



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Título:

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE LONGITUD EFECTIVA EN ELEMENTOS
DIAGONALES DE TORRES DE TRANSMISIÓN AUTOSOPORTADAS.

Autores:

Alan de Jesús Gerónimo Pineda

Ingeniero Civil

geronimo.pineda@gmail.com

Instituto Tecnológico del Istmo

Valentín Jiménez Ramírez

Ingeniero Civil

jimenez-ramirez-valentin@hotmail.com

Instituto Tecnológico de Zacatepec

Ernesto Rodolfo Neri Barrio

Maestro en Ingeniería

eneri@iie.org.mx

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Guillermo Fernández Alcalá

Ingeniero Civil

gmofdeza_63@hotmail.com

Instituto Tecnológico del Istmo

José Manuel Dehesa Martínez

Maestro en Ciencias Eléctricas

jmdehesa@itistmo.edu.mx

Instituto Tecnológico del Istmo



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Título:

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE LONGITUD EFECTIVA EN ELEMENTOS DIAGONALES DE TORRES DE TRANSMISIÓN AUTOSOPORTAS.

Resumen:

En este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta para el cálculo de factores de longitud efectiva en elementos sujetos a compresión axial que conforman las torres de transmisión de energía eléctrica. Esta herramienta se basa en la teoría de estabilidad elástica de S. Timoshenko [Ref. 1].

Su uso permitirá diseñar elementos diagonales mediante la selección de perfiles óptimos para garantizar la resistencia a los casos de carga considerados en el diseño.

En la actualidad, el análisis y diseño estructural de torres se basa en las normas mexicana y americana J1000-50 Y ASCE 10-97 [Ref. 2, 3] que establecen en 0.2 el valor mínimo de la relación tensión/compresión en dos diagonales interconectadas para que la diagonal que trabaja a tensión proporcione apoyo fijo en el punto de cruce a la diagonal que trabaja a compresión, esto como único criterio para establecer el valor del factor de longitud efectiva. A su vez, la norma AS [Ref. 4] establece como 0.6 el valor mínimo para conseguir los mismos efectos.

De los resultados aquí obtenidos se encontró que el valor necesario de la relación tensión/compresión en las diagonales es mayor que lo que se establece en las [Ref. 2-4].



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

I. Introducción

El presente trabajo se desarrolló durante una estancia de prácticas profesionales en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, a partir de eventos extraordinarios que se han presentado, tales como colapsos en algunas torres de transmisión, posiblemente causadas por la falla de sus elementos diagonales a compresión.

En la práctica para análisis y diseño estructural de torres de transmisión de energía eléctrica así como en los códigos vigentes, se considera que sus elementos están sometidos principalmente a cargas axiales de tensión y compresión, básicamente por ser armaduras tridimensionales atornilladas. Normalmente el efecto del viento se modela como un conjunto de cargas puntuales actuando en los nodos de la estructura.

Las normas de diseño [Ref. 2-4] establecen que las diagonales sean conectadas en su intersección para que trabajen de manera conjunta. Por lo general, una de las diagonales trabaja a compresión y la otra a tensión, de manera que ésta proporciona cierto apoyo a la otra, permitiendo escoger elementos de menor sección para soportar las cargas actuantes de compresión.

La norma nacional J1000-50 [Ref. 2] recurre a los criterios establecidos por la norma ASCE [Ref. 3] definiendo el valor del “Factor de Longitud Efectiva” para dimensionar la diagonal que trabaja a compresión, en función de la fuerza de tensión actuante en la otra diagonal (relación tensión / compresión = 0.2); a su vez, la norma AS [Ref. 4] requiere que esta relación sea 3 veces mayor que lo considerado por la norma ASCE.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Debido a esa diferencia entre una norma y otra, se plantea el objetivo de determinar los factores de longitud efectiva en elementos diagonales a compresión para que sean más precisos, optimizando el diseño de los elementos estructurales, esto podría explicar algunas fallas ocurridas.

II. Metodología

Las diagonales reciben fuerzas como cargas axiales de tensión y compresión, debido a su conexión en el punto de cruce trabajan conjuntamente de manera que el elemento sometido a tensión puede servirle de apoyo al elemento a compresión.

Las barras esbeltas sometidas a compresión axial tienden a fallar por pandeo. Ante esta situación, pueden presentarse dos casos: Si la otra diagonal también está sometida a compresión o a un valor de tensión insuficiente, entonces ambas barras se deforman o desplazan juntas (Fig. 1a). Por el contrario, si la otra barra está sometida a suficiente tensión entonces se opone al desplazamiento y proporciona cierto apoyo a la barra a compresión. Si el apoyo es suficiente, esta barra se pandea formando dos ondas (Fig. 1b). Ocasionando que el elemento a compresión reduzca su longitud efectiva debido a la oposición al desplazamiento del elemento a tensión.

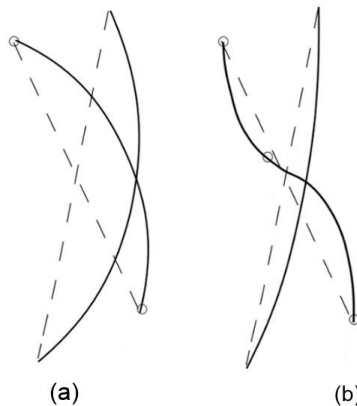


Figura 1 Interacción de las diagonales



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Derivado de lo anterior se asume que la rigidez que proporcione el elemento a tensión al de compresión dependerá de la fuerza de tensión a la que esté sometido. Si el elemento está sometido a una fuerza de tensión lo suficientemente alta se comportará como un apoyo fijo en el punto de conexión con el de compresión, de manera que la longitud efectiva del elemento a compresión ahora será la distancia mayor entre los claros formados (Fig. 2).

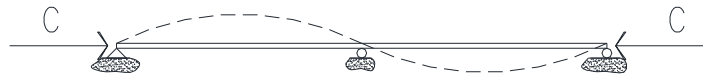


Figura 2: Pandeo del elemento con apoyo fijo al centro.

Es poco probable que la fuerza de tensión sea lo suficientemente grande para comportarse como apoyo fijo, aun así, con una tensión considerable la rigidez que suministra el punto de intersección puede reducir la longitud efectiva del elemento a compresión, variando sus valores entre 0.5 y 1 (Fig. 3).

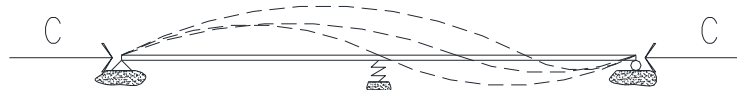
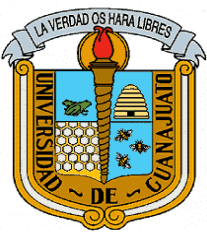


Figura 3: Casos de pandeo en función de la rigidez del apoyo

En el caso donde la tensión es suficiente y el punto de cruce se comporta como apoyo fijo, el elemento a compresión divide su longitud en dos partes, tratándose del cuerpo piramidal las distancias no serán iguales debido a la inclinación de dicha estructura, siendo mayor la distancia ubicada en el nivel inferior, $L_1 > L_2$ (Fig. 4).



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

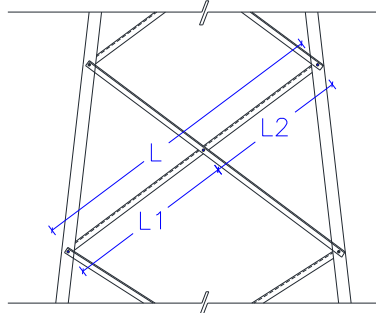


Figura 4: Diagonales en el cuerpo piramidal de una torre de transmisión

La fuerza de tensión necesaria para que la longitud efectiva del elemento disminuya, se asume ser una fracción de la fuerza de compresión actuante. Ésta relación se define como “relación tensión/compresión” e indica el porcentaje de tensión actuante con respecto a la compresión actuante. Según las normas empleadas en el diseño de torres las relaciones mínimas son ASCE 10-97 = 0.2 y AS-3995 = 0.6.

En la Ec. (1) se presenta la carga de pandeo de Euler que determina la carga crítica para el elemento a compresión.

Pe = (pi^2 EI) / (KL^2) (1)

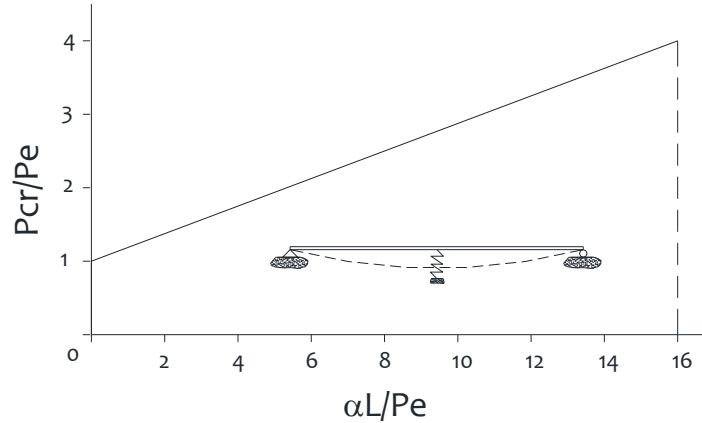
La reducción de la longitud efectiva debido al aumento de rigidez en el punto de cruce se considera mediante el factor de longitud efectiva K, que representa la proporcionalidad de L1 con respecto a L.

Timoshenko [Ref. 1], modela un elemento a compresión axial con un resorte en el centro de su longitud. La carga crítica del elemento depende de la rigidez del resorte, como se muestra en la Gráfica 1. Cuando el resorte es lo suficientemente rígido para funcionar como apoyo fijo, la carga crítica puede llegar a ser hasta cuatro veces su carga de Euler.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

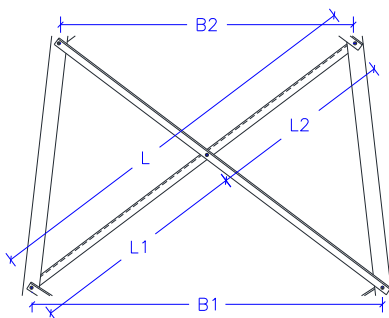


GRÁFICA 1: Rigidez – Resistencia a compresión según Timoshenko

De la gráfica 1 puede observarse que la carga crítica del elemento a compresión varía desde P_{eu} hasta $4 P_{eu}$, en función de la rigidez $\alpha L/Pe$ que proporciona el resorte, es decir, la otra diagonal.

- $\alpha L/Pe = 0$ si la diagonal “de apoyo” está trabajando a compresión.
- $4 \leq \alpha L/Pe \leq 16$ en función del valor de tensión en la diagonal de apoyo.

En las diagonales cruzadas existe cierta relación entre las longitudes de los segmentos desiguales y las bases del trapecio definido por sus extremos. Esta relación se define mediante la Ec. 3, obtenida del análisis de la (Fig. 5).



$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{L_2}{L_1} = X \quad (3)$$

Figura 5: Relación de longitudes y bases

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

El primer modelo estará definido por el elemento sometido a tensión, con una carga puntual Q a una distancia diferente del centro de su longitud, ésta fuerza es equivalente a la reacción en el punto de cruce debido al desplazamiento del elemento a compresión al pandearse (Fig. 6).

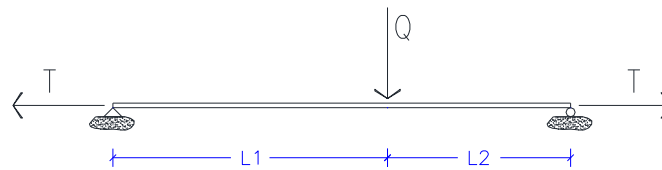


Figura 6: Modelo del elemento a tensión

El segundo modelo está definido por el elemento a compresión con un resorte intermedio de rigidez variable (Fig. 7), el cual representa la oposición del elemento a tensión fuera del plano en el punto de cruce, y estará en función de la fuerza de tensión.

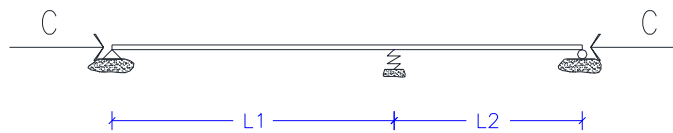
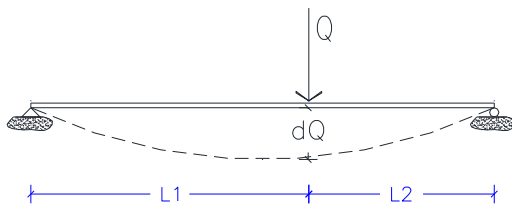


Figura 7: Modelo del elemento a compresión

La rigidez del apoyo se calcula como la relación carga a desplazamiento; aún si la barra no está trabajando a tensión (Fig. 8).



$$\alpha = \frac{Q}{\delta_Q} = 3EI \frac{L}{L_1^2 L_2^2} \quad (4)$$

Figura 8: Desplazamiento producto de Q .



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

La gráfica 1 que proporciona Timoshenko [Ref. 1], indica los valores máximos de resistencia que alcanza el elemento a compresión en función de la rigidez del resorte, ésta solo aplica para elementos a compresión con el resorte en el centro de su longitud.

Para el caso de las diagonales cruzadas que componen el cuerpo piramidal de las torres de transmisión, el punto de cruce que se toma como resorte no se ubica en el centro de la longitud, entonces se tendrán dos longitudes diferentes y la carga crítica corresponderá al tramo mayor, por lo que no alcanzará a ser 4 veces la carga de Euler.

Debido a este problema, Timoshenko en [Ref. 1] plantea la Ec. (5) para elementos a compresión con el resorte ubicado en cualquier punto de su longitud.

sin 2u1 sin 2u2 = 2(u1+u2) sin 2(u1+u2) [L1L2/L^2 - P/alpha L] (5)

De donde se obtiene una expresión general en función de la constante geométrica “x” que al ser evaluada determine la relación tensión/compresión actuante mediante el uso de resortes intermedios.

Al obtener momentos en cualquiera de los apoyos, el momento resultante o momento final es el resultado del momento producido por Q menos el momento a causa de la fuerza de tensión, Ec. (6), como se ilustra en la (Fig. 9).

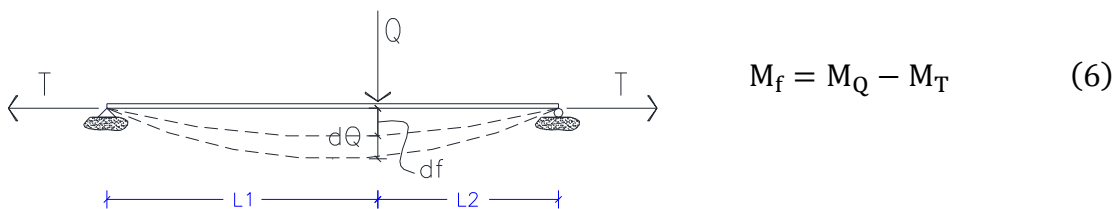


Figura 9: Desplazamientos en el elemento a tensión



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

La deflexión final se define con la Ec. (7), donde se muestra que ésta aumenta debido al momento producido por Q y disminuye conforme crece la tensión. Para simplificar términos, la constante z involucra propiedades mecánicas y de sección transversal.

$$\delta_f = \frac{z M_Q}{(1 + z T)} \tag{7}$$

Donde: $z = \frac{L_1 L_2}{3EI}$

De la ec (4) que define la rigidez inicial del elemento, se asume que la rigidez final incluyendo la fuerza de tensión se define como:

$$\alpha_f = \frac{Q}{\delta_f}$$

Al sustituir los valores del desplazamiento final, e incluir la fuerza de tensión se obtiene la Ec. (8), donde se observa que la rigidez del resorte aumenta conforme crece la tensión.

$$\alpha_f = \frac{(1 + z T)}{z L \gamma} \tag{8}$$

Donde: $\gamma = \frac{x}{(x+1)^2}$

Finalmente al sustituir valores de la Ec. (5) por términos de la constante geométrica “x” y propiedades mecánicas del elemento, se obtiene una ecuación general definida en función de x, π, γ y la carga de pandeo de Euler, como se muestra en la Ec. 9.

$$\text{sen}(n\pi) \text{sen}(xn\pi) = (n\pi + n\pi x) \text{sen}(n\pi + n\pi x) \left(\gamma - \frac{\gamma^2 \omega^2 \pi^2}{3 + \gamma \omega^2 \pi^2 F_r} \right) \tag{9}$$



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

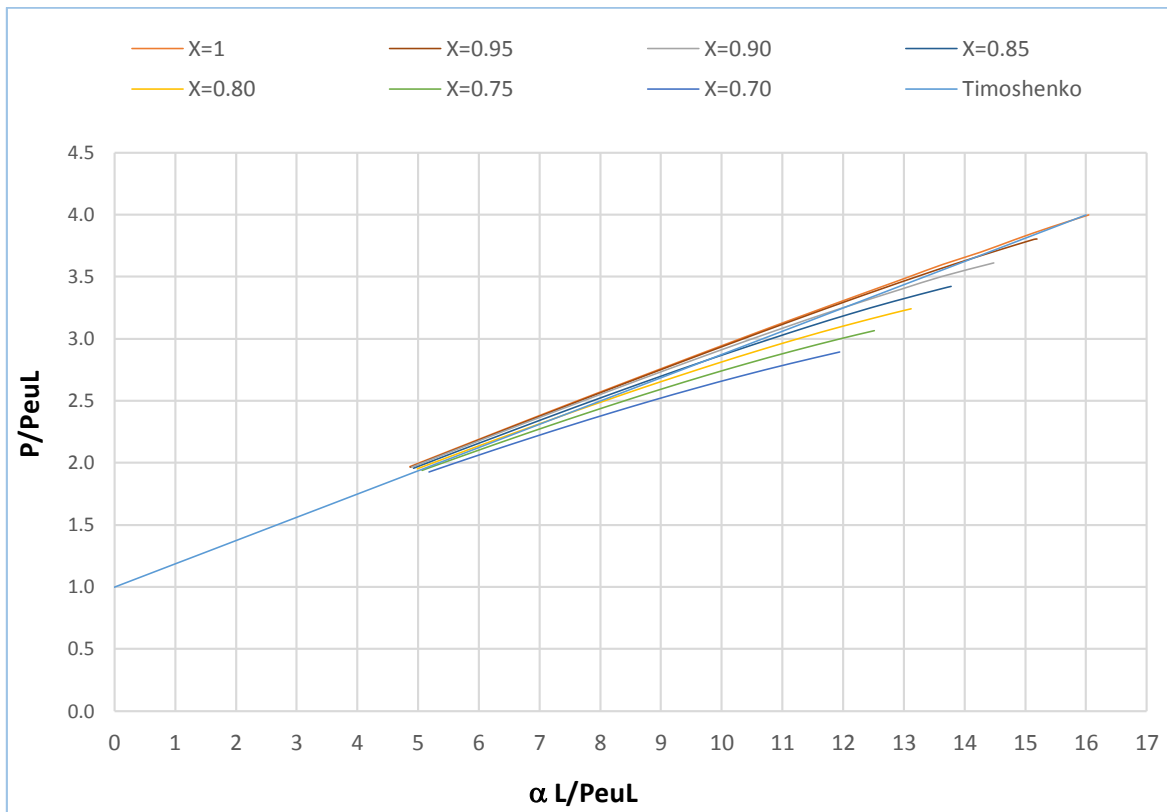
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

El término “Fr” representa la relación tensión/compresión y se obtiene al cumplir la igualdad en la ecuación.

Al evaluar la Ec. (9) se obtienen los valores reales de la curva Rigidez-Compresión que proporciona Timoshenko [Ref. 1]. Nótese que para cada valor de la constante geométrica “x” existe un gráfico que difiere de la de Timoshenko como se muestra en la Gráfica 2. Esto indica que la carga crítica del elemento a compresión depende de la constante geométrica.



Gráfica 2: Curvas Rigidez - Compresión



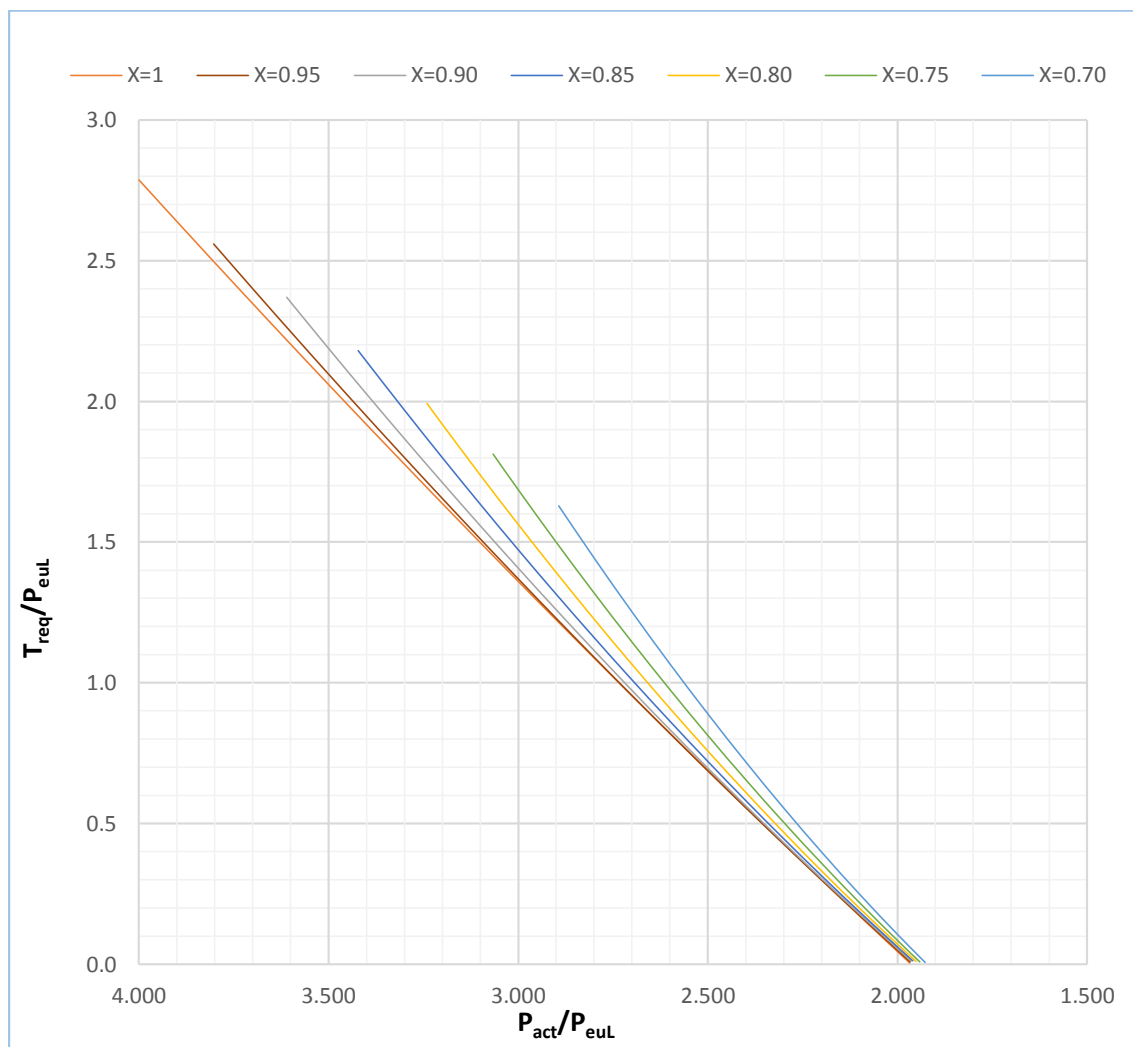
“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

III. Resultados

Al exceder la carga de pandeo de un elemento, es requerida cierta fuerza de tensión en el otro elemento para suministrar apoyo en el punto de cruce, y con base en las evaluaciones realizadas con la Ec. 9 se define la Gráfica 3 la cual muestra el valor requerido de tensión para una cierta compresión actuante.



Gráfica 3: Tensión Requerida

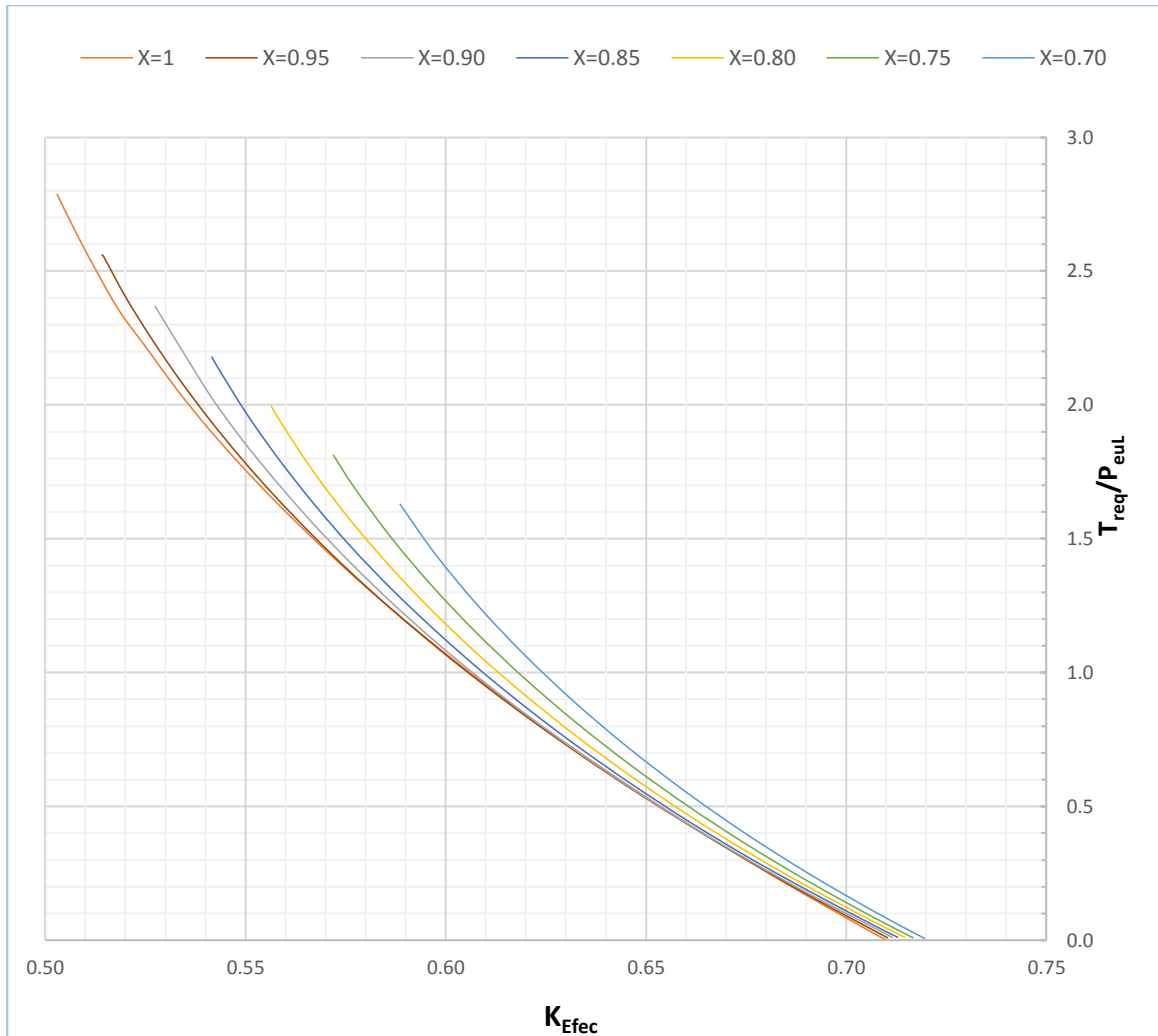


“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

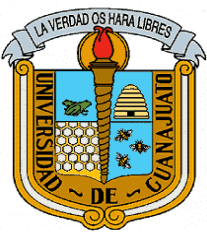
21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Definida la fuerza de tensión requerida o actuante, se estima la longitud efectiva del elemento a compresión mediante la Ec. (9) para diferentes valores de X, los cuales se muestran en la Gráfica 4.



Gráfica 4: Factores de Longitud Efectiva



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

IV. Conclusiones

Para el análisis y diseño de torres de transmisión de energía eléctrica, las normas mexicana y americana [Ref. 2 y 3] establecen en 0.2 el valor mínimo de la relación tensión/compresión en dos diagonales interconectadas para que la diagonal que trabaja a tensión proporcione apoyo fijo en el punto de cruce a la diagonal que trabaja a compresión, esto para determinar el valor del factor de longitud efectiva. A su vez, la norma australiana AS [Ref. 4] fija en 0.6 el valor mínimo para conseguir los mismos efectos.

Se ha determinado que el factor de longitud efectiva para la diagonal a compresión depende no sólo del valor de la tensión actuante en la otra diagonal, es decir, del valor de la relación tensión/compresión, sino que también depende de la relación geométrica de las longitudes de las barras entre sus extremos y el punto de cruce, esto es, de la inclinación de los elementos principales que pueden estar en el cuerpo recto o en el cuerpo piramidal. Se encontró que, por lo general, el valor necesario de la relación tensión/compresión en las diagonales es mayor que lo que se establece en las [Ref. 2-4].

En la práctica normal de diseño de estas estructuras no se considera la relación geométrica, lo cual podría explicar algunas fallas ocurridas.

Sería recomendable continuar el estudio de este tema incluyendo nuevos aspectos como el efecto del viento actuando directamente en los elementos y analizar una torre completa tomando en cuenta esta nueva metodología, comparando su diseño con el de la práctica actual establecida en las normas. Posiblemente daría lugar a un cambio en la normativa para incrementar la confiabilidad de estas estructuras.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

V. Bibliografía.

- 1 Theory of Elastic Stability – Timoshenko & Gere. McGraw-Hill Book Company, 1961.
- 2 Especificación CFE J1000-50 Torres para líneas de transmisión y subtransmisión, México 2011.
- 3 American Society of Civil Engineers - Design of Latticed Steel Transmission Structures (ASCE 10-97)
- 4 Australian Standard – Design of Steel Lattice Towers and Masts (AS 3995)