

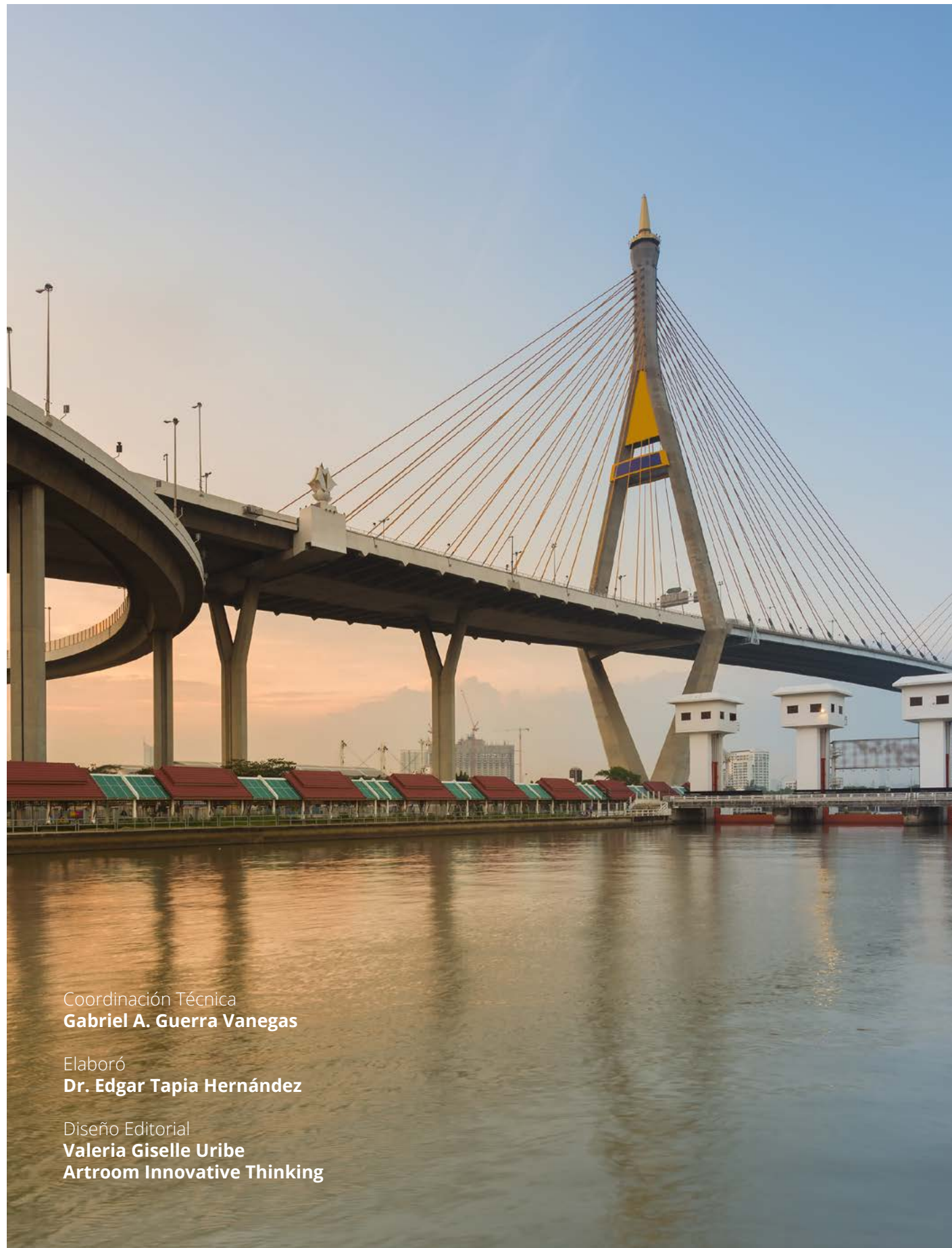


GERDAU
CORSA
El futuro se moldea

USO DE **CONTRAVIENTOS DE ACERO**

Gerdau Corsa. El futuro se moldea.

gerdaucorsa.com.mx

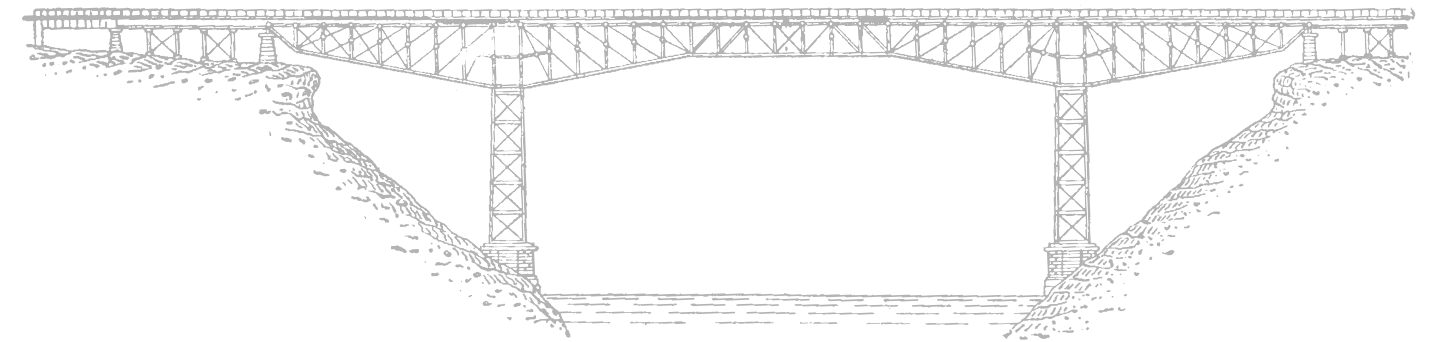


Coordinación Técnica
Gabriel A. Guerra Vanegas

Elaboró
Dr. Edgar Tapia Hernández

Diseño Editorial
Valeria Giselle Uribe
Artroom Innovative Thinking

1. INTRODUCCIÓN



Un contraviento es un elemento estructural que se usa para aumentar la rigidez lateral de un edificio. Al modificar la rigidez (proporción entre los esfuerzos y las deformaciones), en forma indirecta coadyuvan a controlar las deformaciones de la estructura ante excitaciones laterales. Por esto, en un edificio estructurado con marcos contraventeados, la respuesta inelástica ante excitaciones laterales de todo el sistema es altamente dependiente de las capacidades y de la respuesta inelástica de los contravientos (MacRae et al. 2004; Izvernari et al. 2007; Tapia y Tena 2014).

Los marcos con contravientos se clasifican básicamente en dos grupos: marcos con contravientos concéntricos y marcos con contravientos excéntricos. Si el eje del contraviento intersecta aproximadamente con el eje de la trabe y la columna se trata de un contraviento en configuración concéntrica (figura 1a). En cambio, es un contraviento excéntrico si el eje del contraviento intersecta en diferentes puntos el eje de la trabe (figura 1b).

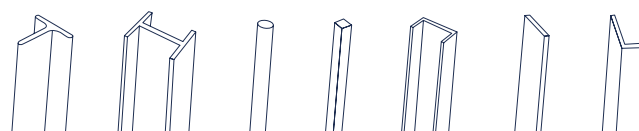


a) Marco con contravientos concéntrico



b) Marco con contravientos excéntricos

Figura 1. Configuraciones de marcos con contravientos



2. SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS CONTRAVIENTOS.

Los contravientos pueden diseñarse considerando varias secciones transversales. Por ejemplo, usando secciones IR (figura 2a), secciones cajón formadas por la unión de dos ángulos (figura 2b) o mediante la unión de cuatro placas soldadas (figura 2c), secciones de sección circular (figura 2d). En cada caso, la capacidad del elemento estructural quedará definida por la capacidad que tenga la sección para plastificarse por fluencia en tensión P_y o pandeo global en compresión R_c .



a) Sección IR



b) Sección formada con dos ángulos



c) Sección formada por placas



d) Sección circular

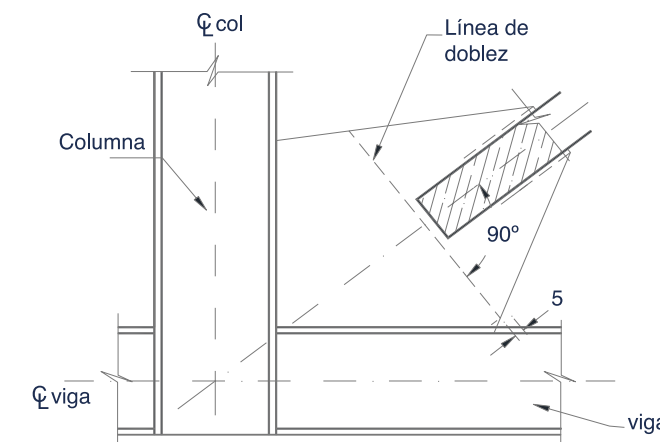
Figura 2. Ejemplos de contravientos

Frecuentemente, se prefiere que el contraviento tenga aproximadamente la misma capacidad en ambos ejes principales, por lo que en la práctica es común que los contravientos tengan secciones en cajón. Sin embargo, el diseño del contraviento queda usualmente definido por la capacidad del contraviento por pandeo global en compresión en el plano perpendicular al eje del marco. Por esto, no es imprescindible que la capacidad en ambos ejes principales sea la misma como ocurre en contravientos de sección IR o en contravientos formados por dos secciones canal. En la figura 3 se muestran algunos tipos de sección transversal que pueden usarse en secciones de contravientos.



Figura 3. Sección transversal de contravientos

De hecho, el diseño por compresión de la placa de conexión se realiza a partir de la sección Whitmore propuesta en 1952 (Tapia y Tena 2013), definida como el ancho efectivo de la placa de conexión perpendicular al eje del elemento e intersectado por dos líneas con una inclinación de unos 30 grados (figura 4a). Siguiendo este criterio, las placas de conexión de los contravientos se deben diseñar para que tengan una línea de doblez bien definida que favorezca el pandeo global en el plano perpendicular al plano del marco. En la figura 4b se muestra la conexión de un contraviento donde se nota la línea de doblez que propicia el pandeo global fuera del plano.

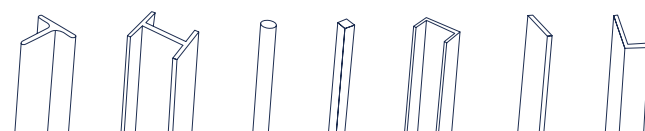


a) Características de la placa de conexión



b) Conexión de contraviento

Figura 4. Detalle de la línea de doblez en las placas de conexión



Respecto al diseño por compresión de la placa de conexión, se acostumbra considerar un factor de longitud efectiva igual a $K=1.2$ (Cochran y Honeck 2004, Lacerte y Tremblay 2006), aunque existen estudios que proponen $K=2.0$, por suponer que la placa se encuentra fija en un extremo y completamente libre en el otro (Tapia y Tena 2013; Tremblay 2014). Entonces, la placa de conexión se diseña considerando una longitud de la articulación al menos igual a dos veces el espesor de la placa ($2t$), aunque una práctica común es considerar dos pulgadas (5 cm), como se muestra en la figura 4a. Es posible conocer más detalles sobre el procedimiento de diseño de las placas de conexión de los contravientos en Lundeen (2003); Astaneh-Asl et al. (2006) y Tapia y Del Rincón (2018p).

3. DESEMPEÑO SÍSMICO DE LOS MARCOS CON CONTRAVIENTOS.

En el caso típico de edificios estructurados con marcos de acero con contravientos, la demanda de deformación de todo el sistema queda restringida a la capacidad de algunos entrepisos después del pandeo por compresión en marcos con contravientos concéntricos (Lacerte y Tremblay 2006; Tapia y Tena 2014) y también en marcos con contravientos excéntricos después de la fluencia de la viga enlace (Rozon et al. 2008; García y Tapia 2018p). Por esto, la predicción correcta de las capacidades del contraviento trasciende a la estimación adecuada de la capacidad de deformación de los entrepisos y, en consecuencia, en la evaluación de la rigidez lateral de toda la edificación.

En la figura 5 se muestra el desempeño sísmico de diferentes configuraciones de marcos con contravientos. La figura incluye marcos con contravientos concéntricos y marcos con contravientos excéntricos. Las estructuras están ordenadas en referencia al desempeño dúctil ante excitaciones laterales; de manera que los marcos del lado derecho tienen una respuesta inelástica estable y pueden estar relacionados con factores de comportamiento sísmico más altos ($Q=3$, $Q=4$). En contraparte, los marcos de la izquierda tienen una respuesta inelástica limitada. De hecho, el marco con contravientos en configuración K está prohibida en zonas sísmicas, puesto que la descarga de los contravientos ocurre en el centro del claro de la columna.

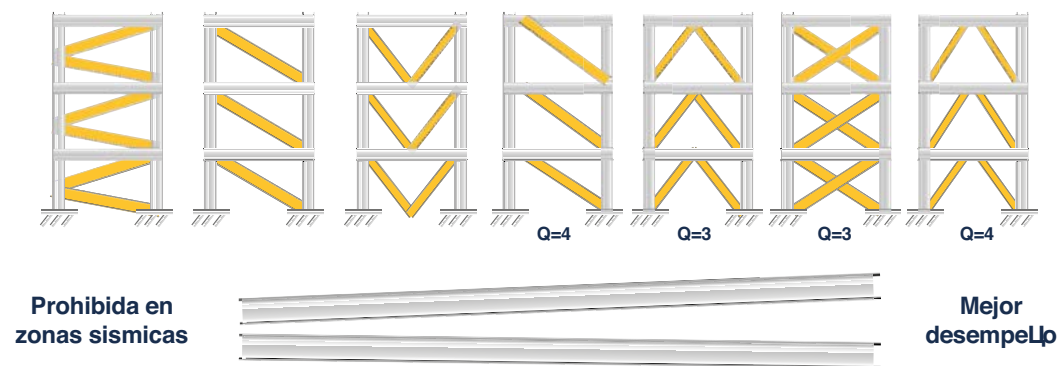


Figura 5. Desempeño sísmico de los marcos con contravientos

4. RESPUESTA DEL CONTRAVIENTO

Durante demandas sísmicas intensas (tramo A-B en la figura 6), se espera que el inicio del daño se presente por pandeo global de los contravientos en compresión ($P=R_c$) en el punto B de la figura 6, donde las deformaciones inelásticas de los contravientos deben ser redistribuidas a las trabes, columnas y conexiones. Después del pandeo en una deformación δ_b (tramo C-D), ocurre una disminución súbita de la capacidad del contraviento hasta una resistencia residual de compresión post-pandeo ($P \approx 0.3R_c$). En el punto D se forma una articulación al centro del claro del elemento.

En el caso de fuerzas sísmicas, se espera un cambio de dirección en la magnitud de la carga axial, por lo que en el tramo D-E la carga axial aplicada está en tensión. El elemento es capaz de resistir la carga hasta la plastificación por fluencia cuando $P=P_y$.

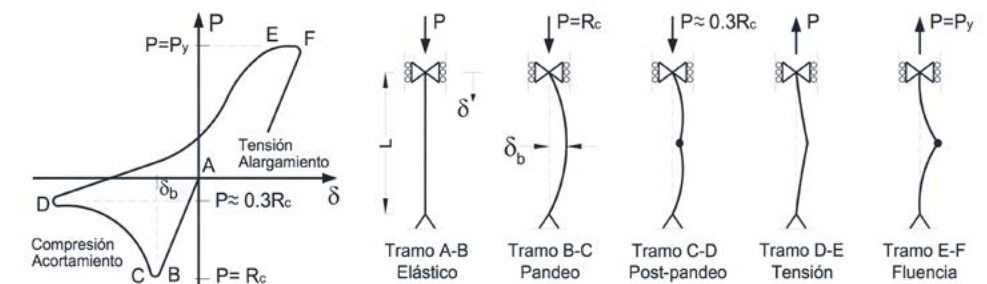


Figura 6. Comportamiento de contravientos sometidos a cargas cíclicas

En los cálculos, la capacidad a compresión por pandeo global se calcula mediante la ecuación 1 y la capacidad por fluencia en tensión se determina con la ecuación 2 conforme a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero (NTCA - 17) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF - 17).

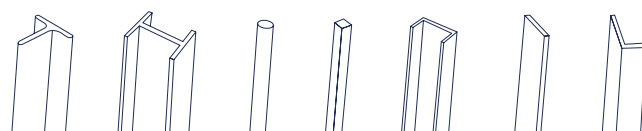
$$P_y = F_y A \quad (1)$$

$$R_c = x F_y A \quad (2)$$

$$x = \left[1 + \lambda_c^{2n} \right]^{-1/n} = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_c} \right)^{2n} \right]^{-1/n} \quad (3)$$

Donde, A es el área de la sección del contraviento, F_y es el esfuerzo del tipo de acero considerado, F_c es el esfuerzo crítico de Euler de la sección del contraviento que depende del parámetro de esbeltez λ_c . Es posible conocer más información sobre la determinación de la resistencia en las secciones 4.2 y 5.2 de las NTCA-17 (2017).

En la figura 7 se muestra el comportamiento cíclico de un contraviento de sección cajón cuadrada OR 15.2x1.27 cm con una longitud no arriostrada de 453 cm y una relación de esbeltez igual a $kL/r = 128.4$ con apoyo articulados y acero tipo ASTM A572 Gr. 50. En la curva se nota que la capacidad de fluencia por tensión del contraviento P_y es mucho más grande que la resistencia por pandeo global en compresión R_c .



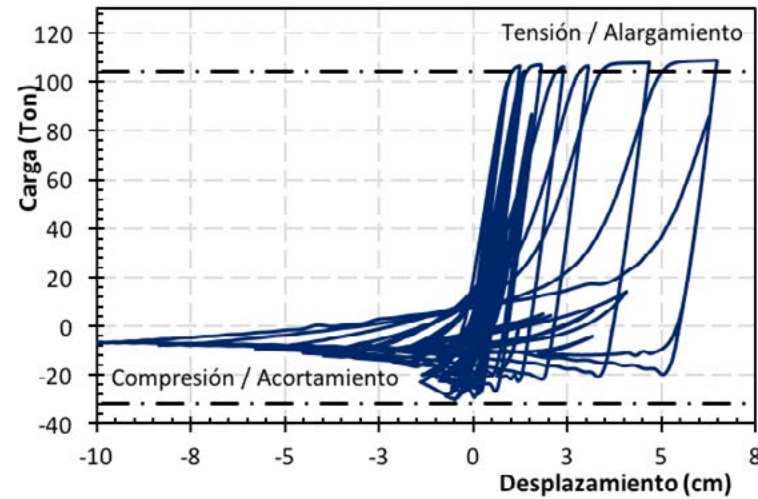


Figura 7. Curva de histéresis de un contraviento tipo

Así, teniendo en consideración que la capacidad de fluencia en tensión de los elementos de acero es mucho mayor que la capacidad por pandeo global en compresión ($R_c < P_y$), la respuesta de histéresis de los contravientos está caracterizada por un desempeño que es muy diferente en el cuadrante en compresión y el cuadrante en tensión. Esta respuesta es especialmente importante en contravientos esbeltos con relaciones de esbeltez altas, donde la respuesta es liderada por la capacidad por pandeo global en compresión R_c . Por esta razón, en los reglamentos especializados, la relación de esbeltez máxima que pueden tener los contravientos está limitada en marcos dúctiles. De hecho, el límite de esa relación de esbeltez disminuyó entre la versión de las NTCM-04 (ecuación 4) a la versión de las NTCA-17 (ecuación 5), lo que representa un límite más estricto. Por ejemplo, en un contraviento con acero tipo ASTM A500 Gr. B con $F_y = 3,235 \text{ kg/cm}^2$ que se pretende usar como parte de un marco dúctil, la relación de esbeltez máxima conforme a las NTCM-04 era $kL/r_{max} = 147.6$; mientras que conforme a las NTCA-17 sería $kL/r_{max} = 100.4$.

$$kL/r_{max} < 5.88 \sqrt{E/F_y} \quad (4)$$

$$kL/r_{max} < 4.0 \sqrt{E/F_y} \quad (5)$$

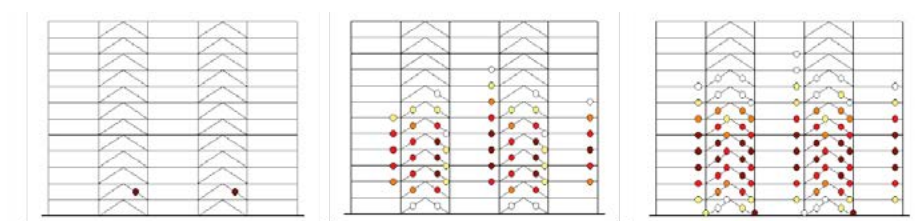
Entonces, cuando se analiza la respuesta de edificios en zonas sísmicas es posible modelar la respuesta inelástica global, a partir del modelado de los elementos estructurales detallados y la interacción entre ellos. Sin embargo, los supuestos, simplificaciones, omisiones y errores relacionados con las formulaciones representan una fuente de incertidumbre en la evaluación del desempeño sísmico de las edificaciones; especialmente, las estructuradas con marcos con contravientos debido a la complejidad de su respuesta. Es posible conocer más detalles sobre la influencia del modelado de los contravientos en Tapia et al. (2016).

5. EVOLUCIÓN DEL DAÑO EN MARCOS CON CONTRAVIENTOS.

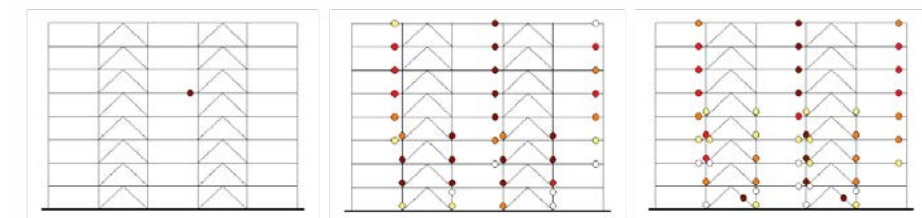
En el diseño sismo-resistente se espera que las estructuras tengan incursiones en el intervalo inelástico, esto es daño en los elementos estructurales. Sin embargo, ese daño debe evolucionar distinguiendo líneas de defensa. En ello, los contravientos deben ser la primera línea de defensa por plastificación por pandeo global en compresión o fluencia en tensión; después deben plastificarse las traveses y, finalmente, las columnas deben permanecer con poco o nulo daño. Así, el objetivo de diseño de una edificación con marcos con contravientos concéntricos debe ser un mecanismo columna fuerte – viga débil – contraviento más débil (figura 8a).

Con el propósito de que se desarrolle el mecanismo de colapso objetivo es necesario aplicar una filosofía de diseño que se llama diseño por capacidad. En ese proceso, los contravientos se deben diseñar considerando las máximas demandas de las combinaciones de carga obtenidas en un programa aplicando un análisis modal espectral. Luego, la sección transversal de las traveses debe diseñarse con la resistencia máxima esperada que puede desarrollar la sección transversal de los contravientos. Posteriormente, las columnas se diseñan con la resistencia máxima esperada que pueden desarrollar las secciones transversales seleccionadas para las traveses y los contravientos. Finalmente, las conexiones y la cimentación se diseñan con la máxima resistencia que puede desarrollar la sección transversal de las columnas.

Esta filosofía del diseño por capacidad evita que se desarrollen mecanismos indeseados que: i) no distinguen líneas de defensa y ii) propician la concentración del daño en algunos entrepisos. Por ejemplo, la evolución mostrada en la figura 8b, donde la primera línea de defensa fueron las traveses, después el daño se propagó a las columnas y, previo al colapso, muy pocos contravientos fallaron por pandeo global.

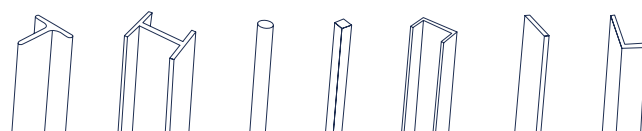


a) Evolución de un mecanismo columna fuerte – viga débil – contraviento más débil



b) Evolución de un mecanismo indeseable

Figura 8. Mecanismos de colapso en marcos contraveneados



En los reglamentos (AISC 341-16 y NTCA-17), la filosofía del diseño por capacidad se aplica cuando el procedimiento normativo solicita que los elementos se diseñen o se revisen con las capacidades esperadas de los otros elementos. Vale la pena hacer notar que los programas de análisis son incapaces de identificar los conceptos del diseño por capacidad. Así que es recomendable diseñar únicamente la primera línea de defensa usando las ayudas de diseño del programa y efectuar el resto de los elementos con otras ayudas de diseño que identifiquen las capacidades esperadas. Es recomendable cargar las secciones finales en el modelo del programa para verificar que la estructura cumple los límites de deformación y revisar el comportamiento global de la edificación. Es posible conocer más información sobre el diseño por capacidad en estructuras dúctiles de acero en el capítulo 9 de Álvarez et al. (2017) y en García y Tapia (2018p).

6. INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS CONTRAVIENTOS

Entonces, durante un movimiento sísmico intenso todas las estructuras experimentan una redistribución de cargas internas que no forzosamente deben coincidir con la condición que rigió el diseño en la etapa inicial. Específicamente, en marcos contraventeados la respuesta global de la estructura y, por consiguiente, la posible redistribución de cargas internas, depende altamente de respuesta del sistema de contravientos y su configuración.

Como ya se comentó, el comportamiento del sistema de contravientos queda regido por la capacidad de fluencia por tensión y pandeo por compresión (Tapia et al. 2016). Durante un sismo intenso, esta condición provoca variaciones de las cargas axiales que soportan los contravientos y, por consiguiente, modifica la magnitud de las componentes que deben ser resistidas como cargas axiales en las traveses P_{ix} y en las columnas P_{iy} (figura 9). Como consecuencia, esta redistribución de las demandas sobre los elementos principales ocasiona que se modifique el comportamiento global de la estructura.

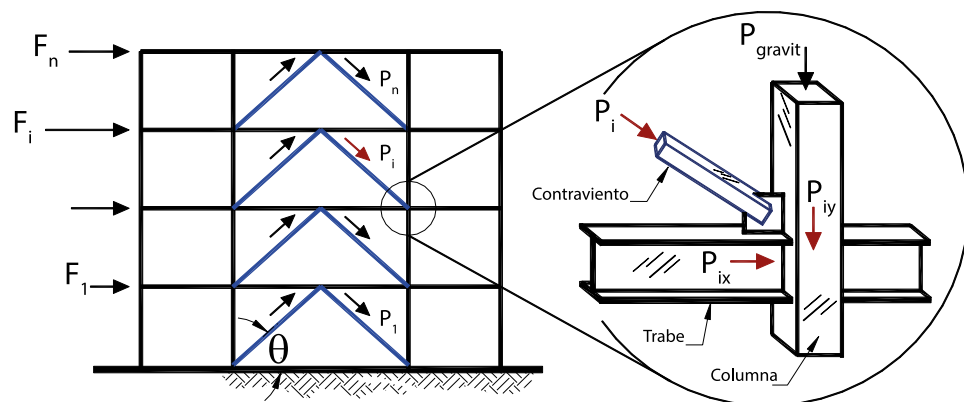


Figura 9. Distribución de demandas por carga axial del contraviento en la conexión

Por ejemplo, en marcos con contravientos en chevrón (figura 10a), la componente de la carga axial en los contravientos que incrementa la carga axial en la columna está siempre relacionada con el pandeo en compresión de los contravientos (identificado con la letra C en la figura 10), mientras que la fluencia por tensión de los contravientos constituye una reducción en la magnitud de la carga axial de la columna.

En cambio, en configuraciones contravientos en cruz en uno o dos entrepisos, es necesario que las columnas se diseñen considerando incrementos de carga axial por el pandeo global en compresión y, adicionalmente, la fluencia en tensión de los contravientos. Es decir, el proceso de diseño de las columnas en marcos con contravientos en configuración en cruz debe estar relacionado con una carga axial de diseño de mayor magnitud que los marcos con contravientos en configuración en V invertida ó chevrón, pese a que el resto de las características del marco sea equivalentes.

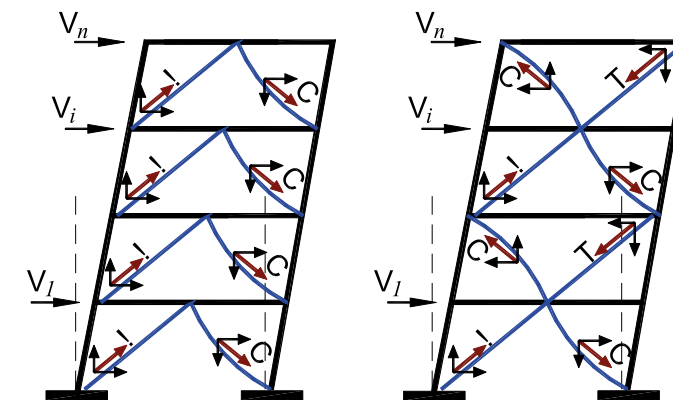
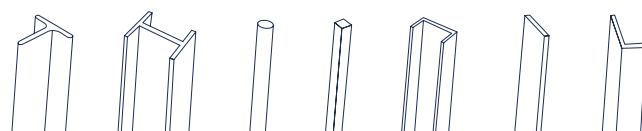


Figura 10. Axialización de las columnas para distintas configuraciones de contravientos

En la literatura existen publicados métodos para la estimación de la carga axial de diseño de columnas adyacentes a crujeas contraventeadas. Es posible consultar una discusión más amplia sobre las cargas axiales de diseño en las columnas de crujeas contraventeadas en Tapia y Martínez (2017).

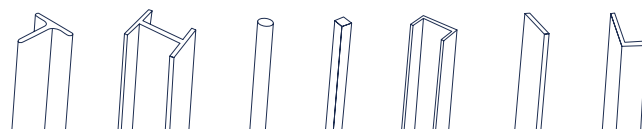
7. MÁS INFORMACIÓN

Al final de este documento se incluyen referencias bibliográficas que pueden complementar la información discutida. Este documento pretende mejorar, difundir y promover las buenas prácticas del uso del acero; su correcta interpretación, aplicación y uso es responsabilidad del lector. Para una mayor referencia de los temas discutidos y/o mayor información escribir a etapiah@hotmail.com.



8. REFERENCIAS

- [1] AISC 341-16 (2016), "Seismic provisions for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [2] Álvarez O; O De Buen; J Cesin; C Cincúnegui; E Tapia et al. (2017), "Ejemplos de diseño de acuerdo a la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero 2017", Ed. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE). 263 páginas.
- [3] Astaneh-Asl A, M Cochran y R Sabelli (2006), "Seismic detailing of gusset plates for special concentrically braced frames", Structural steel educational council, Technical information and product service. diciembre, www.steeltips.org.
- [4] Cochran, M y W Honeck (2004), "Design of special concentric braced frames (with comments on ordinary concentric braced frames)", Structural steel educational council, Technical information and product service, mayo, www.steeltips.org.
- [5] García J.S. y E. Tapia (2018p), "Respuesta inelástica de marcos dúctiles con contraviento excéntrico", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS. En prensa.
- [6] Izvernari C, M Lacerte y R Tremblay (2007), "Seismic performance of multi-storey concentrically braced steel frames designed according to the 2005 Canadian seismic provisions", Memorias, Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Ontario, Canadá, junio.
- [7] Lacerte, M y R Tremblay (2006), "Making use of brace overstrength to improve the seismic response of multistory split-X concentrically braced steel frames", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, pp. 1005-1021.
- [8] Lundeen, T (2003), "Design and detailing of seismic connections for braced frame structures", Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Vol. 25, pp. 1-20.
- [9] MacRae, G.A., Y. Kimura y C. Roeder (2004), "Effect of column stiffness on braced frame seismic behavior", Journal of Structural Engineering, ASCE, March, pp. 381-391.
- [10] NTCM-04, (2004), "Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño y construcción de estructuras metálicas", Gaceta Oficial del Distrito Federal, décimo cuarta época, tomo II, octubre.
- [11] NTCA-2017 (2017), "Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Acero", Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Vigésima época. No. 220Bis. 15 de diciembre.
- [12] Rozon J., S Kovoebic y R. Tremblay (2008). "Study of global behavior of eccentrically braced frames in response to seismic loads", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. Octubre.
- [13] RCDF-17 (2017), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF)", Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Vigésima época. No. 220Bis. 15 de diciembre.
- [14] Tapia E. y A. Tena (2013), "Diseño sísmico de marcos de acero contraventeados. Parte 1: Recomendaciones de diseño", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS. No.88. pp. 43-68.
- [15] Tapia E. y Tena A. (2014), "Code-Oriented methodology for the seismic design for regular steel moment resisting braced frames". Earthquake Spectra Journal. Vol. 3, No. 4, pp. 1683-1709. [dx.doi.org/10.1193/032012EQS100M](https://doi.org/10.1193/032012EQS100M).
- [16] Tapia E, J.S. García y A. Del Rincón (2016), "Estudio paramétrico del modelado inelástico de contravientos de acero", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS. No. 94. Pp. 49-74. [doi: dx.doi.org/10.18867/ris-0](https://doi.org/10.18867/ris-0)
- [17] Tapia E. y R. Martínez (2017), "Carga axial de diseño de columnas de marcos con contraviento concéntrico", Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 17, No. 1, Pp. 5-22.
- [18] Tapia E. y Del Rincón A. (2018p), "Influencia de la esbeltez de los contravientos en la respuesta sísmica de edificios regulares", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS. En discusión.
- [19] Tremblay, R (2014), Comunicación personal.





DIRECTORIO

OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590

PLANTAS

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex – Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

DISTRIBUCIÓN

CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex – Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

SAN JUAN

T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 675, Granjas Modernas, CDMX, 07460

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726



GERDAU CORSA

El futuro se moldea

Somos más allá del acero.

gerdaucorsa.com.mx



Gerdau Corsa. El futuro se moldea.