

# CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN DE POSTES DE ACERO ANTE DEMANDAS DE VIENTO<sup>1</sup>

Edgar Tapia-Hernández<sup>2</sup>

Resumen: En este artículo se discuten los resultados de un estudio analítico que evalúa la respuesta inelástica de postes de acero ante demandas laterales de viento. Se realizaron análisis ante carga estática monótona creciente de diez postes con alturas entre los 10 m hasta los 30 m. Los análisis inelásticos se realizaron ante tres patrones de carga mediante el programa *OpenSees* considerando modelos detallados con secciones discretizadas con fibras. A base de los resultados, se propuso una deformación límite de diseño para el estado límite de servicio.

**Palabras clave:** deformación, estado límite de servicio, fluencia, postes de acero, cargas de viento.

## DEFORMATION CAPACITIES OF STEEL POLES UNDER LATERAL DEMANDS

Abstract: This paper discusses the results of an analytical study aimed at evaluating the inelastic response of steel poles under lateral wind loads. Pushover analyses of ten steel poles from 10 m to 30 m in height were performed. Nonlinear analyses were carried out under three lateral load patterns using the program *OpenSees* with detailed models having a cross-section discretized with fibers. Based on the results, a design limit deformation was proposed for the serviceability limit state.

**Keywords:** deformation, serviceability state limit, steel poles, wind loads, yielding.

### INTRODUCCIÓN

En años recientes, los fenómenos meteorológicos han ocasionado colapsos totales o parciales de postes metálicos de distribución de energía eléctrica, iluminación y telecomunicaciones por demandas laterales de viento intenso (Figura 1). Por ejemplo, se estima que 1,800 postes fueron dañados durante el Huracán Odile en Baja California, México, en septiembre del 2014 (García, 2014). Igualmente, se han presentado múltiples daños en el sistema de iluminación y distribución de energía eléctrica en los huracanes Wilma, Rita y Katrina en 2005, Ike y Gustav en 2008 y Earl y Alex en el 2010 (Tapia e Ibarra, 2015).

En la actualidad, los reglamentos especializados disponibles en México establecen el comportamiento que debe satisfacer una estructura sin especificar el procedimiento para que el diseñador pueda conseguirlo; de hecho se limitan a establecer la obtención de las demandas y/o delimitan el comportamiento esperado. Así que los postes de acero se diseñan siguiendo diferentes criterios establecidos por el diseñador, el productor de postes o las condiciones del mercado e incluso adaptando los criterios de diseño de edificios.

Sin embargo, los postes constituyen un sistema estructural con peculiaridades muy específicas en comparación con otras estructuras. Por ejemplo, en el diseño de estas estructuras es imprescindible considerar conceptos de estabilidad, la teoría de desplazamientos grandes que incluyan los efectos de segundo orden y las condiciones locales de fabricación, traslado y erección, puesto que estas pueden influenciar el diseño.

Usualmente, con el propósito de prevenir deformaciones excesivas, la deformación lateral de diseño de los postes se restringe entre un 5% y 15% de la altura total del poste dependiendo del reglamento o el criterio del diseñador. Sin embargo, no existe un límite preciso de la deformación en el estado límite de servicio ni un criterio único que

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 24 de agosto de 2016 y aceptado para publicación el 10 de septiembre de 2016.

<sup>2</sup> Profesor – investigador, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, Av. San Pablo, 180, CP 02200, México, D.F. Email: etapiah@azc.uam.mx

contribuya a la toma de decisiones conservadoras en la etapa de diseño con el propósito de asegurar el comportamiento adecuado de las estructuras ante demandas laterales de viento.

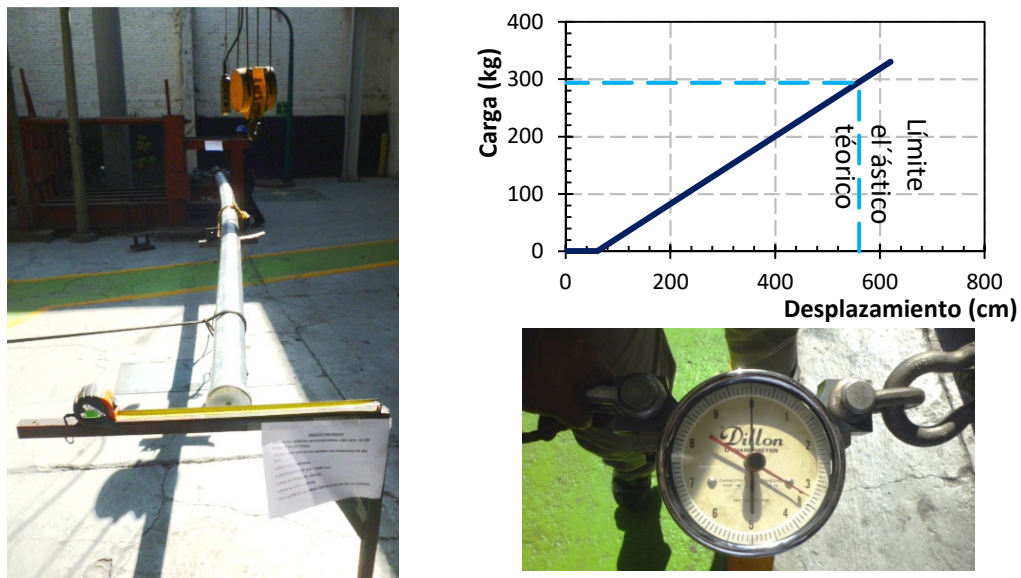


**Figura 1: Ejemplo de colapsos de postes de acero por viento intenso: a) Colapso de postes en subestación Santa Cruz; b) Colapso de ocurrido en enero 2009.**

En este artículo se desarrolla un estudio analítico sobre la respuesta inelástica de postes de acero sometidos a viento intenso. Los postes se diseñaron siguiendo prácticas de diseño locales con dimensiones y equipos típicos para satisfacer los criterios de diseño de la reglamentación vigente. Los postes se analizaron ante carga estática monótona creciente con el propósito de establecer demandas de deformación razonables que contribuyan a proteger la vida y los bienes de inversión durante demandas de viento intenso.

### PRÁCTICA DE DISEÑO DE LOS POSTES

En México es común que la entrega de un lote de postes de acero esté acompañada ó condicionada de pruebas experimentales de al menos un poste para verificar que el comportamiento del poste sea adecuado (Figura 2). Esas pruebas experimentales no superan el límite de fluencia, puesto que el fabricante pocas veces está dispuesto a perder la inversión que representa una prueba destructiva. Por esta razón, la deformación al inicio de la fluencia se reduce a límites teóricos desde la etapa de diseño que están definidos por factores de reducción que aseguran que el poste no se dañe.



**Figura 2: Ejemplo de una prueba no destructiva de un poste A13.**

De hecho, la deformación permisible en el estado límite de servicio conforme a la Especificación para Postes de Acero de la Comisión Federal de Electricidad de México (CFE-J6200, 2002) es función del tipo de poste, pero no es función de la longitud del elemento (Tabla 1). Esto podría significar que el límite propuesto en esta norma no está basado en un estudio analítico formal sino representa una referencia del comportamiento estructural deseable.

**Tabla 1: Límite de deformación según la Especificación CFE-J6200 (2002)**

Tipo de poste	Longitud del poste (mm)	Revisión del estado límite de servicio	
		Deformación (mm)	Distorsión (%)
A13	10,300	560	5.44
A14	11,500	680	5.91
A15	12,700	820	6.47
A17	14,500	980	6.76

Aunado a lo anterior, la estrategia de diseño de los postes de acero es muy variada. Algunos postes son fabricados a partir de un diseño estructural formal que cumple con los requisitos del reglamento local, pero muchos otros son suministrados con base a un diseño tipo de un catálogo con fines comerciales. Esas deficiencias del diseño de los postes puede incluir factores de seguridad incorrectos, carencias en el sistema de anclaje, velocidades y coeficientes de diseño por viento inapropiados, soldaduras escasas y deficientes procesos de fabricación (Reese, 2011).

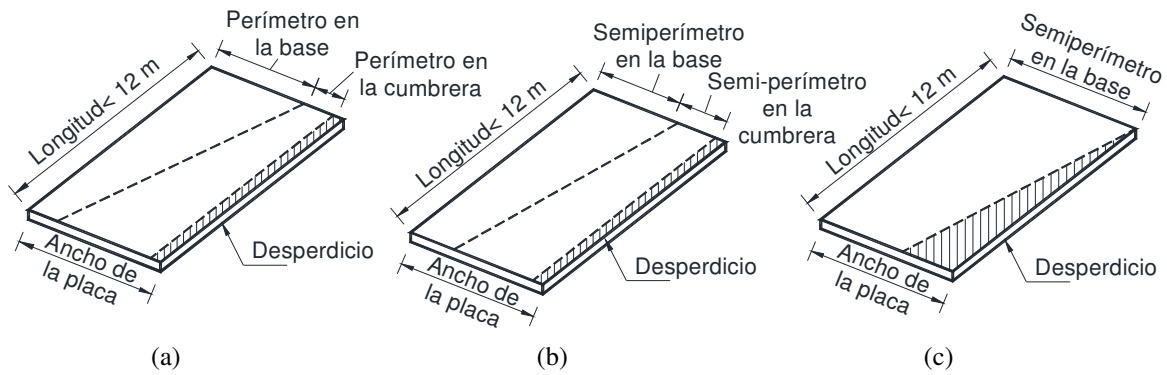
### PROCESO DE FABRICACIÓN

El principal objetivo del proceso de manufactura de los postes de acero, que se fabrican usando placas de 0.48 mm hasta 12.7 mm, es reducir al máximo el desperdicio. Por esta razón, la condicionante crítica del análisis, diseño y detallado de los postes debe ser obtener las estructuras más económicas (menor peso) y lo más compatibles posible con la práctica de fabricación y el equipo disponible en cada planta (Figura 3).



**Figura 3: Detalles de la práctica en México para la fabricación de postes de acero: a) Detalle del corte de la placa; b) Moldeado del poste con prensa hidráulica.**

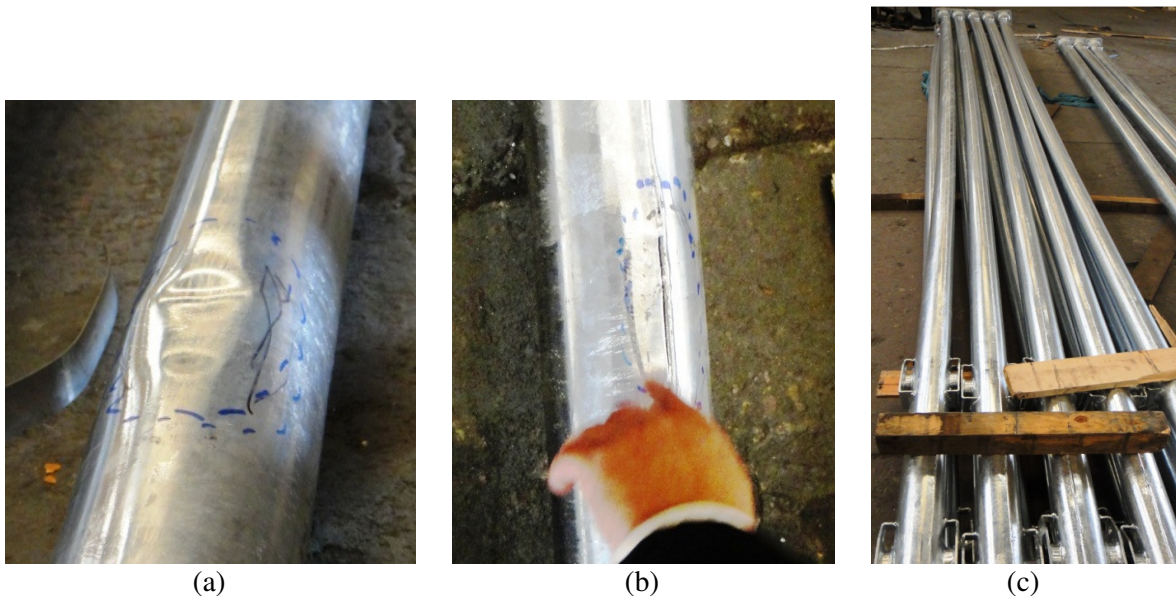
Debido a que en estructuras metálicas el precio de venta es directamente proporcional al peso, las empresas fabricantes de postes dedican muchos esfuerzos en simplificar el proceso de fabricación con el mínimo desperdicio en el corte de las placas. Así, el poste se forma de una placa trapezoidal (Figura 3a) y dependiendo de sus dimensiones puede formarse de una sola cuña unida mediante un único cordón de soldadura longitudinal o por dos o más cuñas con los cordones de soldadura que sean necesarios (Figura 4). Esta práctica reduce el desperdicio y, por lo tanto, el costo del poste.



**Figura 4: Configuraciones típicas de cortes en la práctica en México: a) Corte de dos postes; b) Corte de un poste formado por dos cuñas; c) Corte de una cuña de un poste formado por dos cuñas.**

Una vez cortado, la placa se dobla en un prensa hidráulica (Figura 3b) y finalmente se une mediante una soldadura a lo largo de la altura total del poste. Debido a que los postes de acero estarán sometidos a los efectos de la intemperie, es común que los postes sean protegidos contra corrosión cuando están proyectados para un ambiente húmedo y/o con contaminación atmosférica. Esta protección representa un incremento del 30 % del costo final del poste, por lo que el proceso se efectúa únicamente si se tiene certeza de que el poste estará expuesto a un ambiente corrosivo. El método más común para proteger el poste es el galvanizado por inmersión en caliente.

Durante el proceso de galvanizado, es común que los postes sufran daños en el traslado (Figura 5a), se noten imperfecciones en la soldadura (Figura 5b) y que dadas las altas temperaturas del proceso y el espesor delgado de las placas se presenten deformaciones permanentes (Figura 5c). Por esta razón, es común que el poste sea sometido nuevamente a un proceso de enderezado en prensas hidráulicas antes de la entrega final.



**Figura 5: Daño típico de postes durante el traslado a la galvanizadora: a) Abolladura durante el traslado; b) Daño en el cordón de soldadura; c) Deformación por temperatura.**

Por motivos de seguridad, la dimensión de traslado está restringida a una longitud de 12,000 mm en México. Por esto, cuando se diseñan postes muy altos usualmente se fabrican en tramos con longitudes menores a los 12,000 mm que se unen mediante traslapes. En la práctica esos traslapes (Figura 6) se diseñan con una longitud mínima  $L$  de 1.05 veces el diámetro interior, con el propósito de asegurar una adecuada transmisión de las cargas por fricción entre las secciones que conforman el poste.



**Figura 6: Traslape típico de postes de acero en México: a) Vista esquemática del traslape; b) Traslape en poste de alta tensión.**

## MODELOS EN ESTUDIO

En esta investigación se diseñaron diez postes de 10 m a 30 m de altura siguiendo estrictamente los requisitos del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-04) y las condiciones de demanda del Capítulo de Viento del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-CFE-08). Las estructuras estudiadas son representativas de postes para luminarias usadas en México.

En la Tabla 2 se muestran las secciones de diseño finales de los postes de esta investigación. Es posible consultar más información sobre el procedimiento de diseño y otras características de los postes en Flores (2014). El criptograma de los modelos sigue el criterio de identificación  $P_{xxT_y}$ , donde  $P$  indica que la estructura es un poste;  $xx$  indica la altura del poste en metros y  $y$  (precedido por una letra  $T$ ) identifica la cantidad de secciones que conforma el poste.

**Tabla 2: Características de los postes diseñados.**

Modelo	Altura del poste, $L_p$ (mm)	Diámetro inferior (mm)	Diámetro en la cumbre (mm)	Espesor de la placa (mm)	Cantidad de secciones del poste	1er. y 2do. periodo fundamental (seg)	3er. y 4do. periodo fundamental (seg)	Deformación de diseño en la cumbre (cm)
P10T1	10,000	110	90	4.76	1	0.928	0.162	25.51
P12T1	12,000	150	110	4.76	1	0.944	0.179	25.60
P15T2	15,000	160	110	4.76	2	1.335	0.258	55.31
P18T2	18,000	185	120	4.76	2	1.707	0.326	94.88
P20T2	20,000	200	125	4.76	2	1.937	0.376	126.92
P22T2	22,000	250	140	4.76	2	1.840	0.372	116.45
P24T3	24,000	290	150	4.76	3	1.863	0.387	121.9
P26T3	26,000	310	170	4.76	3	2.060	0.419	151.04
P28T3	28,000	320	185	4.76	3	2.330	0.464	197.34
P30T3	30,000	350	190	4.76	3	2.422	0.494	220.64

Los postes se diseñaron y analizaron utilizando el programa de análisis estructural SAP2000 (CSI, 2009) con modelos tridimensionales considerando: a) el peso del poste, la batería, luminarias y paneles solares, y b) la presión del viento actuando lateralmente en el cuerpo del poste y en el equipo. Las características de los accesorios considerados en este estudio siguen la tendencia de los empleados en la actualidad (Tabla 3). Los modelos de los postes están conformados por un conjunto de elementos de 20 cm de longitud para reproducir adecuadamente los efectos de segundo orden típicos de elementos cargados axialmente.

**Tabla 3: Características de los accesorios.**

Accesorio	Peso (kN)	Área expuesta (m <sup>2</sup> )	Características
Luminaria	696.3	0.121	Luz emitida por diodo. 18 W.
Batería	951.3	0.090	12V, 1200 Ah @10hr
Panel solar	147.1	0.252	185 W. Monorristalino. 2x120W

En la práctica, la cantidad de luminarias de un poste depende de la altura de la estructura y su ubicación. Por esta razón, en este estudio se consideraron más luminarias y más paneles solares en los postes de mayor altura, puesto que usualmente son considerados para iluminar una superficie más grande. La cantidad de accesorios usados en cada modelo se muestran en la Tabla 4.

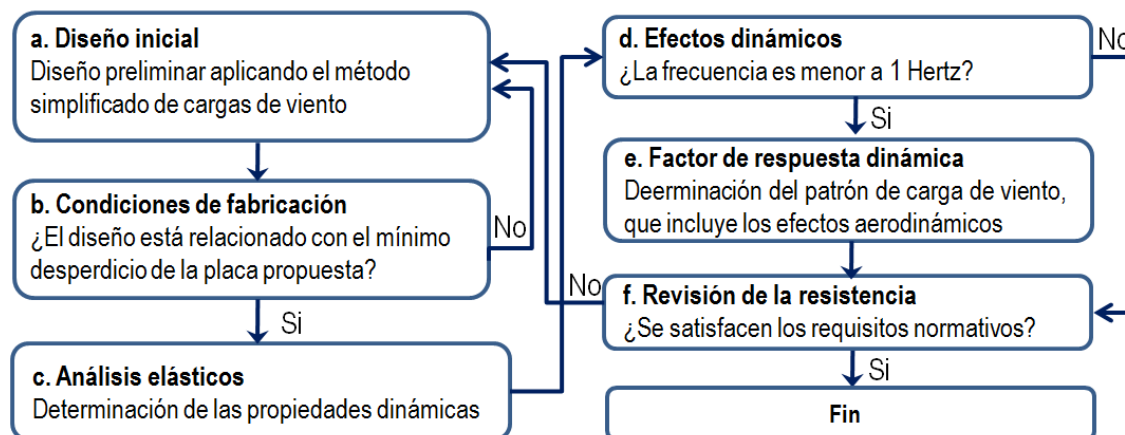
**Tabla 4: Cantidad de accesorios por poste.**

Modelo	Luminaria	Batería	Paneles solares	Peso (kN)
P10T1, P12T1, P12T1, P15T2, P18T2, P20T2	1	1	1	1,794.7
P22T2	4	1	1	3,883.6
P24T3, P26T3, P28T3	4	1	2	4,030.7
P30T3	6	1	3	5,570.4

### CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Los postes de acero se diseñaron variando el diámetro y el espesor de la placa de manera que la sección transversal propuesta debe satisfacer: a) las demandas normativas laterales, y b) también debe estar relacionada con el mínimo desperdicio como se discute con mayor detalle en Flores (2014).

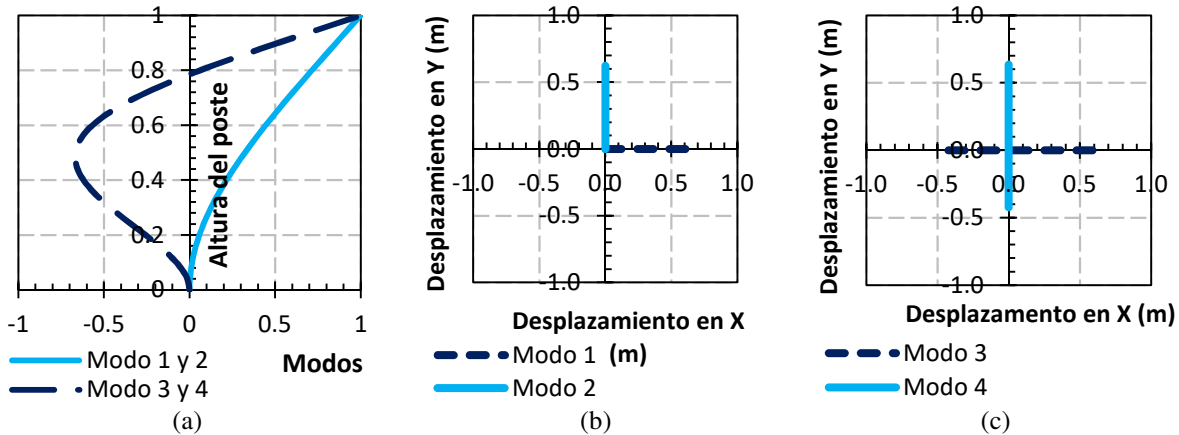
Aunado a lo anterior, los postes son estructuras susceptibles a los efectos aerodinámicos del viento dada su alta flexibilidad. Por esta razón, en el procedimiento de diseño fue necesario considerar la estrategia que se describe en la Figura 7.



**Figura 7: Metodología empleada en el diseño de los postes.**

En la metodología (Figura 7), la determinación de la resistencia de la sección propuesta del poste se realiza mediante los lineamientos de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción para Estructuras Metálicas (NTCM-04) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal mexicano (RCDF-04). Por otra parte, la determinación de las demandas laterales se estableció mediante los criterios del Capítulo de Viento del Manual de Obras Civiles (MOC-CFE-04). En el diseño de los postes (cuadros a y f en la Figura 7), los efectos de segundo orden relacionados con la aplicación de la carga axial se incluyeron mediante métodos aproximados.

Los primeros dos modos acoplados en flexión se incluyeron también en la Tabla 2, mientras que la configuración de los modos se muestran en la Figura 8a. Dada la simetría del poste, la Figura 8 muestra un comportamiento muy similar entre los ejes principales de referencia (Figura 8b y 8c).

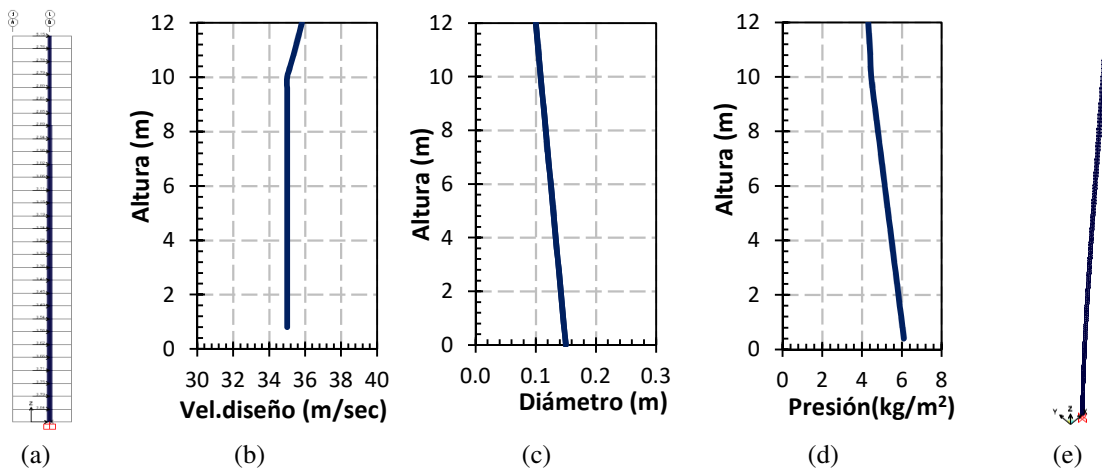


**Figura 8: Configuración típica de los primeros modos: a) configuración de una vista lateral; b) primer y segundo modo desde una vista superior; c) tercer y cuarto modo desde una vista superior.**

Nótese que en este estudio se ha supuesto que el equipo (baterías, paneles y luminarias) induce una excentricidad despreciable con respecto a la demanda lateral. Sin embargo, la presencia de equipos que no favorezcan que la presión del viento coincida con el centro de rigidez pueden cambiar la respuesta mecánica y aerodinámica del poste (Nguyen et al., 2015).

En el procedimiento de diseño, la presión del viento se obtuvo multiplicando la presión dinámica por factores que se definen por la configuración de la estructura y la interacción de las fluctuaciones dinámicas con la respuesta del poste conforme a la filosofía de los reglamentos vigentes (Tapia y Sordo, 2012). El cálculo de los coeficientes de presión se simplifican en los reglamentos mediante factores aerodinámicos que consideran la naturaleza dinámica de la presión del viento y la respuesta de la estructura lo que resulta en una fuerza estática equivalente (Tapia e Ibarra, 2015a). De esta manera, las estructuras diseñadas (Tabla 1) satisfacen las demandas impuestas y satisfacen estrictamente los criterios de los reglamentos vigentes.

La deformación máxima obtenida en los análisis elásticos se incluye también en la Tabla 1. Con el propósito de ejemplificar el procedimiento empleado, los detalles de diseño del poste P12T1 se muestran en la Figura 9.



**Figura 9: Características de diseño del modelo P12T1: a) modelo en 3D; b) velocidad de diseño,  $V_D$ ; c) variación del diámetro en la altura; d) patrón lateral normativo; e) configuración deformada.**

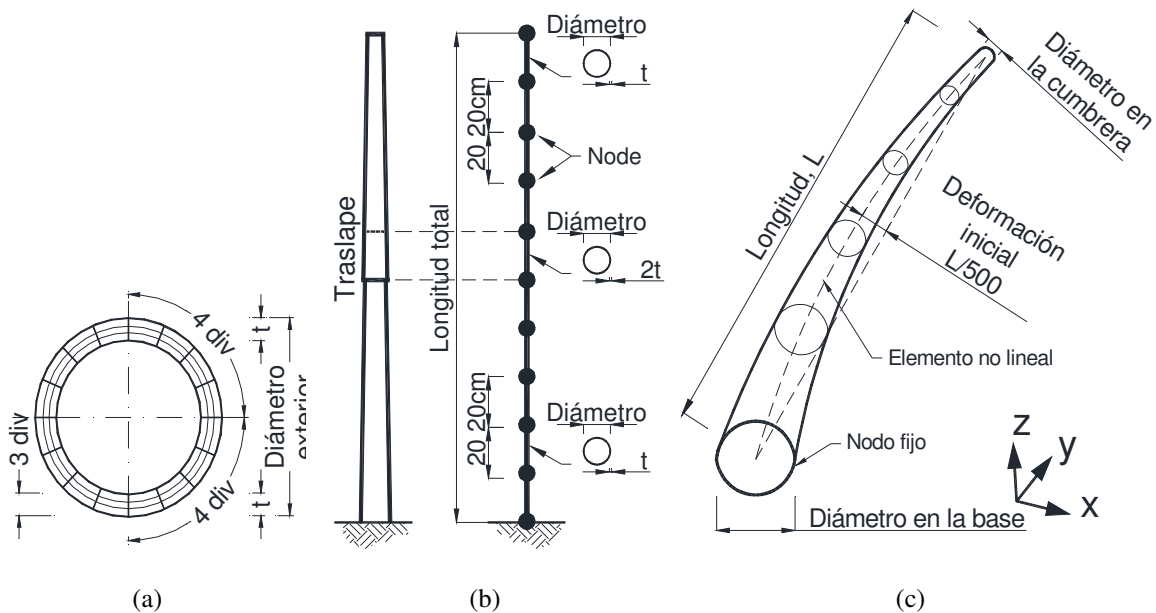
## ANÁLISIS INELÁSTICOS

Se realizaron análisis inelásticos ante carga estática monótona creciente para estimar la capacidad estructural y las características de la curva de capacidad. Usualmente, la aplicación de análisis no lineales (estáticos y dinámicos) ante demandas eólicas no es común en el análisis y diseño de este tipo de sistemas estructurales debido a que las

acciones por viento requieren que las estructuras permanezcan en el intervalo elástico. De hecho, la aplicación de análisis inelásticos es considerada únicamente para análisis que consideran excitaciones sísmicas, dado que en la filosofía de diseño sísmico se permite que las estructuras incurran en el intervalo inelástico (Tapia *et al.*, 2016a). Sin embargo, en este estudio se realizaron análisis ante carga estática monótona creciente con el propósito de evaluar su respuesta de los postes ante cargas laterales.

Los análisis no lineales tridimensionales se realizaron usando OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2006). Los segmentos que conforman los postes se modelaron mediante elementos que son capaces de incluir la plastificación a lo largo de la sección transversal. La sección transversal se subdividió en fibras con tres divisiones en la dirección de la circunferencia y 16 divisiones en la dirección radial como se muestra en la Figura 10a.

En el modelo se agregó una restricción torsional en los subelementos para garantizar que la respuesta esté regida por el pandeo lateral fuera del plano. Además, los postes se modelaron con subelementos de 20 cm de longitud para incluir los efectos de segundo orden como se propuso en los análisis elásticos en la etapa de diseño (Figura 10b). Dependiendo de las necesidades del modelo, el traslape se modeló mediante elementos que tenían una pared con doble espesor de la placa (Figura 10b).



**Figura 10: Consideraciones del modelo inelástico: a) discretización de la sección; b) subelementos inelásticos; c) imperfección inicial.**

Se supuso que el acero tenía las siguientes características  $F_y = 345$  MPa,  $E = 200,000$  MPa y  $G = 77$  GPa. El acero fue modelado con el material uniaxial Giuffre-Menegotto-Pinto que considera endurecimiento isotrópico y que permite simular el efecto Bauschinger con el propósito de incluir una representación más realista de la respuesta del material. Así, los modelos predicen en una forma realista la respuesta inelástica del elemento de acero. De hecho, se ha encontrado una similitud razonable entre los modelos en *OpenSees* (Mazzoni *et al.*, 2006) y las pruebas experimentales para predecir la capacidad de elementos de acero sujetos a flexo-compresión (Uriz y Mahin, 2008). Otros detalles de la validación del modelo analítico pueden ser consultados en Tapia *et al.* (2016).

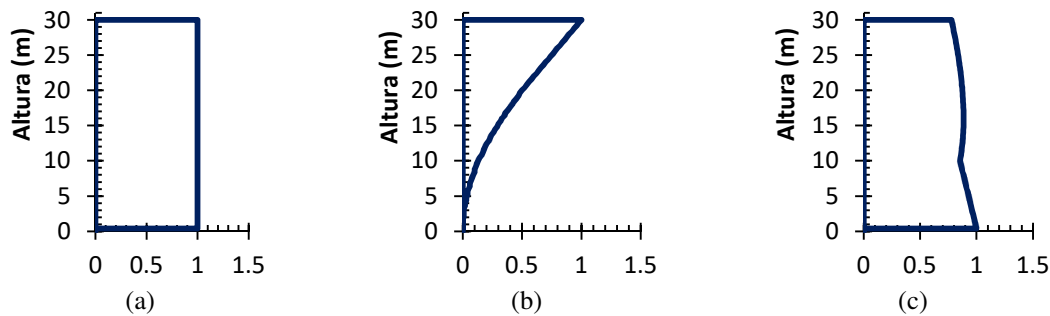
En particular, los postes son estructuras muy flexibles que pueden desarrollar grandes deformaciones ante carga laterales y, por consiguiente, se desarrolla un momento secundario que puede representar una parte importante del momento último de diseño. Las tres fuentes que contribuyen a incrementar el momento secundario son: a) una imperfección inicial, b) una excentricidad en la aplicación de las cargas axiales, y c) esfuerzos residuales en la sección transversal. En esta investigación, con el propósito de incluir condiciones realistas y analizar la condición más crítica, los modelos de los postes incluyen una imperfección inicial con forma parabólica en el centro del claro igual a  $L/500$  como se muestra en la Figura 10c.



## PATRONES DE CARGA LATERAL

Los patrones de carga considerados en el estudio fueron: a) un patrón rectangular, b) un patrón modal basado en el modo fundamental, y c) el patrón normativo obtenido de la reglamentación vigente. En la Figura 11 se muestran los patrones normalizados para el modelo P30T3 con el propósito de ejemplificar el procedimiento empleado.

En la determinación de las demandas normativas, se asumió que los postes estarían ubicados en un terreno con una longitud de rugosidad igual a  $z_0 = 0.30$  m y una velocidad regional de  $u_b = 39$  m/s con una velocidad media a 10 m de altura, un terreno con pocas o nulas obstrucciones y un periodo de retorno de 50 años.



**Figura 11: Patrones laterales de carga considerados en este estudio: a) patrón rectangular; b) patrón modal; c) patrón normativo.**

En el análisis se usó un sólo paso con un control de carga para las cargas gravitacionales: peso propio de la estructura y equipo (luminarias, baterías y paneles solares). Posteriormente, el tiempo se reinicia a 0.0 y la magnitud de la carga aplicada se mantiene constante. Finalmente, se aplican los patrones de carga estáticos sobre el cuerpo del poste y sobre los accesorios como una carga incremental. Los resultados de los análisis se emplearon para definir curvas de capacidad en términos de la fuerza horizontal total (cortante basal) contra la distorsión global en porcentaje (desplazamiento en la cumbre dividido entre la altura del poste).

## CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN

En la

Figura 12 se muestran las curvas de capacidad de los análisis inelásticos que se obtuvieron de los análisis en *OpenSees* (Mazzoni *et al.*, 2006). Los resultados indican un cambio de pendiente muy ligero en la fluencia, lo que es típico de curvas de estructuras modeladas con fibras.

Con base en los resultados, no se nota alguna dependencia entre la respuesta de las estructuras y la aplicación de los patrones de carga cuando los postes tienen poca altura. Sin embargo, el patrón modal es más crítico cuando se incrementa la altura de los postes. Al respecto, se observa que los patrones modales y rectangulares representan una configuración de carga hipotética y son sumamente difíciles de que puedan desarrollarse naturalmente debido a que el patrón de carga está estrechamente relacionado con el área sólida y la altura  $z$ . Por lo anterior, la discusión sobre la capacidad de deformación considerará los resultados evaluados en la curva de capacidad ante los patrones normativos.

Los resultados de deformación se estudiaron desde dos perspectivas: a) la distorsión reportada en los análisis elásticos que usualmente es considerada en un proceso típico de diseño de los postes, y b) la distorsión de fluencia  $\delta_y$  reportada en los análisis inelásticos que está relacionada con el estado límite de servicio. Las magnitudes se reportan en la Figura 12 y se resumen en la Tabla 5.

Como se muestra en la Figura 13, en general las distorsiones de la etapa de diseño obtenida mediante análisis inelásticos de cada poste (rectángulos) no envuelven la distorsión de fluencia obtenida de los análisis inelásticos (círculos). Esto implica que la capacidad de deformación que efectivamente pueden desarrollar los postes es mayor que la que se obtiene en análisis elástico ordinarios. Esto puede explicar la razón por la cual en pruebas experimentales, los postes usualmente satisfacen las demandas impuestas sin daño (Figura 2) y hace notar la

importancia de acortar las distancias entre el comportamiento previsto desde la etapa de diseño y el comportamiento que finalmente desarrollará la estructura, especialmente en el intervalo inelástico.

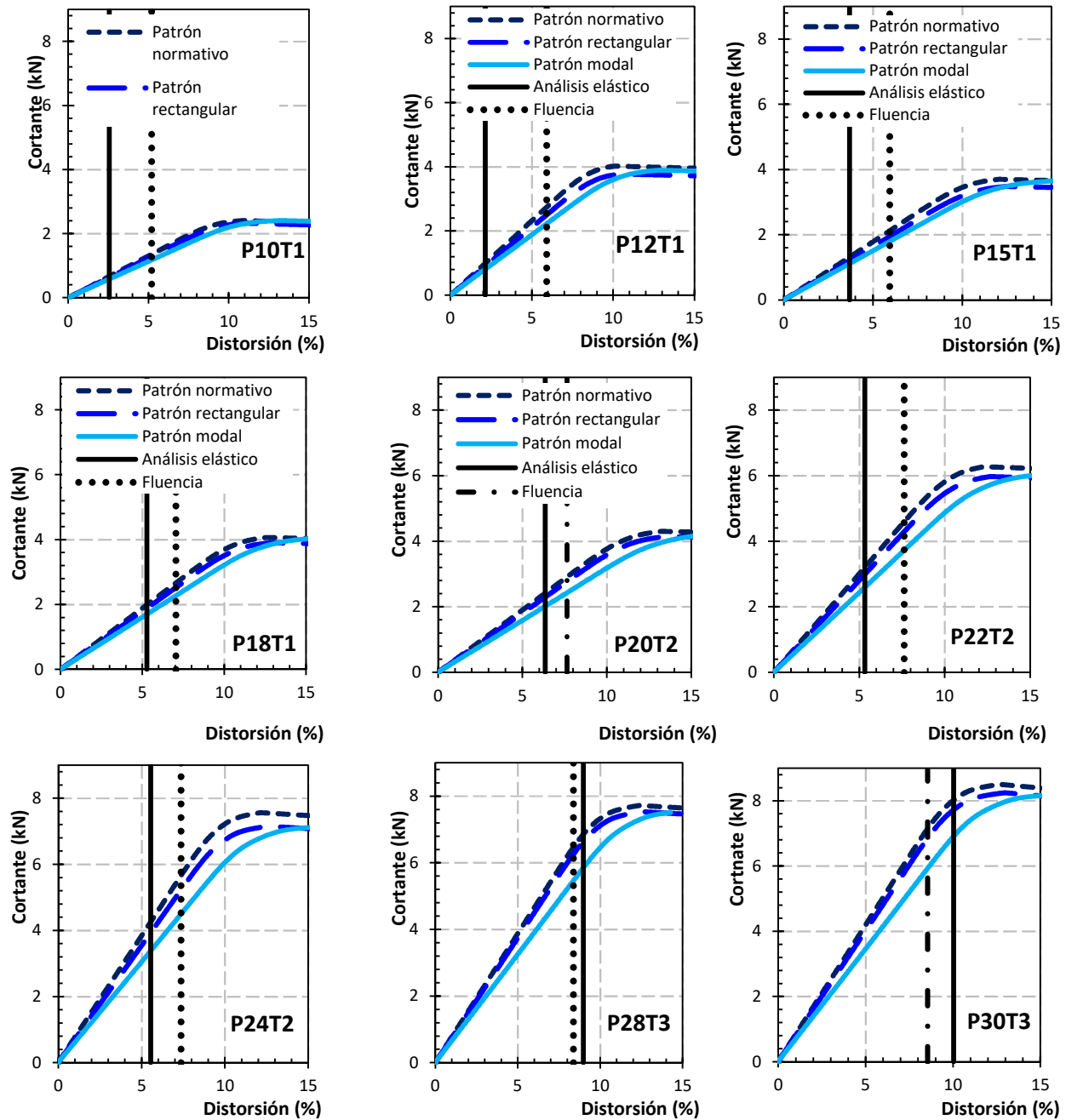
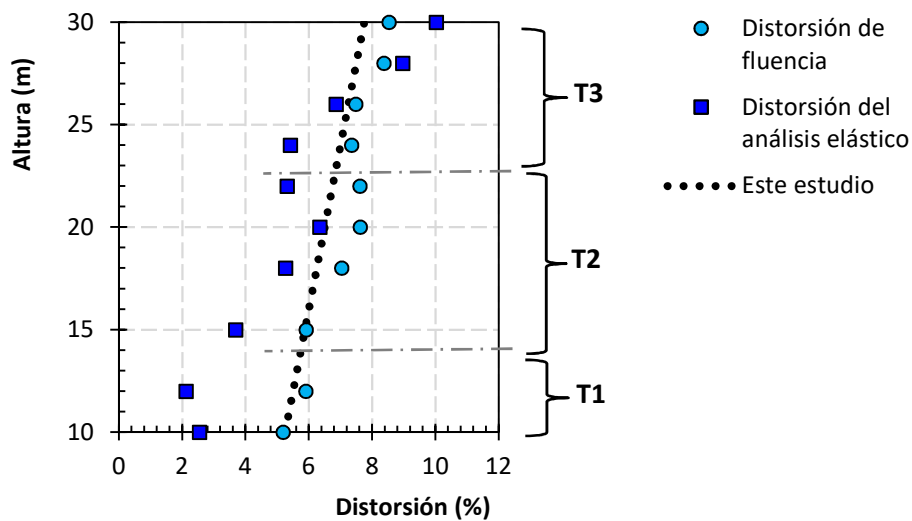


Figura 12: Curvas de capacidad.

**Tabla 5: Distorsiones obtenidas ante el patrón de carga normativo.**

Modelo	Etapa de diseño		Fluencia (análisis inelástico)	
	$\delta_{\text{diseño}}$ (%)	Paso	$\delta_y$ (%)	Paso
P10T1	2.55	1.037	5.19	2.076
P12T1	2.13	1.029	5.91	2.888
P15T2	3.69	1.007	5.92	1.614
P18T2	5.27	1.002	7.04	1.339
P20T2	6.35	1.003	7.63	1.202
P22T2	5.32	1.004	7.62	1.466
P24T3	5.42	1.009	7.35	1.469
P26T3	6.87	1.003	7.48	1.302
P28T3	8.97	1.002	8.37	1.185
P30T3	10.03	1.001	8.54	1.134



**Figura 13: Relación entre las distorsiones desarrolladas.**

Basado en los resultados, se realizó una interpolación lineal de las distorsiones globales obtenidas con el propósito de establecer una propuesta conservadora para predecir la capacidad de deformación, que se incluyó en la Figura 13 y que se define mediante la ecuación (1):

$$\delta_{perm}(\%) = 4 + L/8 \quad (1)$$

Al respecto, se hace notar que en los resultados (Figura 13) denotan una ligera influencia entre la capacidad de deformación y la cantidad de traslapes (T1, T2 y T3) que conforman el modelo. Por esto, considerar modelos de postes que ignoren los traslapes podría representar una respuesta poco realista. Finalmente, estos resultados hacen notar la importancia de realizar esfuerzos que mejoren la estimación del comportamiento de las estructuras, a partir de límites y herramientas simples desde la etapa elástica de diseño.

## CONCLUSIONES

En este artículo se discute un estudio analítico que evalúa la respuesta inelástica de postes de acero ante excitaciones de viento. Específicamente, la atención se centra en la capacidad de deformación en el estado límite de servicio con el propósito de proteger la vida y la inversión ante demandas de viento intenso.

A pesar de que los postes son estructuras relativamente sencillas, existe una gran variabilidad de las configuraciones e incertidumbres relacionadas con la caracterización exacta de las condiciones en el campo como la presión del viento atmosférico, las características físicas y geométricas de los postes, entre otras. En este estudio se

consideraron postes, equipos y prácticas de análisis, diseño y fabricación, que resultan en una buena representación de las características de estructuras existentes en la Ciudad de México.

La respuesta de los postes se evaluó mediante análisis inelásticos ante carga estática monótona creciente en modelos muy detallados que fueron analizados ante distintos patrones de carga: a) un patrón rectangular, b) un patrón modal, y c) un patrón normativo. Las principales contribuciones de esta investigación son las siguientes:

- Las curvas de capacidad obtenidas ante los patrones de carga considerados son muy similares cuando se estudian postes de poca altura ( $L < 18$  m). Sin embargo, ante el incremento de la altura de los modelos, el patrón de carga modal se vuelve más crítico y el patrón normativo representa la respuesta más conservadora.
- Aunque existen muchos posibles diseños de postes de acero, se ha hecho notar que algunos procedimientos de análisis y diseño que se basan únicamente en el proceso de fabricación y en el desperdicio de las placas son desfavorables.
- Con base en los resultados, la capacidad de deformación de los postes podría no ser adecuadamente estimada a base de análisis elásticos ordinarios siguiendo únicamente los lineamientos de los reglamentos vigentes. De hecho, se demostró que en algunos casos los postes podrían desarrollar una deformación sin daño permanente mayor a la estimada; sin embargo, también se hizo notar que esas capacidades inelásticas pueden ser difíciles de predecir con los criterios normativos y las prácticas de diseño vigentes. Esto hace notar la importancia de realizar esfuerzos que acorten la distancia entre el comportamiento que se predice en la etapa elástica de diseño y el comportamiento que efectivamente desarrolla la estructura, especialmente, en el intervalo inelástico de los postes de acero. Esto podría explicar la razón por la que en pruebas experimentales los postes usualmente satisfacen las demandas impuestas sin daño.
- En este estudio se propone una metodología que pretende predecir la capacidad de deformación para el estado límite de servicio que depende de la altura de los postes. Este procedimiento pretende contribuir a establecer límites normativos de deformación transparentes y conservadores que coadyuven a diseñar estructuras seguras y estables ante vientos intensos.

Finalmente, es valioso hacer notar que la participación activa de los profesionales involucrados en la fabricación, traslado, diseño, análisis y montaje de los postes es crucial para mejorar el desempeño estructural de este sistema estructural.

## REFERENCIAS

- CFE-J6200 (2002). "Postes de Acero Truncocónicos", Comisión Federal de Electricidad de México, Especificación Técnica.
- CSI (2009). "SAP2000 Analysis Software", *Computers and Structures*, Berkeley, California, EEUU.
- Flores, J.M. (2014). "Demandas de Rigidez Lateral de Postes Tronco-Piramidales de Acero ante Vientos Intensos", Proyecto terminal, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, México.
- García, K. (2014). "Este huracán, el más destructor en la historia de la red eléctrica", Artículo periodístico, *El Economista*, 22 de septiembre.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. and Fenves, G. (2006). "Open System for Earthquake Engineering Simulation, User Command-Language Manual", *Report NEES grid-TR 2004-21*, Pacific Earthquake Engineering Research, University of California, Berkeley, California.
- MOC-CFE-08 (2008). "Manual de Diseño de Obras Civiles. Capítulo de Diseño por Viento", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad, México.
- Nguyen C.H., Freda A., Solari G. and Tubino F. (2015). "Aeroelastic instability and wind-excited response of complex lighting poles and antenna masts", *Engineering Structures*, Vol. 85, pp. 264-276.

- NTCM-04 (2004). “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, décimo cuarta época, Tomo II, No. 103-Bis, Distrito Federal, México.
- RCDF-04 (2004). “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, décimo cuarta época, Tomo II, No. 103-Bis, Distrito Federal, México.
- Reese, B.R. (2011). “Design of sports lighting support structures – Will your structures perform to expectation?”, *Proceeding of the Structures Congress*, American Society of Civil Engineers. pp. 1269-1285.
- Tapia, E. y Sordo, E. (2012). “Patrones de carga reglamentarios para torres de transmisión de alta tensión sujetas a viento intenso”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 12, No. 2, pp. 219 - 232.
- Tapia, E. e Ibarra, S. (2015). “Demandas inelásticas en torres de transmisión ante viento intenso”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 142, No. 1-2, pp. 165 - 180.
- Tapia, E. e Ibarra, S. (2015a). “Perfiles normativos de demandas por viento intenso en estructuras esbeltas”, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 20, No. 1, pp. 71-100.
- Tapia E., Carrera S. y Del Rincón A. (2016). “Estudio paramétrico del modelado inelástico de contravientos de acero”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 94, pp. 49-74.
- Tapia-Hernández, E., Ibarra-González, S. y De-León-Escobedo, D. (2016a). “Collapse mechanisms of power towers under wind loading”, *Structure and Infrastructure Engineering*, pp. 1-17.
- Uriz, P. and Mahin, S. (2008). “Toward Earthquake-Resistant Design of Concentrically Braced Steel-Frames Structures”, *PEER Report 2008/08*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.