

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

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

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

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

Recebido: 25/10/2025 | Correções recebidas: 02/06/2025 | Aceito: 05/08/2025 | Publicado: 01/09/2025

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 tipo de casca e blocos de torneamento. Os resultados mostraram uma relação coerente do comportamento em relação às mudanças de secção. Os recalques diferenciais aumentaram drasticamente os deslocamentos. A limitação foi a interrupção do acesso, devido a atividades 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, recalque diferencial, análise dinâmica, análise linear modificada, edifícios históricos.

Citar como: Torres Montes de Oca, C. A., Rosas Valencia, J. E. (2025), “*Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edifícios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada. Estudo de caso: 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>.

Contribuição de cada autor

Nesta obra, Carlos Alberto Torres Montes de Oca contribuiu com 100% da ideia original, direção e redação final, e José Eduardo Rosas Valencia contribuiu com 100% da redação inicial do documento e com o desenho e edição das figuras.

Licença Creative Commons

Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 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.

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.

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edificios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada.

Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

1. INTRODUÇÃO

Na prática profissional, ferramentas computacionais são utilizadas para layout geométrico, malhas e análise numérica com o método dos elementos finitos de casca (MEF) para representar sistemas estruturais de edifícios completos de forma eficiente e rápida, tornando-se essencial conhecer o comportamento estrutural virtual neste tipo de modelagem com elementos finitos de casca, com análise linear e linear modificada. Neste trabalho, são comparadas as análises linear e quase não linear do Templo de "Santa Veracruz", fundado no século XVI e substituído por uma nova construção no século XVIII, construída inteiramente com alvenaria irregular. O referido templo está localizado no Centro Histórico da Cidade do México, uma área altamente sísmica com solo compressível, que danificou o edifício, apresentando considerável recalque diferencial. A modelagem de edifícios mais antigos envolve maior complexidade em comparação com edifícios contemporâneos em vários aspectos, como: as propriedades mecânicas dos materiais, sua homogeneização e a aproximação à realidade geométrica. Portanto, uma série de decisões são necessárias para determinar os componentes essenciais e, assim, alcançar uma modelagem adequada da estrutura. Esses componentes podem ser: sistemas construtivos, materiais, geometria, propriedades mecânicas, ações internas ou externas que impactam a estrutura. Este trabalho busca tornar esses modelos relativamente rápidos, razão pela qual são realizados por meio de análises lineares e/ou lineares modificadas, para apresentar resultados confiáveis. Embora exijam maior expertise para sua leitura e interpretação em comparação a outros tipos de análise, são ideais para modelar e analisar sistemas estruturais que não apresentam deterioração ou danos críticos, o que deixa uma margem de segurança para realizar todas as análises e procedimentos necessários para propor as ações adequadas.

2. TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO E DETERIORAÇÃO ESTRUTURAL NAS TORRES

As torres sineiras tendem a mudar sua rigidez à medida que sua altura aumenta, devido a alterações nas dimensões e seções transversais. A Figura 1 ilustra tendências comuns de deterioração e falha em torres sineiras que fazem parte dos sistemas estruturais de templos mexicanos típicos, com alvenaria histórica irregular unida com argamassa de cal e areia.



Fig. 1. Tendência de deterioração e falha em torres sineiras fixadas a corpos adjacentes; a) falha horizontal devido a terremoto com tendência a tombar no topo devido à mudança abrupta de volume. Imagem obtida do Ministério da Cultura, Governo do México. (2024), b) falha diagonal devido a um terremoto pela mudança abrupta de seção. Imagem retirada de: De la Torre RO, et. al. (2004).

Para entender o comportamento estrutural desses tipos de torres, elas são frequentemente analisadas isoladamente, evitando a necessidade de modelar corpos adjacentes para realizar simulações mais rapidamente. As Figuras 2 e 3 mostram tendências nas concentrações de tensões, tombamento e padrões de deterioração devido ao efeito de forças inerciais sísmicas. As Figuras 2b e 2c mostram a modelagem de uma torre sineira isoladamente, considerando comportamento do tipo pêndulo invertido, com base fixa e base de contato, respectivamente. A Figura 2b apresenta uma concentração de tensões com maior magnitude na mudança abrupta de seção em relação à sua base, enquanto a Figura 2c mostra um comportamento de tombamento do tipo bloco rígido. As Figuras 2d e 2e ilustram o comportamento da torre considerando restrições laterais na parte inferior, simulando contato com um corpo adjacente por meio de molas, sem modelar todo o sistema usando o método dos elementos finitos. A Figura 2e mostra um comportamento de tombamento com a mudança de rigidez. As Figuras 3c e 3d mostram os padrões de deterioração estrutural quando as torres são modeladas como pêndulos invertidos sem restrição lateral e com restrição lateral na zona inferior, respectivamente.

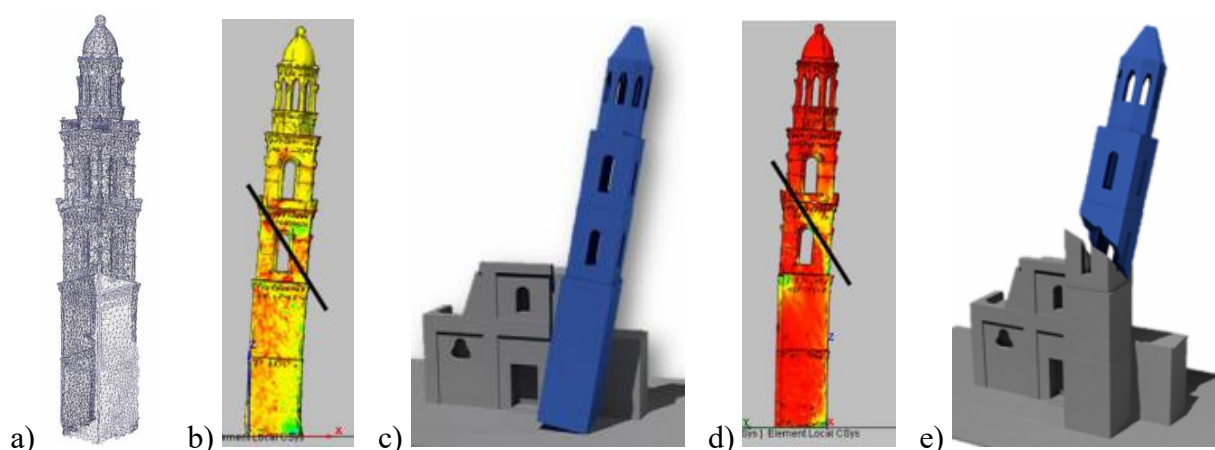


Fig. 2. Concentração de tensões e tendência de elevação na torre sineira, a) modelo de elementos finitos (EF), b) concentração de tensões na torre isolada, c) elevação na base, d) concentração de tensões na torre com interação do corpo adjacente na base, e) elevação na mudança abrupta de seção. Reproduzido de Francesco M. et al. (2020).

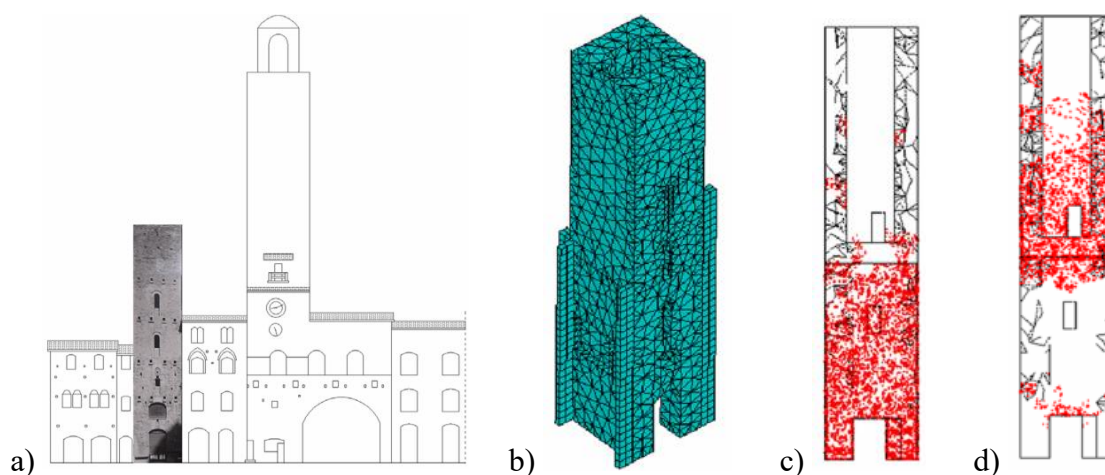


Fig. 3. Padrões de deterioração em uma torre sineira devido a forças sísmicas, a) vista frontal e interação da torre com outros corpos adjacentes, b) modelo com EF isolado e com restrições laterais, c) zona de fissuração em uma torre isolada, d) zona de fissuração em uma torre lateralmente restrita. Recuperado de: Gianni B., et. al.

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edificios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada.

Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

A Figura 4 mostra a tendência da concentração de tensões devido aos deslocamentos laterais. A Figura 4c mostra essa concentração da zona intermediária para o topo, devido à modelagem estrutural da torre isolada com restrições na zona inferior. A Figura 4d mostra a concentração de tensões na zona inferior, visto que existem elementos que restringem os deslocamentos nessa direção. No entanto, a zona lateral em contato com o corpo adjacente não está completamente descolada do corpo adjacente, o que não é observado na modelagem.

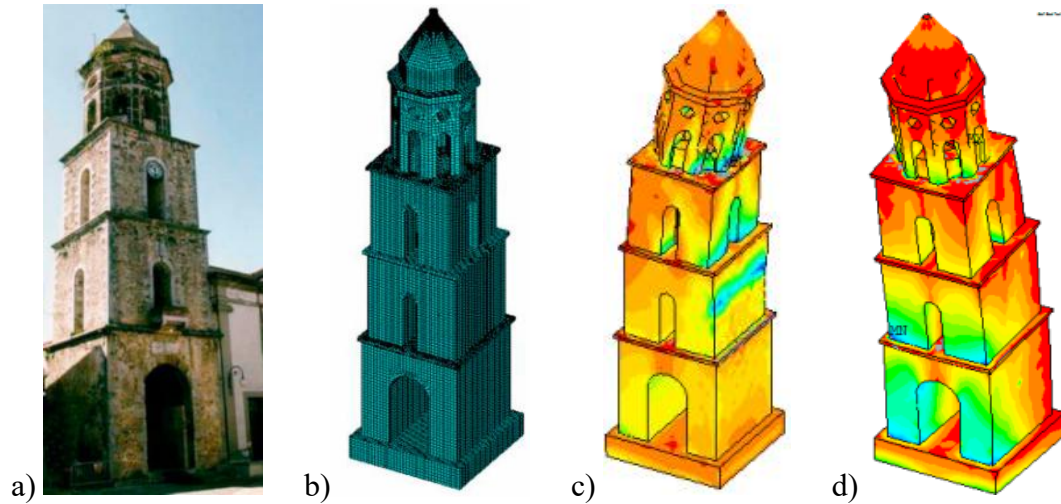


Fig. 4. Tendência de concentração de tensões na torre sineira, a) torre sineira física, b) modelo EF, c) concentração de tensões na torre sineira com restrição lateral na base, d) concentração de tensões na torre sineira isolada. Recuperado de: Massimiliano F., et. al. (2023).

As Figuras 5a e 5b mostram uma torre sineira física e sua modelagem digital com EF, enquanto a Figura 5c mostra os efeitos de seus deslocamentos causados por forças sísmicas, e a Figura 5d representa graficamente esses deslocamentos em relação à sua altura para visualizar o comportamento da torre.

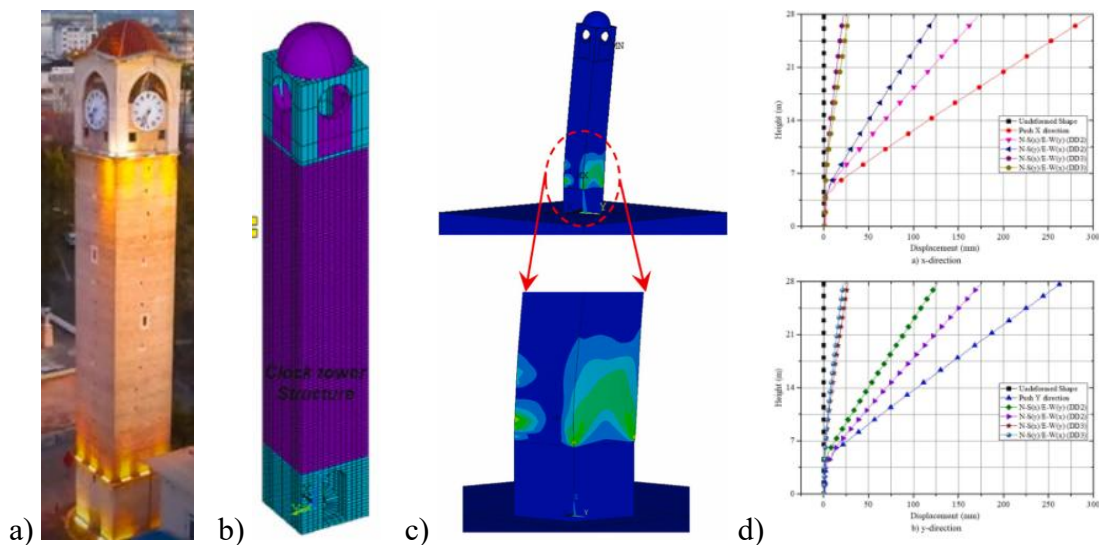


Fig. 5. Tendência de deslocamento em uma torre sineira com mudança repentina de seção na base, a) torre real, b) modelo EF, c) concentração de deformações devido a deslocamentos laterais, d) gráficos de deslocamento em relação à altura. Retirado de: Hakan E., et. al., (2024).

Quatro casos digitais são apresentados nas Figuras 2 a 5., esses casos têm em comum a tendência de apresentar deslocamentos laterais significativos como resultado da exposição a eventos sísmicos. Da mesma forma, concentrações de tensões são observadas em mudanças abruptas em seções e com o aumento da altura ou na base quando as torres são modeladas isoladamente. Além disso, a Figura 5 mostra que esse comportamento pode ser representado linearmente para simular a tendência de deslocamento e sua interação com corpos adjacentes ou bases rígidas. Esse tipo de modelo digital de elementos finitos pode ser usado para simular o comportamento de deslocamento em torres que pertencem a sistemas completos de edifícios históricos ou mesmo torres isoladas. Para agilizar o processo, o uso de elementos do tipo casca é proposto. Além disso, os princípios e diretrizes do ISCARSAH (2003, 2004) incentivam que os estudos estruturais sejam realizados no sistema completo e não isoladamente.

A Figura 6 apresenta uma maquete de um templo mexicano típico, construído com alvenaria histórica irregular e argamassa de cal e areia, bem como seus padrões de danos simulados em uma mesa vibratória (retirado de Chávez M., 2010). Uma vez submetido a acelerações na base, este modelo apresentou uma tendência à fissuração muito semelhante à mostrada na Figura 1, que são edifícios históricos de alvenaria irregular unidos com argamassa de cal e areia, sob os efeitos do terremoto de 2017 no México. Na maquete, padrões de fissuração diagonais são observados na torre esquerda (ver Figura 6a), semelhante à Figura 1b, enquanto a torre à direita apresenta fissuração horizontal (ver Figura 6b), semelhante à Figura 1a.

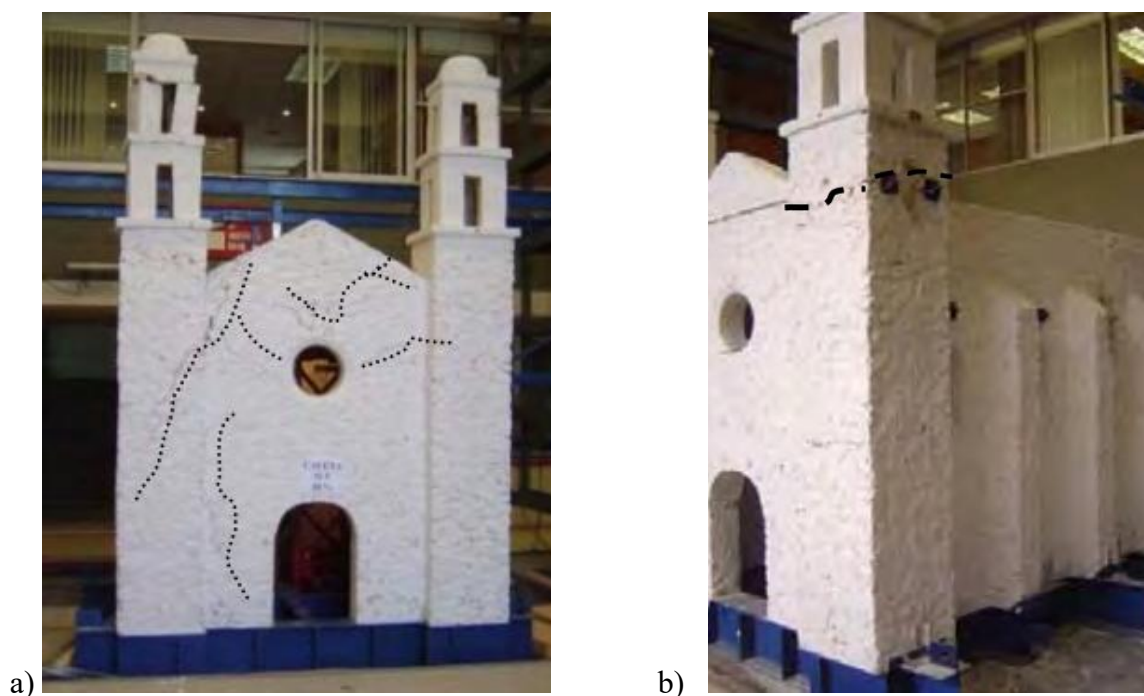


Fig. 6. Principais danos na maquete submetida a ações sísmicas: a) tendência à deterioração e fissuração diagonal na torre à esquerda; b) tendência à ruptura horizontal no bloco superior da torre sineira à direita. Reproduzido de Chávez M., (2010).

3. ELEMENTOS FINITOS DO TIPO CASCA

Elementos finitos (Figura 7) podem ser compostos de 3 nós ($u1...u3$) dando uma forma triangular ($C1...C3$) tendo apenas 5 faces (a face 4 não é contada), ou podem ser compostos de 4 nós ($u1...u4$) e 6 faces ($C1...C4$), esses elementos têm seus eixos locais localizados no centro da figura representando os eixos X, Y e Z sendo representados como E1, E2 e E3 na figura respectivamente, eles também têm seus nós que interagem com outros elementos finitos do tipo casca como uniões para representar um elemento maior que se assemelha, neste caso, a uma abóbada de arco abatido, dando a liberdade de modelagem usando apenas dois tipos de elementos de casca. A razão para modelar um elemento do tipo casca triangular ou quadrada é principalmente para a convergência e racionalidade dos resultados obtidos, uma vez que os nós mostram deslocamentos nos 3 eixos, sendo possível detectar tais deslocamentos em cada nó. Para visualizar o comportamento, o tamanho da malha também afeta os resultados, visto que uma malha fina com muitos elementos consome mais recursos computacionais para obter resultados de um único modelo, cabendo ao modelador decidir se prioriza a precisão do modelo ou a velocidade dos resultados. Por outro lado, elementos de casca retangulares são mais comumente implementados em edifícios ortogonais, modernos e modulares, enquanto elementos de casca triangulares se adaptam melhor a formas irregulares e curvas, tornando-os mais práticos para a modelagem de templos históricos.

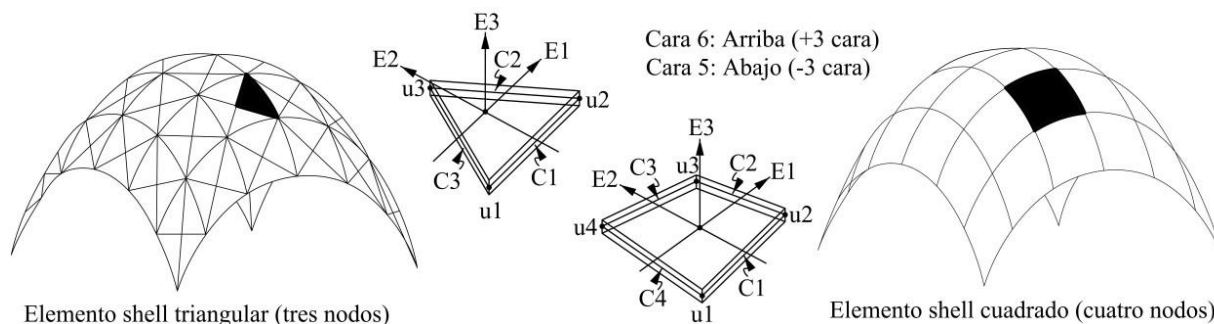


Fig.7 Modelo de abóbada Vahida baseado em elementos finitos de casca triangular e quadrada; representação de eixos, faces e juntas. Reproduzido e redesenhado de SAP2000v23 (2017), Torres CA et. al. (2023).

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso é o templo da Santa Veracruz, que possui um par de torres sineiras de aproximadamente 30 m de altura, feitas de pedra de jazida. O material principal desta construção é a alvenaria irregular, e as paredes que compõem a estrutura têm uma variação de espessuras, atingindo espessuras de 60 cm a 170 cm em diferentes áreas. A Figura 8 mostra os elementos arquitetônicos que o compõem e suas medições tanto em elevação quanto em planta arquitetônica. O levantamento do templo foi retomado a partir do trabalho realizado pelos alunos da Especialidade de Restauração Arquitetônica da Seção de Estudos de Pós-Graduação e Pesquisa da Escola Superior de Engenharia e Arquitetura, Unidade Tecamachalco do Instituto Politécnico Nacional. Este levantamento geométrico estrutural foi realizado por meio de trenas de fita, medidores de distância a laser e fios de prumo.

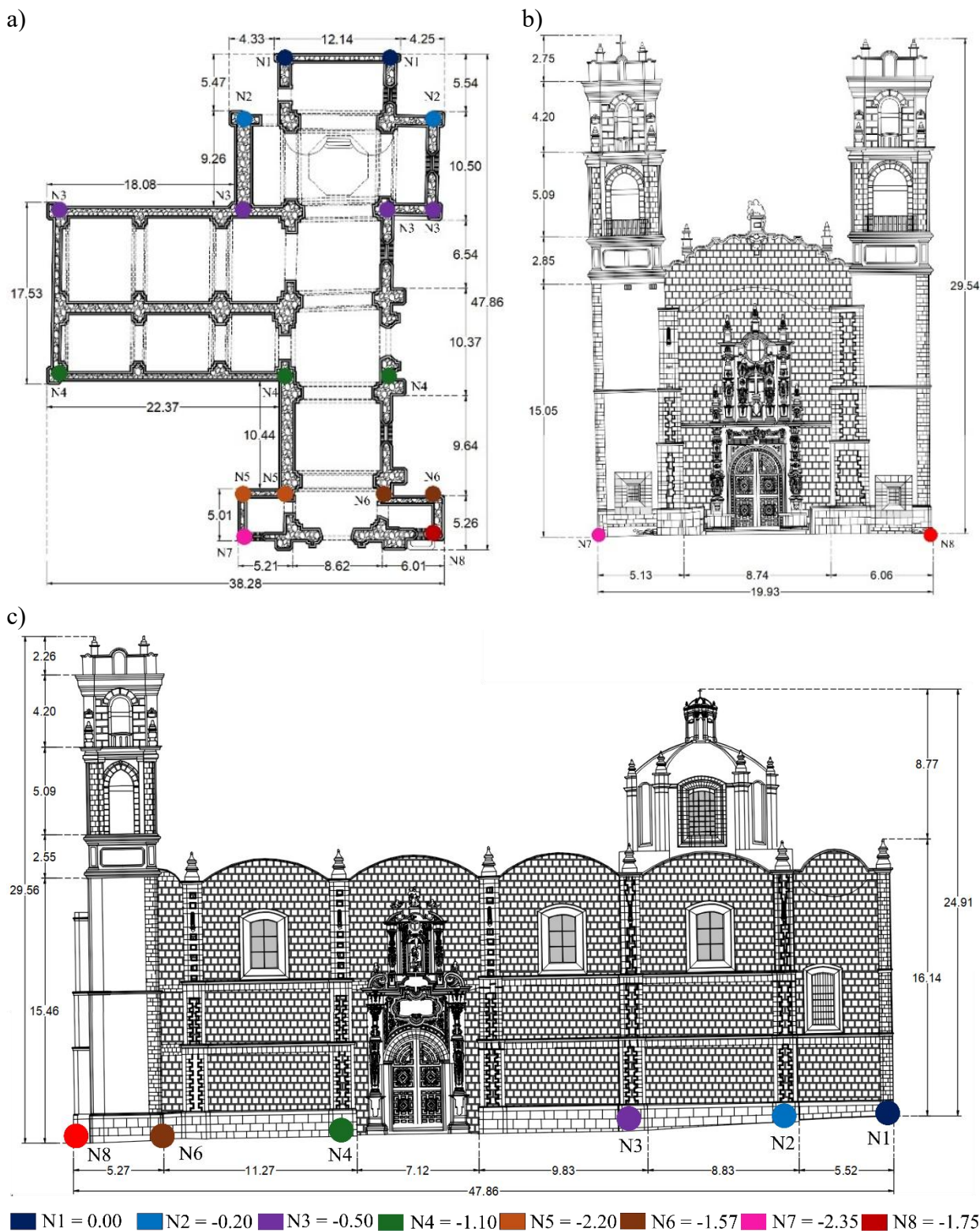


Fig. 8. Templo da Santa Veracruz. a) Planta arquitetônica geral, b) Fachada principal, c) Elevação lateral longitudinal. Reproduzido e adaptado de Zepeda A., et. al. (2014). Onde: N = Cota do nível em relação a 0,00. NOTA: Todas as cotas estão em metros.

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edificios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada.

Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

5. MODELAGEM ESTRUTURAL DIGITAL

A modelagem digital de um templo histórico é complexa devido à morfologia dessas construções. Portanto, a metodologia implementada para o desenvolvimento dessas estruturas também é complexa, pois os sistemas construtivos que compõem cada seção físico-geométrica e as propriedades mecânicas dos materiais devem ser levados em consideração. O modelo do estudo de caso é desenvolvido com elementos finitos do tipo casca com diversas espessuras para representar a edificação, como pode ser visto nas Figuras 9 e 10.

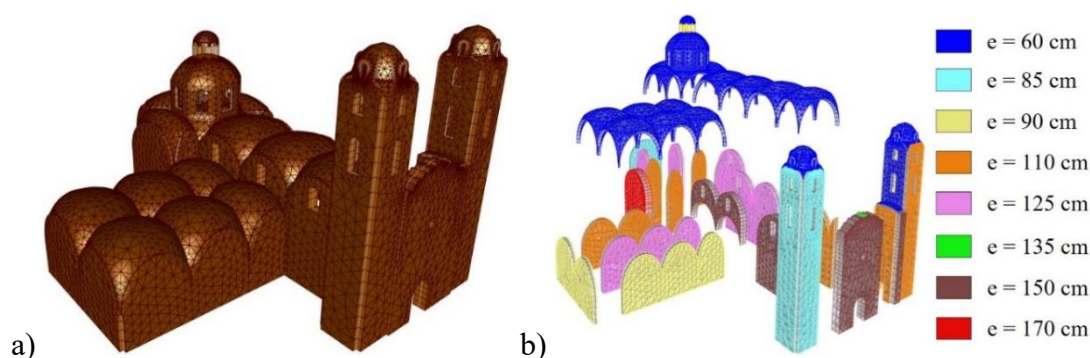


Fig. 9. Modelos, a) original com elementos finitos; b) modelo explodido do templo de Santa Veracruz feito com elementos finitos do tipo casca. Onde: e = espessura do elemento.

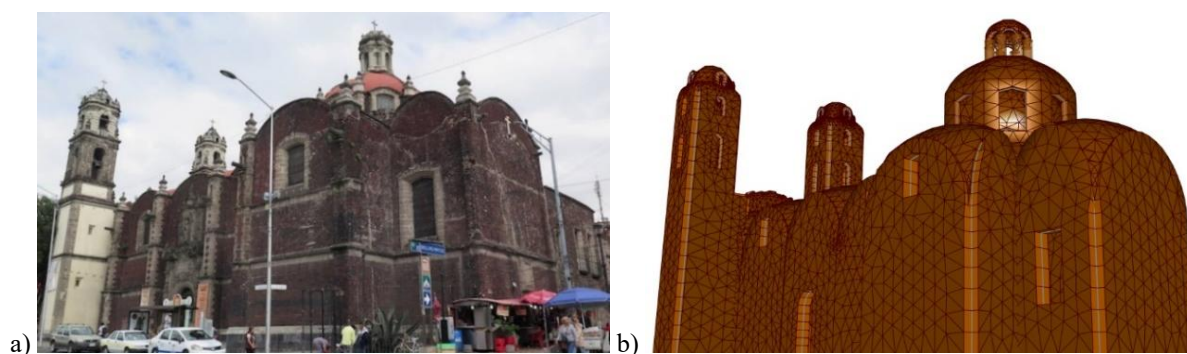


Fig. 10. Foto do imóvel e maquete digital, a) foto do Templo da Santa Veracruz, b) maquete digital do Templo da Santa Veracruz. Imagem retirada de Fernández M. (2024).

O módulo de elasticidade utilizado para modelagem estrutural foi de 7.063 kg/cm^2 (cerca de 1 GPa), o módulo de Poisson foi de 0,17 e o peso volumétrico foi de $1,627 \text{ kg/m}^3$ (Torres C., et. al., 2024). Muitos autores, como: García N. (2007), Angelillo M. (2014), Chávez M. (2005, 2010), Peña F. et. al. (2010), Meli R., (1998), relatam e utilizam valores de resistência à tração extremamente baixos, variando de $0,2 \text{ kg/cm}^2$ a 3 kg/cm^2 (0,02 a 0,30 MPa).

6. AFUNDAMENTO DIFERENCIAL

Os recalques considerados para a modelagem do estudo de caso chegam a atingir -2,35 m de desnível em relação à cota 0,00 m, causando danos à estrutura, essas alterações são visíveis na Fig. 11 onde se pode observar tanto a edição física quanto o modelo digital com os recalques aplicados em sua base, os recalques também estão representados na Fig. 8 com um código de cores que

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

mostra sua magnitude de recalque a partir de $N1 = 0,00$ m que se localiza no lado direito da Fig. 8c, aumentando a declividade para $N7$ e $N8$ (pontos com maiores recalques que se localizam na base das torres sineiras) que apresentam $-2,35$ m e $-1,75$ m de recalques diferenciais em relação a $N1$. Por outro lado, a Fig. 11a mostra o recalque diferencial no edifício físico em uma fotografia, enquanto a Fig. 11b mostra o modelo digital com elementos finitos que está sendo submetido a recalque diferencial aplicando o recalque de $N1$ a $N8$ de maneira diferencial, diminuindo o recalque em relação à distância de cada nó, para simular o comportamento do edifício físico, as cores na Fig. 11b mostram o comportamento do edifício em termos de deformações verticais.

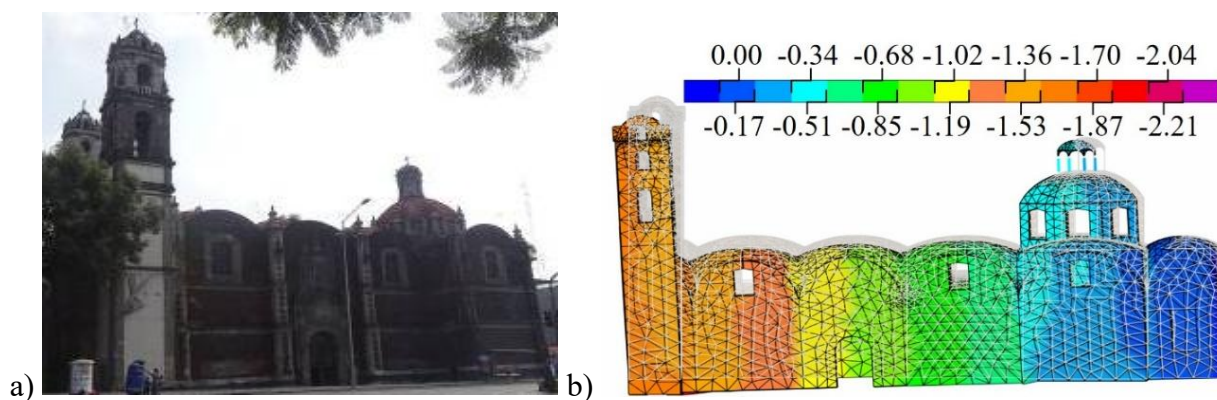


Fig. 11. Recalques diferenciais, a) edifício real, b) modelo digital do templo de Santa Veracruz feito com elementos finitos do tipo casca. Imagem retirada da Cidade do México (2024).

7. AÇÕES SÍSMICAS

Para simular os efeitos sísmicos, foram utilizados acelerômetros, obtidos em estações próximas ao local onde se encontra o estudo de caso. Os acelerogramas apresentados nas Figuras 12 e 13 correspondem a sinais sísmicos selecionados: Secretaria de Comunicações e Transportes (SCT) B1 e B2 com coordenadas 19.394694 LAT N e 94.148678 LONG W, e Centro Cultural Universitario Campo Libre de Tlatelolco (CCUT-CL) com coordenadas 19.449858 LAT N e 99.137919 LONG W. Como os acelerômetros apresentam maiores amplitudes nas direções $N90E$ e $N90W$, considerou-se que essas acelerações atuam paralelamente à direção curta do edifício, o que deveria ser mais desfavorável de acordo com a configuração geométrica vista na planta do imóvel. Portanto, na direção “X” do modelo foram aplicadas as acelerações $N90E$ e $N90W$ e na direção “Y” foram aplicadas as acelerações $N00E$ e $N00W$. Um dos objetivos deste trabalho é agilizar o processo de análise de torres sineiras que fazem parte de sistemas, por isso foram procurados os períodos com maior amplitude nos acelerômetros e os sinais foram cortados. Foram determinados 80 segundos de fase intensa para cada um destes (ver figuras 14 a 18). Da mesma forma, para encurtar ainda mais os tempos de análise, foram selecionados 12 pontos com as maiores amplitudes nos acelerogramas (perfil gráfico de acelerômetros), nos quais as maiores amplitudes (ver Fig. 19) respeitaram os passos de tempo (Δt) entre elas, ignorando os picos de aceleração com menor amplitude.

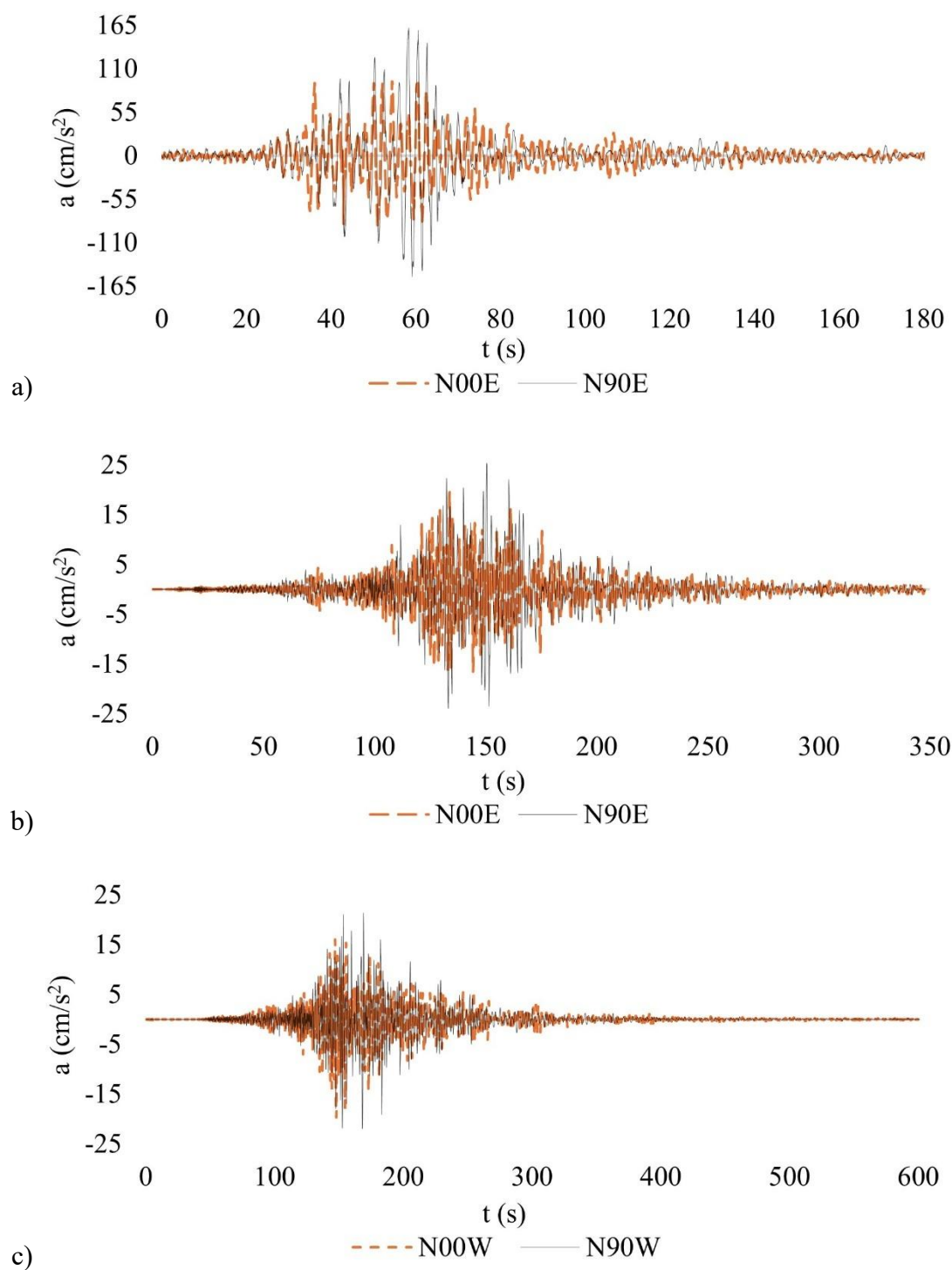


Fig. 12. Acelerogramas completos, a) terremoto de 19/09/1985 na estação SCT B- 1, b) terremoto de 09/09/2017 na estação SCT B-2, c) terremoto de 09/09/2017 na estação CCUT-CL. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s^2). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

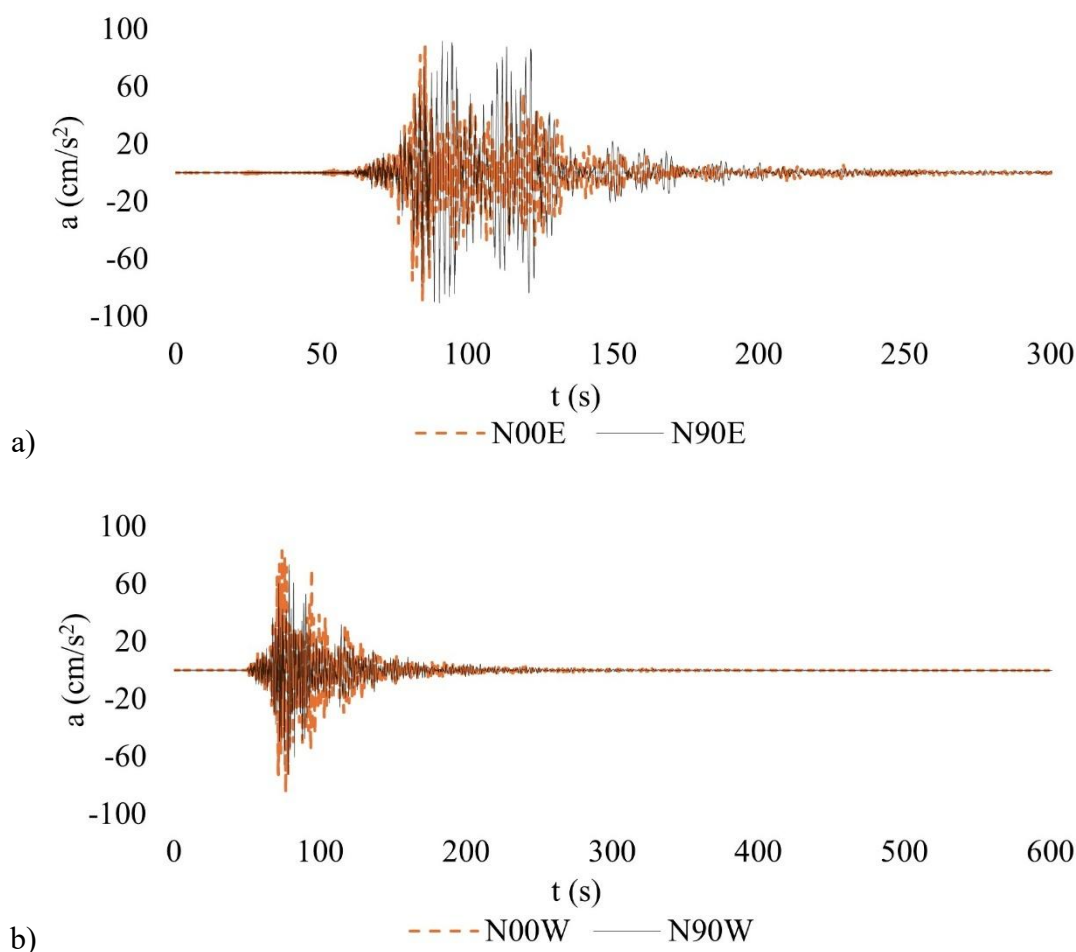


Fig. 13. Acelerogramas completos, a) terremoto de 19/09/2017 na estação SCT B- 2, b) terremoto de 19/09/2017 na estação CCUT-CL. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s^2).

Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

Cinco terremotos foram determinados para análise, o primeiro foi detectado pela estação SCT-B1 em 19/09/1985 com magnitude de 8,1, o segundo e o terceiro foram detectados pelas estações SCT-B2 e CCUT-CL em 09/09/2017 com magnitude de 8,2, o quarto e o quinto históricos de aceleração foram detectados pelas estações SCT-B2 e CCUT-CL em 19/09/2017 com magnitude de 7,1. Foi decidido implementar os quatro históricos de aceleração temporal de 2017 (SCT-B2 09, SCT-B2 19, CCUT-CL 09 e CCUT-CL 19) nas análises porque variações consideráveis nas acelerações máximas foram observadas entre as duas datas, sendo digno de nota o fato de que o terremoto de magnitude 8,2 (09/09/2017) resultou em acelerações menores do que o terremoto de magnitude 7,1 (19/09/2017), sendo estas de 25 cm/s^2 e 100 cm/s^2 , respectivamente em seus picos mais altos. As Figuras 14 a 18 mostram os limiares a partir dos quais os maiores picos de aceleração foram considerados correspondentes à seleção dos 12 passos, a fim de encurtar os tempos de análise.

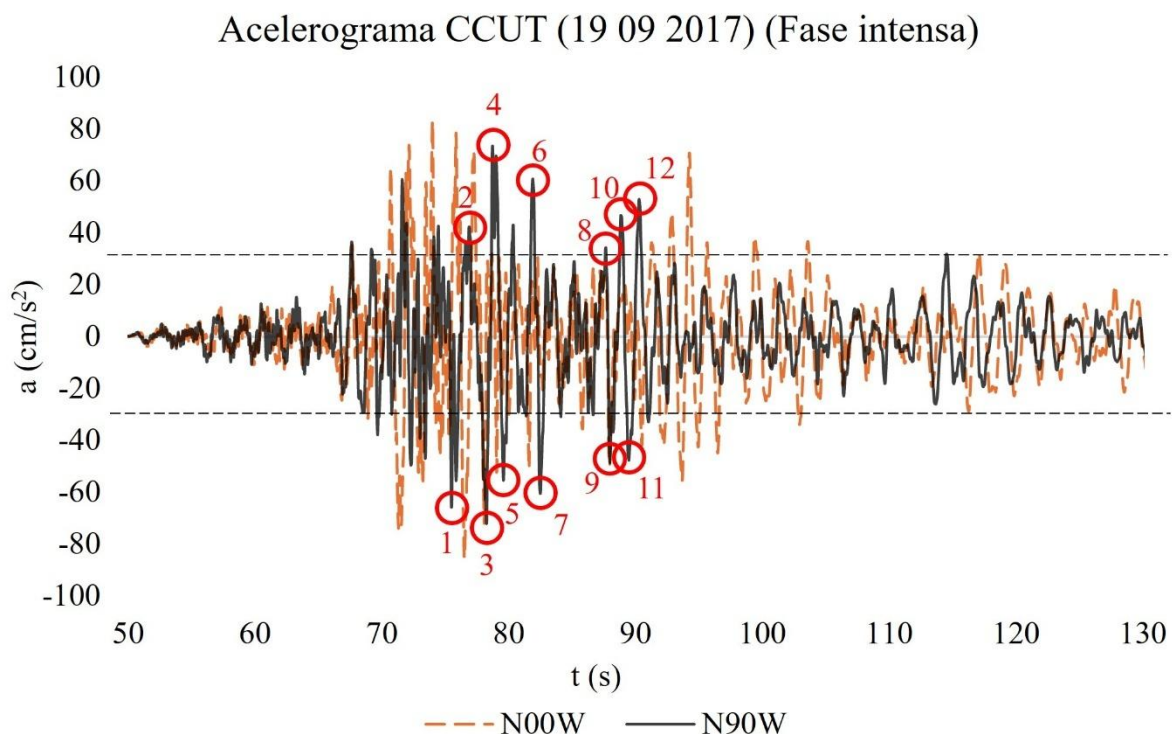


Fig. 14. Acelerograma de fase intensa com duração de 80 segundos do terremoto de 19/09/2017 na estação CCUT-CL. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s^2). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

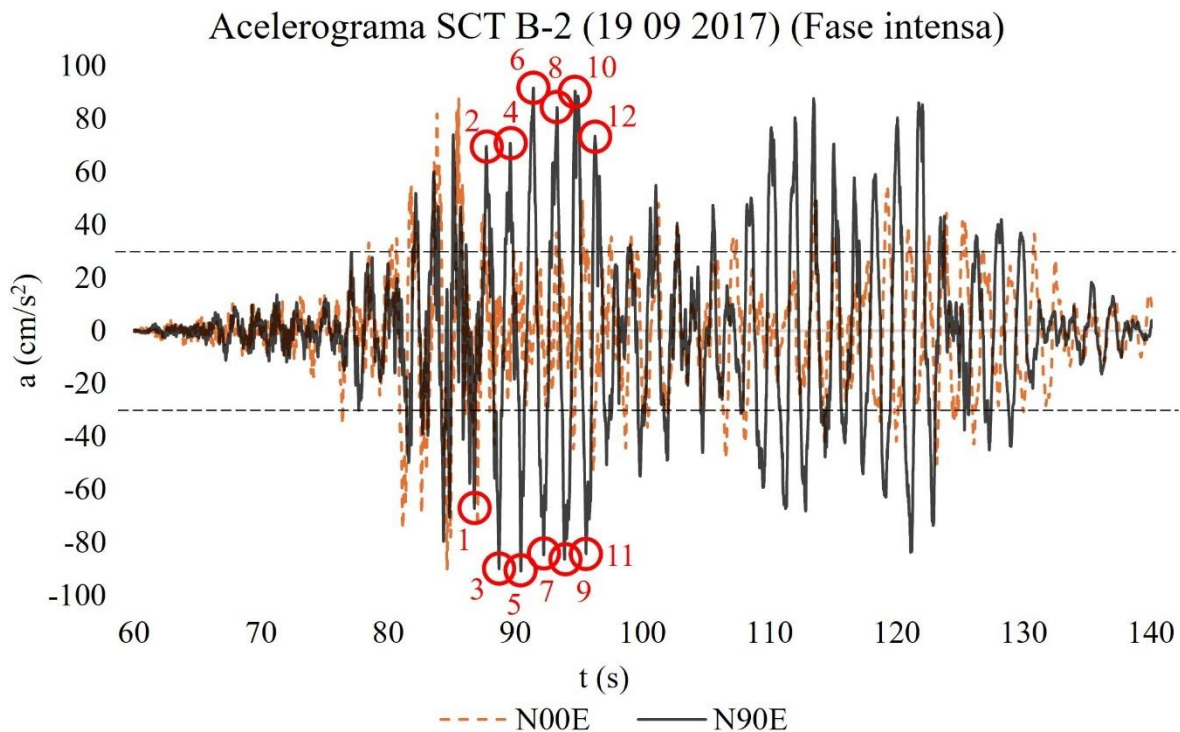


Fig. 15. Acelerograma de fase intensa com duração de 80 segundos após o terremoto de 19/09/2017 na estação SCT B-2. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s^2). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

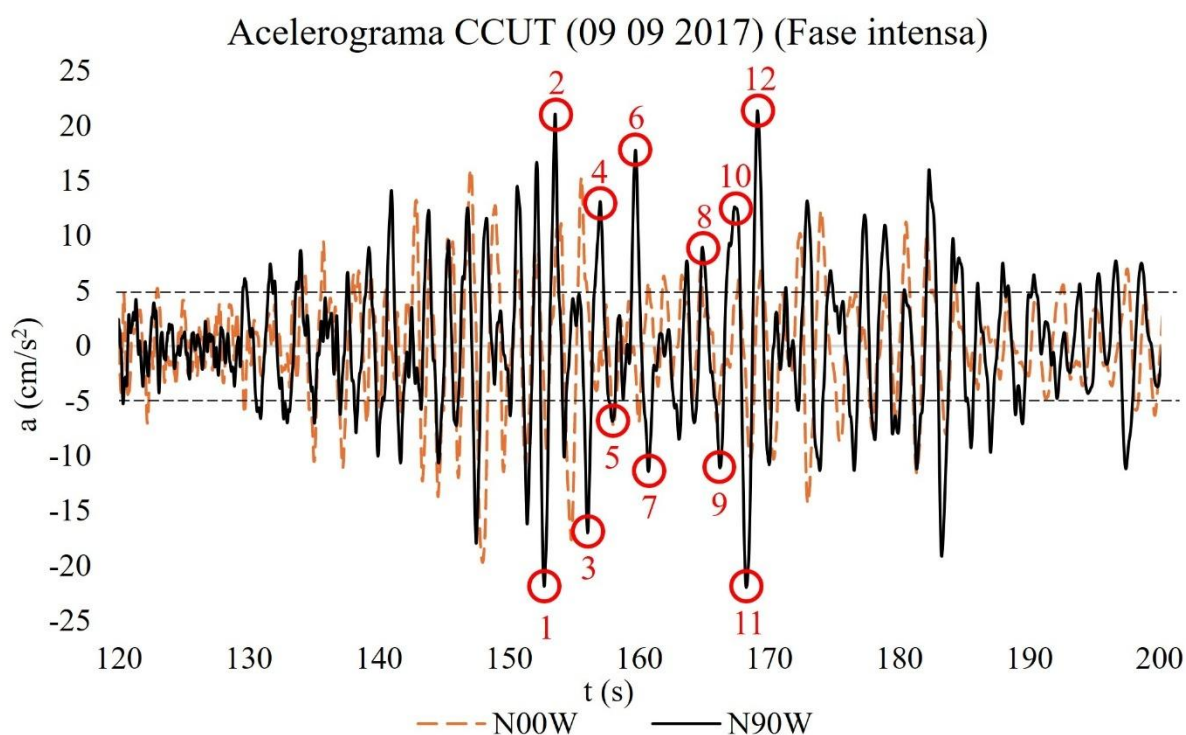


Fig. 16. Acelerograma de fase intensa com duração de 80 segundos do terremoto de 09/09/2017 na estação CCUT-CL. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s²). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

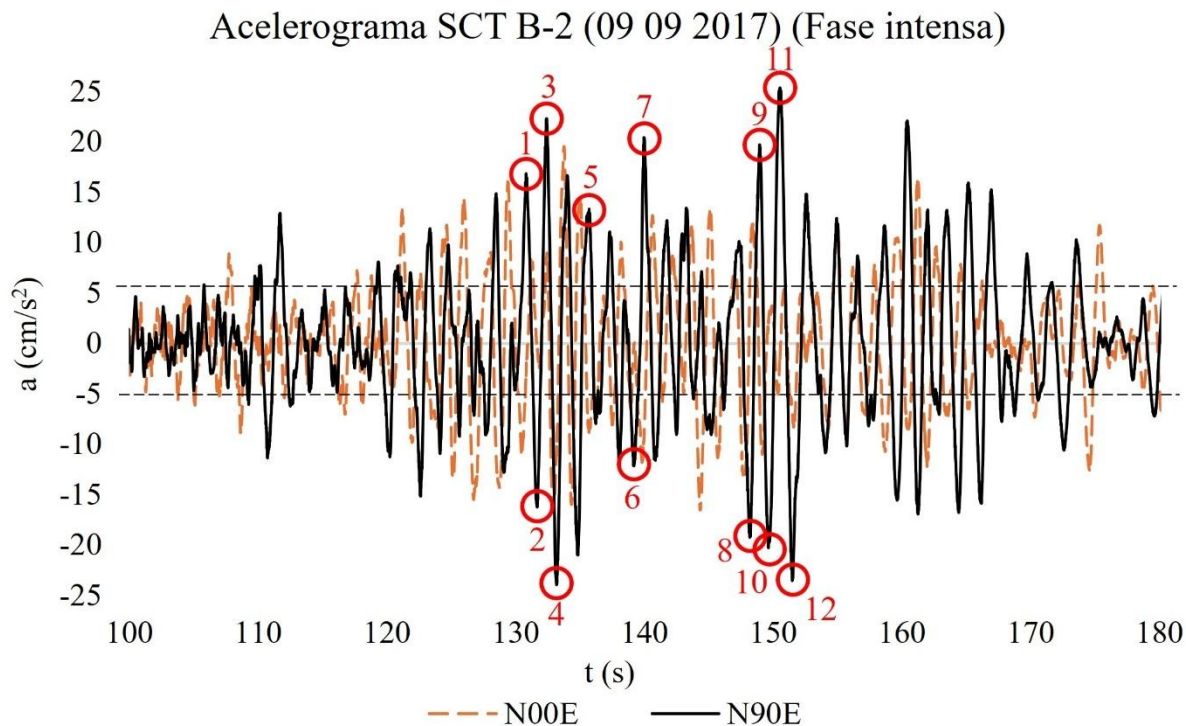


Fig. 17. Acelerograma de fase intensa com duração de 80 segundos do terremoto de 09/09/2017 na estação SCT B-2. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s²). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edifícios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada.

Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

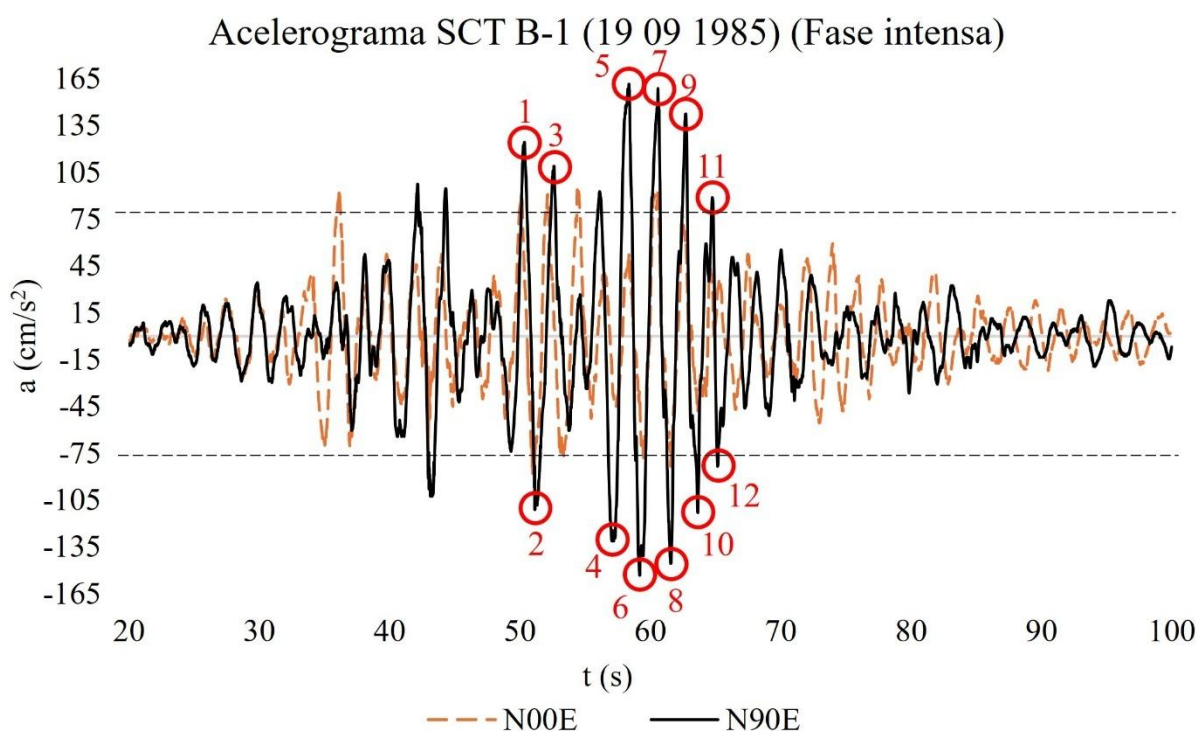


Fig. 18. Acelerograma de fase intensa com duração de 80 segundos do terremoto de 19/09/1985 no SCT B-1, onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s²). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

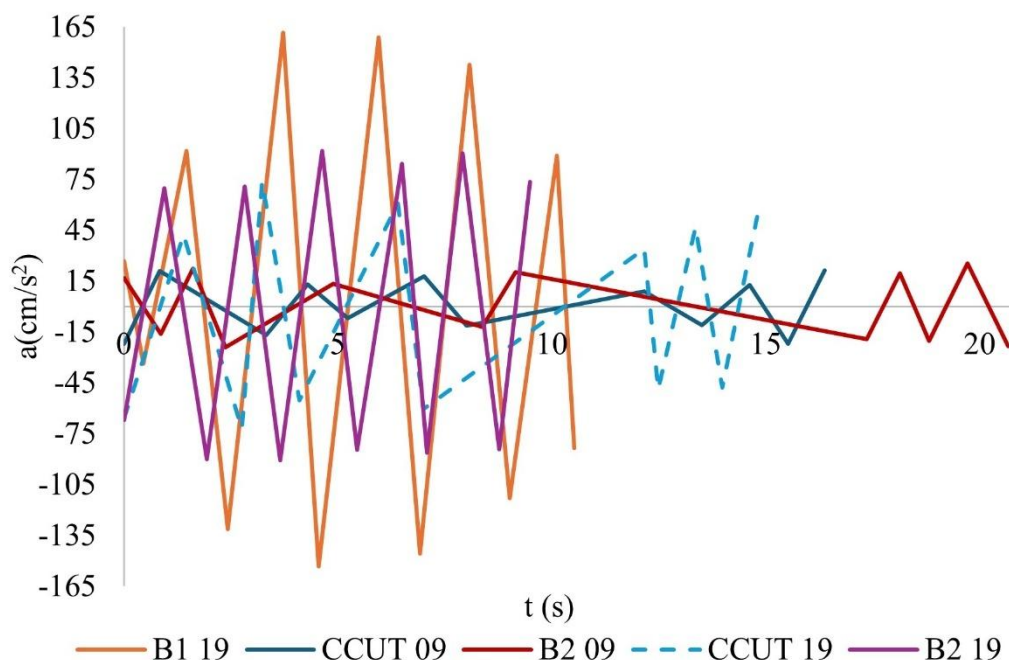


Fig. 19. Acelerogramas medidos em 12 etapas (TMTS) entre os picos de aceleração seleccionados de cada terremoto. Onde: t = tempo (s), a = acelerações (cm/s²). Acelerogramas obtidos e adaptados de RAII-UNAM (2014).

Atualmente, o acesso à propriedade está restrito devido a obras de intervenção. Também é vigiado por instituições públicas, o que impossibilita o livre acesso e/ou instrumentação temporária. Para validar as análises sísmicas usando espectros de resposta e acelerogramas ao longo do tempo, um pêndulo invertido foi configurado para comparar e validar os deslocamentos em relação a um procedimento analítico. O pêndulo invertido é considerado embutido na base, modelado com elementos finitos do tipo casca, no qual o peso próprio do eixo é desprezado, apenas sua rigidez é levada em consideração, uma altura de 5 m (h) e uma seção transversal de 50 x 50 cm, com uma carga pontual de 30 toneladas no topo e um módulo de elasticidade igual ao considerado na alvenaria irregular do estudo de caso. As acelerações mostradas nas Figuras 14 a 18 foram aplicadas ao pêndulo. O caso analítico (CA) para análise do pêndulo foi retirado de Torres C. (2023). As Figuras 20 a 29 mostram os deslocamentos do pêndulo sob a ação de acelerogramas ou terremotos de sinal completo (SC) e de fase intensa (FI). Além disso, foram propostos sinais alternativos, consistindo em 12 etapas com pontos selecionados com $\Delta t = 1$ s (12PCS) e 12 etapas com pontos selecionados com Δt medido entre esses pontos (12PCTM).

Nas Fig. 20, 22, 24, 26 e 28 são apresentados os casos SC e FI nas seções a e b respectivamente, nas quais são observados deslocamentos praticamente iguais, enquanto nas figuras 21, 23, 25, 27 e 29 são apresentados os casos 12PCS e 12PCTM nas seções a e b respectivamente, estes dois últimos casos apresentam um comportamento que difere dos dois primeiros casos SC e FI. As figuras 30 a 34 apresentam os deslocamentos do pêndulo com cada sismo analisado, no seu tempo integral, fase intensa e no intervalo de tempo dos 12 pontos selecionados, correspondentes às seções a, b e c respectivamente, além disso, na seção c os deslocamentos determinados com o caso analítico (CA) são apresentados com pontos pretos. Com base nos resultados obtidos e apresentados nas figuras 20 a 34, optou-se por realizar as análises apenas com o FI para a análise do sistema completo.

Para comparar os deslocamentos e validá-los, os espectros de resposta do local são apresentados na Figura 35, obtidos do SASID (2020), pertencente ao NTCDS-CDMX-2023. Os espectros apresentam as seguintes especificações: fator de hiperestaticidade $k_1 = 0,80$, fator de importância (grupo) A1, fator de irregularidade = 0,7. Da mesma forma, são apresentados os espectros com fatores de ductilidade $Q = 1,0$ e $Q = 1,5$. EPU = espectro uniforme de risco.

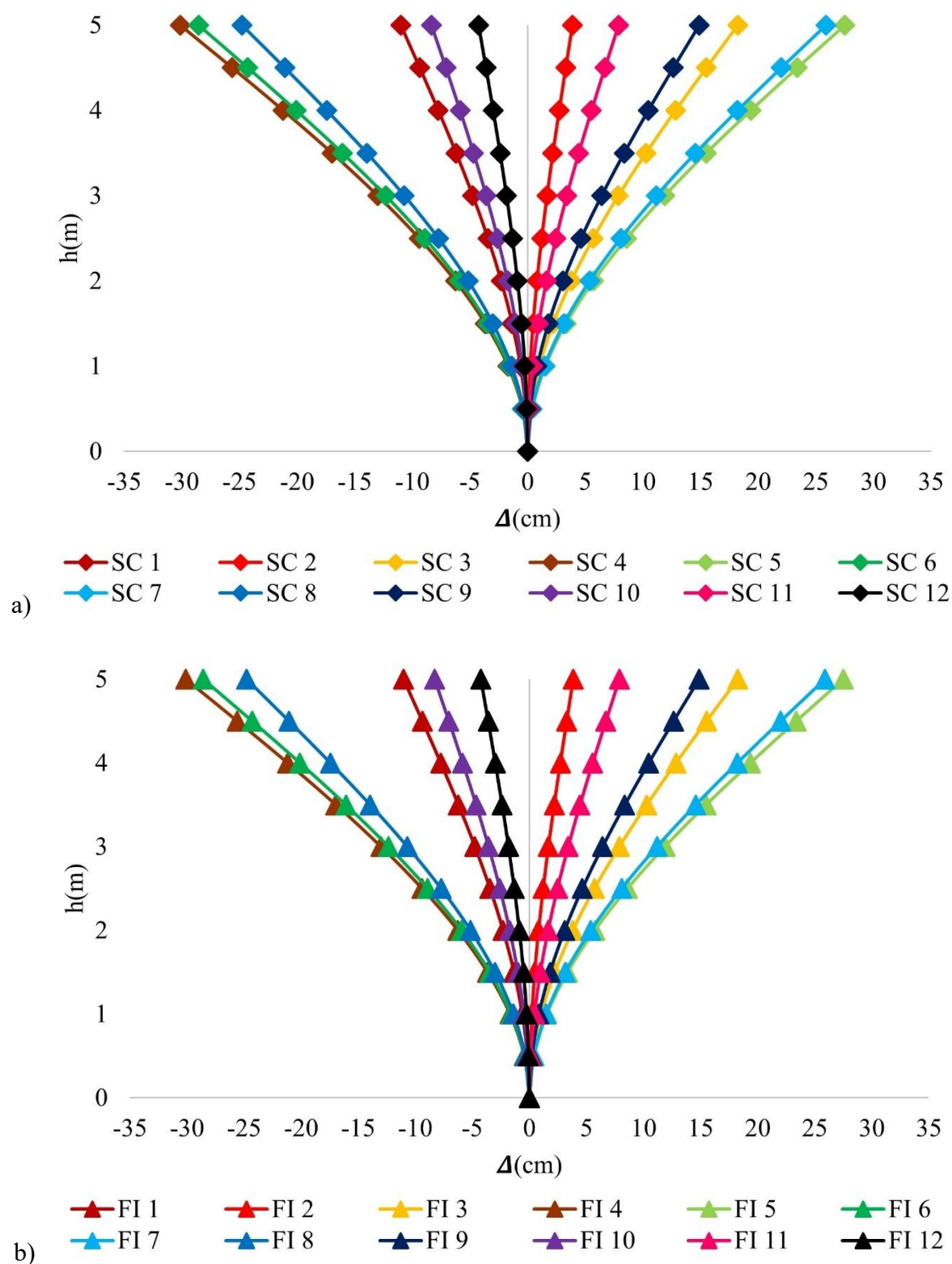


Fig. 20. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma de SCT-B1 (19/09/1985), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Deslocamentos.

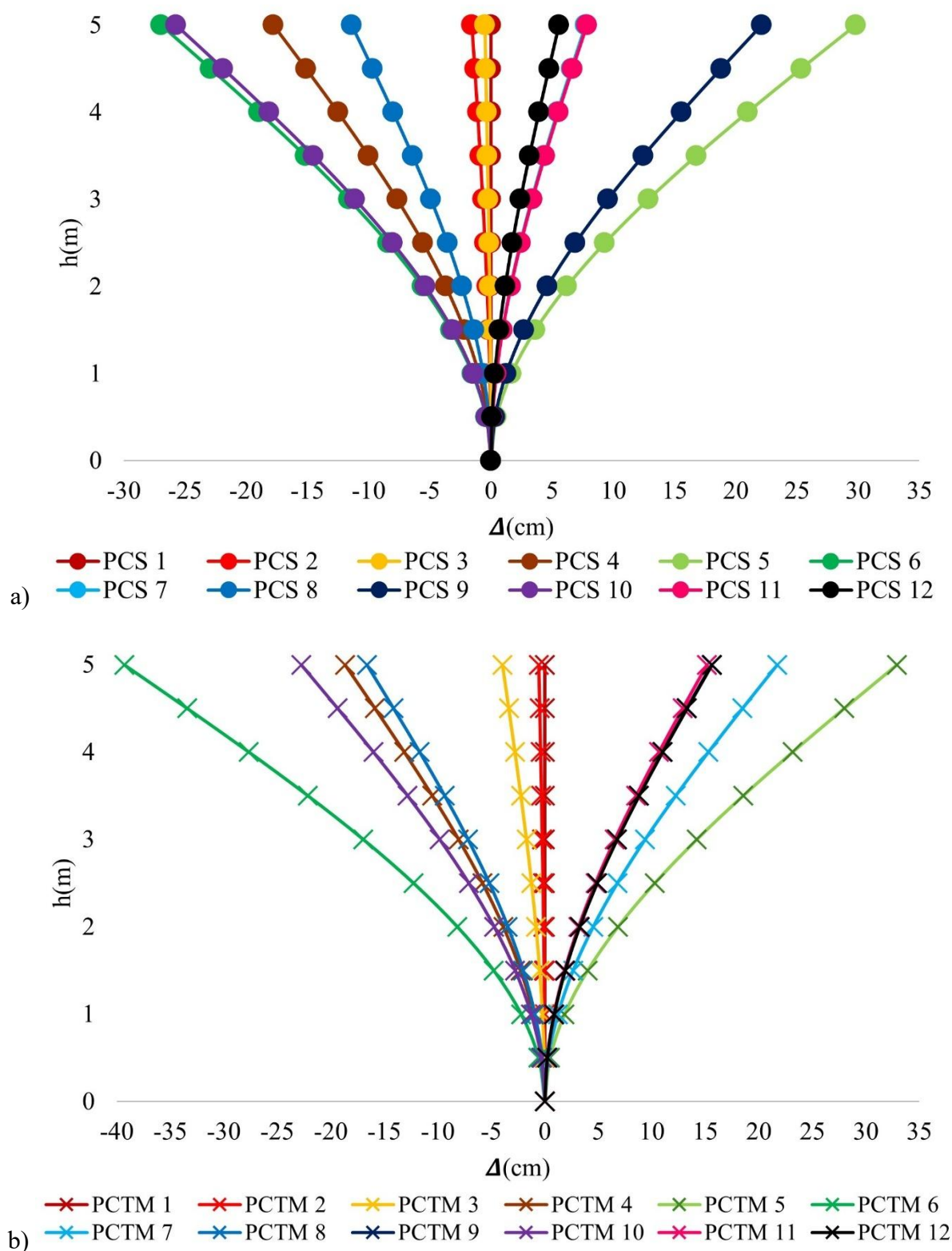


Fig. 21. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do SCT-B1 (19/09/1985), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa. Onde: PCS = Passos a Cada Segundo, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, Δ = Deslocamentos

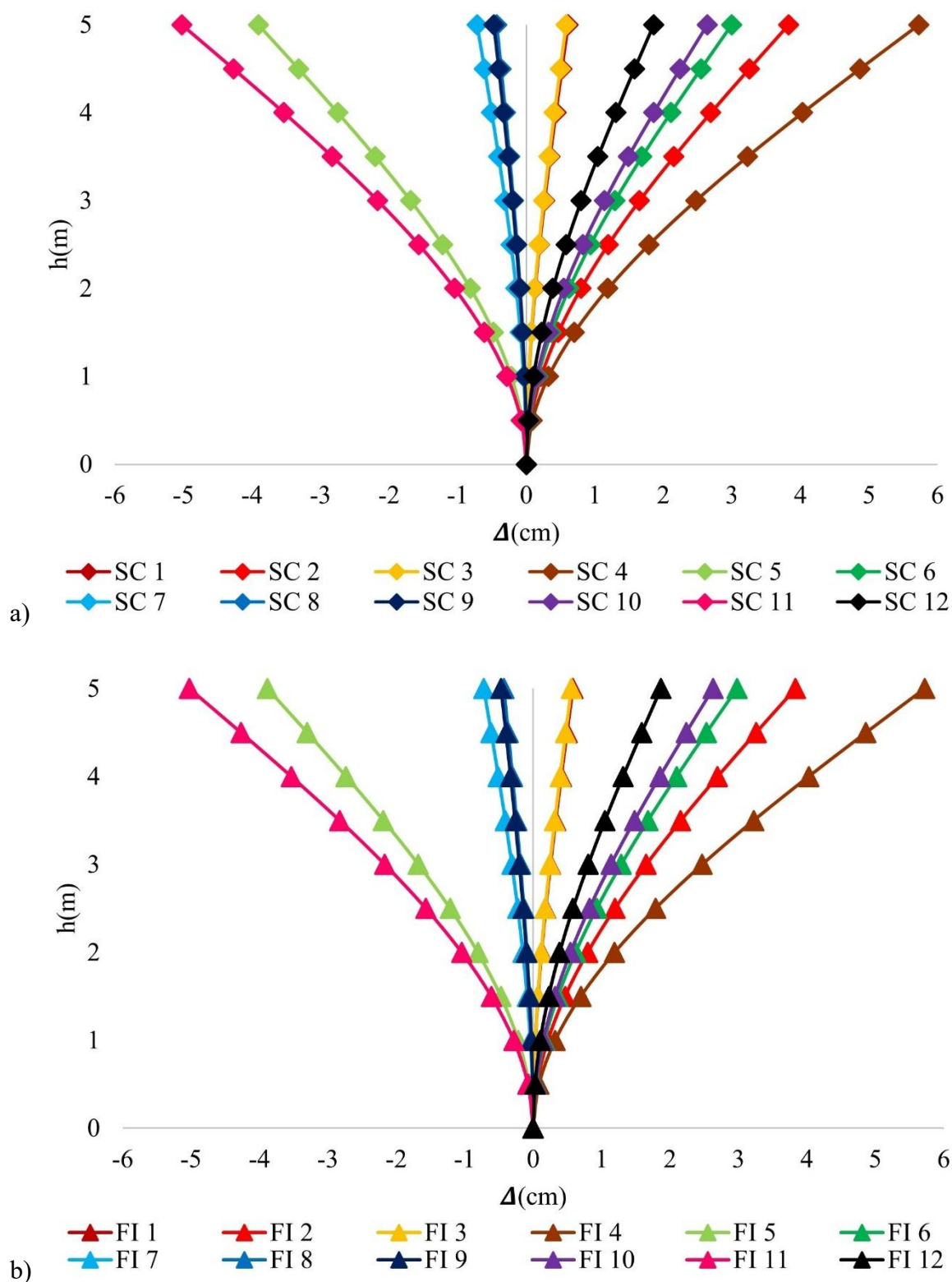


Fig. 22. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do CCUT-CL (09/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa. Onde: SC = sinal completo, FI = fase intensa, Δ = deslocamentos laterais.

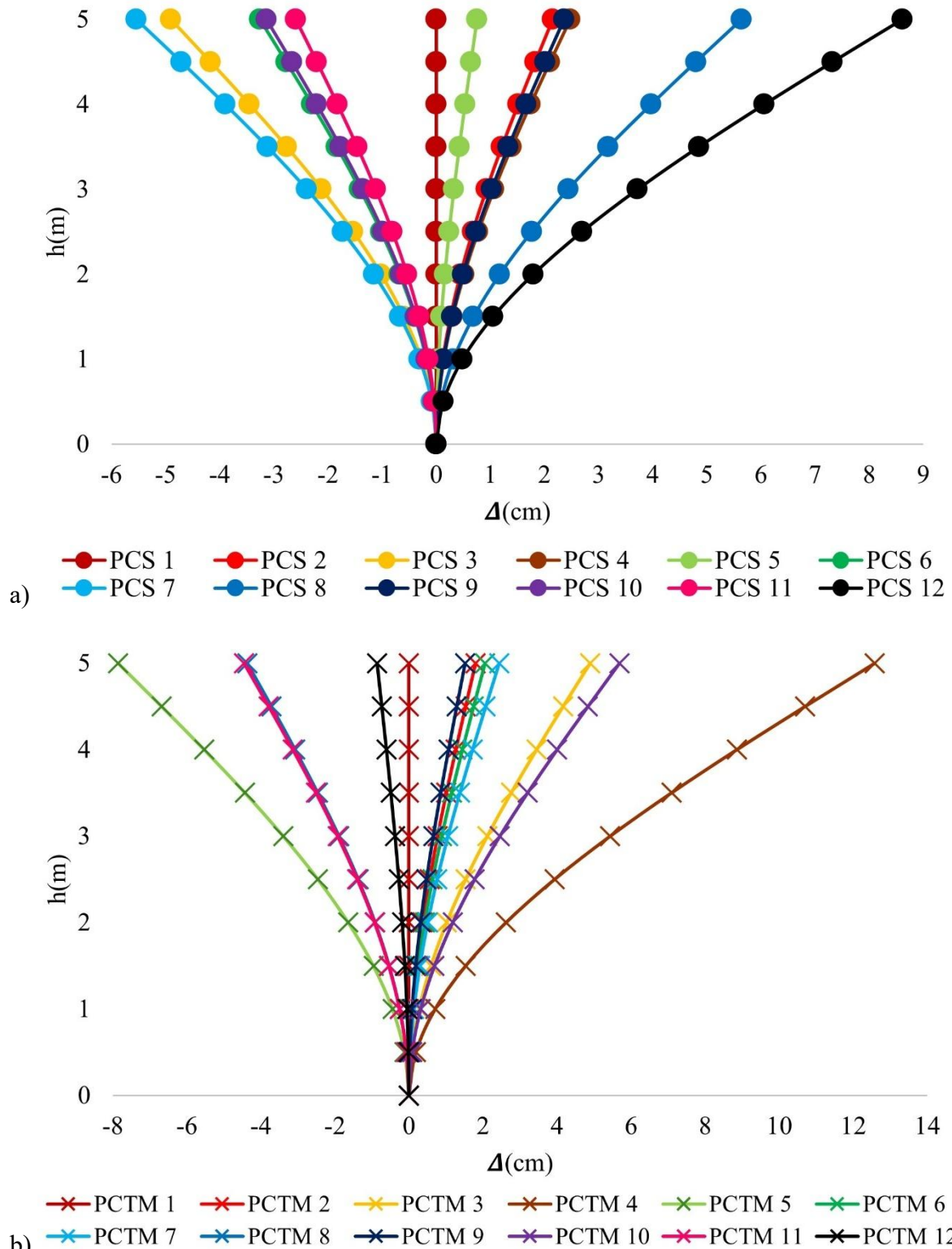
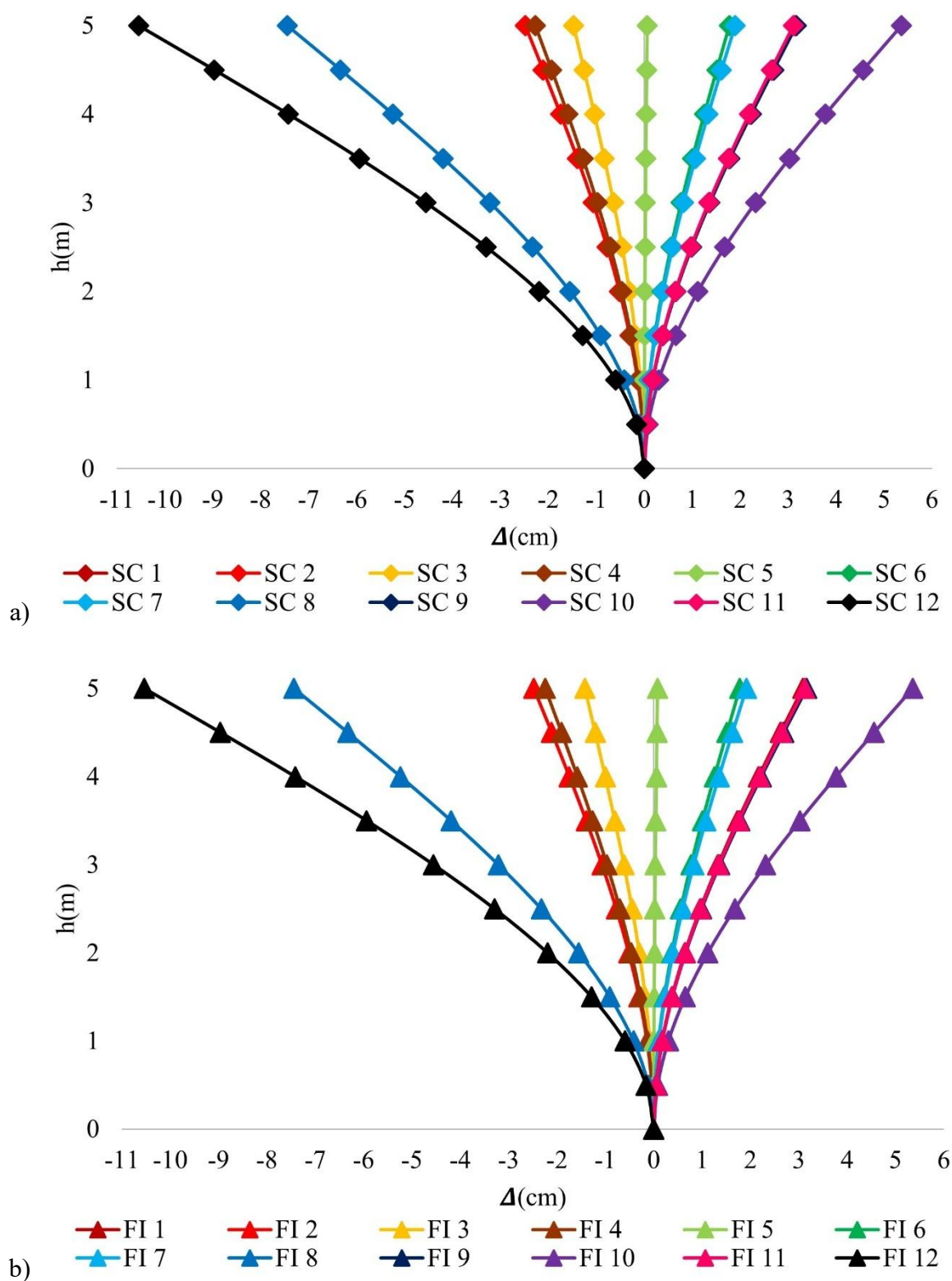


Fig. 23. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do CCUT-CL (09/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa.

Onde: PCS = Passos a Cada Segundo, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido,

Δ = Deslocamentos.



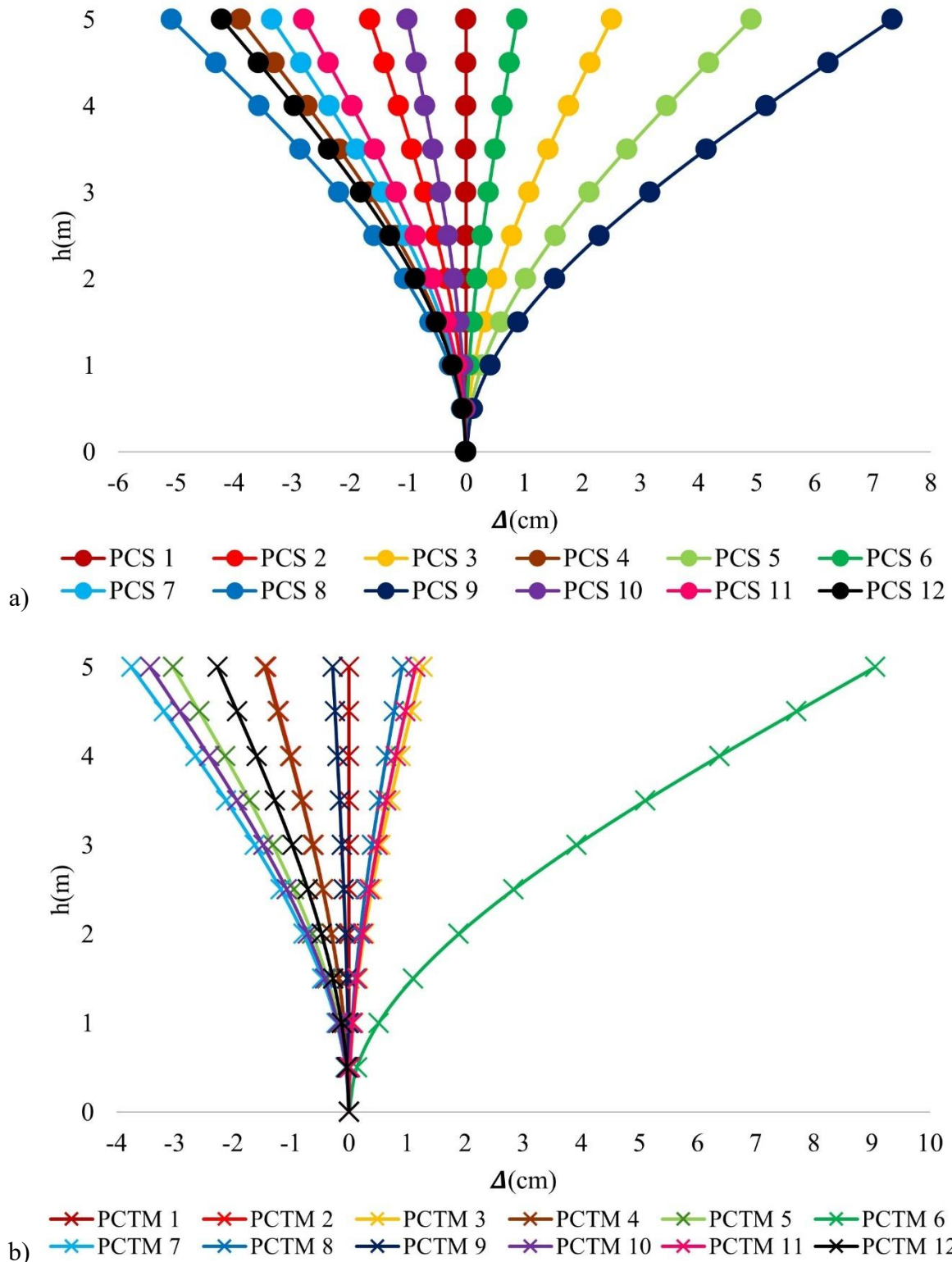


Fig. 25. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do SCT-B2 (09/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa.

Onde: PCS = Passos a Cada Segundo, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, Δ = Deslocamentos.

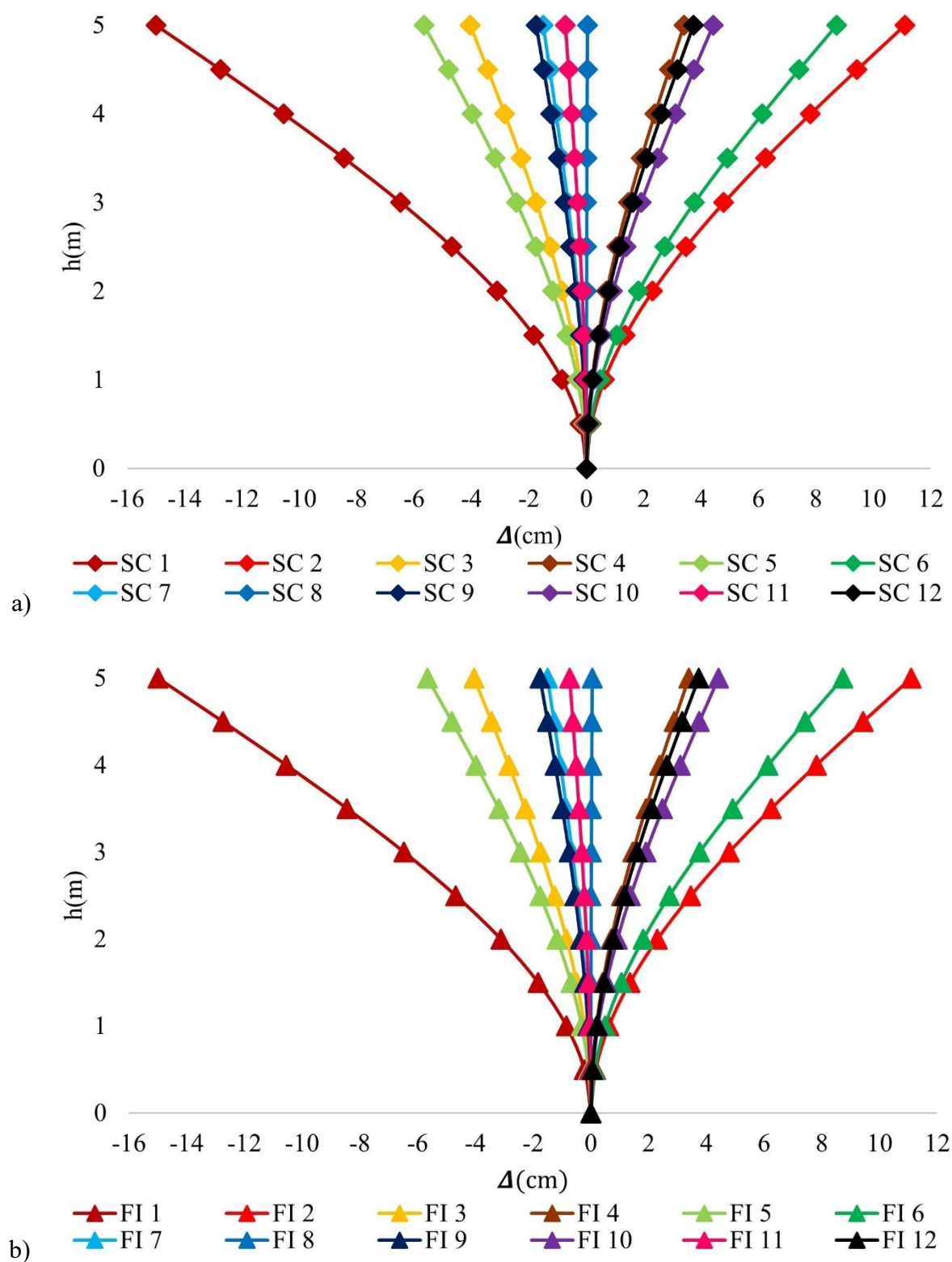


Fig. 26. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do CCUT-CL (19/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Deslocamentos.

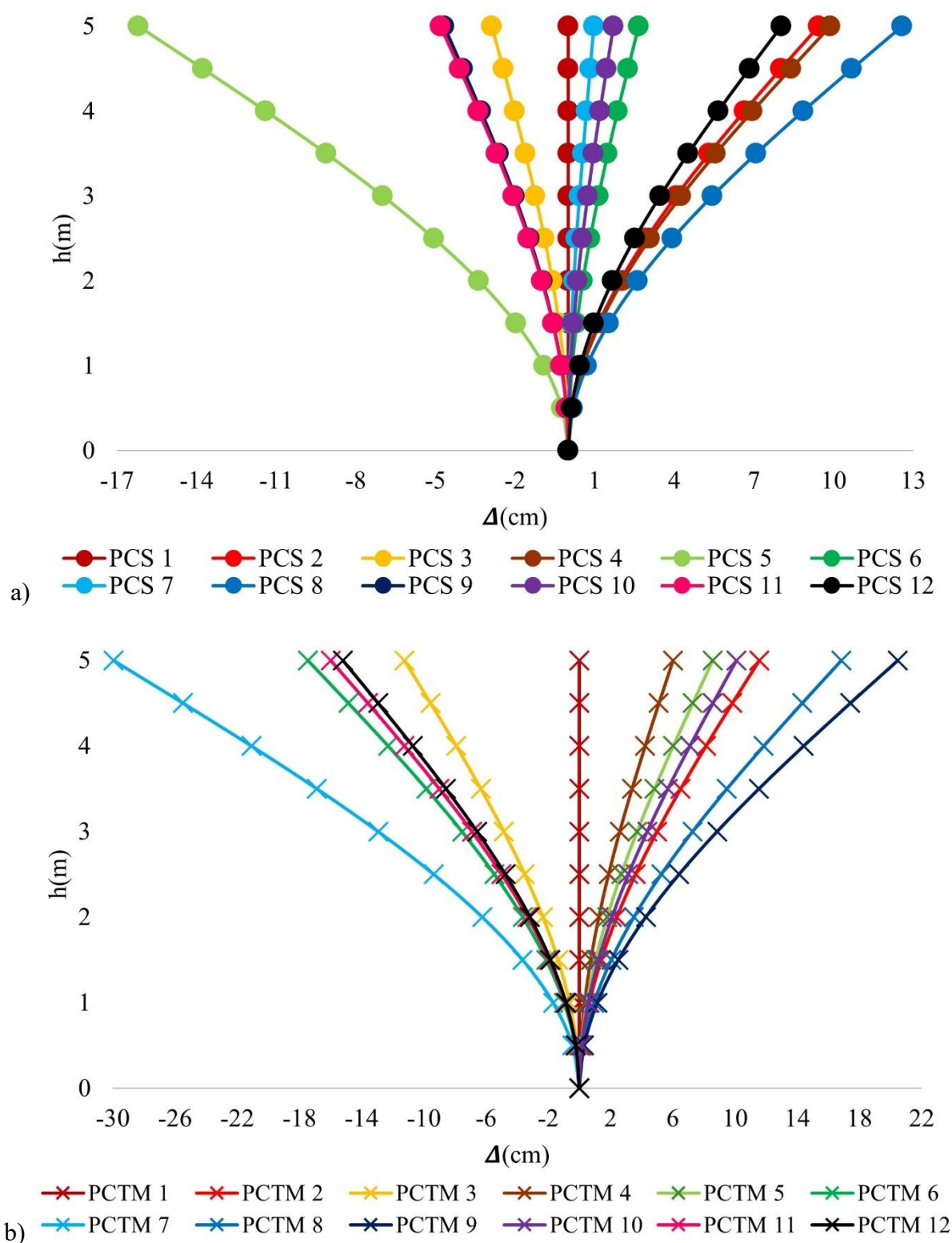


Fig. 27. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do CCUT-CL (19/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa.

Onde: PCS = Passos a Cada Segundo, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, Δ = Deslocamentos

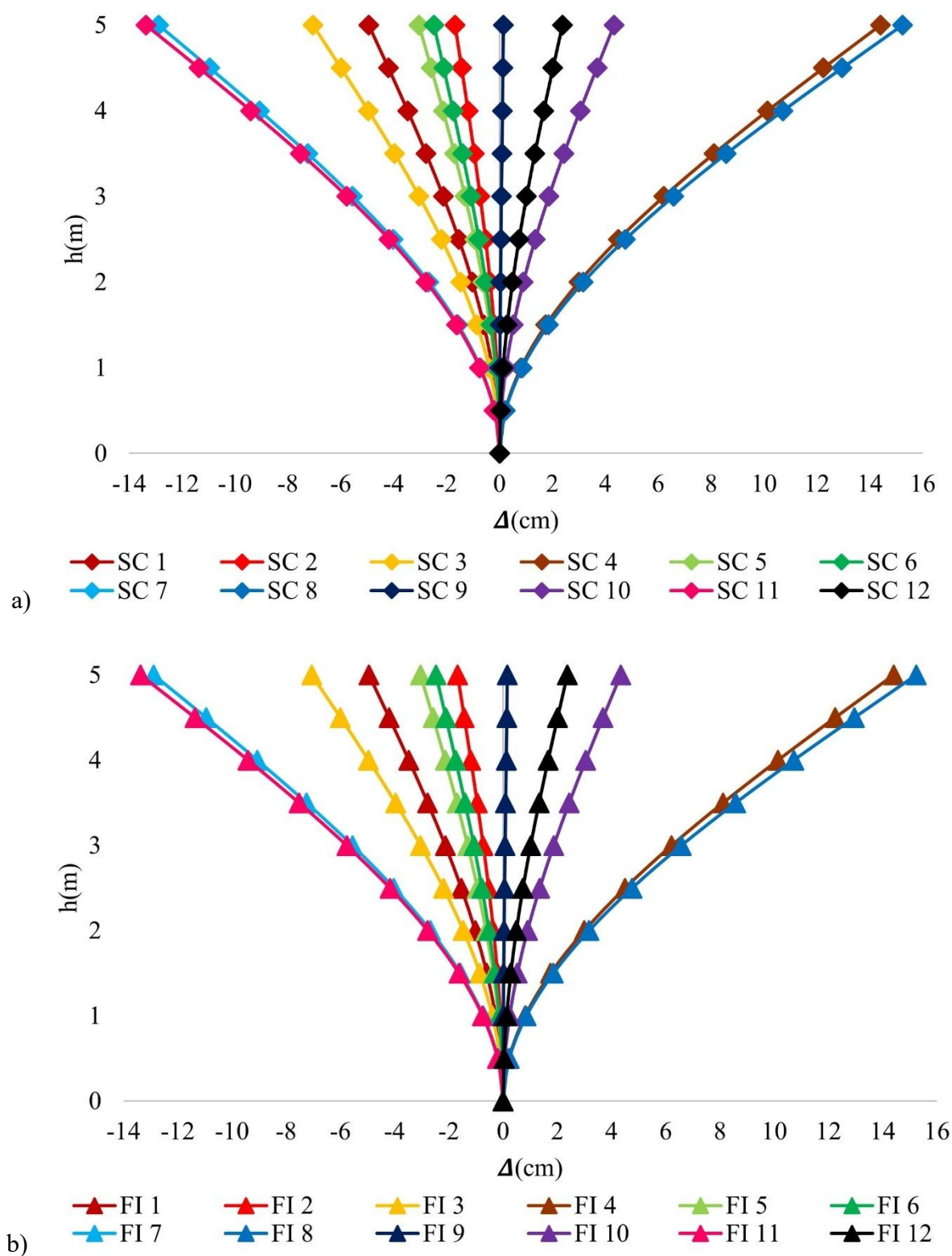


Fig. 28. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma de SCT-B2 (19/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, Δ = Deslocamentos.

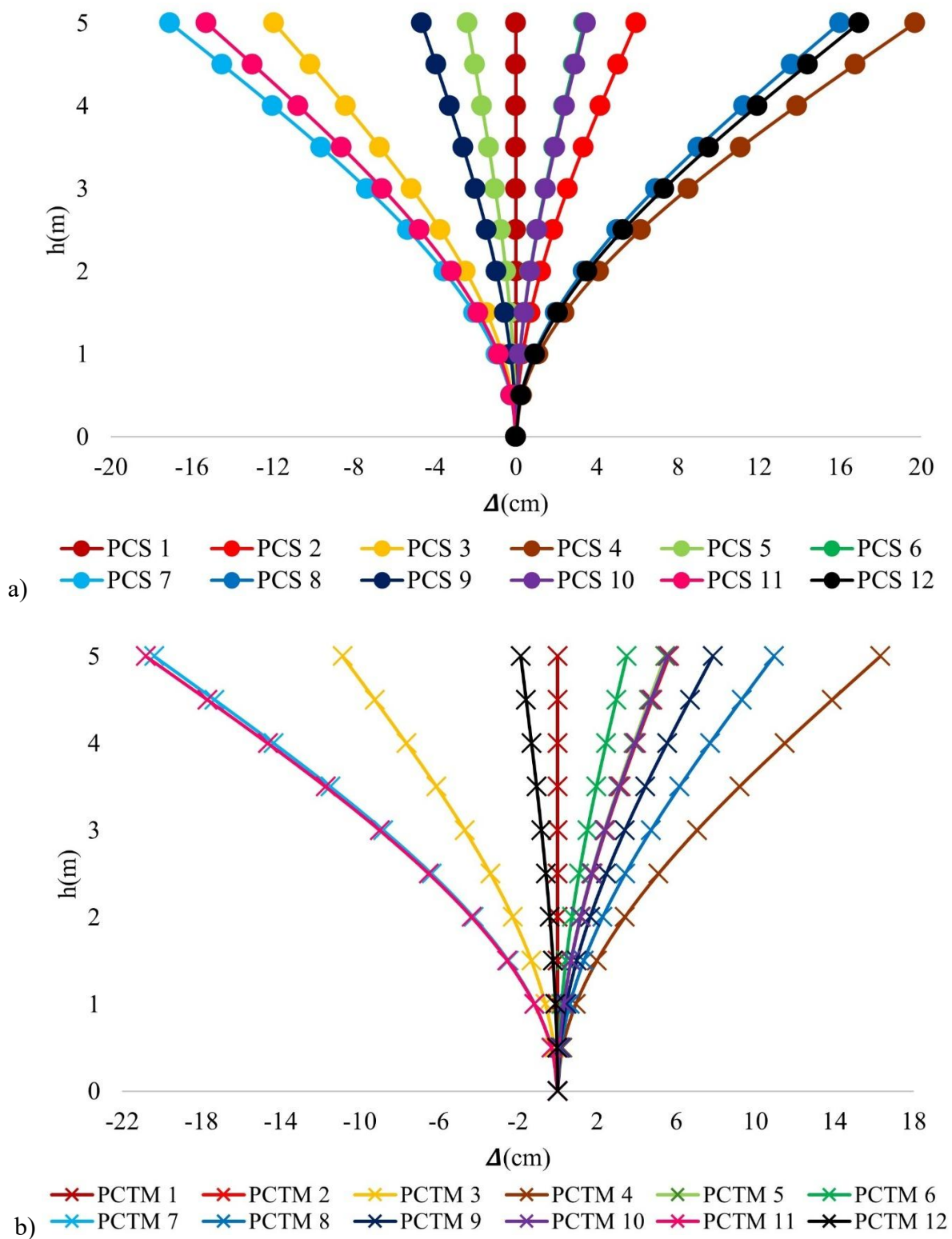


Fig. 29. Pêndulo invertido submetido a ações sísmicas com acelerograma do SCT-B2 (19/09/2017), a) deslocamentos com terremoto completo, b) deslocamentos com fase intensa.

Onde: PCS = Passos a Cada Segundo, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido,

Δ = Deslocamentos.

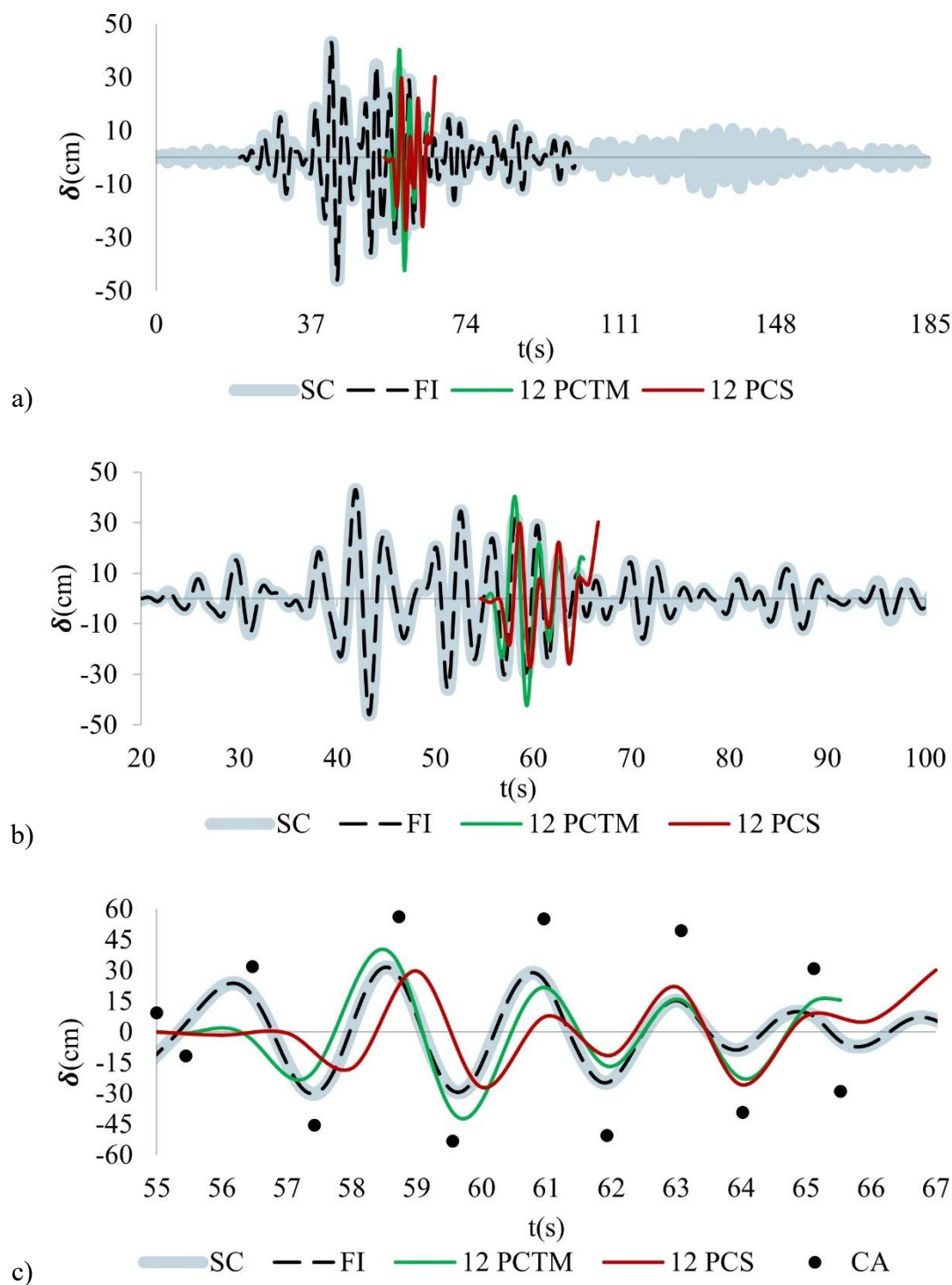


Fig. 30. Superposição de deslocamentos temporais, determinados com SCT-B1 (09/09/1985), a) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM no tempo completo do sinal, b) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM na fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM e CA no intervalo de tempo dos 12 pontos seleccionados. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, PCS = Passos a Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

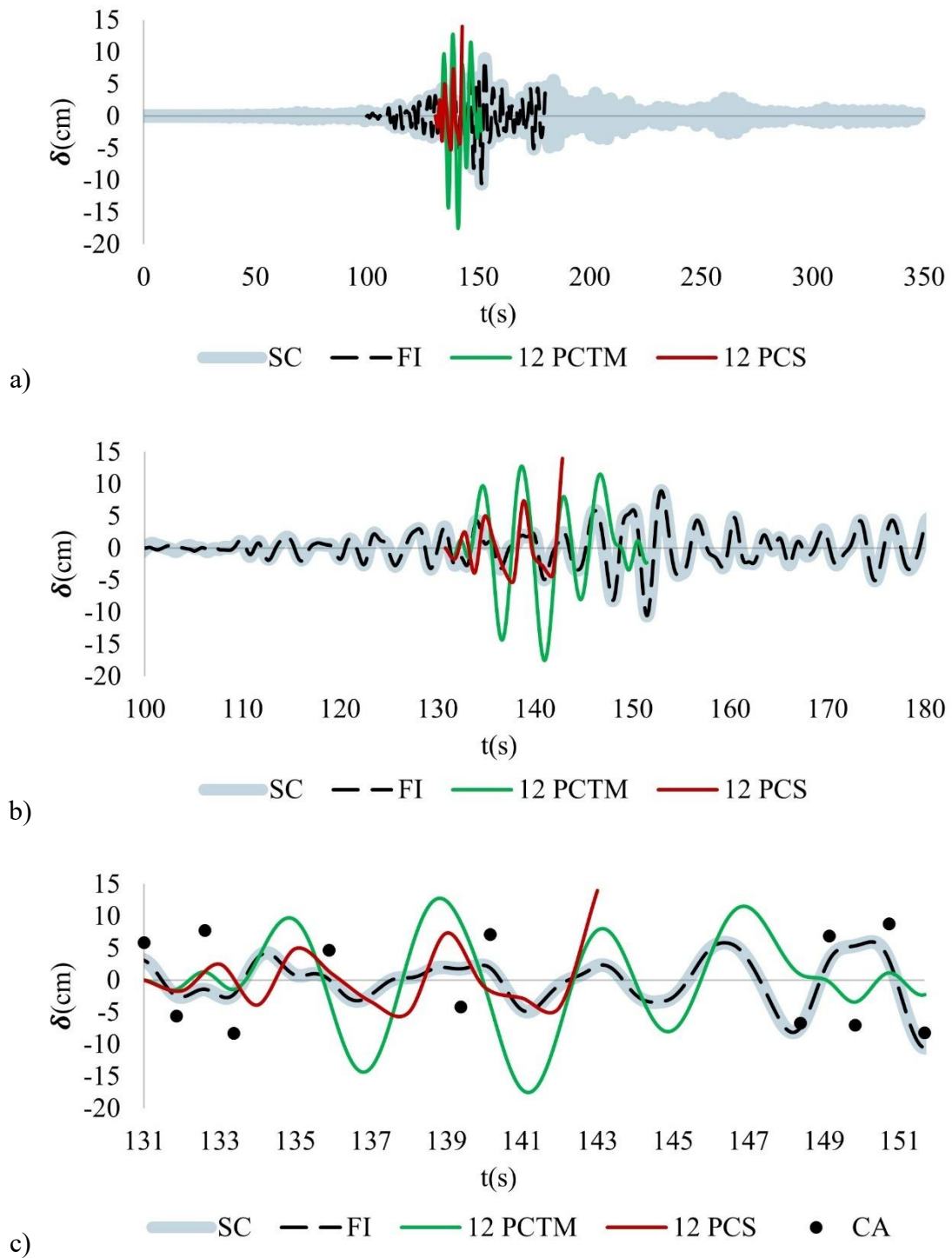


Fig. 31. Superposição de deslocamentos no tempo determinados com SCT-B2 (09/09/2017), a) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM no tempo completo, b) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM na fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM e CA no intervalo de tempo dos 12 pontos selecionados. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, PCS = Passos a Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

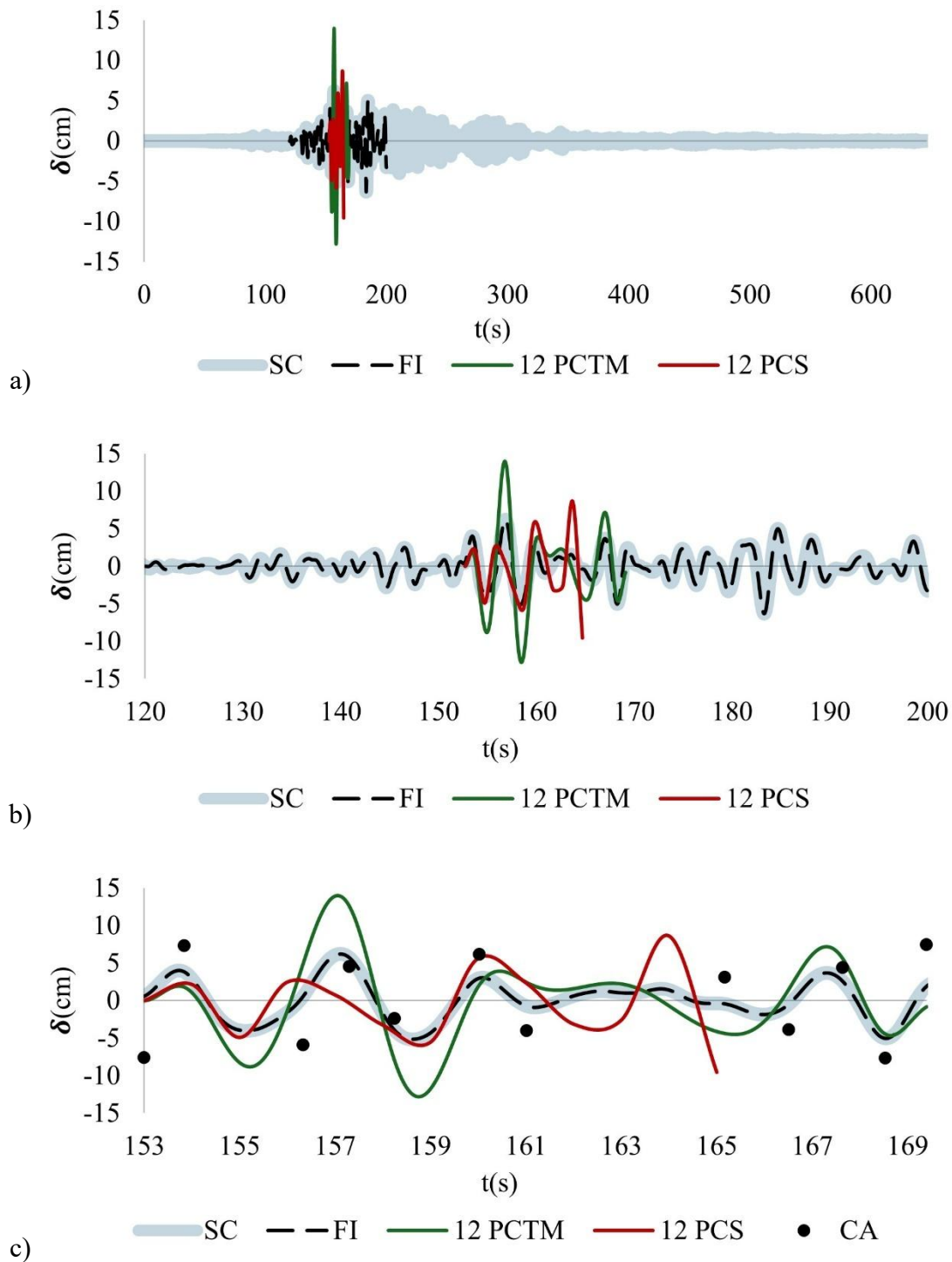


Fig. 32. Superposição de deslocamentos temporais determinados com CCUT-CL (09/09/2017), a) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM ao longo do tempo total do sinal, b) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM na fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM e CA ao longo do intervalo de tempo dos 12 pontos seleccionados. Onde: SC = sinal total, FI = fase intensa, PCTM = passos a cada tempo medido, PCS = passos a cada segundo, CA = caso analítico.

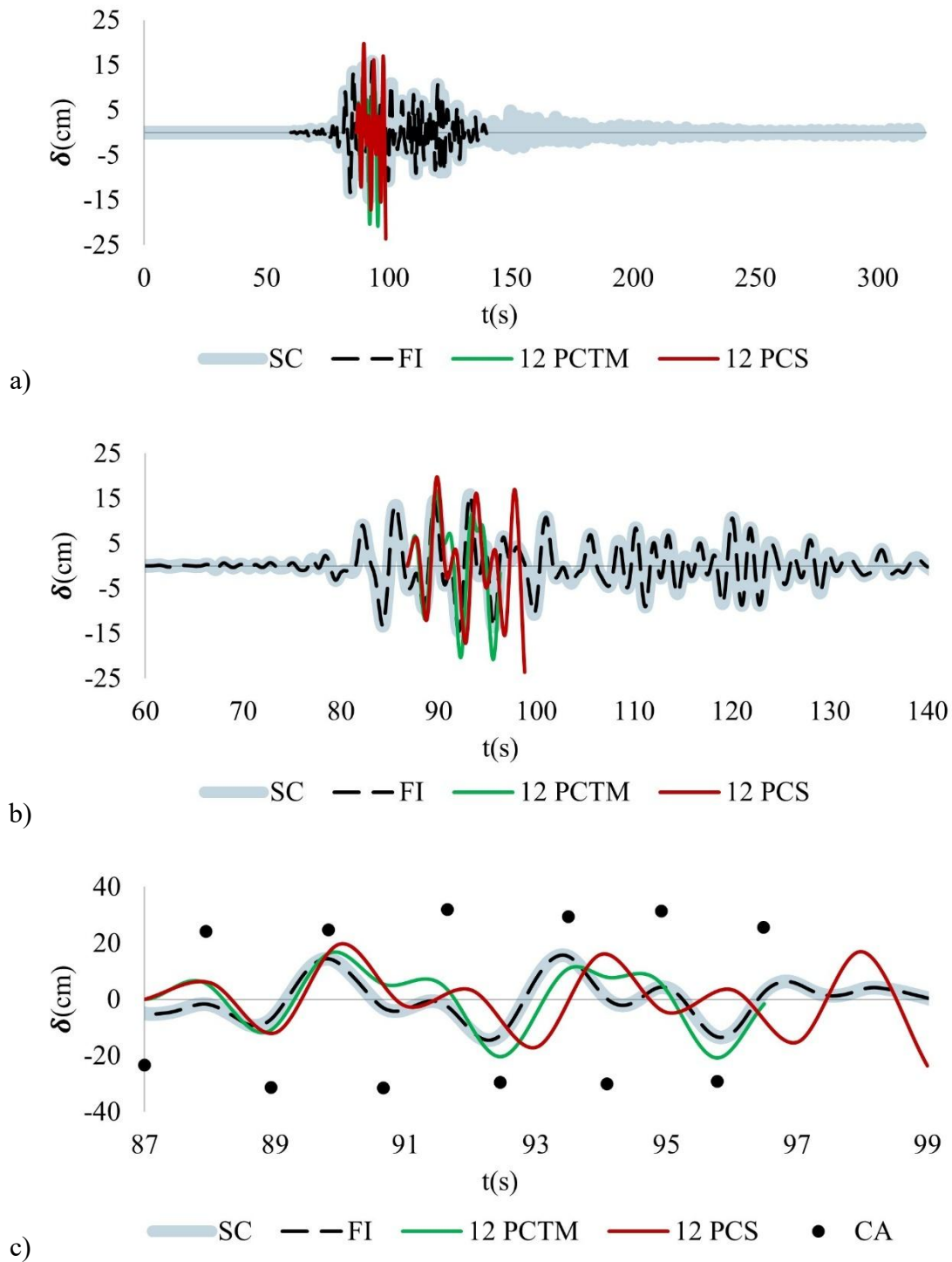


Fig. 33. Superposição de deslocamentos temporais determinados com SCT-B2 (19/09/2017), a) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM no tempo completo do sinal, b) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM na fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM e CA no intervalo de tempo dos 12 pontos seleccionados. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, PCS = Passos a Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

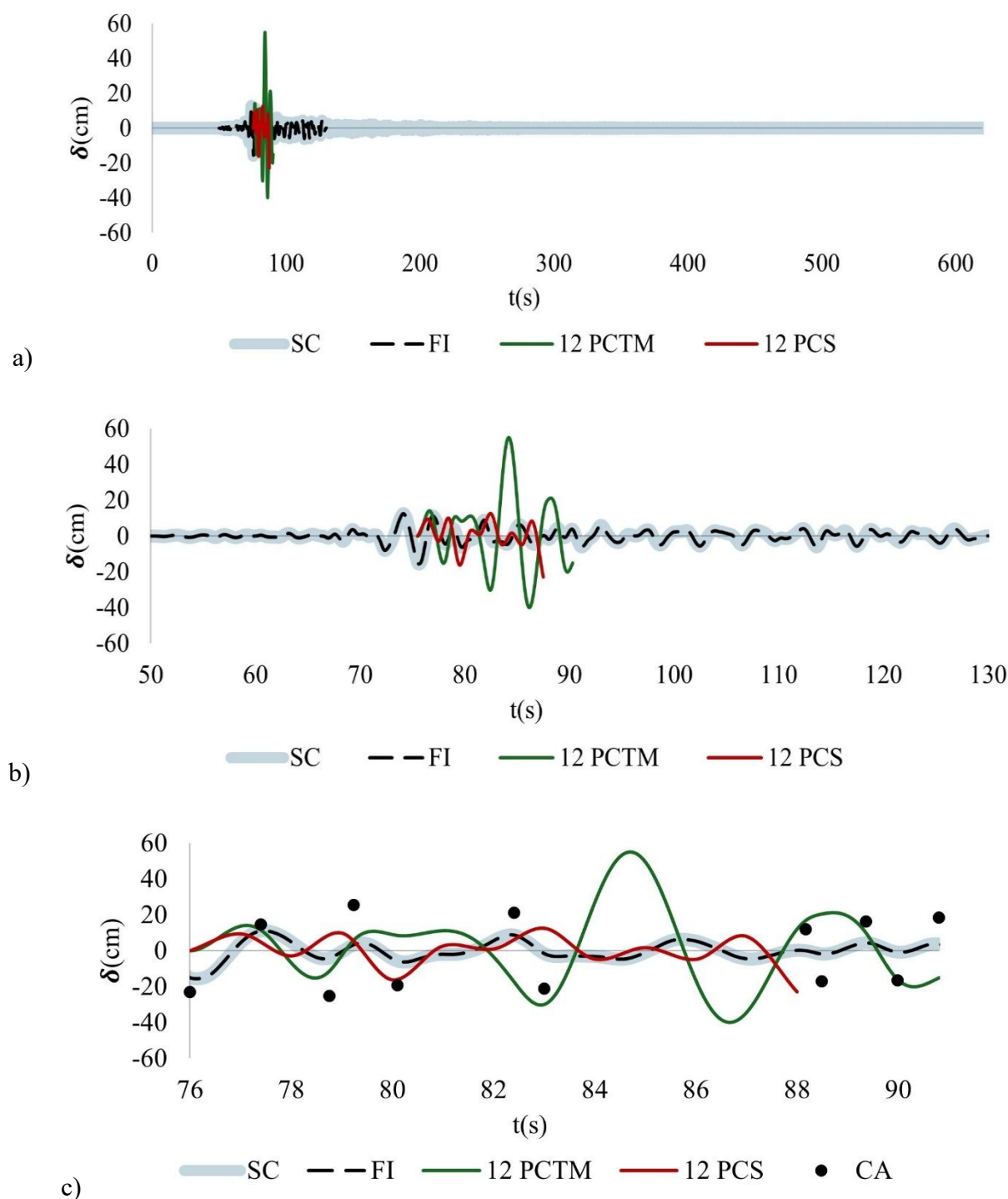


Fig. 34. Superposição de deslocamentos temporais determinados com CCUT-CL (19/09/2017), a) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM no tempo total do sinal, b) SC, FI, 12PCS e 12 PCTM na fase intensa, c) SC, FI, 12PCS, 12 PCTM e CA no intervalo de tempo dos 12 pontos seleccionados. Onde: SC = Terremoto Completo, FI = Fase Intensa, PCTM = Passos a Cada Tempo Medido, PCS = Passos a Cada Segundo, CA = Caso Analítico.

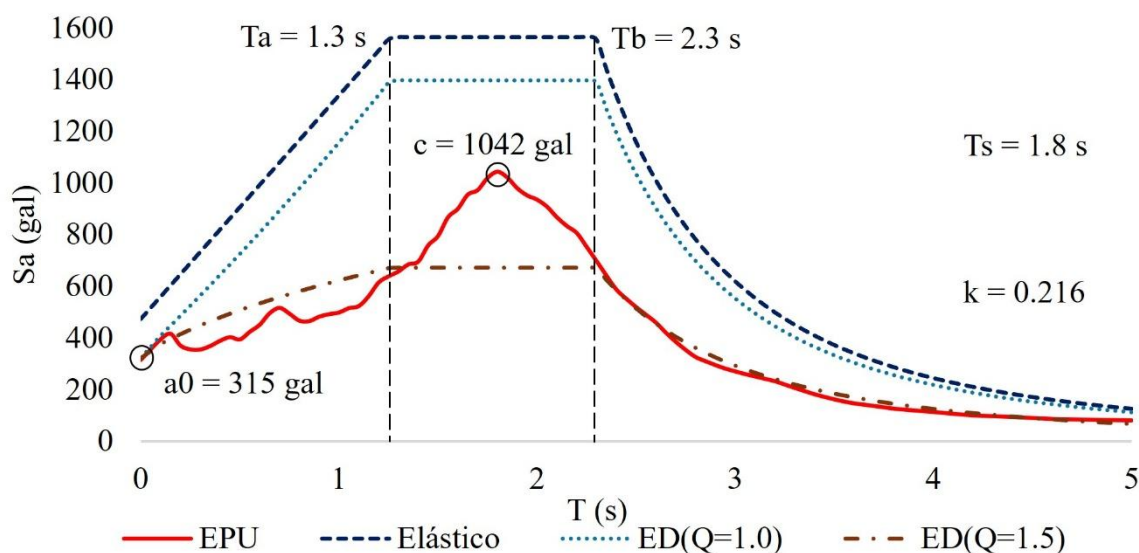


Fig. 35. Espectros de resposta no local onde o edifício está localizado. Retirado e adaptado de SASID (2020). Onde: S_a = pseudoaceleração (gal), T = Período natural da estrutura (s), T_a e T_b = Início e fim do platô, respectivamente, c = Aceleração máxima do espectro, T_s = Período do solo, k = quociente entre os deslocamentos máximos do solo e da estrutura, a_0 = valor de S_a correspondente a $T = 0$ (aceleração máxima do solo).

A Figura 36 mostra as deformações no pêndulo mencionado anteriormente, mas agora submetido a ações devido aos espectros de resposta, os diferentes casos podem ser classificados com $Q = 1,0$, $Q = 1,5$ (que foram afetados por Q após a obtenção dos resultados) e espectro de resposta elástica (ERE), cada caso foi analisado usando um software de elementos finitos (S) e pelo método analítico (A) para contrastar os deslocamentos e ângulos máximos de rotação que determinam o possível tombamento dos blocos.

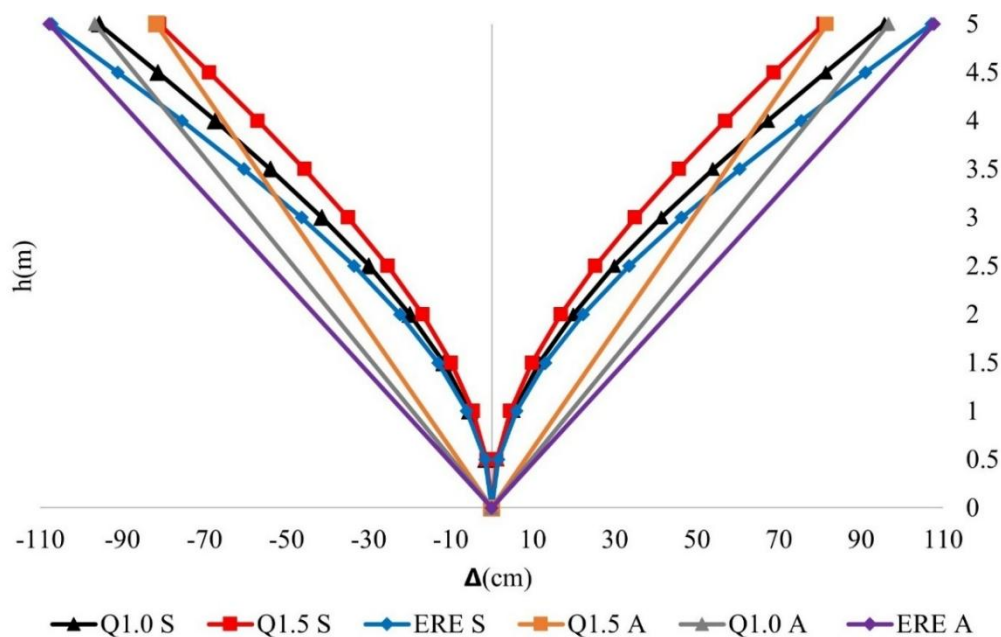


Figura 36. Pêndulo invertido submetido a espectros de resposta com ductilidade $Q1.0$, $Q1.5$ e ERE. Onde: S = Software de elementos finitos, A = Analítico, ERE = Espectro de resposta elástica.

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edifícios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada.

Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

A Figura 37 mostra as linhas de tendência de tombamento de um bloco histórico de alvenaria, onde a linha preta representa os deslocamentos gerados em um elemento do tipo pêndulo invertido com elementos finitos contínuos, sejam eles lineares ou quase não lineares, em contraste com a rotação de blocos rígidos (representados pela linha cinza), onde θ_{br} é o ângulo que ocorre no topo do elemento como bloco rígido, enquanto no caso de elementos finitos são obtidos dois ângulos diferentes, o primeiro passando pelo ponto de tendência de falha de tombamento gerando θ_f , o segundo é gerado após o referido ponto de falha, gerando $\theta < \alpha$, onde θ_L é o ângulo medido entre a tendência inicial do bloco e a tendência de tombamento a partir do ponto de falha e θ_{er} é o ângulo de erro medido entre a linha de tendência de tombamento como bloco rígido e a tendência da linha de tombamento do bloco de falha.

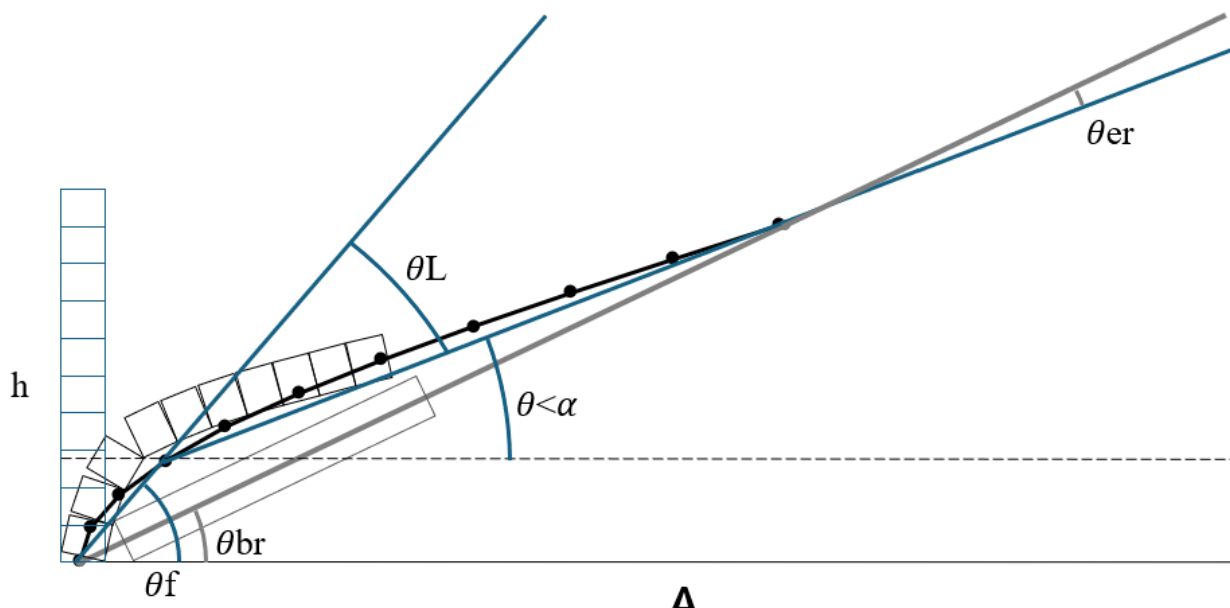


Figura 37. Elemento de alvenaria submetido a deslocamentos laterais com simulação de tendência de tombamento sem resistência à tração. Onde: θ_{br} = ângulo de torção como bloco rígido, θ_f = ângulo entre a linha horizontal e a tendência de torção da base do elemento até o ponto de tendência de falha devido ao tombamento, θ_{er} = ângulo de erro medido entre a linha de tendência de tombamento como bloco rígido e a tendência da linha de tombamento do bloco de falha, θ_L = ângulo medido entre a tendência do bloco inicial e a tendência de tombamento a partir do ponto de falha, $\theta < \alpha$ = ângulo de torção menor que o ângulo máximo a partir do qual ocorre o tombamento, h = altura do elemento, Δ = deslocamento lateral.

8. DESLOCAMENTOS LATERAIS NAS TORRES SINEIRAS DO SISTEMA COMPLETO SOB AÇÕES COMBINADAS

Para as combinações de ações sísmicas e recalques, foram propostos quatro 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 os deslocamentos, nós consecutivos foram selecionados na parte lateral ao longo da altura de cada uma das torres (TI = Torre Esquerda, TD = Torre Direita). Os deslocamentos foram analisados e representados graficamente nas direções X e Y (ver Figuras 38 a 45). Da mesma forma, na análise com espectros de resposta, foram considerados os fatores de ductilidade $Q = 1,0$ e $Q = 1,5$ com seus deslocamentos máximos e mínimos. Por outro lado, os acelerogramas foram rotulados como: SCT-B1, SCT-B2 09, SCT-B2 19, CCUT-CL 09, CCUT-CL 19 (ver figuras 14 a 18).

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

Os deslocamentos mostrados nas figuras 38 a 45 podem ser difíceis de observar e determinar as variações entre eles, por isso, na tabela 1 são apresentados os deslocamentos máximos de cada combinação no nó superior (altura 29,2m) de cada torre, com isso os resultados podem ser melhor apreciados e os deslocamentos críticos para cada caso podem ser visualizados.

Tabela 1. Deslocamentos máximos no topo das torres sineiras.

Torres	Aceleração /Espectro	Endereço X				Direção 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
GRAVATA	Q = 1,0 máx,	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 máx,	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 máx,	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 máx,	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

Nas Figuras 46 a 49 fica evidente que os deslocamentos máximos em seus valores absolutos não partem da linha de base zero, pois alguns destes iniciam com deformações anteriores devido ao recalque da base.

Nas figuras 38 a 41 pode-se observar que algumas linhas de tendência de deslocamentos com ações sísmicas espectrais tendem a permanecer verticais no topo, isso porque em alguns momentos do terremoto a estrutura se desloca em sentido contrário ao recalque e tenta verticalizar as torres sineiras quando os deslocamentos são positivos (nos gráficos são apresentados como máximos).

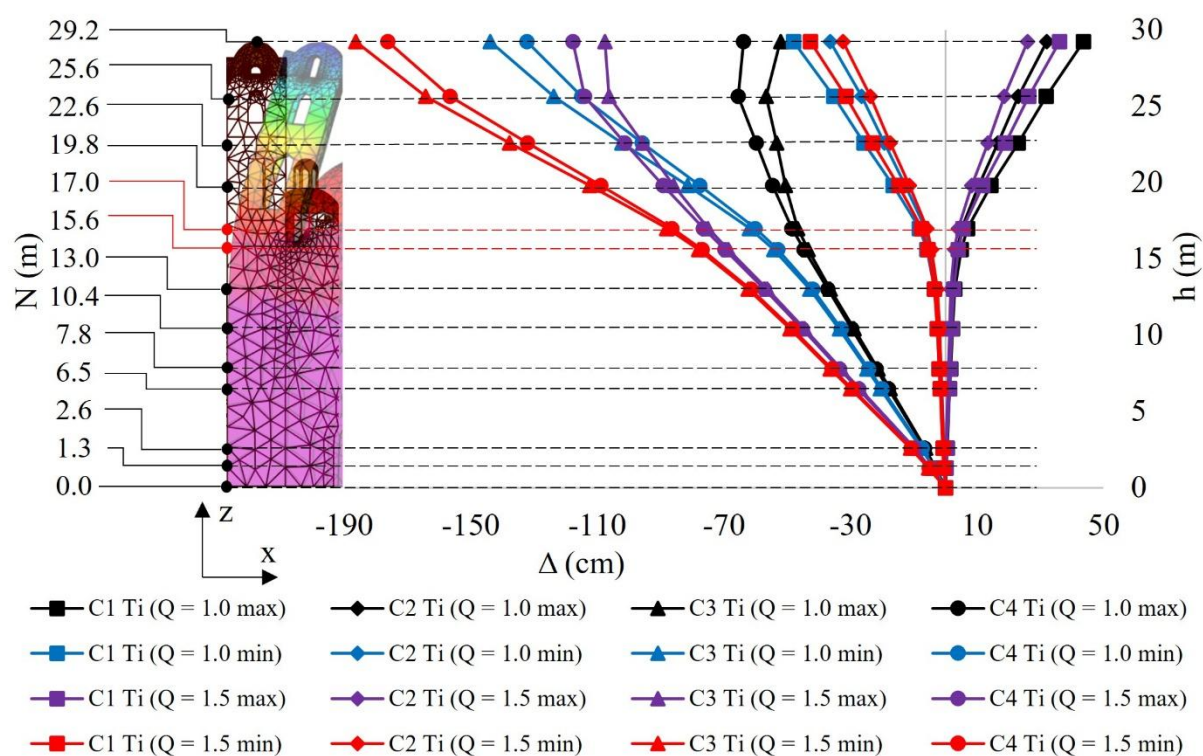


Fig. 38. Deslocamentos na direção X na torre esquerda (Ti).

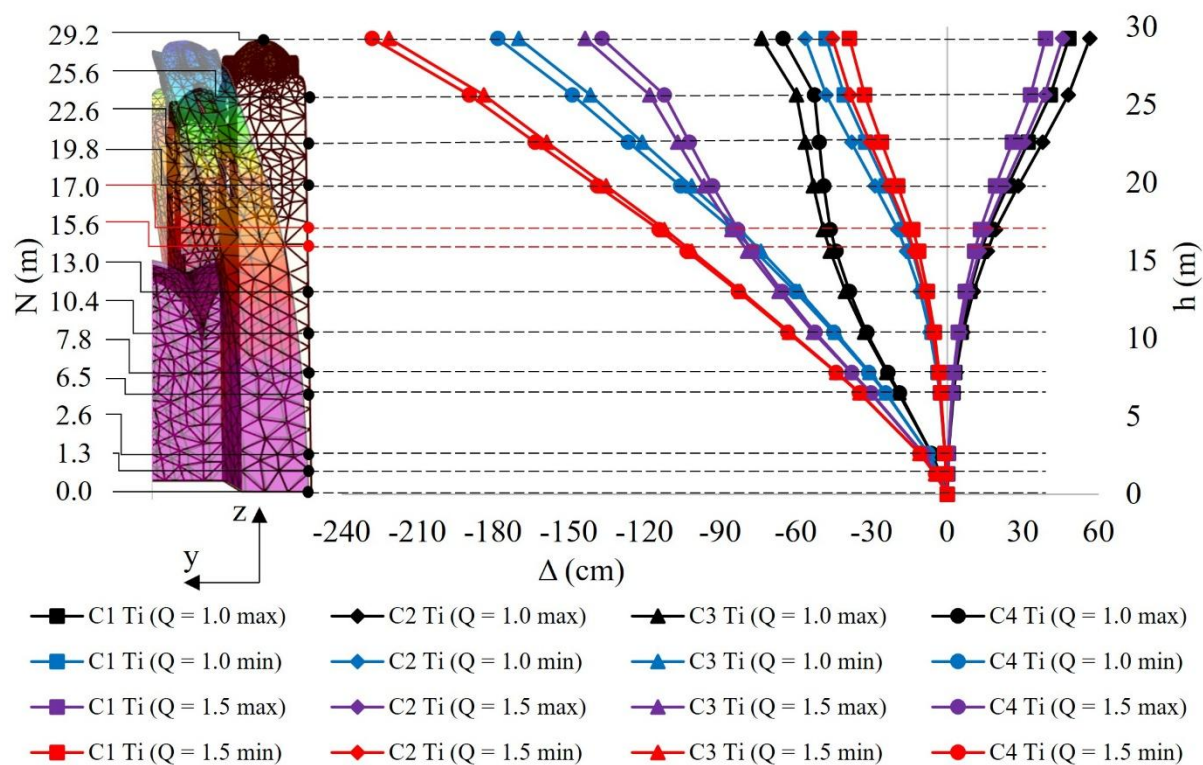


Fig. 39. Deslocamentos na direção Y na torre esquerda (Ti).

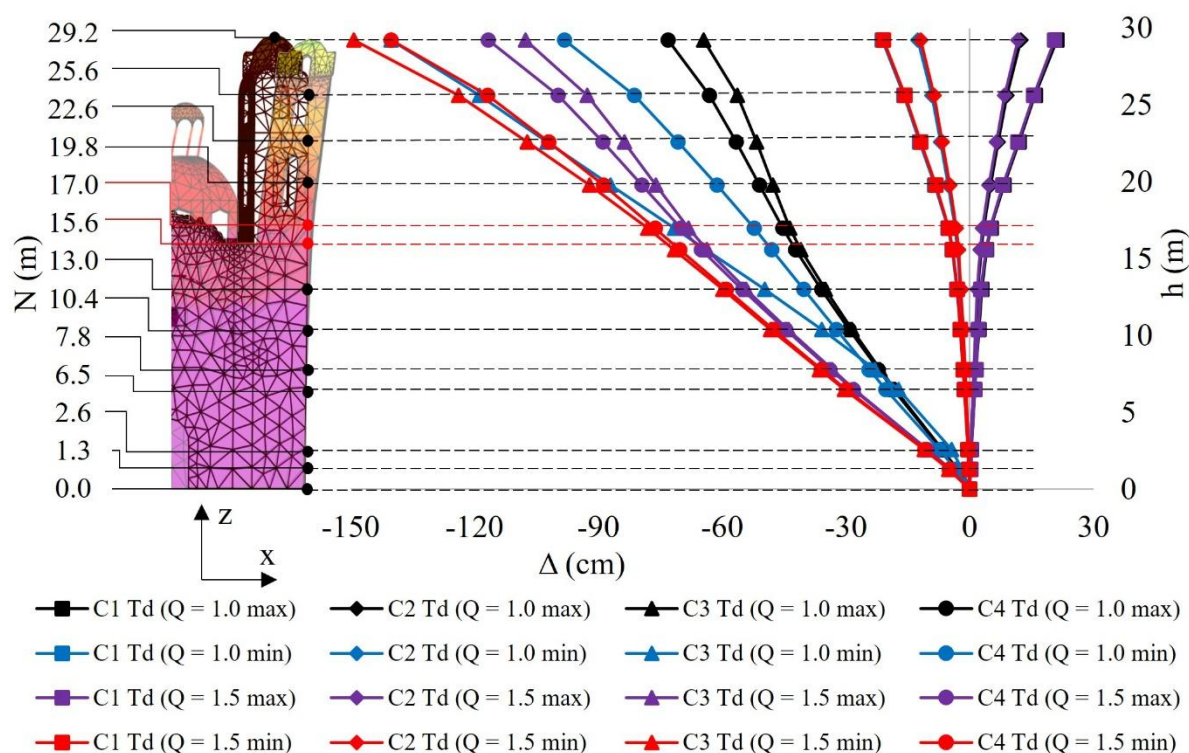


Fig. 40. Deslocamentos na direção X na torre direita (Td).

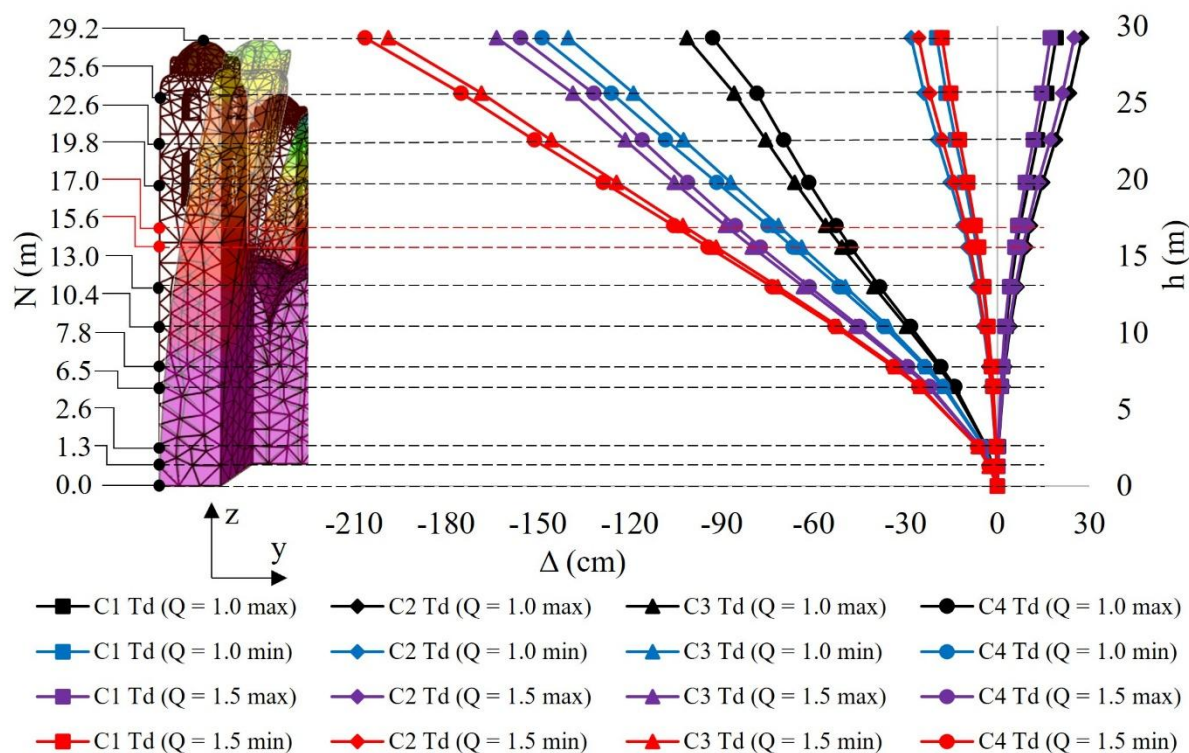
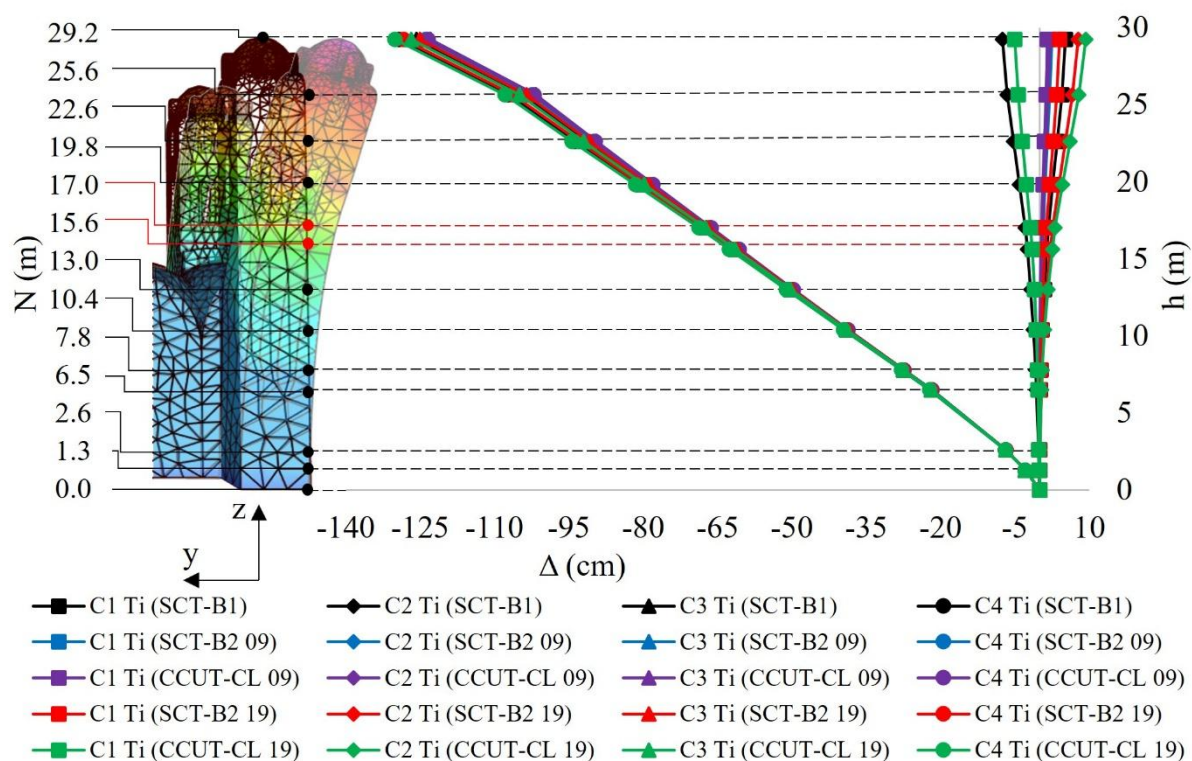
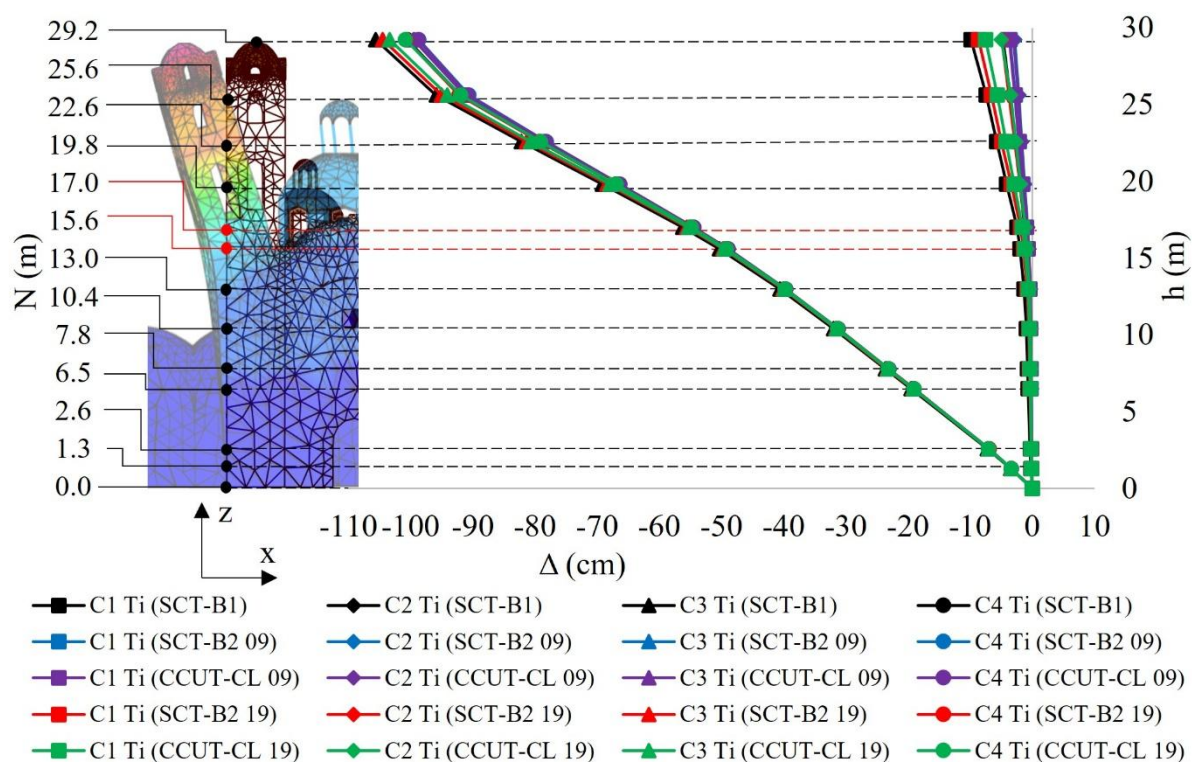


Fig. 41. Deslocamentos na direção Y na torre direita (Td).



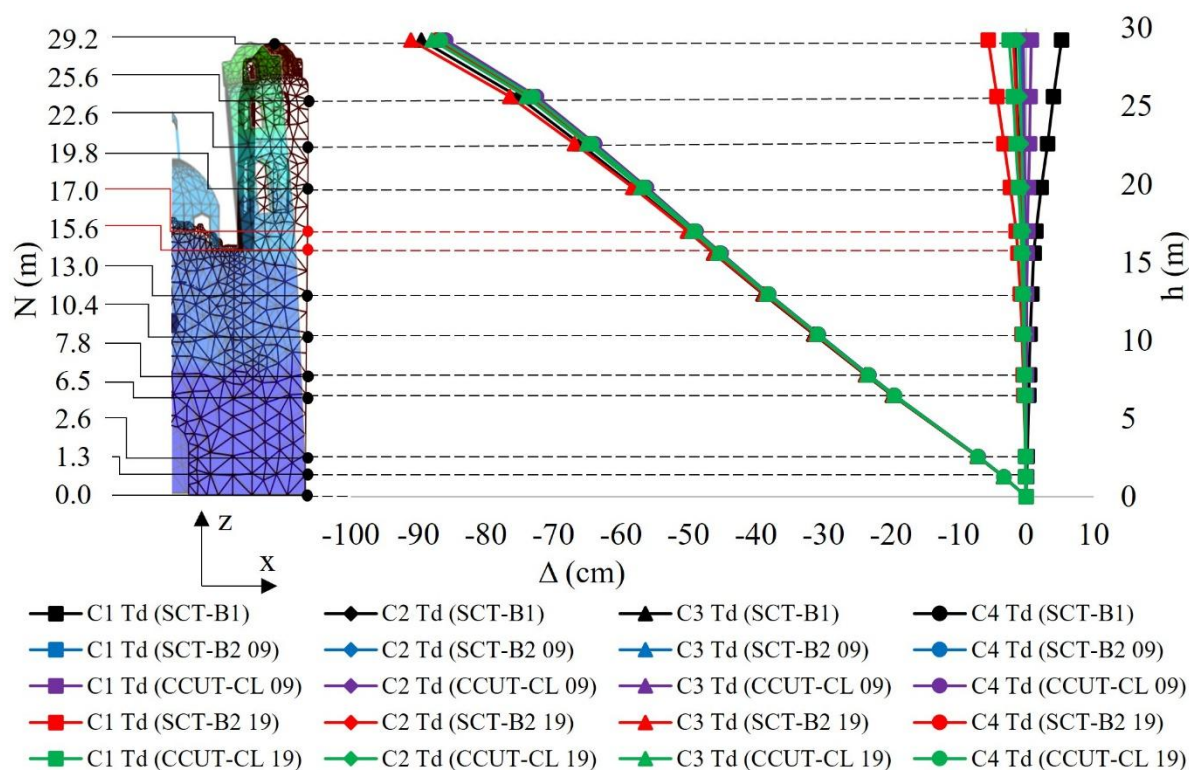


Fig. 44. Deslocamentos na direção X.

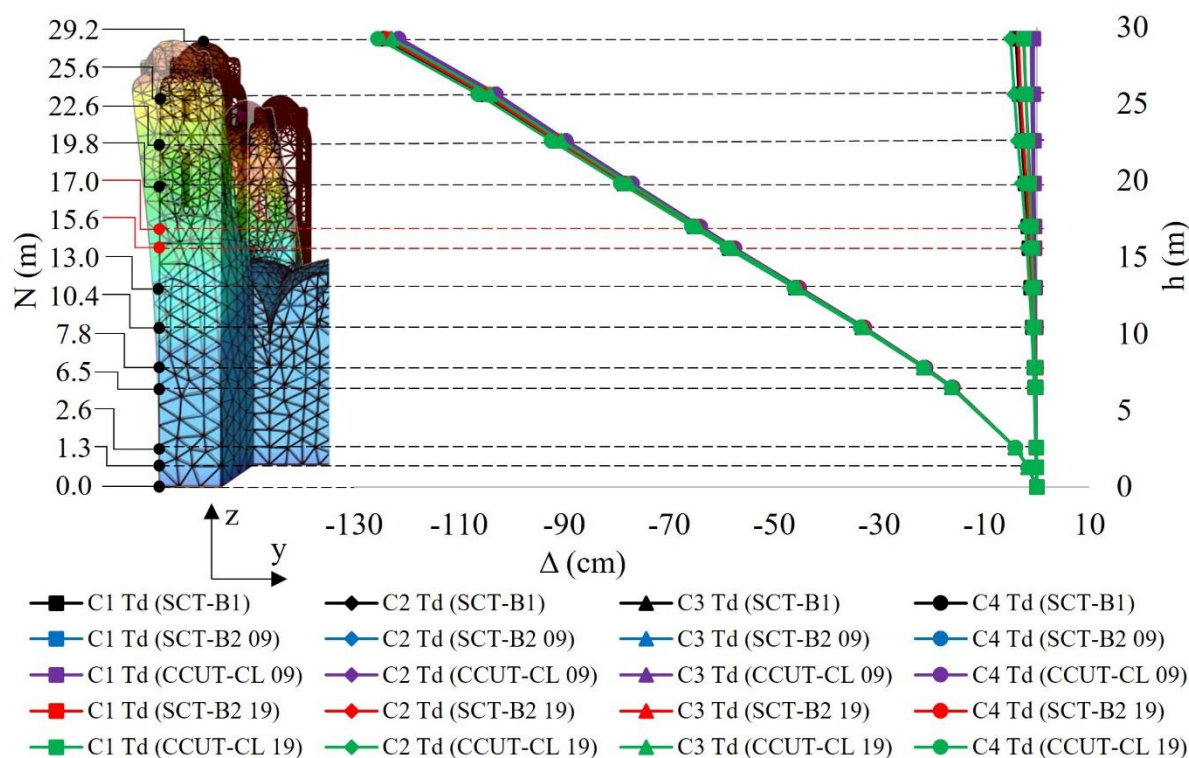


Fig. 45. Deslocamentos na direção Y.

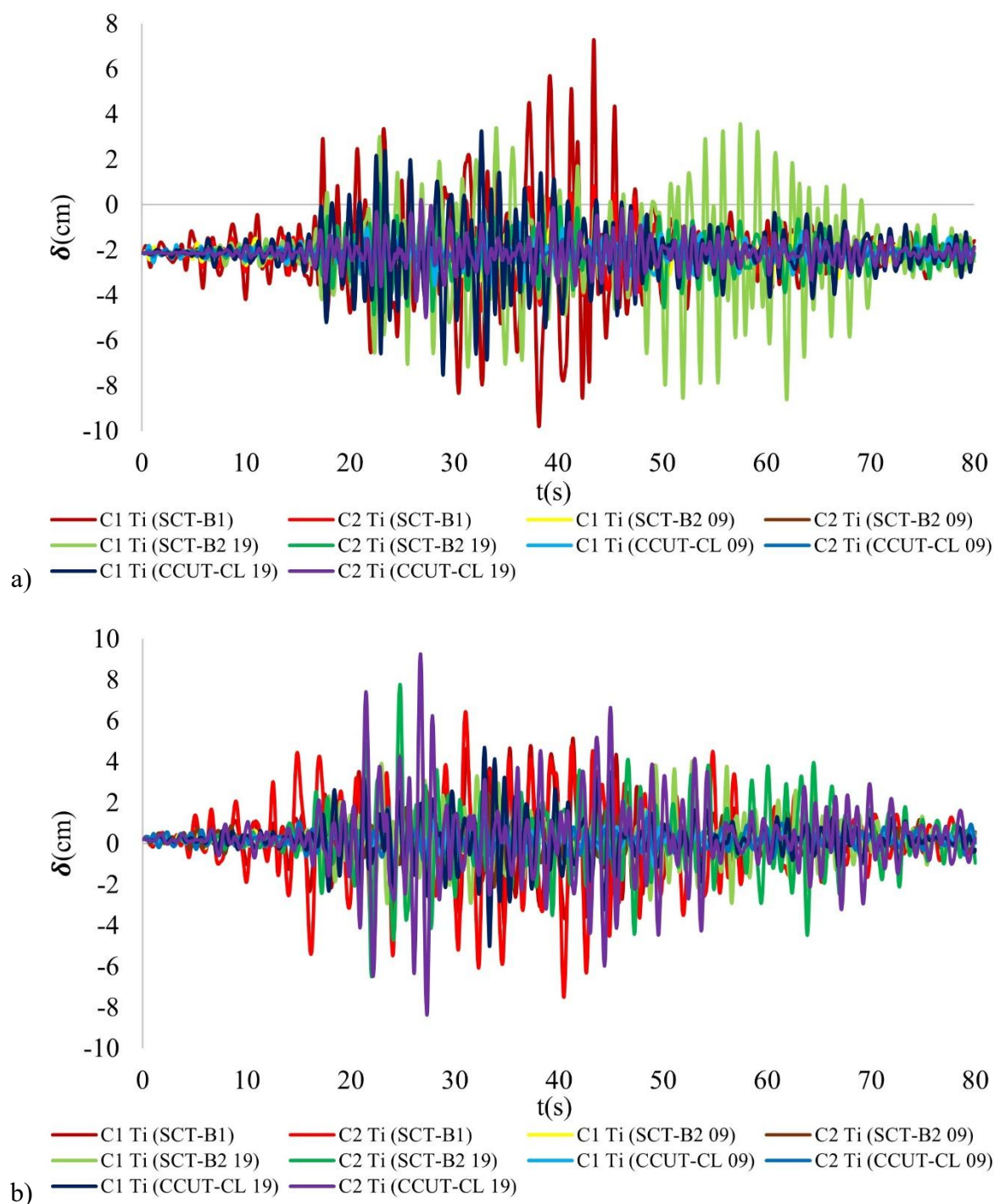


Fig. 46. Superposição de deslocamentos em FI sem recalques, a) direção X, b) Direção Y.

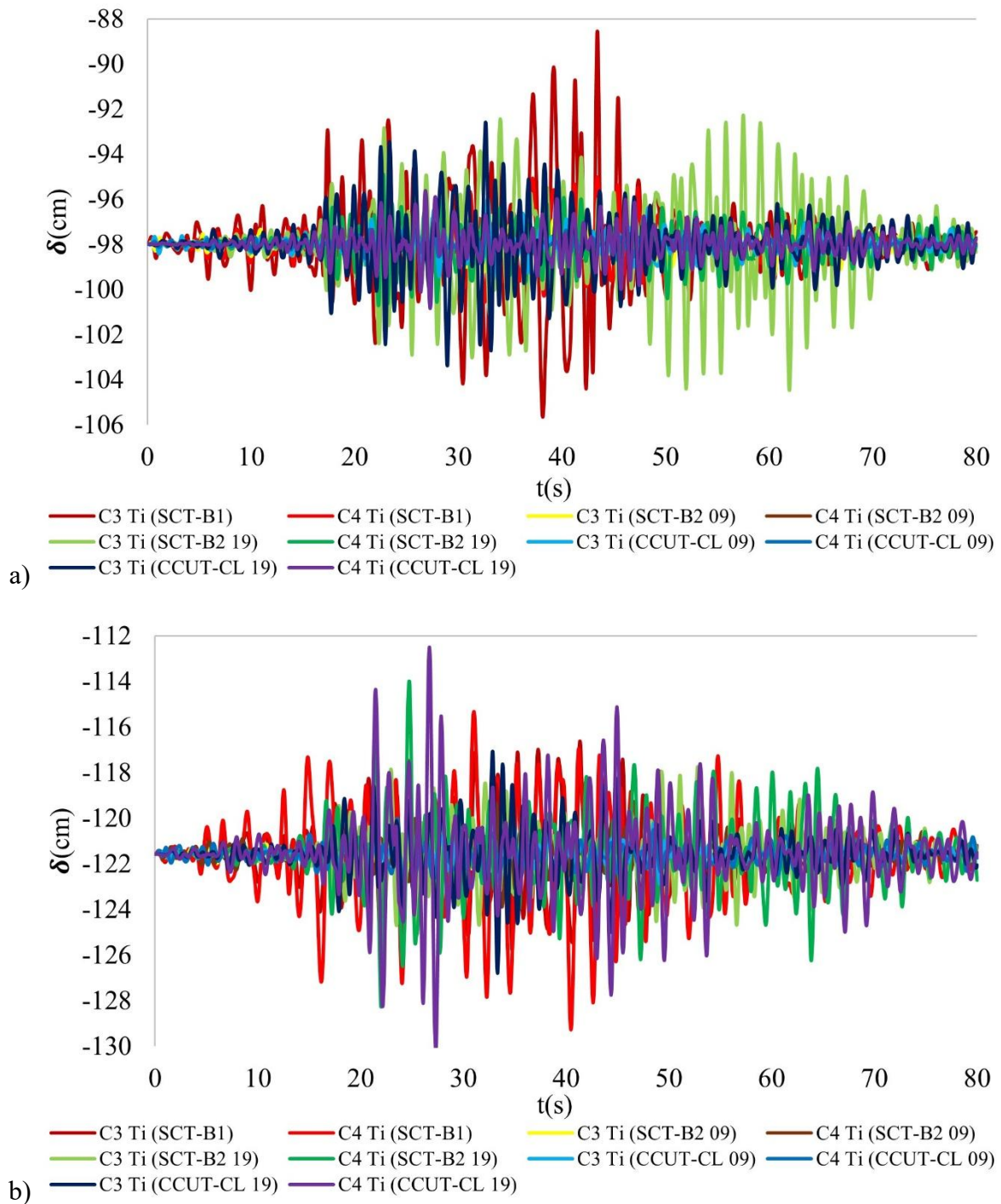
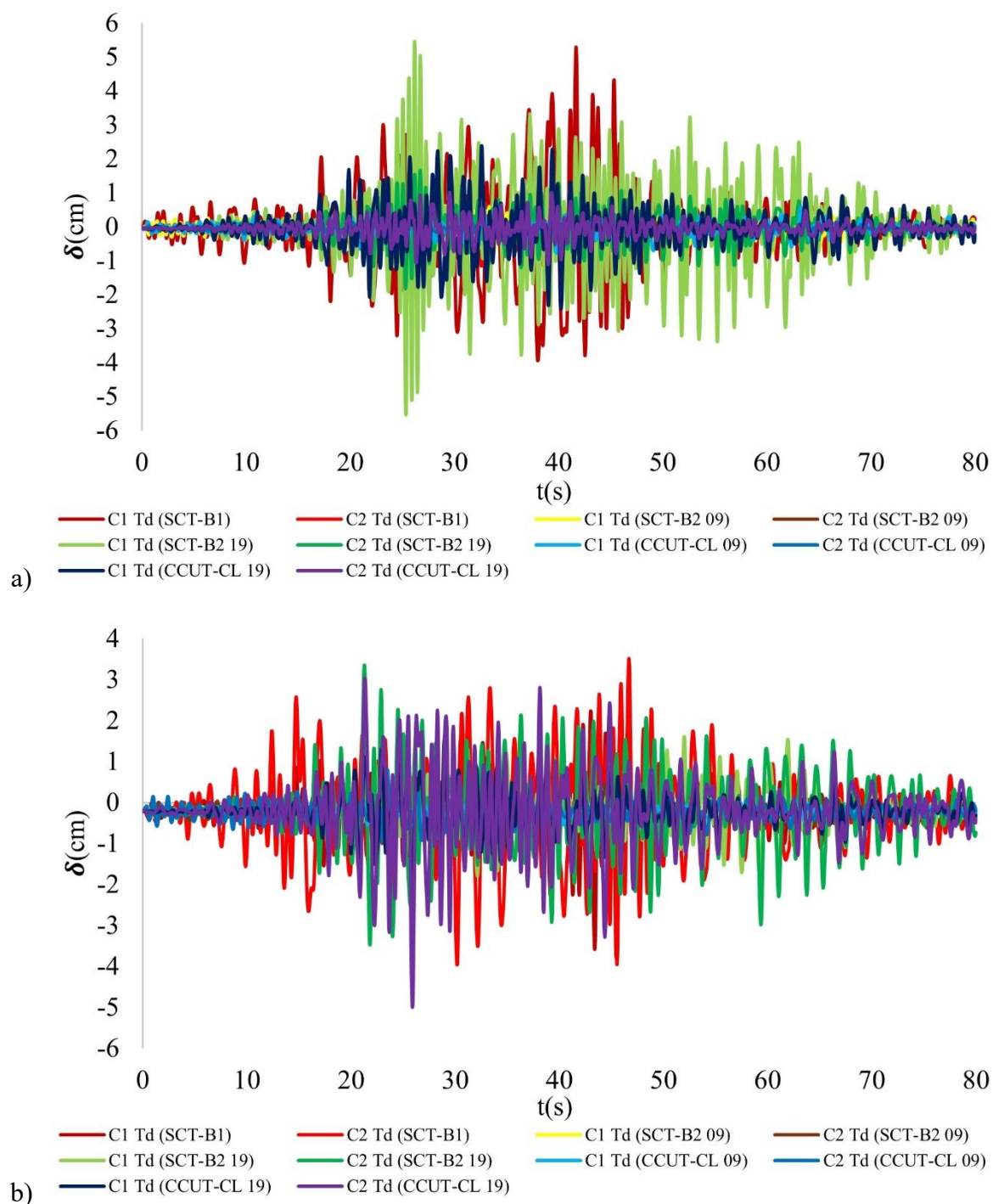


Fig. 47. Superposição de deslocamentos FI com recalques, a) direção X, b) direção Y.



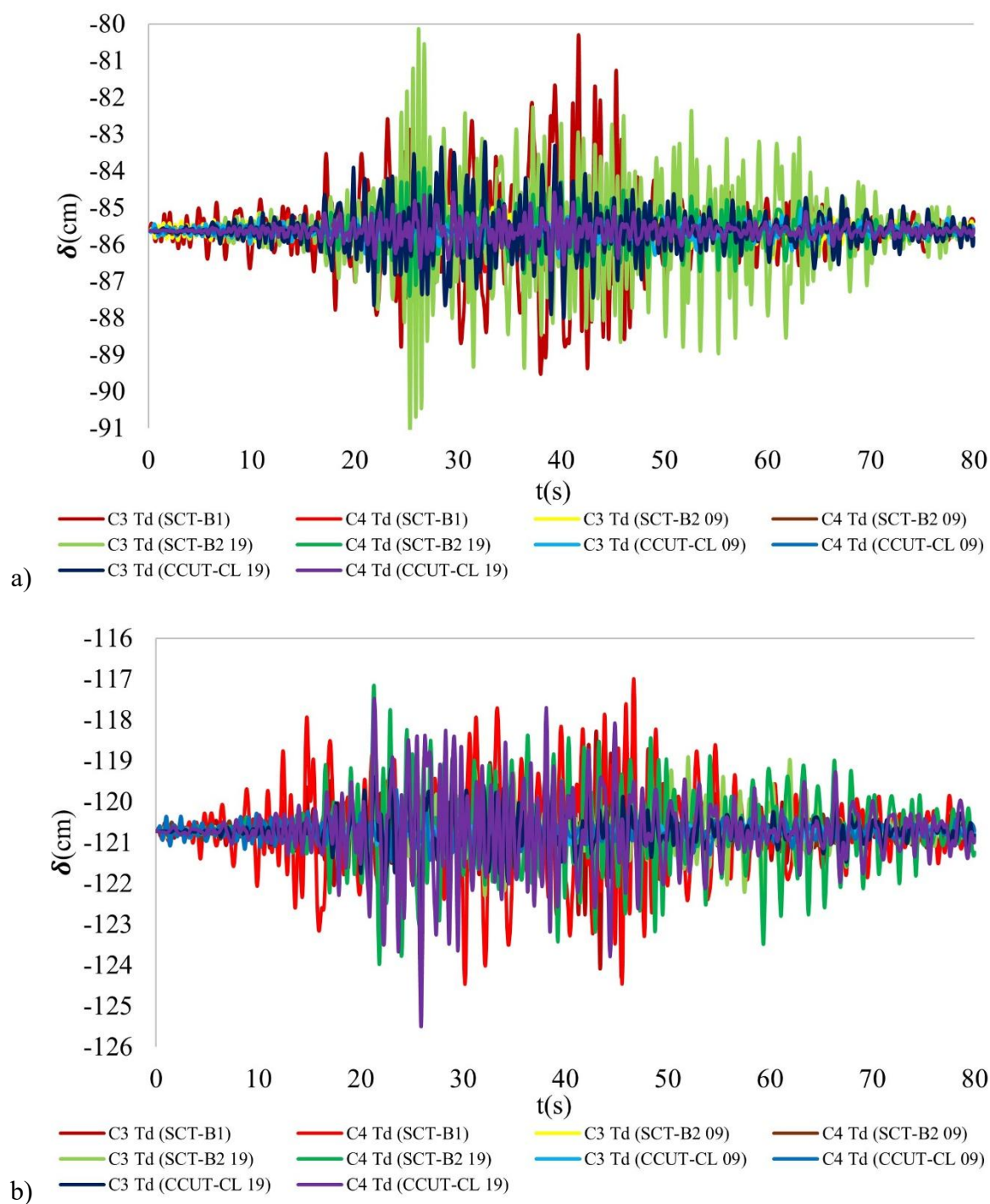


Fig. 49. Superposição de deslocamentos FI com recalques, a) direção X, b) direção Y.

9. RELAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS LATERAIS COM O GIRO DOS BLOCOS

De acordo com as premissas mencionadas por Heyman J. (1969, 1997), Mas-Guindal AJ (2011) e Huerta S. (2004), em relação à forma como a alvenaria é trabalhada na construção de edifícios históricos, pode-se considerar que a resistência à compressão é praticamente infinita, sendo muito difícil e quase impossível que a alvenaria histórica falhe por esmagamento, desde que sejam mantidas as relações de aspecto clássicas e a batida seja mínima. Portanto, pode-se considerar que, quando a resistência à tração é excedida, um bloco começa a se desprender e mecanismos de giro começam a se formar, o que gera blocos com tendência a tombar (ver figura 50). Por esse motivo, é viável determinar os deslocamentos laterais das torres sineiras utilizando sistemas completos por meio de modelos baseados em elementos finitos do tipo casca para obter seus ângulos de rotação, posteriormente identificar os possíveis blocos desfavoráveis e calcular suas propriedades físicas e geométricas, como: a) peso próprio, área e centro de gravidade. É importante mencionar que, de acordo com o que foi explicado por Peña F., (2015), a teoria do tombamento de blocos também obedece a possíveis assimetrias geométricas e dinâmicas. Uma vez determinados os deslocamentos com o modelo digital, os blocos vulneráveis ao tombamento foram considerados simétricos, sem perda de material tanto na base quanto nos blocos. Os ângulos das linhas de tendência dos deslocamentos mais desfavoráveis foram medidos e a resistência à tração foi desprezada. A Tabela 2 mostra os ângulos de rotação dos casos mais críticos das Figuras 38 a 45 do bloco vulnerável que está localizado a 17 m de altura em relação à linha horizontal. Vale ressaltar que o ângulo α é o ângulo a partir do qual o bloco vulnerável tomba nas torres sineiras. É necessário mencionar que os valores dos ângulos são absolutos e, como o bloco foi considerado simétrico, não importa para qual lado ele gire, a representação da Figura 50 será sempre a mesma. Quanto aos valores de ângulo obtidos, estes foram medidos traçando-se linhas de tendência de rotação conforme a direção e inclinação das linhas de deslocamento mostradas nas Figuras 38 a 45. O caso mais desfavorável de deslocamento foi detectado na torre esquerda, na direção Y, com o caso C4 Ti ($Q = 1,5$ máx), que atinge um ângulo de $5,34^\circ$, sendo o valor máximo entre todos os cenários de combinação propostos. O ângulo crítico ou limite (α) para o qual os blocos começam a tombar é calculado com a equação 1 (ver Figura 50). As expressões 1 a 5 estão relacionadas à Figura 50.

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

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

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

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

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

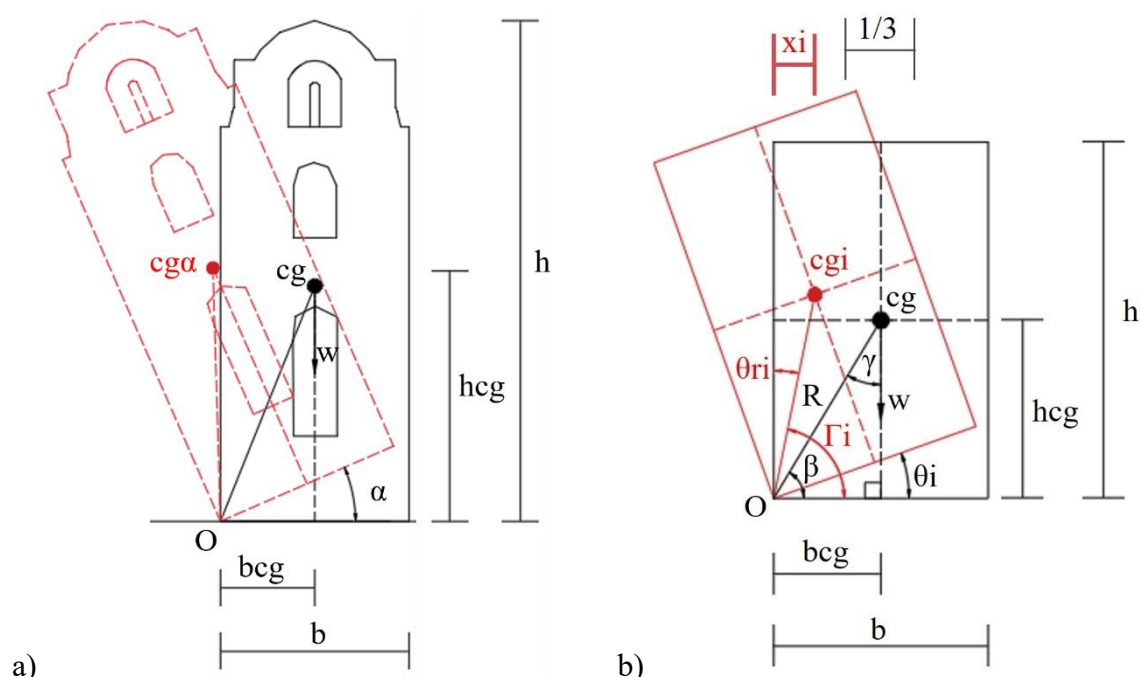


Fig. 50. Rotação dos blocos com tendência a tombar nas torres do Templo da Santa Cruz, a) bloco da torre, b) bloco equivalente. Reproduzido e modificado de Peña F. et. al. (2010).

Onde:

W = densidade do bloco,
 α = ângulo máximo a partir do qual ocorre o tombamento,
 cg = centro de gravidade,
 $cg\alpha$ = centro de gravidade do bloco no ângulo máximo em que ele tomba,
 h = altura total do bloco,
 b = largura da base na direção da inclinação,
 b_{cg} = dimensão medida do vértice “O” até a vertical que passa pelo centro de gravidade,
 h_{cg} = dimensão vertical medida da base ao centro de gravidade do bloco,
 θ_i = i-ésimo ângulo de rotação na base,
 θ_{ri} = i-ésimo ângulo restante para causar a inversão,
 cg_i = i-ésima posição do centro de gravidade do bloco com rotação na base em relação ao ponto “O”,
 R = distância do ponto “O” ao centro de gravidade,
 β = ângulo formado entre a reta “O”-“cg” e a horizontal da base,
 Γ_i = i-ésimo ângulo da linha “O”-“cg” durante a inversão,
 γ = ângulo formado entre a reta “O”-“cg” e a reta vertical que passa por cg,
 xi = i-ésima dimensão horizontal entre cg_i e “O”.

A Figura 51 ilustra os blocos críticos que sofrem deslocamentos laterais nas torres sineiras, a Figura 51b mostra o bloco que tende a tombar, que é analisado conforme as Figuras 37 e 50, além de considerar os valores apresentados na Tabela 2, onde: $b = 5,24m$, $h = 13,63m$, $w = 284470,37kg$.

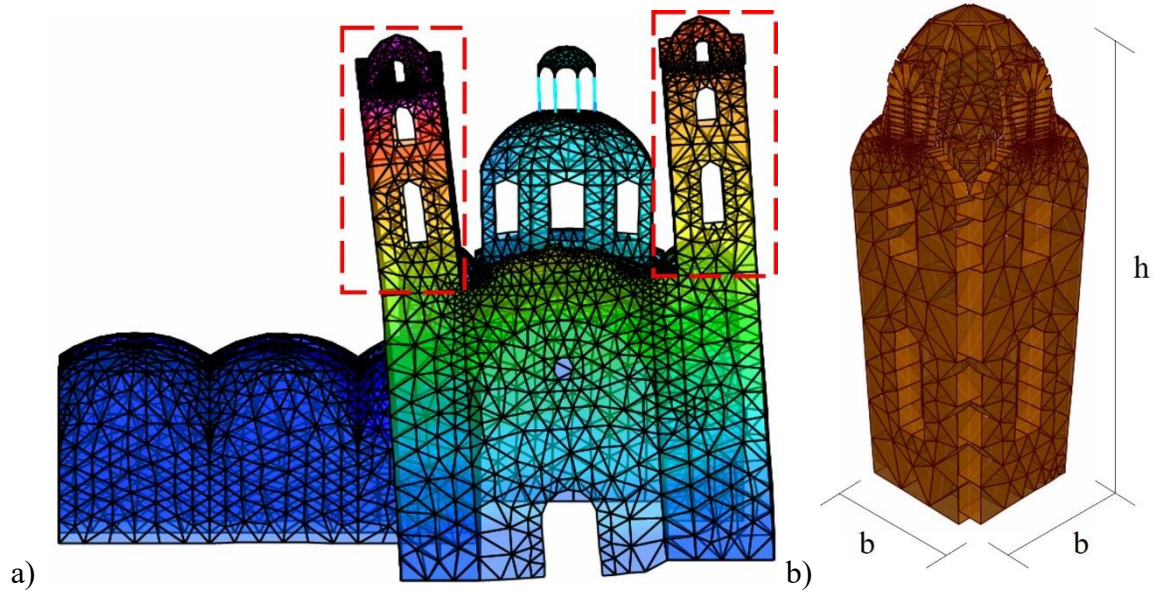


Fig. 51. Blocos críticos nas torres sineiras, a) localização dos blocos críticos no sistema, b) bloco crítico isolado.

Tabela 2. Ângulos de tombamento gerados por deslocamentos críticos nas torres sineiras do templo de Santa Veracruz.

Casos	θ_i°	θ_{ri}°	$\left(\frac{\theta_{ri}^\circ}{\theta_i^\circ}\right)$	x_i (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

A figura 52 mostra a relação entre a distância horizontal do centro de gravidade (x_i) medida na aresta vertical que passa pelo ponto “O” do bloco em relação ao i -ésimo ângulo de tombamento (θ_i) do bloco, a linha pontilhada azul é o limite do terço médio de segurança pertencente ao bloco analisado, onde o centroide se desloca conforme o bloco gira, dentro desta faixa está a linha pontilhada preta que representa o maior ângulo atingido pelo bloco sob ações sísmicas sem subsidência conforme figuras 38 a 45, enquanto a linha pontilhada verde é o maior ângulo atingido ($5,34^\circ$) com as combinações que incluem subsidência, e por fim a linha pontilhada vermelha é o ângulo α em que o bloco tomba e $x_i=0$. O ângulo α foi de $21,01^\circ$.

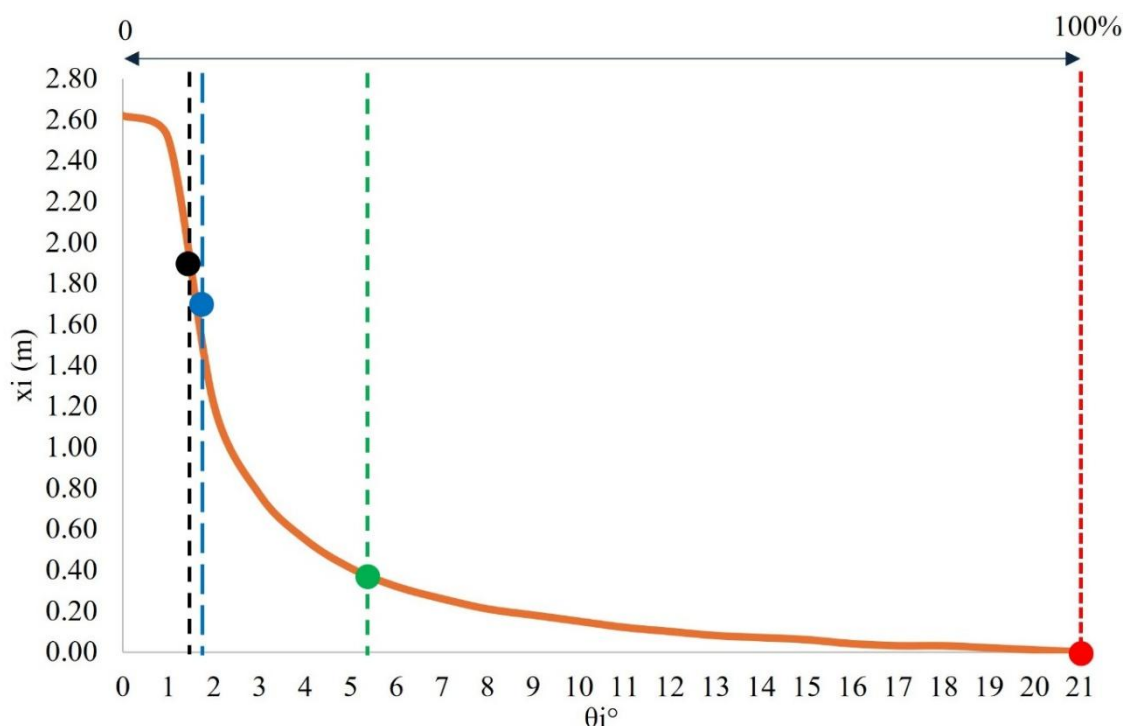


Fig. 52. Relação entre a distância horizontal do centro de gravidade (x_i) medida na aresta vertical que passa pelo ponto “O” do bloco, com o ângulo de tombamento do bloco (θ_i).

10. DISCUSSÃO

Ferramentas numéricas também estão disponíveis atualmente para simular blocos rígidos e elementos de contato para modelagem de alvenaria histórica. Esses tipos de ferramentas consomem uma quantidade maior de dados computacionais e exigem muito mais tempo para análise. Portanto, essas ferramentas são atualmente usadas apenas para modelar estruturas relativamente pequenas ou médias, principalmente em duas dimensões. Consequentemente, são impraticáveis e quase impossíveis de implementar em sistemas tridimensionais completos. Dadas as muitas zonas sísmicas ao redor do mundo, procedimentos e ferramentas de análise simplificados, comuns, comerciais, relativamente rápidos e amplamente utilizados são necessários para permitir uma revisão rápida e eficaz do deslocamento e, assim, avaliar os riscos potenciais de queda de torres. Existem muitos artigos que analisam torres sineiras, no entanto, a maioria deles é modelada isoladamente, o que contradiz os princípios ISCARSAH-ICOMOS (2003, 2004), que mencionam que a análise não deve ser realizada apenas em uma única parte da edificação, é necessário avaliá-la completamente, portanto, não é viável apenas salvar as torres, é também necessário conservar os corpos adjacentes. Este tipo de procedimento para analisar deslocamentos de torres sineiras, considerando o sistema completo modelado com EF, permite visualizar as áreas suscetíveis a danos, no entanto, embora seja uma ferramenta poderosa para analisar rapidamente templos construídos com alvenaria histórica, é recomendado, e também necessário, após a detecção dessas áreas vulneráveis, realizar análises estruturais com métodos específicos para cada uma dessas áreas. Este artigo apresenta a análise do sistema completo, pois a análise isolada teria que levar em conta a possível batida por contato vibratório dos corpos circundantes, pois seria muito difícil que os corpos pequenos colapsassem primeiro antes das torres, por esse motivo não é apresentada a análise da torre separada do restante do edifício, portanto, pode-se concluir que as torres sem subsidência permaneceriam dentro dessa faixa de segurança do terço médio mesmo quando submetidas a ações sísmicas.

Determinação virtual de deslocamentos em torres sineiras de edifícios históricos sujeitos a ações sísmicas e recalques, empregando elementos de casca, análise dinâmica linear e linear modificada.

Estudo de caso: Templo de La Santa Veracruz.

Observou-se que ao cortar o sinal e utilizar apenas a fase intensa, os deslocamentos foram praticamente os mesmos que ao utilizar os acelerogramas completos, o que significou utilizar apenas 80 segundos equivalentes a 1,2 minutos de cada sinal, representando a eliminação de 87%, 56%, 77%, 73% e 77% dos sinais completos (ver figuras 12 a 18). Neste trabalho, os deslocamentos laterais obtidos com elementos do tipo casca modelados em um sistema completo submetido a diferentes ações estão relacionados ao tombamento de blocos, em vez de serem analisados por tensões, pois, dada a natureza deste tipo de sistemas construtivos, tendem a ser avaliados com maior certeza sob os princípios mencionados por alguns autores como: Heiman J., (1969, 1997), Mas-Guindal AJ (2011) e Peña F. (2007). Uma vez obtidos os deslocamentos do sistema estrutural, os ângulos são determinados e o potencial de tombamento do bloco crítico é revisado. Portanto, embora os testes de vibração ambiente (AV) sejam uma excelente ferramenta para determinar as propriedades dinâmicas de edifícios, essas ferramentas têm limitações. A faixa de medição de frequência e amplitude registrada pela maioria dos acelerômetros de AV permite determinar propriedades dinâmicas na faixa linear e com deslocamentos muito pequenos. No entanto, grandes deslocamentos e/ou deslocamentos que excedem as resistências à tração perdem coerência numérica, uma vez que esse tipo de edifício tende a se separar em macroblocos. Da mesma forma, funções de transferência são mais compatíveis para analisar sistemas físicos contínuos com pequenos deslocamentos. Isso também se aplica a ângulos de fase, funções de coerência e espectros cruzados. Este trabalho se concentrou especificamente em grandes deslocamentos e utilizou propriedades mecânicas da literatura, usando métodos paramétricos. Os testes de VA são recomendados para calibrar sistemas estruturais. Entretanto, em comportamentos não lineares ou quase não lineares, ou com tendência à fratura ou tombamento do objeto físico, tais ensaios são limitados e não são compatíveis para calibrar rotações e colapsos de blocos em torres sineiras, uma vez que esses tipos de ensaios não são válidos para grandes deslocamentos. Portanto, para calcular colapsos de torres sineiras, é mais eficaz usar a teoria de tombamento de blocos rígidos, uma vez que as tendências de deslocamento lateral foram determinadas e os ângulos de rotação obtidos. Em análises realizadas com acelerações espectrais, deslocamentos de até 60 cm são apresentados sem subsidência, enquanto em análises desenvolvidas com acelerações temporais, os deslocamentos máximos não excedem 10 cm. Levando em consideração a subsidência da base, os deslocamentos com acelerações espectrais produziram um colapso máximo de 7,5% em relação à parte mais alta das torres, enquanto as acelerações ao longo do tempo resultaram em um colapso máximo de 4,5%, representando uma diferença de 40%.

11. CONCLUSÕES

As tendências comportamentais das torres mostradas nas Figuras 1 a 6 são semelhantes aos resultados obtidos no estudo de caso do Templo da Santa Cruz, no qual foi determinado que há uma tendência a maiores deslocamentos a partir da mudança abrupta de seção. Essa mudança está localizada na parte superior da nave principal, que fornece suporte lateral nas áreas mais baixas das torres sineiras. Além disso, o uso de elementos finitos do tipo casca foi adequado para a modelagem estrutural rápida do templo. Da mesma forma, as respostas dos deslocamentos determinados com os diferentes acelerogramas usados para a análise mostraram diferenças significativas, onde o acelerograma do terremoto completo (SC) e da fase intensa (FI) produziram deslocamentos praticamente idênticos. Entretanto, ao tentar reduzir os tempos de análise selecionando apenas 12 pontos específicos com as maiores acelerações dos ditos acelerogramas, tais deslocamentos mostraram-se de maior magnitude que os obtidos com SC e FI, chegando a ultrapassar 200% dos deslocamentos em certos casos, portanto não é aconselhável utilizar somente as acelerações máximas dos acelerogramas, pois o histórico temporal de todas as acelerações define a resposta do

sistema e não somente os picos máximos.

Também pode ser concluído que, ao considerar blocos completamente rígidos com tendência a tombamento, os resultados variam em comparação com elementos modelados com elementos finitos (ver Figura 37). Conclui-se que a falha por tombamento das torres sineiras no estudo de caso tem uma ampla faixa de segurança (ver Figura 52) diante de eventos sísmicos; no entanto, o recalque diferencial é um fator que aumenta muito os deslocamentos, o que pode posicionar as torres fora de seu terço de segurança, danificando constantemente esses elementos ao longo do tempo. Em particular, para o estudo de caso, recomenda-se implementar medidas de renivelamento na base para evitar danos futuros. É por isso que este trabalho é único, visto que combina ferramentas baseadas em elementos finitos e tombamento de elementos de blocos rígidos.

12. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Politécnico Nacional (IPN), pois parte deste texto é derivado de projetos de pesquisa da Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP), por exemplo, dos projetos SIP 20181461 e SIP 20195419. Agradecemos também ao atual SECIHTI (antigo CONAHCYT) pelo apoio fornecido aos autores.

13. REFERÊNCIAS

- 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 Imágenes del Instituto de Investigaciones Estéticas, última data de acesso ao 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”. Tese doutoral. 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*”. Munillalera.
- 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 data de acceso ao 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/>.
- RAII-UNAM (2014), “*Red Acelero grafica del instituto de Ingeniera de la UNAM*”. Os dados sísmicos foram fornecidos pela Red Acelerográfica do Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM), um produto do trabalho de instrumentação e processamento da Unidad de Instrumentación Sísmica. Os dados são distribuídos através do Sistema de Base de Datos Acelerográficos na 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://sasid.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.