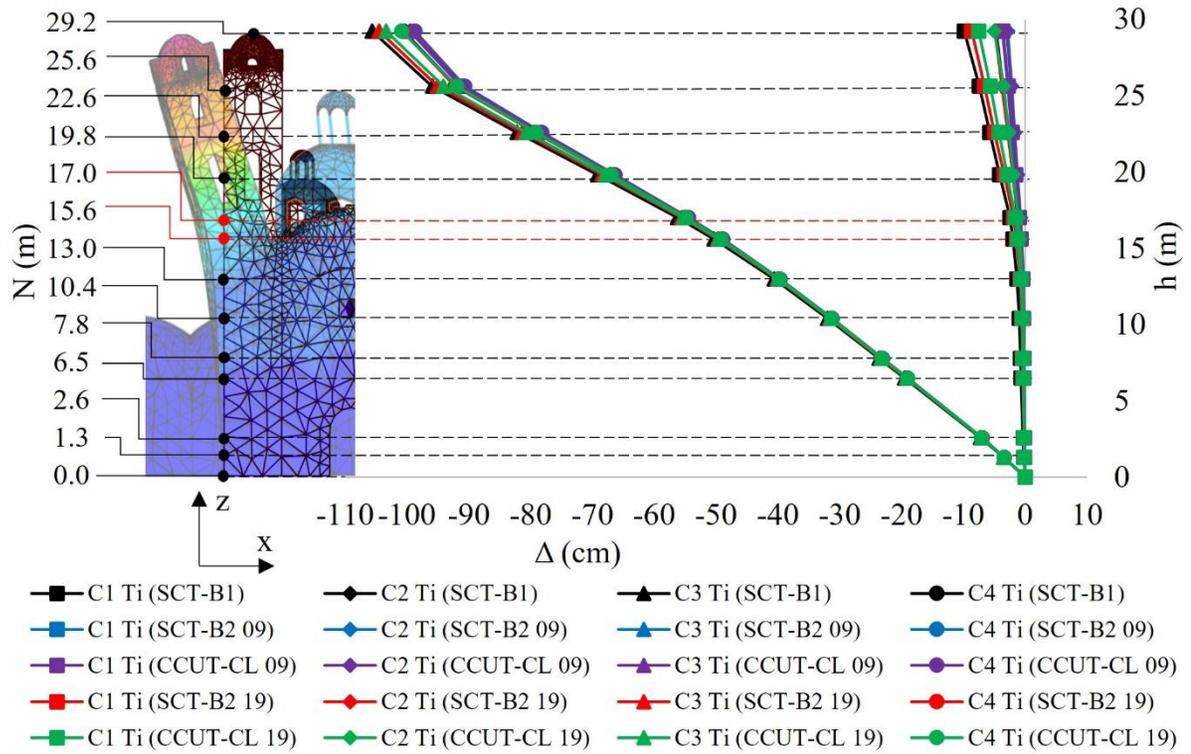


Fig. 42. Desplazamientos en dirección X.

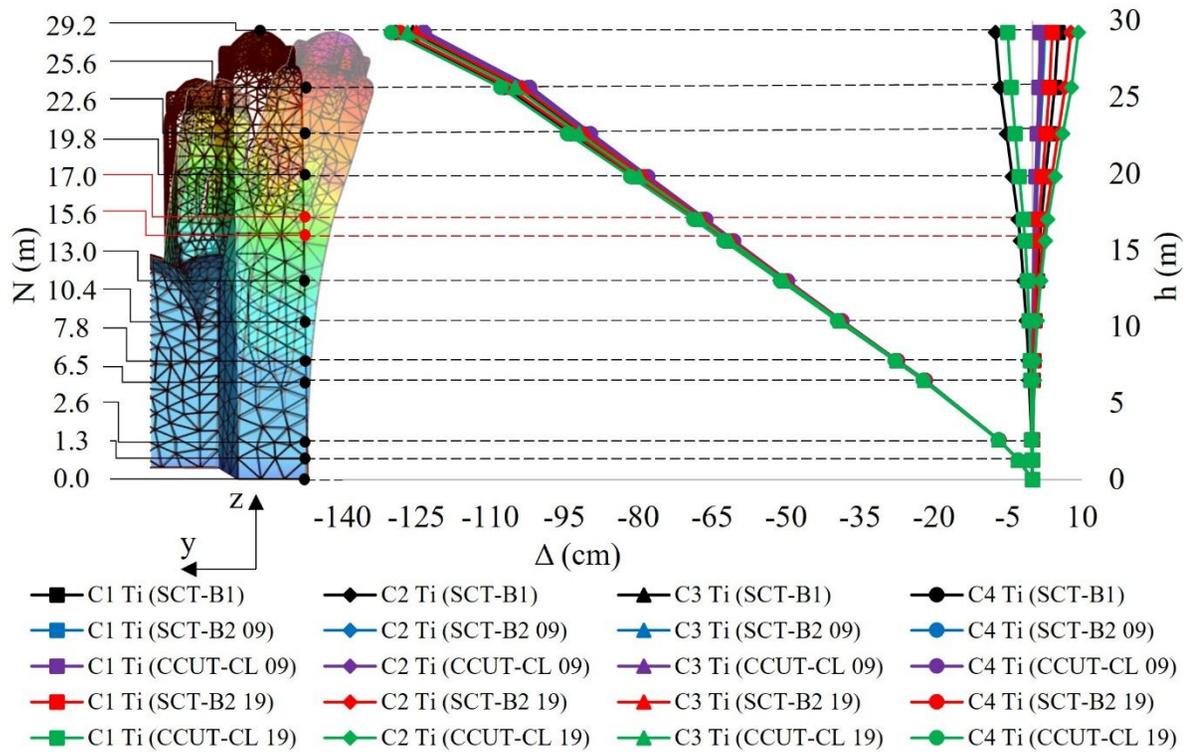


Fig. 43. Desplazamientos en dirección Y.

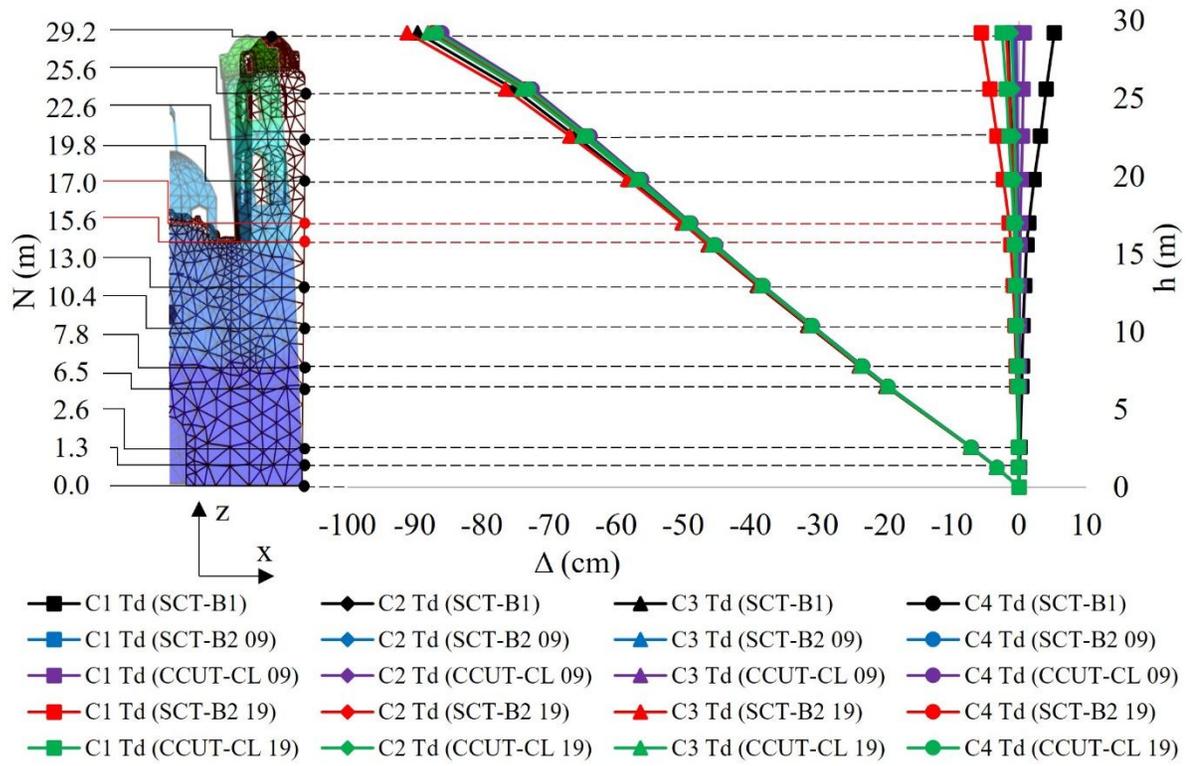


Fig. 44. Desplazamientos en dirección X.

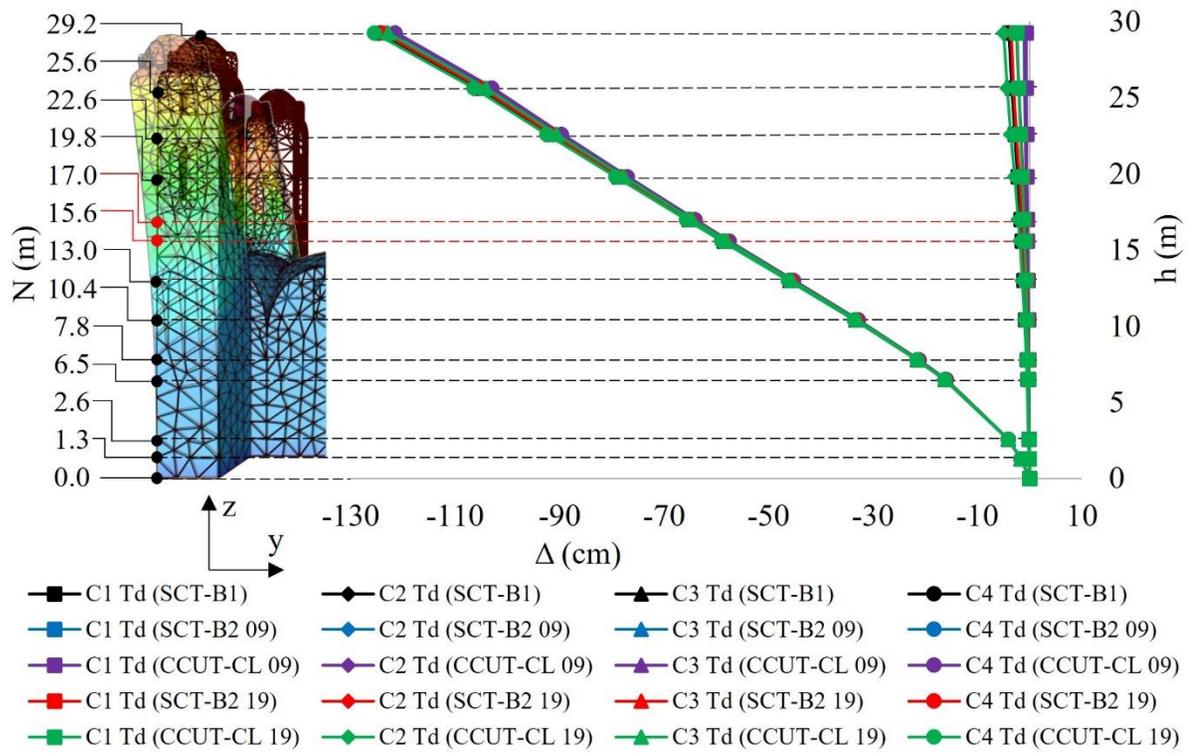


Fig. 45. Desplazamientos en dirección Y.

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

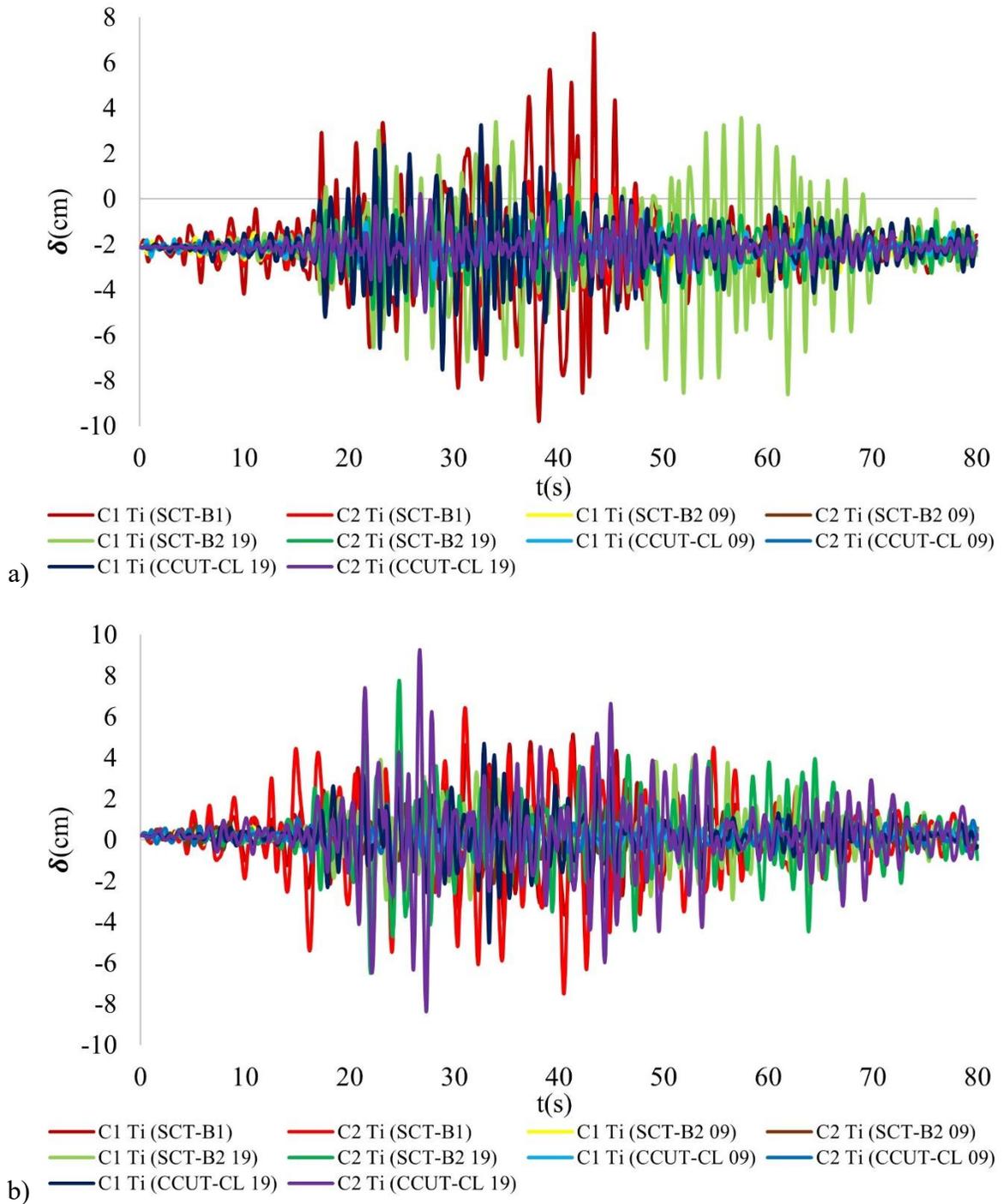


Fig. 46. Superposición de desplazamientos en FI sin hundimientos, a) dirección X, b) dirección Y.

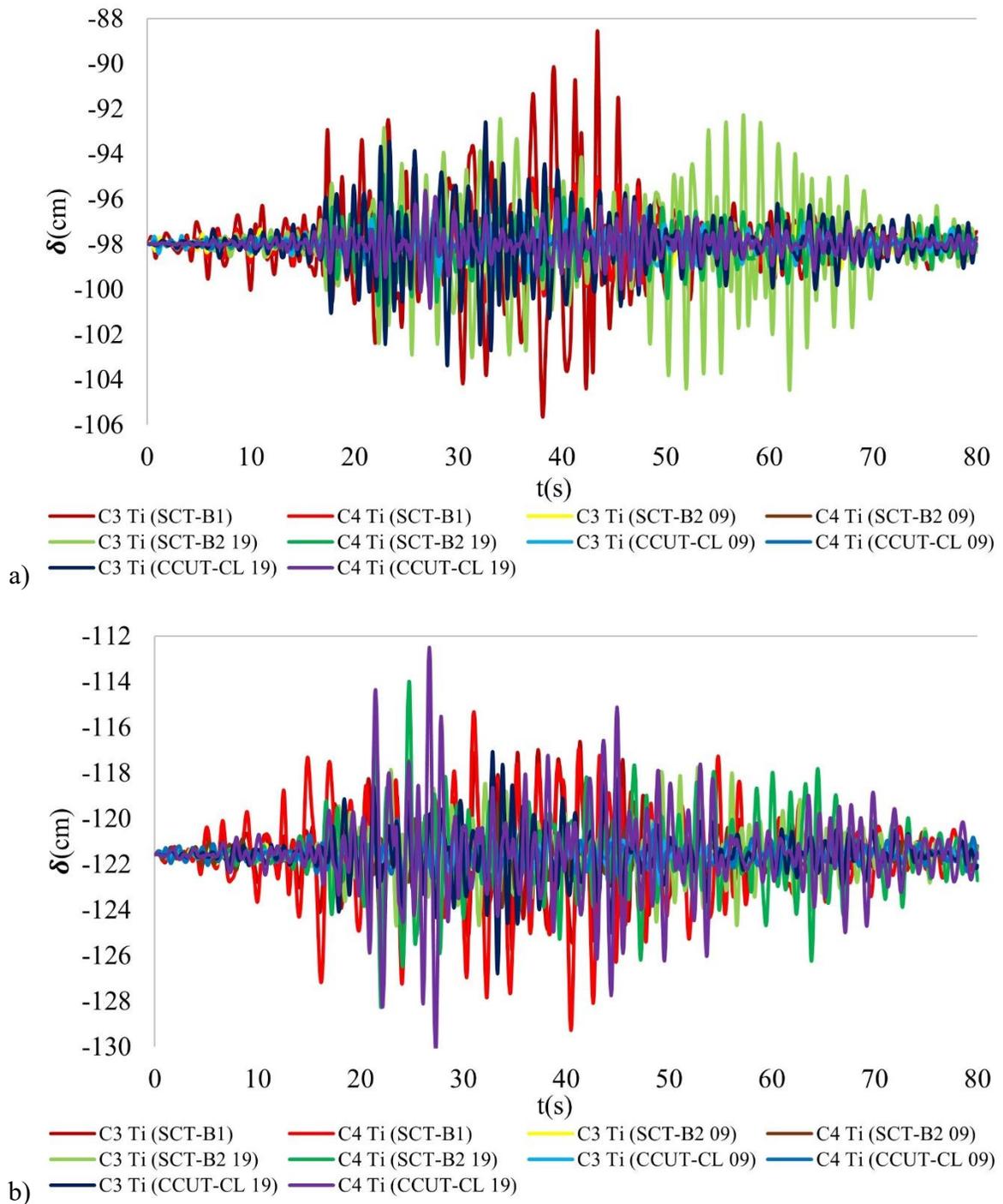


Fig. 47. Superposición de desplazamientos en FI con hundimientos, a) dirección X, b) dirección Y.

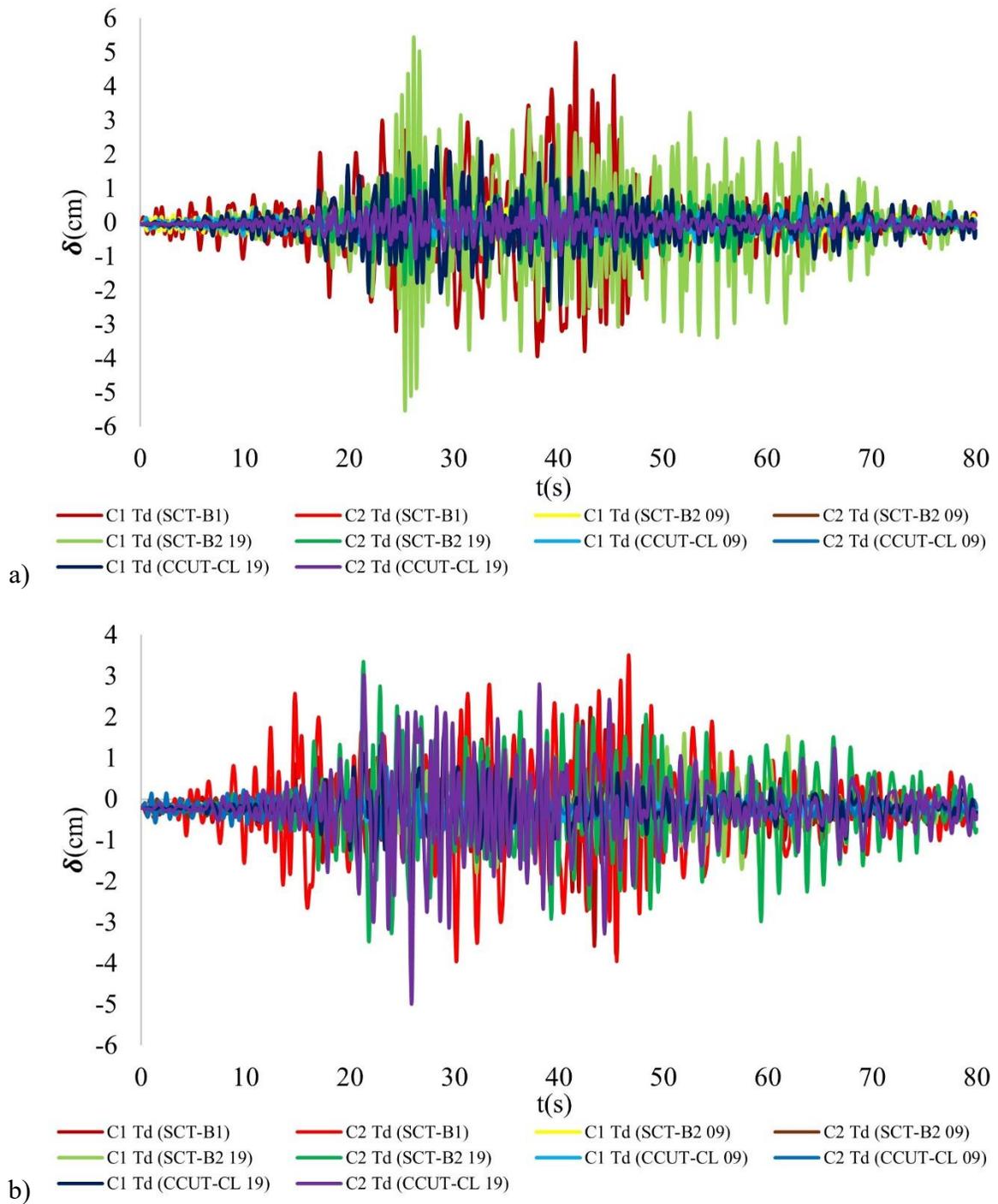


Fig. 48. Superposición de desplazamientos en FI sin hundimientos, a) dirección X, b) dirección Y.

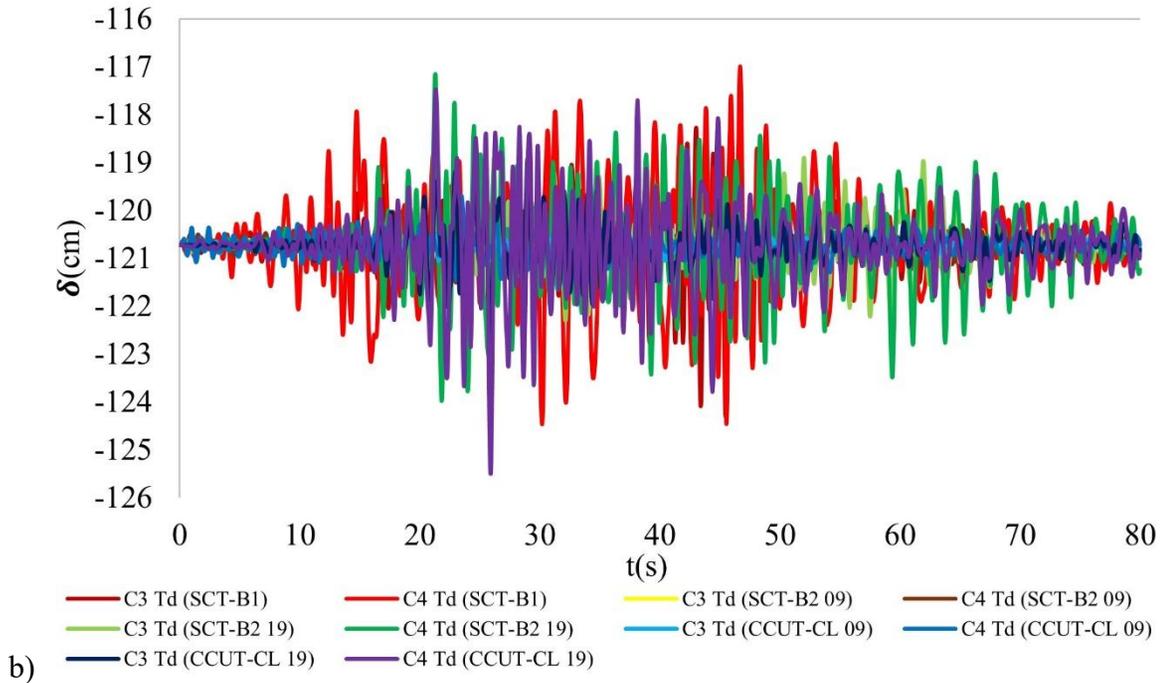
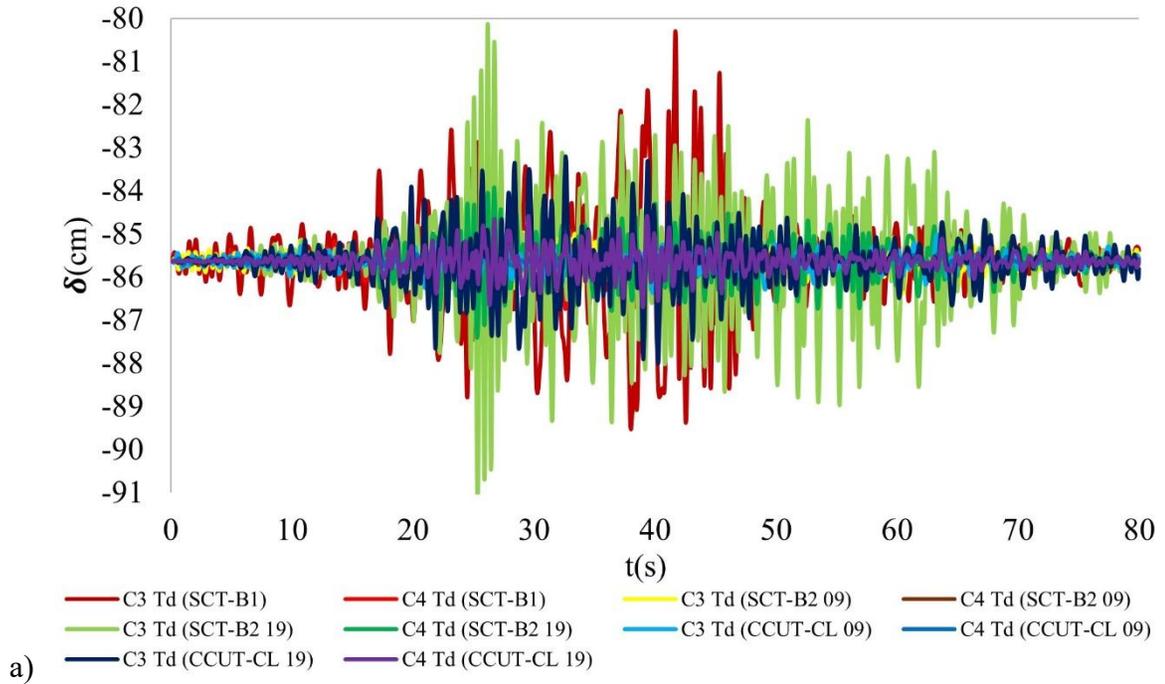


Fig. 49. Superposición de desplazamientos en FI con hundimientos, a) dirección X, b) dirección Y.

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

9. RELACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES CON VOLTEO DE BLOQUES

De acuerdo con las premisas mencionadas por Heyman J. (1969, 1997), Mas-Guindal A.J. (2011) y Huerta S. (2004), en cuanto a la manera de trabajar de la mampostería utilizada en la construcción de los edificios históricos, se puede considerar que la resistencia a compresión es prácticamente infinita, por lo que es muy difícil y casi imposible que la mampostería histórica falle por aplastamiento, siempre y cuando se mantengan las relaciones de aspecto clásicas y el golpeteo sea mínimo. Es por ello, que se puede considerar que, al sobrepasar la resistencia a tracción se comienza a desprender un bloque y empiezan a formarse mecanismos de giro, lo cual genera bloques con tendencia de volteo (ver figura 50). Por tal motivo, es factible determinar los desplazamientos laterales de las torres campanario utilizando sistemas completos por medio de modelos basados en EF tipo shell para obtener sus ángulos de giro, posteriormente identificar los posibles bloques desfavorables y calcular sus propiedades físicas y geométricas como lo son: a) peso propio, área y centro de gravedad. Es importante mencionar que, de acuerdo con lo explicado por Peña F., (2015), la teoría del volteo de bloques también obedece a posibles asimetrías geométricas y dinámicas. Una vez determinados los desplazamientos con el modelo digital, se consideró a los bloques vulnerables al volteo como simétricos, sin pérdida de material tanto en la base como en los bloques, se midieron los ángulos de las líneas de tendencia de los desplazamientos más desfavorables y se despreció la resistencia a tracción. En la tabla 2, se presentan los ángulos de giro que tienen los casos más críticos de las figuras 38 a la 45 del bloque vulnerable que se encuentra a partir de los 17m de altura respecto a la línea horizontal. Cabe mencionar que el ángulo α es el ángulo a partir del cual se produce el volteo del bloque vulnerable en las torres campanario. Es necesario mencionar que los valores de los ángulos son absolutos y dado que el bloque se consideró simétrico, no importa el lado hacia el que gire, la representación de la figura 50 siempre será la misma, en cuanto a los valores obtenidos de los ángulos, estos se midieron trazando líneas de tendencia de giro de acuerdo con la dirección e inclinación de las líneas de desplazamiento mostradas en las figuras 38 a la 45. El caso más desfavorable de desplazamiento se detectó en la torre izquierda, en el sentido Y, con el caso C4 Ti (Q = 1.5 max) , el cual alcanza un ángulo de 5.34°, siendo el valor máximo entre todos los escenarios de combinaciones planteados. El ángulo crítico o límite (α) para el cual los bloques se comienzan a voltear se calcula con la ecuación 1 (ver figura 50). Las expresiones 1 a 5 se relacionan con la figura 50.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{bcg}{hcg} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{bcg}{R} \quad (2)$$

$$\theta_{ri} = L - (\theta_i + \beta) \quad (3)$$

$$R = \sqrt{bcg^2 + hcg^2} \quad (4)$$

$$\text{Sen}(\theta_{ri}) = \frac{x_i}{R} \quad (5)$$

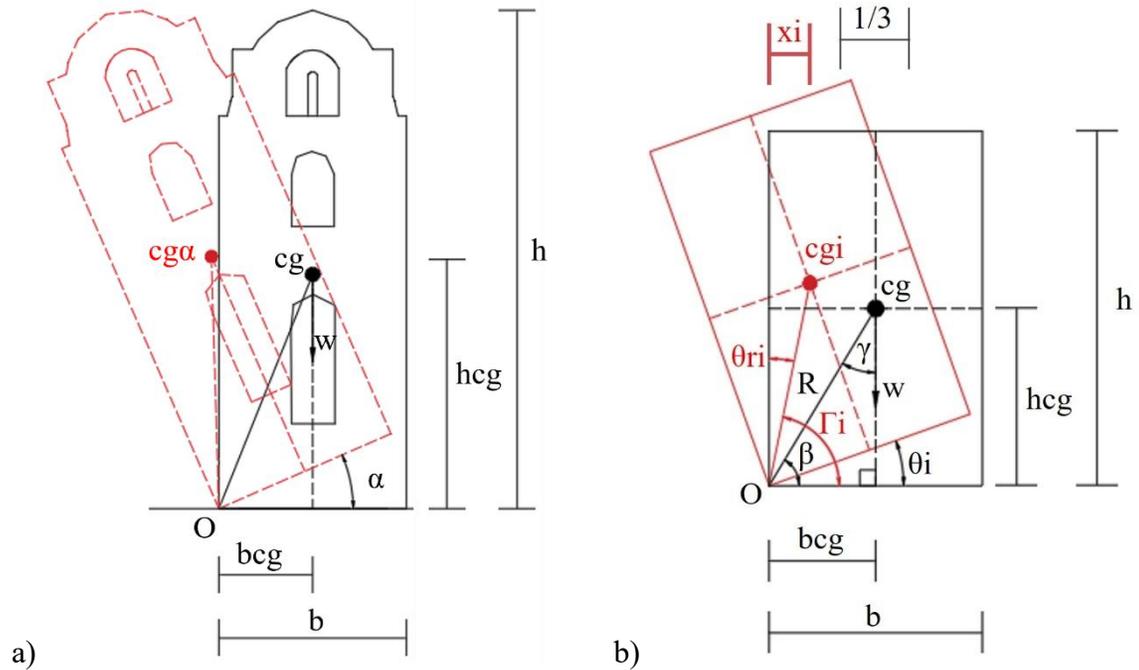


Fig. 50. Giro de los bloques con tendencia al volteo en las torres del Templo de la Santa Veracruz, a) bloque de la torre, b) bloque equivalente. Retomado y modificado de Peña F. et al. (2010).

Donde:

W = densidad del bloque,

α = ángulo máximo a partir del cual se produce el volteo,

cg = centro de gravedad,

$cg\alpha$ = centro de gravedad del bloque con el ángulo máximo a partir del cual se produce el volteo,

h = altura total del bloque,

b = ancho de la base en dirección del volteo,

bcg = dimensión medida desde el vértice “O” hasta la línea vertical que pasa por el centro de gravedad,

hcg = dimensión vertical medida desde la base hasta el centro de gravedad del bloque,

θ_i = i -ésimo ángulo de volteo en la base,

θ_{ri} = i -ésimo ángulo restante para provocar el volteo,

cg_i = posición i -ésima del centro de gravedad del bloque con giro en la base respecto al punto “O”,

R = distancia desde el punto “O” al centro de gravedad,

β = ángulo formado entre la línea “O”-“ cg ” y la línea horizontal de la base,

Γ_i = i -ésimo ángulo de la línea “O”-“ cg_i ” durante el volteo,

γ = ángulo formado entre la línea “O”-“ cg ” y la línea vertical que pasa a través de cg ,

x_i = i -ésima dimensión horizontal entre cg_i y “O”.

En la figura 51 se ilustran los bloques críticos a sufrir desplazamientos laterales en las torres campanario, en la figura 51b se presenta el bloque que tiende al volteo, el cual se analiza de acuerdo con las figuras 37 y 50, además de considerar los valores presentados en la tabla 2, donde: $b = 5.24\text{m}$, $h = 13.63\text{m}$, $w = 284470.37\text{kg}$.

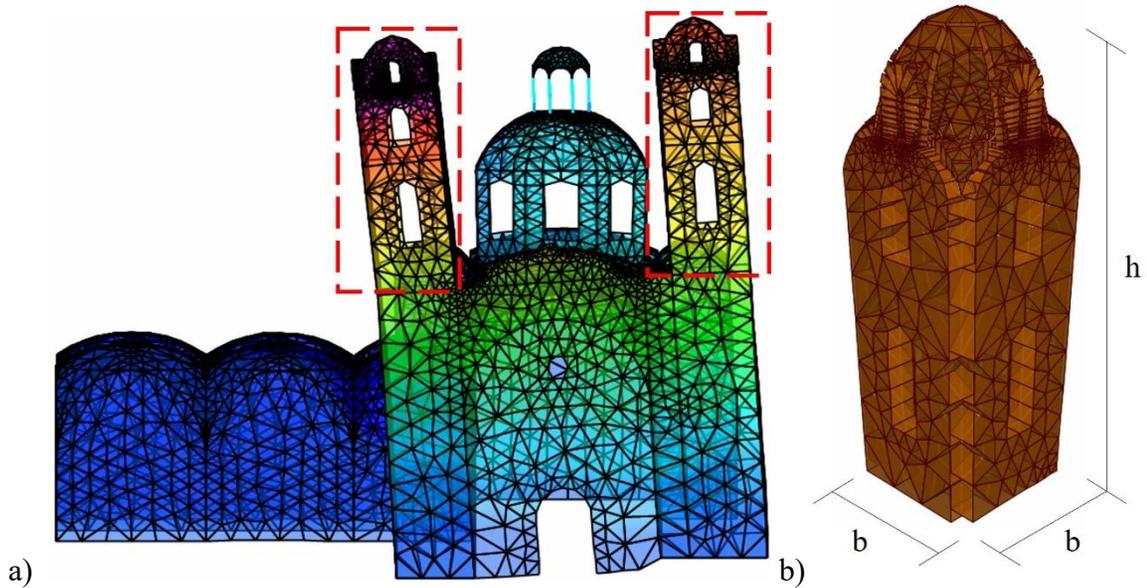


Fig. 51. Bloques críticos en las torres campanario, a) localización de bloques críticos en el sistema, b) bloque crítico aislado.

Tabla 2. Ángulos de volteo generados por desplazamientos críticos en las torres campanario del templo de la Santa Veracruz.

Casos	θ_i°	θ_{ri}°	$\left(\frac{\theta_{ri}^\circ}{\theta_i^\circ}\right)$	xi (m)	$\theta\%$
C3 Td (SCT-B2 19)	1.95	19.06	9.78	1.24	9.28
C3 Ti (SCT-B1)	2.20	18.81	8.55	1.09	10.47
C4 Td (CCUT-CL 19)	3.02	18.00	5.96	0.76	14.36
C4 Ti (CCUT-CL 19)	3.08	17.94	5.83	0.74	14.64
C3 Td (Q = 1.5 max)	3.08	17.93	5.82	0.74	14.67
C3 Ti (Q = 1.5 max)	4.59	16.43	3.58	0.46	21.82
C4 Td (Q = 1.5 max)	4.90	16.11	3.29	0.42	23.33
C4 Ti (Q = 1.5 max)	5.34	15.67	2.93	0.37	25.42

En la figura 52 se presenta la relación de la distancia horizontal del centro de gravedad (xi) medida al borde vertical que pasa por el punto “O” del bloque respecto al i-ésimo ángulo de volteo (θ_i) del bloque, la línea punteada azul es el límite del tercio medio de seguridad perteneciente al bloque analizado, donde el centroide se mueve conforme gira el bloque, dentro de este rango se encuentra la línea punteada negra que representa el ángulo mayor que alcanzó el bloque ante acciones sísmicas sin hundimientos de acuerdo con las figuras 38 a 45, mientras que la línea punteada verde es el ángulo más grande que se alcanzó (5.34°) con las combinaciones que incluyen hundimientos, y por último la línea punteada roja es el ángulo α en el que se voltea el bloque y $xi=0$. El ángulo α resultó en 21.01° .

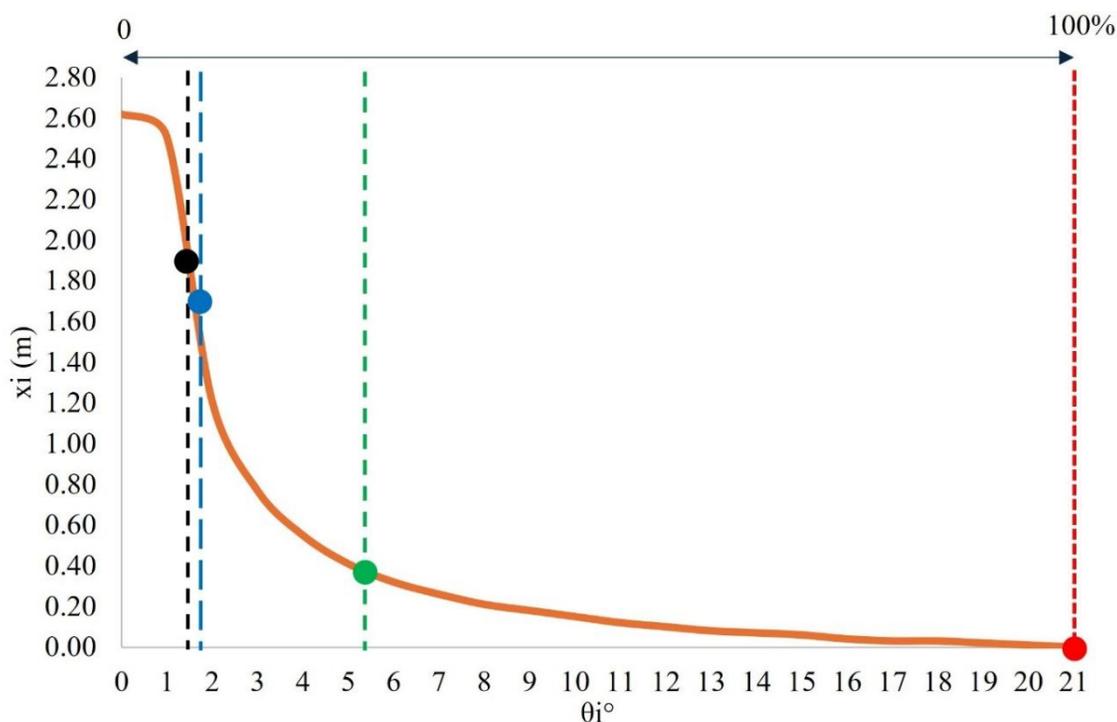


Fig. 52. Relación de la distancia horizontal del centro de gravedad (x_i) medida al borde vertical que pasa por el punto “O” del bloque, con el ángulo de volteo del bloque (θ_i).

10. DISCUSIÓN

En la actualidad también existen herramientas numéricas para simular bloques rígidos y elementos de contacto para la modelación de mampostería histórica. Este tipo de herramientas consumen mayor cantidad de datos computacionales y requieren mucho más tiempo para su análisis. Es por ello que, en la actualidad, dichas herramientas solo se utilizan para modelar estructuras relativamente pequeñas o medianas y principalmente en dos dimensiones, por lo que resultan poco prácticas y casi imposible implementarlas en sistemas completos en tres dimensiones. Dado que existen muchas zonas sísmicas alrededor del mundo, se requiere contar con procedimientos y herramientas de análisis simplificadas, comunes, comerciales, relativamente rápidas y de uso generalizado, con el objetivo de que se puedan revisar de manera pronta y eficaz los desplazamientos, y con ello evaluar los posibles riesgos por volteo en las torres. Existen muchos artículos que analizan torres campanario, sin embargo, la mayoría de éstos se modelan de manera aislada, lo cual se contradice con los principios ISCARSAH-ICOMOS (2003, 2004), donde se menciona que el análisis no debe realizarse solo en una sola parte de los edificios, es necesario evaluarlo de manera completa, por lo que no es factible solo salvaguardar a las torres, también se requiere conservar los cuerpos adyacentes. Este tipo de procedimientos para análisis de desplazamientos de las torres campanario, considerando el sistema completo modelado con EF, permite visualizar las zonas susceptibles a sufrir daños, sin embargo, aunque es una herramienta poderosa para analizar de manera rápida a los templos construidos con mampostería histórica, se recomienda, y además es necesario, después de haber detectado dichas áreas vulnerables, realizar análisis estructurales con métodos específicos para cada una de estas zonas. Este artículo presenta el análisis del sistema completo, dado que el análisis aislado tendría que tomar en cuenta el posible golpeteo por contacto de vibración de los cuerpos aledaños, ya que sería muy difícil que primero colapsen los cuerpos pequeños antes que las torres, por tal motivo no se presenta el análisis de la torre separada del resto del inmueble por lo que se puede concluir que las torres sin hundimientos

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

seguirían dentro de este rango de seguridad del tercio medio incluso siendo sometidas a acciones sísmicas.

Se pudo observar que al cortar la señal y utilizar solo la fase intensa, los desplazamientos resultaron prácticamente los mismos que al utilizar los acelerogramas completos, lo que significó utilizar solo 80 segundos equivalentes a 1.2 minutos de cada señal, representando la eliminación de 87%, 56%, 77%, 73% y 77%, de las señales completas (ver figuras 12 a 18). En este trabajo, se relacionan los desplazamientos laterales obtenidos con elementos tipo shell modelados en un sistema completo sometido a diferentes acciones con los volteos de bloques, más que analizar por esfuerzos, ya que, dada la naturaleza de este tipo de sistemas constructivos, tienden a evaluarse con mayor certeza bajo los principios mencionados por algunos autores tales como: Heiman J., (1969, 1997), Mas-Guindal A.J. (2011) y Peña F. (2007). Una vez que se obtienen los desplazamientos del sistema estructural, se determinan los ángulos y se revisa el posible volteo del bloque crítico. Por tal motivo, aunque las pruebas de vibración ambiental (VA) son una excelente herramienta para determinar las propiedades dinámicas en las edificaciones, dichas herramientas tienen limitaciones, dado que el rango de medición de frecuencias y amplitudes que registran la mayoría de acelerómetros de VA permiten determinar propiedades dinámicas en el rango lineal y con desplazamientos muy pequeños. Sin embargo, los desplazamientos grandes y/o que rebacen las resistencias de tracción, dejan de tener coherencia numérica, ya que este tipo de edificaciones tiende a separarse en macrobloques. Asimismo, las funciones de transferencia son más compatibles para analizar sistemas físicos continuos y con pequeños desplazamientos. Esto también pasa con los ángulos de fase, funciones de coherencia y espectros cruzados. Este trabajo se enfocó de manera precisa en grandes desplazamientos y se retomaron las propiedades mecánicas de la literatura, es decir, utilizando métodos paramétricos. Para calibrar sistemas estructurales se recomienda llevar a cabo pruebas de VA, sin embargo, en comportamientos no lineales, cuasi no lineales o con tendencia a fractura o volteo del objeto físico, tales pruebas quedan limitadas y no son compatibles para calibrar giros de bloques y colapsos en las torres campanarios, ya que este tipo de pruebas no son válidas para grandes desplazamientos, por lo que, para calcular colapsos de torres campanario, se vuelve más eficaz utilizar la teoría de volteo de bloques rígidos, una vez determinadas las tendencias de desplazamientos laterales y obteniendo los ángulos de giro. En los análisis efectuados con aceleraciones espectrales se presentan desplazamientos hasta de 60 cm sin hundimientos, mientras que en los análisis desarrollados con aceleraciones tiempo-historia los desplazamientos máximos no superan los 10 cm. Al tomar en cuenta los hundimientos en la base, los desplazamientos con aceleraciones espectrales produjeron un desplome máximo del 7.5% respecto a la parte más alta de las torres, mientras que con las aceleraciones en el tiempo resultó un desplome máximo de 4.5%, lo cual representa una diferencia del 40% entre éstos.

11. CONCLUSIONES

Las tendencias de comportamiento de las torres mostradas en las figuras 1 a 6 son similares a los resultados obtenidos en el caso de estudio del Templo de la Santa Veracruz, en el cual se pudo determinar que existe la tendencia de sufrir mayores desplazamientos a partir del cambio brusco de sección, dicho cambio se ubica en la parte superior de la nave principal, la cual proporciona soporte lateral en las zonas inferiores de las torres campanario. Por otra parte, el uso de elementos finitos tipo shell fueron adecuados para la rápida modelación estructural del templo. Asimismo, las respuestas de los desplazamientos determinados con los diferentes acelerogramas utilizados para los análisis, mostraron diferencias significativas, donde el acelerograma del sismo completo (SC) y la fase intensa (FI) produjeron desplazamientos prácticamente iguales entre éstos. Sin embargo, al intentar reducir los tiempos de análisis seleccionando solo 12 puntos específicos con las mayores aceleraciones de dichos acelerogramas, tales desplazamientos resultaron con mayor magnitud que

Determinación virtual de desplazamientos en torres campanario de edificios históricos sometidos a acciones sísmicas y hundimientos, utilizando elementos shell, análisis dinámico lineal y lineal modificado.

Caso de estudio: Templo de la Santa Veracruz.

los obtenidos con SC y FI, incluso llegando a rebasar el 200% de los desplazamientos en ciertos casos, por lo que no es recomendable utilizar solo las aceleraciones máximas de los acelerogramas, dado que la historia en el tiempo de todas las aceleraciones define la respuesta del sistema y no solo los picos máximos.

También se puede concluir que, al considerar los bloques completamente rígidos con tendencia al volteo, los resultados varían en comparación con los elementos modelados con elementos finitos (ver figura 37). Se concluye que la falla por volteo de las torres campanario del caso de estudio tiene un rango amplio de seguridad (ver figura 52) ante eventos sísmicos, sin embargo, los hundimientos diferenciales son factores que incrementan en sobremanera los desplazamientos, los cuales llegan a posicionar a las torres fuera de su tercio de seguridad, perjudicando constantemente a dichos elementos con el paso del tiempo. En particular, para el caso de estudio, se recomienda implementar medidas de renivelación en la base para evitar afectaciones futuras. Es por ello que este trabajo es singular, dado que combina herramientas basadas en EF y volteo de elementos de bloques rígidos.

12. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional (IPN) dado que parte de este texto se deriva de proyectos de investigación de la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP), por ejemplo, de los proyectos SIP 20181461 y SIP 20195419. También se agradece al ahora SECIHTI (antes CONAHCYT) por el apoyo brindado a los autores.

13. REFERENCIAS

- Angelillo, M. (2014), *Mechanics of Masonry Structures*. Maurizio Angelillo. Springer. Università di Salerno.
- Antonella, S., Carmelo, G., Antonello, R. (2016) “Pre-diagnostic prompt investigation and static monitoring of a historic bell tower”, EL SEVIER, *Construction and Buildings Materials*, pp 838.
- Chávez, M. (2005), *Estudio experimental de las propiedades mecánicas de mamposterías de piedra natural*. Instituto de ingeniería, UNAM, México.
- Chávez, M. (2010), *Validación experimental de modelos analíticos para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras históricas*. Instituto de ingeniería, UNAM. México.
- De la Torre, R. O., López, V. R., Salazar, H. A., Roldán, C. J. C. (2004) "Evaluación estructural y comportamiento de las reparaciones efectuadas a edificaciones históricas." *Revista de Ingeniería Sísmica*, no. 70, pp.1-26. Redalyc, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61807001>
- Fernández, M. (2024), “La parroquia de la Santa Veracruz: del esplendor al abandono”, Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista Electrónica Imaeneges del Instituto de Investigaciones Estéticas*, última fecha de acceso al enlace: 09/08/2024, <https://www.revistaimagenes.esteticas.unam.mx/la-parroquia-de-la-santa-veracruz>.
- Filomena, S., Dimitris, P., Francesca, C., Stefania, S., Francesco, S. (2018), “Experimental and numerical dynamic identification of a historic masonry bell tower accounting for different types of interaction”, EL SEVIER, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, pp. 249.
- Francesco, M., Alessio, C. (2020), “Structural assessment and seismic of a 14th century masonry tower”, EL SEVIER, *Engineering Failure Analysis*, pp. 21.
- García, N. (2007), “Funcionamiento y seguridad estructural de los templos conventuales del siglo XVI en México”. Tesis doctoral. México; UNAM, México.
- Gianni, B., Michele, B., Luciano, G., Giacomo, Z. (2019), “Numerical insights on the seismic risk of confined masonry towers”, EL SEVIER, *Engineering Structures*, pp. 725.

- Hakan, E., Yusuf, C., Musa, Y. (2024), “*Non-linear seismic behavior of historic Adana Great Clock Tower*”, EL SEVIER, Structures, pp. 9-12.
- Heyman, J. (1969), “*Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*”. Inst. Juan de Herrera.
- Heyman, J. (1997), “*El esqueleto de piedra*”. Inst. Juan de Herrera.
- ICOMOS, International Council on Monuments and Sites, ISCARSAH, International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (2003), “*Carta ICOMOS – Principios para el análisis conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico*”. Editorial Documentation Centre UNESCO-ICOMOS
- ICOMOS, ISCARSAH (2004), “*Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico*”. Editorial Documentation Centre UNESCO-ICOMOS
- Luca, Z. F., Guiosué, B., Rosario, C., Salvatore, R., Silvia, I., Marica, L. P., Antonino, Q. (2017), “*Dynamix investigation on the Mirandola bell tower in post-earthquake*”, Springer, Bull Earthquake Eng, pp 316-327.
- Mas-Guindal, A. J. (2011), “*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*”. Munillaleria.
- Massimiliano, F., Angelo, L., Donato, A., Alberto, M., Alberto, M. A. (2023), “*Seismic vulnerability analysis and structural rehabilitation of a historical masonry tower*”, EL SEVIER, Procedia Structural Integrity, pp 1096.
- Meli, R. (1998), “*Ingeniería estructural de los edificios históricos*”, ICA, México.
- MexicoCity (2024), “*Santa Veracruz*”, Gobierno de la Ciudad de México, Turismo de colores, Fotografía de Jonathan Cardy, última fecha de acceso al enlace: 09/08/2024, <https://mexicocity.cdmx.gob.mx/venues/santa-veracruz-church/?lang=es>
- Peña, F. (2007), “*On the dynamics of rocking motion of single rigid-block structures*”, Earthquake Engineering and Structural dynamics, 2007; 36:2383-2399, Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.739>
- Peña, F., Meza, M., (2010), “*Seismic assessment of bell towers of Mexican Colonial churches*”, Adv. Mater. Res. 133 585–590.
- Peña, F. (2015), “*Modelo simplificado para el estudio del balanceo asimétrico de cuerpos rígidos esbeltos*”
- RAII-UNAM (2014), “*Red Acelero grafica del instituto de Ingeniera de la UNAM*”. Los datos sísmicos fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM), producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica. Los datos son distribuidos a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web: <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>.
- SAP2000v23 (2017), “*CSI Structural Analysis and Design*”. Editorial Computers & Structures, Inc., pp. 204.
- SASID (2020), “*Aplicación Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (NTCDS-CDMX-2020)*”, Fecha de generación de los espectros: 17/05/2024, última fecha de acceso al enlace: 05/08/2024, <https://saside.unam.mx/SASIDV1/default.aspx>.
- Secretaría de Cultura, Gobierno de México (2024), “*Guía para la conservación de bienes culturales, Monumentos históricos y artísticos*”, CULTURA, INAH, pp 4.
- Torres, C. A., Ruiz, C. (2023), “*Tácticas de modelación estructural con elementos tipo shell en inmuebles históricos de mampostería irregular*”, Memorias 4CIHCLB, IV Congreso Internacional, pp. 1-12.
- Torres, C. (2023), “*Análisis lineal y no-lineal de estructuras históricas de mampostería irregular, comparación entre elementos sólidos y shell*”, Memorias 4CIHCLB, IV Congreso Internacional, p. 2.

- Torres, C. A. (2023), “*Procedimiento sistémico y propiedades de la mampostería irregular para el análisis estructural de edificios históricos*”, Editorial Restauro Compas y Canto, ISBN digital: 978-607-99572-4-7, pp. 72-88.
- Torres, C., Rosas, J., Pérez, O. (2024), “*Numerical-vector succession for the graphic structural analysis of masonry historic buildings with arches and symmetrical systems*”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 191 – 210, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.717>
- Zepeda, A., Montero, J. A., Benítez, S. I. (2014), “*Inmuebles históricos, Plantas y Cortes Arquitectónicos de la Iglesia Santa Veracruz*”, IPN, ESIA Tecamachalco, Seminario de Titulación.