UNIVERSIDAD & SOCIEDAD

Fecha de presentación: enero, 2025
Fecha de aceptación: mayo, 2025
Fecha de publicación: julio, 2025

ANÁLISIS

DE TORRES DE ACERO POR PUSHOVER TRADICIONAL Y ADAPTATIVO: PROTECCIÓN SOCIAL ANTE RIESGOS SÍSMICOS

ANALYSIS OF STEEL TOWERS USING TRADITIONAL AND ADAPTIVE PUSHOVER METHODS: SOCIAL PROTECTION AGAINST SEISMIC RISKS

José Alfredo Quesada Tinoco[1*]
E-mail: feroqueti@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0033-5420
Luis Francisco Pérez Moreno [1]
E-mail: lf.perezm@uaq.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3565-9510
Iván Fermín Arjona Catzim[1]
E-mail: ivan.arjona@uaq.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1509-9579
Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández[1]
E-mail: migperez@uaq.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1840-7864
Enrique Rico García[1]
E-mail: ricog@uaq.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1976-6503
[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México.
*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Quesada Tinoco, J. A., Pérez Moreno, L., F., Arjona Catzim, I. F., Pérez Lara y Hernández, M. A. & Rico García, E. (2025). Análisis de torres de acero por pushover tradicional y adaptativo: protección social ante riesgos sísmicos. *Universidad y Sociedad 17*(4). e5325.

RESUMEN

En este trabajo se realiza una comparación entre las curvas pushover obtenidas mediante el método tradicional con carga triangular invertida y el método adaptativo, aplicados a torres de acero. El objetivo principal fue evaluar la precisión de ambos métodos en la predicción de la respuesta no lineal bajo cargas sísmicas, analizando la influencia de los modos superiores y la redistribución de fuerzas asociada a la degradación de la rigidez, así como las diferencias en las predicciones de desplazamiento y los patrones de falla. Los resultados muestran que el método tradicional alcanza una resistencia máxima mayor, mientras que el método adaptativo presenta una resistencia ligeramente inferior, pero permite mayores desplazamientos y ofrece resultados más cercanos a los obtenidos mediante análisis dinámico. Más allá del aporte técnico, este estudio destaca importantes beneficios sociales y ambientales: la aplicación de métodos de análisis más precisos contribuye a optimizar el diseño estructural, lo que se traduce en edificaciones más seguras y resilientes ante sismos, protegiendo vidas humanas y reduciendo pérdidas materiales. Desde el punto de vista ambiental, el uso eficiente de materiales derivado de un diseño más ajustado a las demandas reales ayuda a disminuir el consumo de acero y la generación de residuos, reduciendo la huella de carbono asociada a la construcción. En conjunto, los hallazgos de este trabajo promueven la adopción de prácticas constructivas más sostenibles y responsables, en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

Palabras clave:

Estructuras, Construcción sostenible, Diseño estructural, Método adaptativo, Curvas pushover.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0.

ABSTRACT

This study presents a comparison between pushover curves obtained using the traditional method with an inverted triangular load and the adaptive method, applied to steel towers. The main objective was to evaluate the accuracy of both methods in predicting the nonlinear response under seismic loads, analyzing the influence of higher modes and the redistribution of forces associated with stiffness degradation, as well as differences in displacement predictions and failure patterns. The results show that the traditional method achieves a higher maximum strength, while the adaptive method presents slightly lower strength but allows for greater displacements and provides results closer to those obtained through dynamic analysis. Beyond the technical contribution, this study highlights important social and environmental benefits: the application of more accurate analysis methods helps optimize structural design, resulting in safer and more resilient buildings in the face of earthquakes, thus protecting human lives and reducing material losses. From an environmental perspective, the efficient use of materials derived from a design better suited to actual demands helps decrease steel consumption and waste generation, thereby reducing the carbon footprint associated with construction. Overall, the findings of this work promote the adoption of more sustainable and responsible construction practices, benefiting both society and the environment.

Keywords: How do structures, Sustainable construction, Structural design, Adaptive methods, Pushover curves.

INTRODUCCIÓN

El diseño estructural es una rama de la ingeniería fundamental para la seguridad y el bienestar social, ya que implica la planificación, análisis y construcción de estructuras capaces de soportar las cargas y fuerzas a las que están sometidas durante su vida útil. Según Chopra & Goel (2004), el diseño estructural moderno busca no solo optimizar la resistencia y eficiencia de los materiales, sino también asegurar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones ante diversas solicitaciones, incluidas las sísmicas. El acero, uno de los materiales más utilizados, destaca por su flexibilidad, sostenibilidad y versatilidad, lo que lo convierte en la base de numerosas soluciones constructivas eficientes y de bajo impacto ambiental (De'Nan et al., 2023). Gracias a sus propiedades mecánicas, las estructuras de acero pueden resistir grandes cargas y deformarse sin colapsar, contribuyendo así a la protección de vidas humanas y la reducción de pérdidas materiales en eventos extremos.

El diseño estructural es área de la ingeniería que involucra la planificación, el análisis y la construcción de estructuras capaces de soportar las cargas y fuerzas a las que estarán sometidas a lo largo de su vida útil. Según Chopra & Goel (2004), el diseño estructural actual busca optimizar la resistencia y eficiencia de los materiales, asegurando la seguridad y funcionalidad de las estructuras ante diferentes cargas, incluidas las sísmicas. Uno de los materiales más utilizados en el diseño estructural es el acero, este se utiliza en estructuras debido a sus características flexibles, sostenibles, rentables y versátiles, lo que lo hace adecuado para varios tipos de construcciones (De'Nan et al., 2023). Debido a sus propiedades mecánicas las estructuras de este material son capaces de resistir grandes cargas y deformarse sin colapsar.

En la ingeniería estructural, el análisis sísmico se clasifica en dos categorías principales: estático y dinámico (Rooshenas, 2020). Dentro de los análisis estáticos, se diferencian los métodos lineales y no lineales. Los métodos lineales asumen que la estructura se comporta de manera elástica y no experimenta grandes deformaciones. En contraste, los métodos no lineales consideran que la estructura puede experimentar deformaciones significativas y cambios en su comportamiento durante un sismo.

Según Rooshenas (2020), los análisis tiempo-historia son considerados los más precisos para estimar las demandas sísmicas debido a su capacidad para predecir de manera detallada y precisa la respuesta dinámica no lineal de una estructura bajo cargas sísmicas. Sin embargo, debido a su complejidad matemática y los altos requisitos computacionales que requieren, su uso en aplicaciones de ingeniería rutinaria es limitado (Kuria & Kegyes-Brassai, 2023). Por esta razón, los métodos estáticos se utilizan con mayor frecuencia, ya que son menos exigentes en términos computacionales. Entre estos métodos, el análisis ***Pushover*** ha sido ampliamente adoptado por su simplicidad y eficiencia ya que es posible identificar las zonas críticas donde se concentran las deformaciones inelásticas, optimizando así el diseño y asegurando que los materiales sean utilizados de forma eficiente antes de llegar al colapso, además de ser una herramienta efectiva en el diseño de estructuras sometidas a sismos severos (Yin et al., 2019). No obstante, este enfoque presenta limitaciones importantes, ya que asume que las distribuciones de carga no cambian a lo largo de la respuesta estructural, lo que no refleja de manera precisa la naturaleza dinámica y compleja de los sismos (Rahmani et al., 2019).

El comportamiento sísmico de un edificio bajo la acción de movimientos fuertes es un fenómeno complejo, particularmente cuando la estructura se deforma en el rango inelástico. A pesar de esto, la mayoría de los códigos de construcción en todo el mundo permiten el uso de procedimientos elásticos simples para determinar las demandas sísmicas en edificios de acero, tanto para deformaciones pequeñas como grandes (Llanes-Tizoc et al.,

2019). Esto resalta la importancia de considerar métodos más precisos para evaluar el comportamiento real de las estructuras bajo sismos severos.

El análisis ***Pushover*** tradicional aplica un patrón de carga lateral con incrementos constantes a lo largo de la altura de la estructura, pero no es capaz de tomar en cuenta los efectos de diferentes modos de vibrar (Jalilkhani et al., 2020). Esto plantea dudas sobre la validez de estos perfiles de fuerza, dado que las cargas inerciales generadas durante un terremoto dependen del historial de carga y pueden variar significativamente.

El análisis ***Pushover*** adaptativo ajusta el patrón de carga lateral en cada paso del análisis, en función de los cambios en la rigidez y los modos de vibración de la estructura (Rofooei et al., 2007). A diferencia del método tradicional, este enfoque permite que las fuerzas se redistribuyan dinámicamente a medida que la estructura experimenta deformaciones inelásticas, reflejando de manera más precisa la respuesta real de la estructura bajo cargas sísmicas variables.

El estudio que se presenta tiene como objetivo analizar una estructura de acero mediante los métodos ***Pushover*** tradicional y adaptativo, con el fin de comparar sus resultados y evaluar las diferencias en la predicción de desplazamientos. Se pretende determinar si ambos enfoques ofrecen resultados similares o si existen diferencias significativas en su capacidad para representar el comportamiento no lineal de la estructura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis *Pushover* Tradicional con Carga Triangular Invertida

El análisis ***Pushover*** tradicional es un método estático no lineal que se utiliza para evaluar la respuesta estructural bajo cargas laterales crecientes, como las inducidas por un sismo. Este tipo de análisis da una idea del comportamiento de la estructura en caso de sismos, cuando se supone que la capacidad elástica será excedida (Rahmani et al., 2019). Este método asume un patrón de carga lateral fijo a lo largo de la altura de la estructura, lo que permite modelar el comportamiento de la estructura hasta que se alcanzan los límites de deformación o colapso.

La base de este análisis radica en la resolución de las ecuaciones de equilibrio estático bajo la acción de cargas laterales crecientes. La ecuación general que describe el comportamiento estructural bajo este tipo de cargas es:

$$K(u) \cdot u = \lambda \cdot P \qquad (1)$$

donde:

- es la matriz de rigidez de la estructura, representa la relación entre fuerzas y desplazamientos.
- es el vector de desplazamientos nodales.
- es el factor de carga, un escalar que se incrementa progresivamente para simular la aplicación de una carga lateral creciente.
- es el vector de cargas laterales aplicadas en los nodos de la estructura.

Este análisis se realiza con un enfoque incremental. En cada paso, se aumenta el valor de , lo que incrementa la magnitud de la carga lateral aplicada . El sistema de ecuaciones se resuelve para obtener los desplazamientos nodales , y a partir de estos desplazamientos, se calcula la deformación en los elementos estructurales. A medida que el análisis avanza, algunos elementos de la estructura alcanzan su capacidad máxima y se desarrollan fallas plásticas, lo que reduce la rigidez global de la estructura.

Relación entre desplazamiento y fuerza:

El cortante basal (ecuación 2) se calcula sumando las fuerzas laterales de todos los pisos. El cortante basal es un indicador clave de la resistencia lateral de la estructura:

$$V_b = \sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (2)$$

donde:

- es la fuerza lateral aplicada en el nivel .
- es el número de niveles de la estructura.

Curva de capacidad:

El resultado del análisis ***Pushover*** es la curva de capacidad, que relaciona el cortante basal con el desplazamiento en el tope de la estructura . Esta curva muestra la capacidad de la estructura para resistir cargas laterales y proporciona información sobre la rigidez inicial, el punto de rendimiento, la resistencia máxima y la ductilidad.

Determinación del punto de colapso.

El colapso de la estructura se identifica cuando la pendiente de la curva de capacidad se vuelve negativa, indicando una pérdida significativa de rigidez estructural. Este punto define la capacidad máxima de la estructura antes del colapso global.

***Pushover* adaptativo**

El análisis ***pushover*** adaptativo se basa en la metodología de Antoniou & Pinho (2004), la cual ajusta el patrón de carga lateral en cada paso de carga en función de los cambios en los modos de vibración y la rigidez de la estructura. A diferencia del método tradicional, que comienza con una distribución triangular de cargas, el método adaptativo inicia con una carga rectangular uniforme. Esto es esencial porque permite que la distribución de cargas se adapte a medida que la rigidez y los modos de vibración de la estructura cambian durante el proceso de carga.

En cada paso , el análisis adaptativo recalcula la distribución de las fuerzas basándose en la forma modal y las características actuales de la estructura. Este proceso de ajuste se realiza utilizando un vector de cargas nominado , que es escalado por un factor de carga y un vector de escalamiento modal normalizado .

La actualización de las fuerzas aplicadas en cada paso sigue el esquema mostrado en la figura 1, donde el incremento de fuerzas se calcula mediante la fórmula:

$$\Delta P_t = \lambda_t * F_t * P_0 \qquad (3)$$

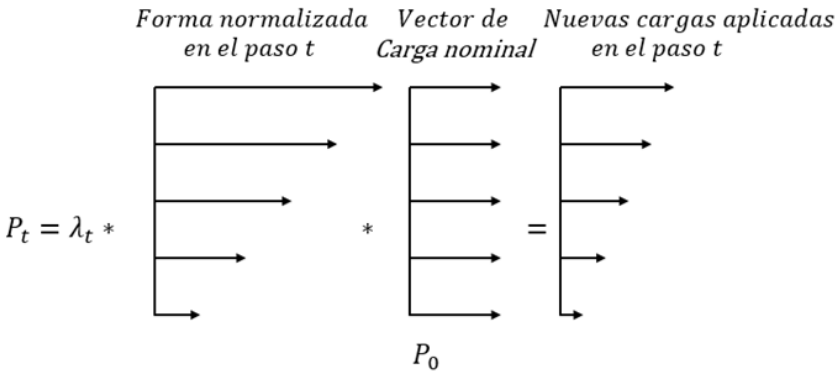
El vector de fuerzas en el paso se obtiene sumando el incremento de fuerzas al vector de fuerzas existente del paso anterior:

$$P_t = P_{t-1} + \Delta P_t \qquad (4)$$

Este proceso se repite hasta que la estructura alcanza el desplazamiento límite o se produce la falla estructural.

La figura 1 muestra el proceso de adaptación de las cargas conforme avanza el análisis. Inicialmente, las fuerzas están distribuidas de manera uniforme en todos los niveles. A medida que la estructura entra en el régimen no lineal, las cargas se redistribuyen dinámicamente en función de la degradación de la rigidez y los cambios en los modos de vibración.

Fig 1: Proceso de actualización de cargas.



Fuente: Elaboración propia.

Descripción de la estructura

Las estructuras evaluadas en este estudio son torres de acero de 4, 6 y 8 niveles con dos crujías, con las siguientes características:

- Altura de cada nivel: 3.5 m
- Ancho de crujías: 6 m

La configuración de la estructura es común en edificios utilizados frecuentemente para oficinas o residencias. Se modela de manera que cada nodo en la estructura representa una conexión, y se aplicaron cargas gravitacionales estáticas antes del análisis ***pushover***.

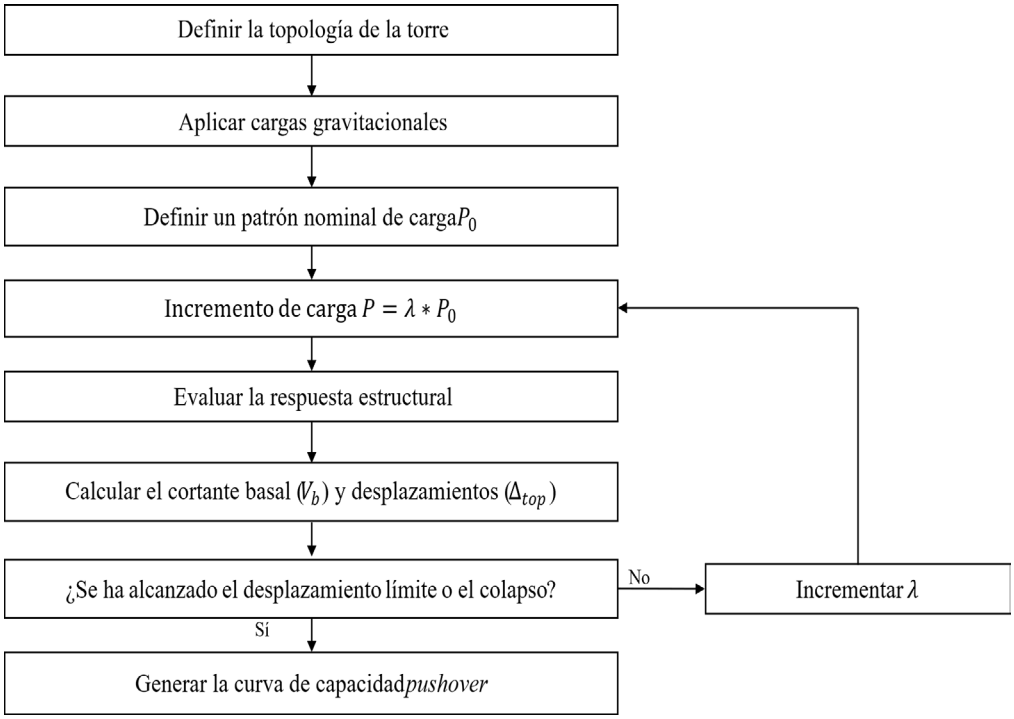
Análisis *Pushover* Tradicional con Carga Triangular Invertida

En las torres de acero de 4, 6 y 8 niveles previamente descritas, se aplicaron las cargas gravitacionales correspondientes al peso propio de la estructura. A continuación, se estableció un patrón de carga lateral triangular invertida. Esta se incrementa progresivamente la magnitud de la carga lateral mediante un factor de carga (λ) en pasos controlados, lo que permite avanzar en la respuesta de la estructura.

En cada incremento, se evaluaron el cortante basal () y el desplazamiento en el tope de la estructura (). Estos valores fueron monitoreados para identificar la transición de la respuesta elástica a la plástica, observando, se puede notar que fue aproximadamente con un desplazamiento de 12 cm, perteneciente a un factor de carga λ igual a 6.2.

El análisis se detuvo al alcanzar el punto donde la pendiente de la curva de capacidad se volvió negativa, indicando una disminución significativa de la rigidez estructural y un posible fallo, específicamente con un desplazamiento aproximado de 35.4 cm, correspondiente a un factor de carga λ igual a 7.88, esto se puede comprobar al notar que el cortante basal disminuye de 820.66 a 788.83 kN, lo que demuestra la pérdida de rigidez. Este proceso se describe gráficamente en la Figura 2.

Fig 2: Diagrama de la metodología empleada.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis *Pushover* Adaptativo

Al igual que en el método tradicional se analizó la estructura de 4, 6 y 8 niveles propuesta al principio de la metodología. A diferencia del patrón triangular usado anteriormente se definió un patrón rectangular uniforme, esto para permitir que la adaptación ocurra en función de los cambios modales y de rigidez.

Incremento de Cargas y Recálculo del Patrón de Carga

A partir del patrón de carga inicial, se calculó el incremento de la carga lateral (ΔP_t) en cada paso del análisis. Este incremento se definió como el producto del factor de carga incremental ($\Delta\lambda_t$), el vector de escalamiento modal

normalizado (F_t)) y el vector de carga nominal (P_0), como se hace en la ec. (3). A medida que avanzaba el análisis, el patrón de carga lateral se actualizaba en cada paso en función de la rigidez actual de la estructura y de los modos de vibración predominantes en ese instante, recalculados mediante un análisis de valores propios.

Posteriormente, el vector de carga total (P_t) en cada paso fue actualizado sumando el incremento de carga al vector de carga existente del paso anterior ec. (4).

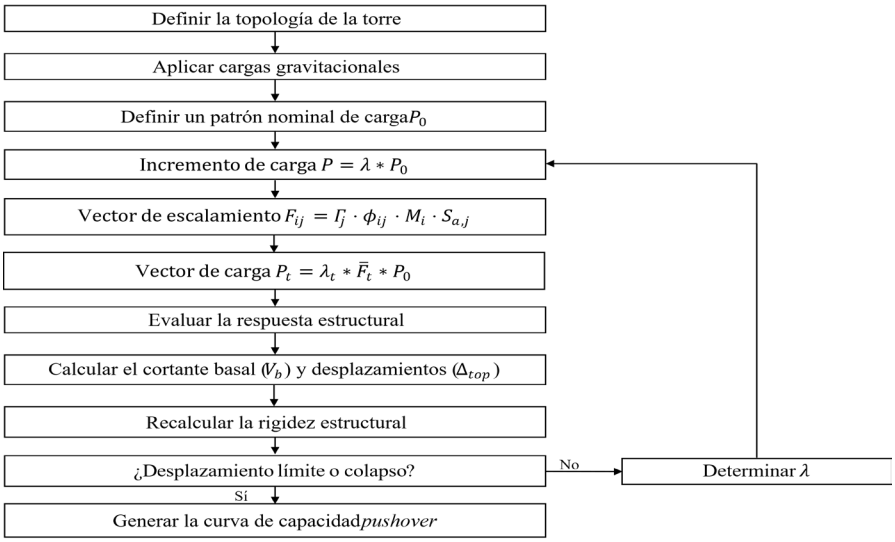
Evaluación de la Respuesta Estructural

En cada incremento de carga, se evaluó la respuesta estructural en términos de cortante basal (V_b) y desplazamiento en el tope de la estructura (Δ_{top}).

Identificación del Punto de Colapso y Finalización del Análisis

El análisis procede hasta que se alcanza el desplazamiento límite o la estructura presenta indicios de colapso, siguiendo el proceso de pushover mostrado en la Figura 3. El punto de colapso se identifica cuando la pendiente de la curva de capacidad se vuelve negativa, lo que indica una disminución significativa de la rigidez y resistencia de la estructura. En ese momento, se registra el desplazamiento máximo alcanzado (0.46m) ya que, aunque el cortante basal en los pasos anteriores iba en decrecimiento al graficar la pendiente ya era significativamente negativa.

Fig 3: Proceso del pushover adaptativo.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

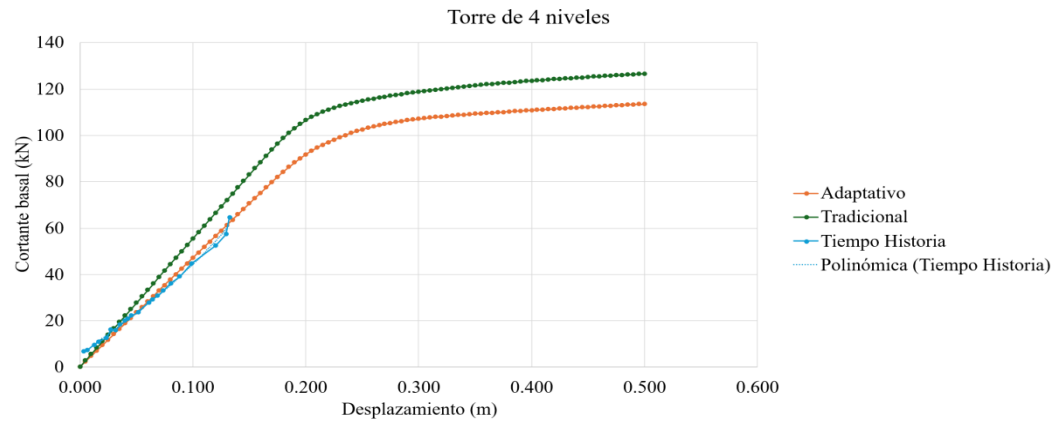
Análisis tiempo-historia

Para un análisis del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas, se utiliza el evento del 19 de septiembre de 2017, que ocurre en el centro de México, con coordenadas 18.5678° N y 98.4808° W, y tuvo lugar a las 18:14:38 UTC. Este sismo se selecciona debido a su impacto significativo en estructuras de acero en la región y su relevancia como caso de estudio para la validación de modelos de análisis estructural.

El análisis tiempo-historia se basó en el registro acelerográfico de este evento, aplicado a las tres configuraciones de torres seleccionadas en el estudio: una torre de 4, una de 6 y una de 8 niveles, ambas diseñadas para uso habitacional, siguiendo los parámetros de diseño tipo B2 según el reglamento.

Los resultados obtenidos, presentados en la gráfica comparativa (Figura 4), muestran variaciones esperadas entre los métodos ***pushover*** tradicional y adaptativo, aunque ambos, al ser métodos estáticos no lineales, tienen cierta similitud en su comportamiento general (específicamente en la zona elástica). El método tradicional alcanza una resistencia máxima ligeramente mayor, con un cortante basal cercano a los 126 kN. Sin embargo, después de un desplazamiento de aproximadamente 50 cm, se observa una pérdida de rigidez, lo que provoca una reducción en el cortante basal.

Fig 4: Comparación de las curvas pushover en la torre de 4 niveles.



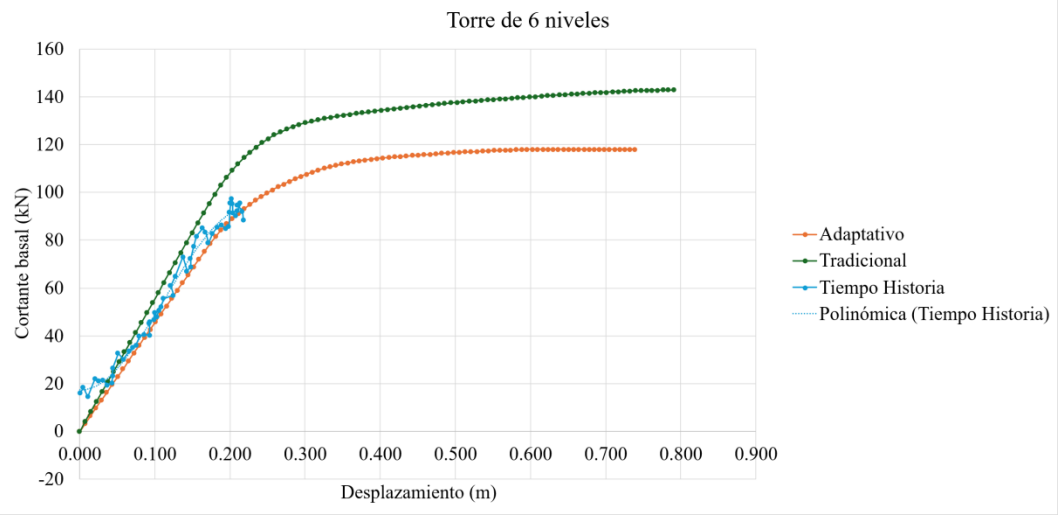
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el método adaptativo presenta una curva más suavizada, con una resistencia máxima ligeramente inferior, cercana a los 117kN, la estructura alcanza desplazamientos de hasta 50 cm, sin que se concentren los daños en puntos específicos. Esto sugiere un comportamiento estructural más equilibrado, con una mejor distribución de las deformaciones a lo largo de la altura de la torre.

Ambos métodos muestran comportamientos similares en sus primeras fases, sobre todo en la fase elástica, lo que era esperado, pero difieren en la capacidad de representar el comportamiento en la fase no lineal avanzada, perteneciente a la fase plástica. El método adaptativo parece capturar mejor la evolución progresiva del daño en la estructura, particularmente en desplazamientos más elevados.

Se pueden observar resultados congruentes en las otras dos configuraciones de torres, donde las gráficas muestran comportamientos similares (Figuras 5 y 6).

Fig 5: Comparación de las curvas pushover en la torre de 6 niveles.

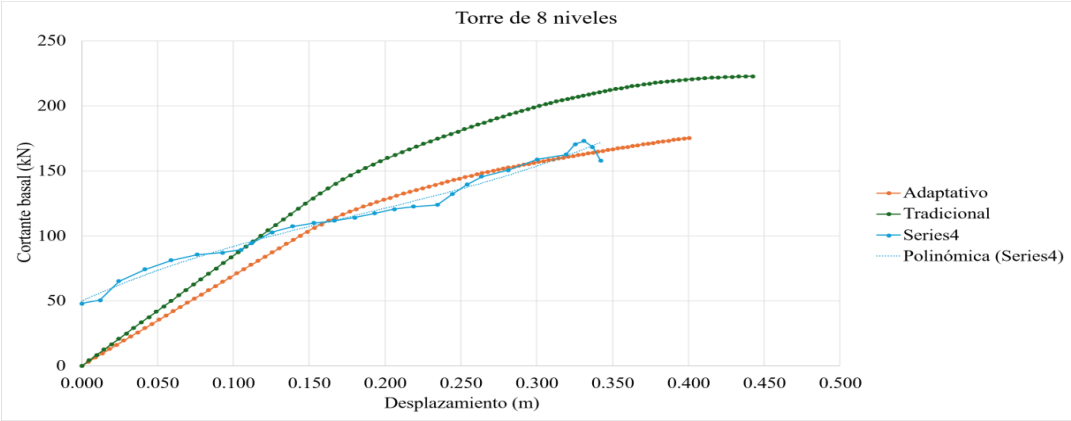


Fuente: Elaboración propia.

Para la torre de 4 niveles, ambas metodologías cumplen con el estado de ocupación inmediata. Sin embargo, el método adaptativo produce valores ligeramente menores de distorsión (Figura 7), distribuyendo mejor las fuerzas sísmicas.

En la torre de 6 niveles, las distorsiones del método tradicional se acercan al límite de seguridad de vida, especialmente en los niveles superiores, mientras que el adaptativo permanece dentro de los límites normativos con una distribución más uniforme.

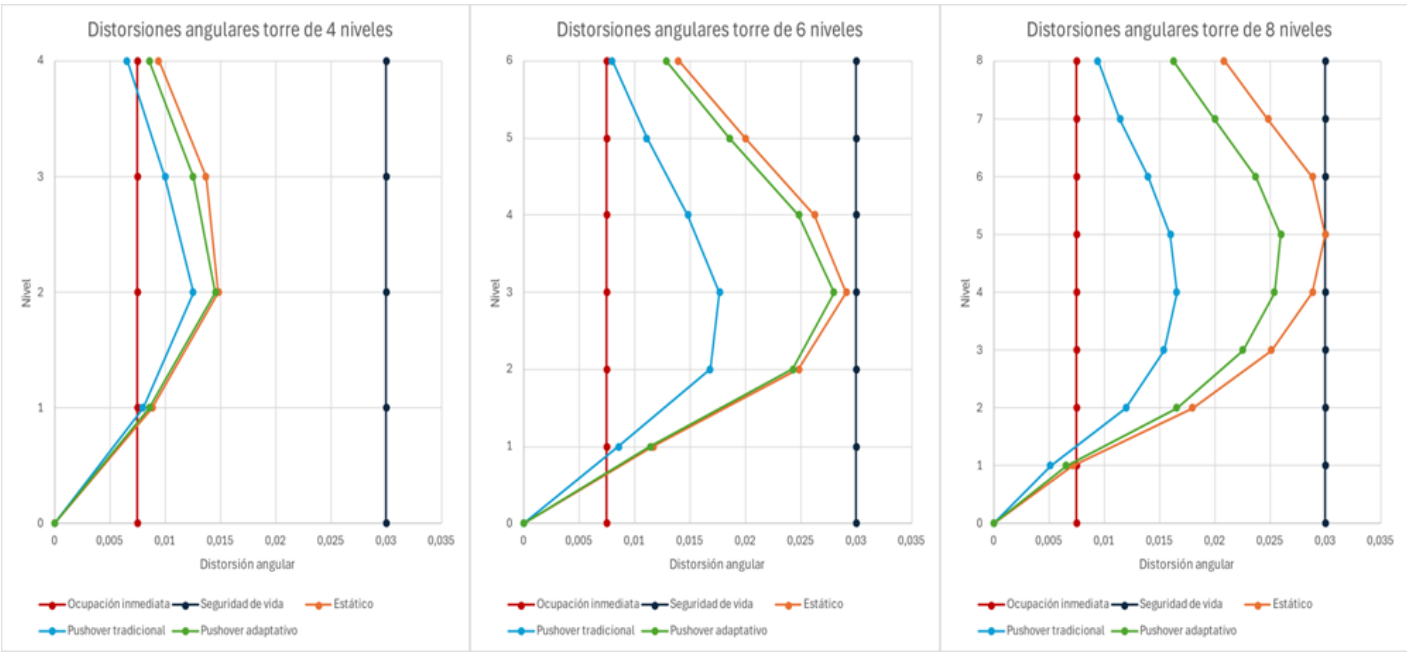
Fig 6: Comparación de las curvas pushover en la torre de 8 niveles.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la torre de 8 niveles, el método adaptativo destaca por mantener las distorsiones dentro de los límites de seguridad de vida. En cambio, el método tradicional supera este límite en niveles superiores, lo que indica un desempeño menos favorable para estructuras altas.

Fig 7: Distorsiones angulares en las torres.



Fuente: Elaboración propia.

En el estudio presentado, la comparación entre los métodos ***pushover*** tradicional y adaptativo para el análisis sísmico de torres de acero permite identificar cuál es más preciso para predecir el comportamiento real de las estructuras bajo sismos. Esta información es crucial para que ingenieros y diseñadores tomen decisiones fundamentadas en evidencia, incrementando la seguridad estructural de edificios de uso común como oficinas y residencias. Además, la validación de estos métodos frente a registros reales de sismos, como el ocurrido en México en 2017, refuerza la aplicabilidad social de la investigación, ya que responde a necesidades reales de la población expuesta a riesgos sísmicos (Chopra & Goel, 2002; Krawinkler & Seneviratna, 1998).

Se compara métodos tradicionales y adaptativos para el análisis pushover de torres de acero, tiene un impacto significativo tanto en la sociedad como en el medio ambiente, al contribuir a la mejora de la seguridad estructural y la eficiencia en el diseño sísmico. En regiones propensas a terremotos, garantizar que las edificaciones puedan soportar

cargas sísmicas sin colapsar es fundamental para proteger vidas humanas y reducir pérdidas económicas (FEMA 356, 2000; Vamvatsikos & Cornell, 2002). Al evaluar y validar métodos más precisos para predecir la respuesta no lineal de estructuras, este trabajo aporta herramientas que permiten a ingenieros y diseñadores optimizar la resistencia y ductilidad de las torres de acero, minimizando riesgos durante eventos sísmicos (Medina & Krawinkler, 2003).

Desde la perspectiva social, el uso de métodos adaptativos, que muestran resultados más cercanos a análisis dinámicos complejos, puede traducirse en estructuras más seguras y confiables. Esto fortalece la resiliencia de las comunidades, especialmente en zonas urbanas con alta concentración de edificaciones metálicas, y fomenta la confianza pública en las normativas y prácticas de construcción (Fajfar, 2000; FEMA P-695, 2009). Además, la optimización del diseño estructural puede reducir costos innecesarios, facilitando el acceso a viviendas y edificios comerciales que cumplan con altos estándares de seguridad sísmica (PEER, 2010).

En cuanto al impacto ambiental, la mejora en la precisión del análisis estructural contribuye a un uso más eficiente de los materiales de construcción, evitando sobredimensionamientos y desperdicios de acero. Esto reduce la huella de carbono asociada a la producción y transporte de materiales, promoviendo prácticas de construcción más sostenibles (Ding et al., 2016; Goggins et al., 2010). Asimismo, estructuras mejor diseñadas tienen mayor durabilidad y requieren menos reparaciones tras eventos sísmicos, disminuyendo la generación de residuos y la necesidad de recursos adicionales para reconstrucción (Asgarian & Shokrgozar, 2009; Brundtland Commission, 1987).

Este trabajo no solo avanza en el campo técnico del análisis estructural, sino que también promueve beneficios sociales y ambientales al facilitar la construcción de edificaciones más seguras, económicas y sostenibles. Su aplicación práctica puede contribuir a ciudades más resilientes y a una gestión responsable de los recursos naturales, aspectos clave para el desarrollo sostenible y la protección de las comunidades frente a desastres naturales.

CONCLUSIONES

Este trabajo compara el comportamiento de una torre de acero de 4, 6 y 8 niveles bajo análisis ***pushover*** utilizando los métodos tradicional y adaptativo. Se observa que el método tradicional alcanza una mayor resistencia inicial. El método adaptativo, aunque alcanza un cortante basal menor, permite alcanzar desplazamientos mayores.

Los resultados de las curvas pushover muestran que el método adaptativo es más conservador que el tradicional. Mientras el tradicional alcanza valores de cortante basal mayores, tiende a concentrar el daño en niveles específicos, particularmente en estructuras altas. El adaptativo, por su parte, redistribuye mejor las fuerzas y permite un mayor control de los desplazamientos antes del colapso, lo que lo hace más adecuado para diseños en zonas como México.

El análisis tiempo-historia sigue de cerca a ambos métodos en las primeras etapas, pero captura mejor las variaciones dinámicas y la disipación de energía. Las oscilaciones observadas son resultado de la evaluación de la respuesta estructural bajo un registro sísmico real.

En las gráficas de distorsiones angulares, el método adaptativo demuestra una distribución más uniforme de las deformaciones en comparación con el tradicional, que concentra mayores distorsiones en los niveles superiores. Esto es especialmente relevante para estructuras de 6 y 8 niveles, donde el adaptativo mantiene las deformaciones dentro de los límites normativos de seguridad de vida, mientras que el tradicional se acerca o supera estos límites.

Los resultados sugieren que el método adaptativo ofrece una representación más precisa del comportamiento no lineal, sugiriendo una mayor capacidad para predecir el colapso bajo cargas sísmicas. A futuro, el método adaptativo podría ser una herramienta clave en el diseño de estructuras sismorresistentes más complejas y seguras.

El impacto social de la investigación en ingeniería estructural se refleja en la protección de vidas humanas, la reducción de pérdidas materiales, la promoción de la sostenibilidad y la mejora de la calidad de vida. Además, fortalece la cultura de prevención y resiliencia ante desastres, y contribuye a la actualización de normativas y la formación de profesionales mejor preparados para enfrentar los retos de la sociedad contemporánea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. ***Journal of Earthquake Engineering, 8***(4), 497–522. https://doi.org/10.1080/13632460409350498

Asgarian, B., & Shokrgozar, H. R. (2009). BRBF response modification factors. ***Journal of Constructional Steel Research, 65***(2), 290-298. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.08.002

Brundtland Commission. (1987). "Our Common Future." United Nations.

Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2004). A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33***(8), 903–927. https://doi.org/10.1002/eqe.380

De'Nan, F., Lau, J. S., Ounahe, A. M., Kamela, M. I., & Hashim, N. S. (2023). Stability Consideration in Design of Steel Structures: A Review. In Electronic Journal of Structural Engineering, 33 (2), pp. 27–32). Department of Civil and Environmental Engineering. https://doi.org/10.56748/ejse.234142

Ding, T., Xiao, J., Tam, V. W. Y., & Wang, J. (2016). Life cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates in China. ***Resources, Conservation and Recycling,*** 118, 43-52. https://doi.org/10.1533/9780857096906.4.569

Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. ***Earthquake Spectra, 16***(3), 573-592. https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1193/1.1586128

FEMA 356. (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings." Federal Emergency Management Agency.

FEMA P-695. (2009). "Quantification of Building Seismic Performance Factors." Federal Emergency Management Agency.

Goggins, J., Keane, T., & Kelly, A. (2010). The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland. ***Energy and Buildings, 42***(5), 735-744. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.013

Jalilkhani, M., Ghasemi, S. H., & Danesh, M. (2020). A multi-mode adaptive pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of RC moment-resisting frames. ***Engineering Structures***, 213. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110528

Krawinkler, H., & Seneviratna, G. D. P. K. (1998). "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation." ***Engineering Structures, 20***(4-6), 452-464. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8

Kuria, K. K., & Kegyes-Brassai, O. K. (2023). Pushover Analysis in Seismic Engineering: A Detailed Chronology and Review of Techniques for Structural Assessment. ***Applied Sciences, 14***(1), 151. https://doi.org/10.3390/app14010151

Llanes-Tizoc, M. D., Reyes-Salazar, A., Bojorquez, E., Bojorquez, J., Lopez-Barraza, A., Rivera-Salas, J. L., & Gaxiola-Camacho, J. R. (2019). Local, story, and global ductility evaluation for complex 2D steel buildings: Pushover and dynamic analysis. ***Applied Sciences (Switzerland), 9***(1). https://doi.org/10.3390/app9010200

Medina, R. A., & Krawinkler, H. (2003). "Seismic demands for nondeteriorating frame structures and their dependence on ground motions." PEER Report 2003/13, University of California, Berkeley. https://www.proquest.com/openview/e9ecf5000e2c12a4d9a1a859d9d00c15/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y

PEER. (2010). "Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings." Pacific Earthquake Engineering Research Center. https://store.ctbuh.org/PDF_Previews/Books/PBSDGuide_2017_Preview.pdf

Rahmani, A. Y., Bourahla, N., Bento, R., & Badaoui, M. (2019). Adaptive upper-bound pushover analysis for high-rise moment steel frames. ***Structures,*** 20, 912–923. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.006

Rofooei, F., Rofooei, F. R., Attari, N. K., Rasekh, A., & Shodja, A. H. (2007). Adaptive pushover analysis. ***In Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 8(***3).

Rooshenas, A. (2020). Comparing pushover methods for irregular high-rise structures, partially infilled with masonry panels. ***Structures,*** 28, 337–353. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.073

Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). "Incremental dynamic analysis." ***Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31***(3), 491-514. https://doi.org/10.1002/eqe.141

Yin, Y., Wang, S., & Fang, Z. (2019). Verification of pushover analysis for a long-span steel truss structure. ***Journal of Vibroengineering, 21***(2). https://doi.org/10.21595/jve.2018.19145