

**VULNERABILIDAD SISMICA DE EDIFICIOS APORTICADOS DE ACERO
ESTRUCTURAL CONSTRUIDOS CON PERFILES TUBULARES EN
VENEZUELA.**

Esp. Ing. Sigfrido A. Loges F.¹

¹ IDEC, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.
e-mail: sloges@gmail.com

RESUMEN

Se plantea la relación que existe entre el uso de miembros con secciones transversales tubulares y la vulnerabilidad sísmica de los edificios aporticados de acero estructural. En los últimos años en Venezuela, se ha evidenciado que edificios de acero estructural, construidos con perfiles tubulares para los miembros resistentes principales (vigas y columnas, especialmente), pudieran resultar significativamente vulnerables a las acciones sísmicas. El uso cada vez más frecuente de este tipo de perfiles en el país, debido entre otras cosas a los problemas de disponibilidad de materiales para la construcción en acero, genera incertidumbres acerca de si las estructuras construidas con perfiles tubulares tendrán la capacidad suficiente para resistir sismos importantes, y si se tomaron en cuenta consideraciones sismorresistentes en los detalles de las conexiones entre vigas y columnas, entre otras. Se explica el comportamiento inelástico que presentan algunos tipos de acero empleados en la construcción, sobre todo para zonas con mediana y alta sismicidad. Se indican disposiciones específicas y recientes aplicables de las Normas Americanas AISC relacionadas, sobre todo en cuanto a la necesidad de disponer de columnas tubulares mixtas (acero – concreto) para construcciones en zonas sísmicas. Se concluye, que los perfiles tubulares huecos para columnas, no cumplen con los límites de esbelteces mínimas necesarias para comportarse satisfactoriamente en el rango inelástico y que las conexiones viga – columna deben disponer de elementos intermedios para la adecuada transferencia de tensiones entre los componentes de edificios aporticados de acero.

Palabras clave: Perfiles Tubulares, Vulnerabilidad, AISC, Conexiones.

INTRODUCCIÓN

El uso de perfiles con sección transversal tubular (en lo sucesivo, STT) en la construcción de edificios de acero, es una práctica muy difundida en muchos países. Una de las tantas razones, se debe a los innegables beneficios arquitectónicos de sus formas (cuadradas, rectangulares o circulares), y a la buena adaptabilidad de éstas a los acabados finales de las edificaciones, entre otros, llegadas de paredes y diversos tipos de cerramientos, y que junto a la uniformidad de propiedades estructurales, tales como Inercia, entre otros, en ambas direcciones principales de la sección (ejes principales), sobre todo en STT cuadradas y circulares (especialmente empleadas como columnas o miembros a flexocompresión biaxial), los convierten en una alternativa atractiva para arquitectos e ingenieros estructurales.

Estructuralmente hablando, sin embargo, y especialmente en zonas con medianas y altas sismicidades, los perfiles STT no se comportan de manera necesariamente satisfactoria. Uno de sus principales problemas radica en el espesor delgado de sus paredes, las cuales en general, no los califican como perfiles ideales para permitir un adecuado desempeño sismorresistente de la edificación, y estudios o análisis de segundo orden por elementos finitos mediante programas estructurales avanzados de computación (ANSYS y ABAQUS, por ejemplo) así lo confirman (GARZA, L. 2011).

Sin embargo y pese a lo anterior, es una opción permitida para emplearse en edificaciones y las actuales normativas de la construcción en acero estructural, entre ellas, AISC 360-10 así lo confirman, al dedicar incluso, un capítulo completo al tema de conexiones entre STT (Capítulo K). En Venezuela, sin embargo, la actual normativa que rige la construcción en acero, COVENIN 1618:1998 *Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites (1ra. Revisión)*, no los incluye al indicar, específicamente, en su Art. 1.2 Alcance, lo siguiente: *Se excluyen del dominio de aplicación de esta Norma los perfiles tubulares, los perfiles formados en frío y las vigas de alma abierta (joists), los cuales se regirán por normas específicas. Véase las Disposiciones Transitorias”*.

En Venezuela, los actuales problemas para la obtención de divisas que permitan la adquisición de perfiles europeos, entre otros, es por mucho la razón principal que motiva la escasez de secciones transversales en forma de I, H, L, ampliamente empleadas en edificaciones de acero estructural con importantes requerimientos de desempeño sismorresistente, y han motivado el empleo de secciones cuya disponibilidad resulta más inmediata. En este particular, las STT pasan a llenar el vacío de los otros tipos de secciones transversales. Sin embargo, es importante conocer su desempeño sísmico y en especial, los distintos y adecuados tipos de conexiones entre los miembros (vigas y columnas, principalmente) para zonas de mediana y alta sismicidad, para no adicionar un aspecto de disminución de capacidad estructural a la edificación por fallas en conexiones por su pobre ejecución y/o caracterización de las mismas.

2. DESARROLLO

Las STT, son aquellos tipos de perfiles estructurales de acero de alta resistencia (Norma ASTM A572 Grado 50), caracterizados por sus formas geométricas cuadradas, rectangulares y circulares, y espesores reducidos de sus paredes, cuya conformación se logra mediante procesos en frío, es decir, a temperatura ambiente, mediante deformaciones plásticas paulatinas del metal a su paso por rodillos de laminación, lo cual le infiere al material una gran resistencia (ANDARA, J. 2007), y cumpliendo con los lineamientos establecidos en la Norma ASTM A500 Grado C (UNICON, 2011), principalmente (es posible el empleo de otros tipos de grados, como el A y el B). Los aceros laminados en frío presentan mayor dureza en comparación con los procesos de laminado en caliente, el cual se realiza a altas temperaturas y permitiendo que el metal se recristalice sin endurecimiento posterior, como en el caso de los perfiles conformados en frío. Este tipo de acero tiene, entre sus propiedades resistentes, valores de la tensión cedente (F_y) de 3515 kgf/cm² y resistencia de agotamiento a tracción (F_u) de 4360 kgf/cm². Sin embargo, se destaca como

un aspecto sísmicamente relevante en el tipo de acero ASTM A572, su menor capacidad de disipación de energía o ductilidad (ver Fig. No.1) en comparación con otros tipos de aceros (por ejemplo, ASTM A36, A992, entre otros), lo cual condiciona su empleo en muchos tipos de edificaciones ubicadas en zonas con sismicidad importante (media a alta). A continuación, se muestran las principales STT empleadas para miembros estructurales como vigas, columnas y arriostramientos (Foto No. 1). Debido a las propiedades resistentes de los perfiles y necesidades estructurales, las STT cuadradas y circulares se emplean, en general, para columnas (mismas características geométricas en ambos ejes principales, lo cual les da una excelente capacidad para resistir flexocompresión biaxial), mientras que las rectangulares para vigas y miembros secundarios horizontales (en donde se requiere mayor inercia en la dirección de la carga externa). Para el caso de arriostramientos, cualquiera de las tres tipologías es válida, ya que son miembros solicitados principalmente por tensiones axiales debidas a tracciones y compresiones, en general.

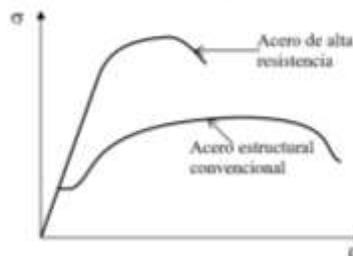


Fig. No.1: Capacidad de Deformación Inelástica entre Aceros.
Fuente: HERRERA, R. (2009).



Foto No.1: Secciones Transversales Tubulares.
Fuente: <http://www.cintac.cl/tubulares/>

Diferencias	Usos	Normas Aplicables	Designación Comercial		Espesores		Longitudes Estándar	
			DN (1)	NPS (2)	mm	in (3)	mm	in (4)
Tubos Estructurales	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Centros de salud de diferentes tipos ✓ Edificaciones habitacionales: viviendas, comerciales, gubernamentales, deportivas, recreativas y de servicios varios. ✓ Torres de telecomunicaciones ✓ Puentes peatonales y vehiculares ✓ Señalización ✓ Señales viales ✓ Vallas comerciales ✓ Señalización vial ✓ Mangas ✓ Centros de tráfico aéreo ✓ Terminales de pasajeros ✓ Ferrocarriles ✓ Calentadores de uso industrial (sistemas metalométricos) 	ASTM A 500 Grados A, B y C	DN (1)	Circular 2 - 12 1/2	2,25 - 11,00	0,010 - 0,433	6 - 30	12 - 40
			DN (1)	Cuadrado 30x30 - 250x250	2,25 - 11,00	NA (5)	6 - 30	12 - 40
			DN (1)	Cuadrado 1 x 1 - 8 x 8	NA (5)	0,010 - 0,250	6 - 30	12 - 40
			DN (1)	Rectangular (6) 30x40 - 300x170	2,25 - 11,00	NA (5)	6 - 30	12 - 40
			DN (1)	Rectangular 2 x 1 - 8 x 4	NA (5)	0,010 - 0,250	6 - 30	12 - 40
			DN (1)	Rectangular 25 x 25 - 120 x 120	2,00 - 5,00	NA (5)	6 - 30	12 - 40
		DN (1)	Rectangular 50 x 50 - 100 x 50	2,00 - 5,00	NA (5)	6 - 30	12 - 40	
		EN 10219 Grados S235, S275 y S355	Rectangular 25 x 25 - 120 x 120	2,00 - 5,00	NA (5)	6 - 30	12 - 40	
		Rectangular 50 x 50 - 100 x 50	2,00 - 5,00	NA (5)	6 - 30	12 - 40		

(1) DN: Designación comercial del producto en milímetros.
(2) NPS: Designación comercial del producto en pulgadas.
(3) in: No aplica. Esta especificación no contempla este parámetro.

Fig. No.2: Características de STT para uso Estructural en Venezuela.

Fuente: <http://unicon.com.ve/documentos/UNICON%20estructural%20espanol%20v2.0%20-%20i.pdf>

En el tema de la llegada de cerramientos, en cuanto a la arquitectura, presentan grandes ventajas, por ejemplo, en debido a que la zona de encuentro entre perfil y el cerramiento facilita mucho los diferentes detalles constructivos. Por esta y otras razones, en muchos proyectos arquitectónicos se consideran primeramente sobre otros tipos de perfiles, como por ejemplo, aquellos conformados por secciones transversales en I, H, U, etc.

En Venezuela, país catalogado como prácticamente sísmico en todo su territorio, de acuerdo con el vigente mapa de zonificación sísmica (COVENIN, 1756-1:2001), desde hace ya varios años, se están realizando numerosas edificaciones empleando STT para los miembros estructurales principales (vigas y columnas). En muchos casos, se aprecia que no se han cuidado los detalles estructurales en las conexiones entre los miembros, entre otros, lo cual, sumado a las características propias del material y procesos de conformación en frío de las STT, se pudieran estar generando vulnerabilidades importantes en las edificaciones y afectando por ende su desempeño sismorresistente, condición indispensable en construcciones en el país.

2.1 Secciones Compactas, No Compactas y Compactas Sísmicas.

Es muy importante cuando se emplean STT en proyectos de edificaciones aporticadas en zonas sísmicas, conocer las relaciones entre los espesores de las caras de los perfiles y sus longitudes, lo cual permitirá determinar su capacidad de plastificación durante un sismo, es decir, su capacidad de alcanzar deformaciones inelásticas más allá del punto en el cual se logra la cedencia de la sección. Cuando una sección transversal de acero es compacta, se supone que ésta puede desarrollar el momento plástico sin que previamente se produzca pandeo local de algún elemento comprimido de su sección transversal, pero si resulta no compacta, aunque puedan alcanzar la tensión de cedencia en sus elementos comprimidos sin que se alcance el pandeo local de alguno de ellos, no pueden alcanzar el momento plástico requerido en zonas de mediana y alta sismicidad. El AISC 341-10 indica un tipo adicional de secciones, las compactas sísmicas, o aquéllas en las cuales se pueden alcanzar valores de rotaciones inelásticas del orden de 6 ó 7 veces mayores que los valores de las deformaciones por cedencia. En las secciones compactas, este valor es de unas 3 veces mayores que la deformación por cedencia. Esto significa, que las relaciones de esbeltez de los elementos comprimidos de la sección (b/t) sísmicamente compacta (λ_p) indicados en el AISC 360-10 (Tablas II.1a y II.1b) deberán satisfacer adicionalmente, en zonas sísmicas, los requerimientos indicados en la Tabla D1.1 del AISC 341-10, la cual evidentemente resulta en valores de relaciones de esbeltez de elementos comprimidos mucho más restrictivos aún.

En el caso de los perfiles disponibles localmente en Venezuela, especialmente las secciones transversales cuadradas y circulares, generalmente empleadas para miembros en flexocompresión (columnas), resultan los siguientes valores para las secciones huecas sin relleno de concreto:

Tabla No.1: Relaciones de Esbeltez en STT Cuadradas Huecas.
Fuente: Elaboración Propia.

AISC 341-10 (Tabla D1.1) (Secciones Tubulares Cuadradas Huecas)						
SECCION	LADO (b) (mm)	Espesor Nominal (t) (mm)	Radio externo (mm)	b/t	λ_{hd} (Alta Sismicidad)	λ_{md} (Mediana Sismicidad)
60x60	60	2.25	6.75	20.67	13.44	15.64
70x70	70	2.25	6.75	25.11		
90x90	90	2.50	7.50	30.00		
100x100	100	3.00	9.00	27.33		
110x110	110	3.40	10.20	26.35		
120x120	120	4.00	12.00	24.00		
135x135	135	4.30	12.90	25.40		
155x155	155	4.50	13.50	28.44		
175x175	175	5.50	16.50	25.82		
200x200	200	5.50	16.50	30.36		
200x200	200	7.00	21.00	22.57		
220x220	220	7.00	21.00	25.43		
220x220	220	9.00	27.00	18.44		
260x260	260	9.00	27.00	22.89		
260x260	260	11.00	33.00	17.64		

Como se puede apreciar, en la columna b/t, todos los valores superan los indicados para zonas de alta sismicidad (λ_{hd}) y mediana sismicidad (λ_{md}). Por lo tanto, ninguna de las secciones mostradas en la tabla resulta apropiada para su empleo en zonas en donde se requiere adecuada capacidad de disipación de energía y deformaciones inelásticas importantes de los miembros estructurales. La misma situación se puede apreciar para STT circulares huecas.

Tabla No.2: Relaciones de Esbeltez en STT Circulares Huecas.
Fuente: Elaboración Propia.

AISC 341-10 (Tabla D1.1) (Secciones Tubulares Circulares Huecas)					
SECCION	Diámetro Externo (b) (mm)	Espesor Nominal (t) (mm)	b/t	λ_{hd} (Alta Sismicidad)	λ_{md} (Mediana Sismicidad)
3	76.20	2.25	33.87	22.70	26.29
3 1/2	88.90	2.25	39.51		
4 1/2	114.30	2.50	45.72		
5	127.00	3.00	42.33		
5 1/2	139.70	3.40	41.09		
6	152.40	4.00	38.10		
6 5/8	168.30	4.30	39.14		
7 5/8	193.70	4.50	43.04		
8 5/8	219.10	5.50	39.84		
9 5/8	244.50	5.50	44.45		
9 5/8	244.50	7.00	34.93		
10 3/4	273.10	7.00	39.01		
10 3/4	273.10	9.00	30.34		
12 3/4	323.85	9.00	35.98		
12 3/4	323.85	11.00	29.44		

1.2 Conexiones entre STT.

El tema de las conexiones entre STT es sumamente discutido desde hace ya varios años. Se han hecho muchas propuestas y se han realizado numerosos ensayos, nacional (ANDARA, 2007; UGARTE et. al 2006) e internacionalmente (GARZA, L. 2011), para verificar si la capacidad que tienen ciertos tipos de conexiones, sobretodo en edificios aporricados de acero que emplean STT para sus miembros principales, vigas y columnas, resultan ciertamente adecuadas para poder clasificarse como Conexiones Rígidas, o dicho de otra manera, resistentes a momento. Existen muchas clasificaciones de conexiones en acero, y una de ellas las cataloga en tres tipologías: Flexibles, Semirrígidas y Rígidas. Las primeras son aquellas con una capacidad de resistir flexión relativamente baja (menos de un 10%), y por lo tanto, se considera en su análisis un valor nulo de capacidad a flexión. Las segundas, tienen una capacidad intermedia (cercana a un 50%), y las terceras, una capacidad a flexión muy elevada (superior al 90%).

Independientemente del tipo de conexión que se emplee, un aspecto fundamental es evitar completamente la unión directa de miembros estructurales mediante soldaduras sin el empleo o adición de elementos que permitan una adecuada transferencia de tensiones en los puntos de unión y miembros estructurales (ver Fig. No.3). El problema que se presenta es similar cuando las columnas se encuentran rellenas o no de concreto, exigencia de la normativa actual (Artículo I1.4, AISC 360-10 y Capítulo D, AISC 341-10) cuando se emplean STT en la construcción de edificaciones, ya que los reducidos espesores de las paredes de estos perfiles hacen posible la aparición de fenómenos de debilitamiento en las mismas con la posibilidad de aparición de rasgaduras, y por lo tanto, fallas en las conexiones (HERRERA, R. 2009). Una falla en una conexión entre perfiles en un edificio de acero estructural, no solamente es muy grave, sino potencialmente catastrófica para el comportamiento e integridad de toda la estructura. En análisis plásticos, la falla de un miembro estructural obliga a una redistribución de tensiones a otras zonas o miembros de la estructura. Por lo tanto, si todas las conexiones entre STT de una estructura se realizaron de manera similar, la falla de una pudiera ser el preámbulo de la falla de otras, con lo cual se imposibilitaría una eficiente redistribución de tensiones.

Por ello, las Normas referenciales de estructuras de acero mundiales, han establecido procedimientos y detalles estructurales, para garantizar un mejor comportamiento de conexiones en acero para STT. Una de las asociaciones internacionales dedicadas al estudio de la construcción con STT, es el CIDECT (*Comité Internacional para el Desarrollo del Estudio de Construcciones Tubulares*), la cual se ha propuesto la tarea de impulsar el estudio de diversas alternativas y prácticas constructivas para mejorar el comportamiento y detallado de edificaciones hechas con STT. En lo referente a las conexiones a momento entre vigas y columnas para edificios aporricados, y en especial en zonas sísmicas, se muestran varias tipologías empleando elementos intermedios para la transferencia de tensiones, tales como diafragmas y planchas, los cuales buscan que esa transferencia sea más uniforme y predecible y así evitar la formación de mecanismos frágiles de falla. La Fig. No.3 muestra algunas de las conexiones a momento sugeridas, las cuales se encuentran

en la Guía de Diseño para Conexiones de Columnas Estructurales de Sección Tubular (CIDECT No.9, 2005).

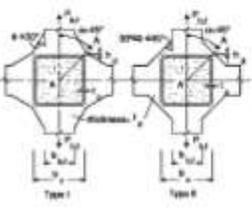
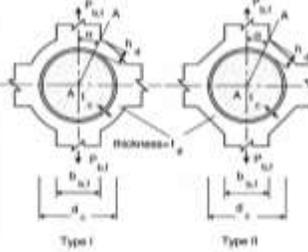
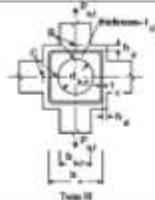
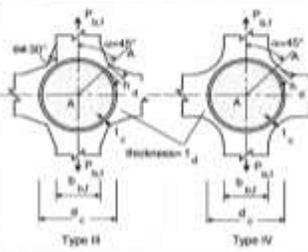
Shape of external diaphragm	Ultimate resistance equation		
 <p>Type I</p> <p>Type II</p>	<p>Type I connection: The design resistance is the larger of the values calculated by Eqs. 1 and 2.</p> $P_{b,r}^* = 2.74 \left(\frac{t_c}{d_c} \right)^{1/2} \left(\frac{t_d}{d_c} \right)^{1/2} \left(\frac{L_c - h_c}{d_c} \right)^{1/2} b_1^2 \sigma_{t,c} \quad (1)$ $P_{b,r}^* = 2.95 d_c t_c + t_d^2 t_{c,y} + 3.30 h_c t_{d,y} \quad (2)$ <p>If $t_{c,y} > t_{d,y}$, then calculate with $t_{c,y} = t_{d,y}$.</p> <p>Type II connection: The design resistance is given by Eq. 2.</p> <p>Symbols: $t_{c,y}$ = Yield strength of column material $t_{d,y}$ = Yield strength of diaphragm material $\sigma_{t,c}$ = Ultimate tensile strength of column material $P_{b,r}$ = Axial load in tension flange</p>	 <p>Type III</p> <p>Type IV</p>	$P_{b,r}^* = 3.09 f_c(\alpha) A_1 t_{c,y} + 1.77 f_d(\alpha) A_2 t_{d,y} \quad (1)$ <p>where</p> $f_c(\alpha) = \sin \alpha$ $f_d(\alpha) = \sqrt{2 \sin^2 \alpha + 1}$ $A_1 = \left(0.63 + 0.88 \frac{b_1}{d_c} \right) \sqrt{d_c t_c} + t_c t_c$ $A_2 = h_c t_c$ <p>Symbols: $t_{c,y}$ = Yield strength of column material $t_{d,y}$ = Yield strength of diaphragm material $P_{b,r}$ = Axial load in tension flange α = Slope of critical section</p>
 <p>Type III</p>	<p>Type III connection: The design resistance is the smaller of the values given by Eqs. 3 and 4.</p> $P_{b,r}^* = 1.43 b_1 + 2 h_c - d_c \left(\frac{b_1}{d_c} \right) t_{c,y} \quad (3)$ $P_{b,r}^* = 1.43 (b_1 + 2 h_c - d_c) t_{d,y} \quad (4)$ <p>Symbols: See above.</p>	 <p>Type III</p> <p>Type IV</p>	$P_{b,r}^* = 2.19 A_1 t_{c,y} + 2.53 A_2 t_{d,y} \quad (2)$ <p>where</p> $A_1 = \left(0.63 + 0.88 \frac{b_1}{d_c} \right) \sqrt{d_c t_c} + t_c t_c$ $A_2 = h_c t_c$ <p>Symbols: See above.</p>
Range of validity		Range of validity	
$20 \leq h_c/d_c \leq 50$, $0.75 \leq t_d/t_c \leq 2.0$, $t_d > t_c$, $t_d/t_c \geq 0.15 t_c/t_c$ (Type I), $t_d/t_c \geq 0.15 t_c/t_c$ (Type II)		$20 \leq d_c/t_c \leq 50$, $t_d/d_c \leq 0.3$, $0.25 \leq t_d/t_c \leq 0.75$	

Fig. No.3: Conexiones entre STT con elementos intermedios (diafragmas).

Fuente: CIDECT No.9 (2005).

En la evaluación de la conexión elegida se aprecia, entre otras cosas, el rango de validación geométrica y el cálculo de la fuerza de tracción ($P_{b,r}^*$) con la cual se obtiene el espesor definitivo de los diafragmas. Es un procedimiento relativamente simple y que permite obtener conexiones con excelente capacidad y comportamiento sismorresistente, en general. Siguiendo este procedimiento de análisis y detallado de la conexión entre STT, se evita la introducción de condiciones de vulnerabilidad estructural por conexiones con niveles de empotramiento semirrígido en vez de rígido que presentan, por ejemplo, aquellas entre vigas y columnas soldadas directamente entre sí sin algún elemento intermedio (diafragma). Con esto, el comportamiento de las estructuras aporticadas resultaría más predecible y ajustado a la realidad arrojada del modelo matemático analizado en el computador, en donde y en general, se consideran niveles elevados de empotramiento en el extremo de los miembros.

Obsérvese en las dos imágenes siguientes, cómo la introducción de los diafragmas permite descargar de tensiones del perfil estructural de la columna, quedando por lo tanto demostrado el comportamiento rígido de la conexión versus el semirrígido que resulta de la práctica común de soldar directamente los miembros entre sí (vigas y columnas), sin elementos intermedios para la transferencia de tensiones entre ellos. La abolladura sectorizada de la columna con la consecuente rotación del extremo de la viga ponen de manifiesto la reducción de la capacidad a flexión de la conexión.

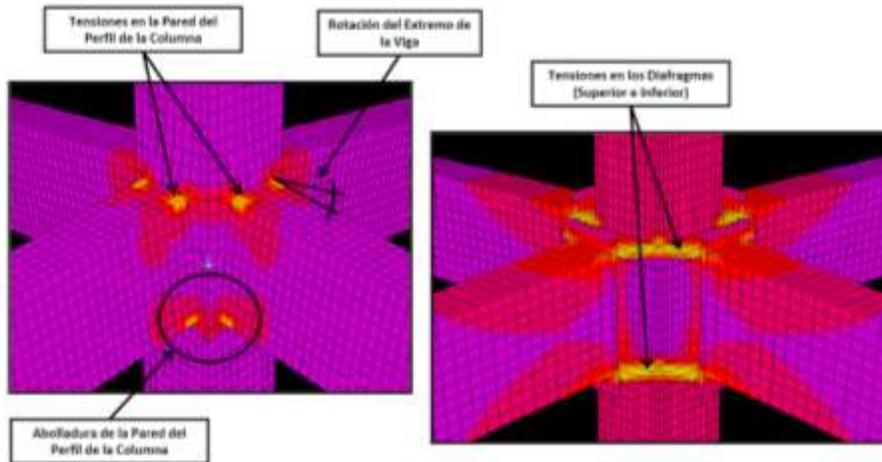


Fig. No.4: Conexiones entre STT (sin diafragmas y con diafragmas).
Fuente: LOGES, S. (2016)

El comportamiento semirrígido de la conexión entre STT sin elementos intermedios ha sido documentado con amplitud, obteniéndose de ensayos realizados a pórticos de acero estructural, deformaciones importantes de las paredes del perfil de la columna y fallas en las conexiones (FERNÁNDEZ, I., CASTAÑEDA, J. 1999). Esta práctica es hoy por hoy aún difundida en Venezuela, lo cual genera numerosas incertidumbres acerca del comportamiento sismorresistente de algunas edificaciones fabricadas con STT y su ductilidad real. Se ha podido constatar la similitud entre modelos por elementos finitos y ensayos reales. La abolladura del perfil de la columna y las fallas en soldaduras son los principales problemas que este tipo de conexiones presentan, sobre todo en zonas sísmicas, en donde se requiere que éstas tengan la suficiente capacidad estructural para soportar las cargas alternantes producidas por el fenómeno en sí.



Foto No.2: Fallas en ensayos de conexiones directas entre STT.
Fuente: FERNÁNDEZ, I., CASTAÑEDA, J. (1999).

Un importante antecedente acerca de ensayos a perfiles tubulares fue el realizado por UGARTE, A., SARCOS, A. y FLORES, J. (2006) y publicado bajo el título

Comportamiento de Tubos Cuadrados a Flexión Monotónica. En ese trabajo se concluyó lo siguiente: “El tubo cuadrado de pared delgada cuando es sometido a flexión monotónica fuerte presenta un comportamiento inadecuado que limita su uso en zonas sísmicas de Venezuela o en diseño de estructuras sometidas a vientos fuertes o incluso cargas estáticas fuertes que no estén perfectamente establecidas, ya que éste no posee ductilidad y se podrían generar fallas frágiles de las estructuras diseñadas con estos elementos, sin embargo si se desea emplear este tipo de elementos en el diseño de estructuras de acero, se recomienda considerar una ductilidad de uno ($D = 1$).”

La especificación AISC 358-10, “*Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*” (Conexiones precalificadas para Pórticos Especiales e Intermedios a Momento para Aplicaciones Sísmicas), material de consulta indispensable para el análisis y diseño de conexiones precalificadas (aquellas que han sido ensayadas y cuyo procedimiento de análisis es validado por resultados experimentales, resultando así apropiadas para ser empleadas en zonas con sismicidades medias a altas debido a su predecible y satisfactoria respuesta estructural), presenta muchos tipos de conexiones en acero estructural. Entre ellas, especialmente se indica una en la cual empleo de perfiles tubulares en columnas llama la atención. Es el Sistema ConXtech® ConXL™, ideal para edificaciones de 2 a 10 pisos de altura, y la cual presenta, uniones de vigas con las columnas soldando específicamente en las esquinas de los perfiles de dichas columnas, o zonas de mayor resistencia de este tipo de STT, y empleando elementos intermedios para la transferencia de tensiones. Éstas conexiones han sido ensayadas con amplitud, y actualmente se emplean en numerosas edificaciones para usos diversos, entre ellos, estacionamientos. El aspecto negativo, sobretodo para los Ingenieros Estructurales venezolanos, es que se incluye en una gama de conexiones precalificadas patentadas, las cuales no se encuentran disponibles en el país, por lo que su uso es sumamente restringido y costoso.



Foto No.3: Sistema ConXtech® ConXL™
Fuente: MURRAY, T. (2011).



Foto No.4: Preparación de una Conexión para Columna Tubular Circular y vigas IPE de acuerdo a CIDECT No.9

Fuente: Fotografía de LOGES, S. (2008).

2.3 Columnas STT Rellenas de Concreto

Un aspecto característico e indispensable en zonas sísmicas, es rellenar las columnas STT con concreto, lo cual retrasa la aparición de fallas locales por pandeo de la columna. Esta condición se encuentra contenida en las Normas actuales, entre ellas, AISC 341-10, guía complementaria de la AISC 360-10 y a la cual supera en exigencia de sus requerimientos. Es muy importante destacar, que el concreto que se vacía internamente en la STT, debe cumplir con ciertas especificaciones normativas, entre las cuales se encuentran las siguientes (CARRASCO, S. 2010):

- a) Para concretos con peso unitario normal (iguales a 2400 kgf/m^3), el valor de $f'c$ se encuentra entre 210 kgf/cm^2 y 700 kgf/cm^2 .
- b) Para concretos con pesos unitarios livianos (iguales o menores a 1840 kgf/m^3), el valor de $f'c$ se encuentra entre 210 kgf/cm^2 y 420 kgf/cm^2 .

El concreto interno de la STT le proporciona a la ahora sección mixta (concreto – acero) una importante ganancia de capacidad, por lo que su empleo resulta más adecuado en zonas sísmicas. Esto se puede evidenciar en las siguientes tablas, en donde las secciones se pueden incluir en las categorías de alta y media sismicidad, de acuerdo a las exigencias de AISC 341-10:

Tabla No.3: Relaciones de Esbeltez en STT Cuadradas Rellenas de Concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

AISC 341-10 (Tabla D1.1)						
(Secciones Tubulares Cuadradas Rellenas de Concreto)						
SECCION	LADO (b) (mm)	Espesor Nominal (t) (mm)	Radio externo (mm)	b/t	λ_{hd} (Alta Sismicidad)	λ_{md} (Mediana Sismicidad)
60x60	60	2.25	6.75	20.67	34.22	55.24
70x70	70	2.25	6.75	25.11		
90x90	90	2.50	7.50	30.00		
100x100	100	3.00	9.00	27.33		
110x110	110	3.40	10.20	26.35		
120x120	120	4.00	12.00	24.00		
135x135	135	4.30	12.90	25.40		
155x155	155	4.50	13.50	28.44		
175x175	175	5.50	16.50	25.82		
200x200	200	5.50	16.50	30.36		
200x200	200	7.00	21.00	22.57		
220x220	220	7.00	21.00	25.43		
220x220	220	9.00	27.00	18.44		
260x260	260	9.00	27.00	22.89		
260x260	260	11.00	33.00	17.64		

Se aprecia que rellenas de concreto, todas las STT cuadradas son aptas para su uso en zonas con altas sismicidades. Para el caso de STT circulares rellenas de concreto, resulta lo siguiente:

Tabla No.4: Relaciones de Esbeltez en STT Circulares Rellenas de Concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

AISC 341-10 (Tabla D1.1)					
(Secciones Tubulares Circulares Rellenas de Concreto)					
SECCION	Diámetro Externo (b) (mm)	Espesor Nominal (t) (mm)	b/t	λ_{hd} (Alta Sismicidad)	λ_{md} (Mediana Sismicidad)
3	76.20	2.25	33.87	45.41	89.62
3 1/2	88.90	2.25	39.51		
4 1/2	114.30	2.50	45.72		
5	127.00	3.00	42.33		
5 1/2	139.70	3.40	41.09		
6	152.40	4.00	38.10		
6 5/8	168.30	4.30	39.14		
7 5/8	193.70	4.50	43.04		
8 5/8	219.10	5.50	39.84		
9 5/8	244.50	5.50	44.45		
9 5/8	244.50	7.00	34.93		
10 3/4	273.10	7.00	39.01		
10 3/4	273.10	9.00	30.34		
12 3/4	323.85	9.00	35.98		
12 3/4	323.85	11.00	29.44		

Todas las STT circulares rellenas de concreto, salvo el perfil 4 ½”, cumplen con los lineamientos establecidos en AISC 341-10 para su uso en zonas con alta sismicidad. Sin embargo, especial cuidado debe tenerse con la sección 7 5/8”, cuyo límite de esbeltez se encuentra cerca del rango máximo para altas sismicidades.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente documento, se han explicado aspectos importantes que condicionan el uso de perfiles estructurales de acero con STT en zonas en donde los requerimientos sismorresistentes resultan importantes. Estos requerimientos se refieren no solamente al tipo de perfiles, sino también a la manera en la cual éstos se unen o conectan entre sí. Pese a que se plantearon exclusivamente cuatro consideraciones de análisis y detallado importantes, relacionados con el material, tipos de conexiones, esbelteces de los elementos constitutivos de las STT y relleno de columnas con concreto, son éstos, principalmente, los que no se están cuidando en las construcciones que emplean este tipo de perfiles. En general y con gran preocupación, se observan edificaciones construidas o en plena construcción con STT en Venezuela, las cuales pudieran presentar problemas de desempeño sobre todo por las conexiones entre sus vigas y columnas, la tipología de dichas conexiones (soldadura directa entre perfiles sin elementos intermedios) y ausencia de relleno de concreto en los STT de las columnas, (condición indispensable para asegurar el retraso de fallas prematuras por pandeo local de los elementos de la sección), con lo cual y basado en resultados experimentales varios, pudieran no estar cumpliendo con los requerimientos mínimos de capacidad y seguridad estructural necesarios en zonas de mediana y alta sismicidad. Es muy importante que el profesional responsable del análisis y detallado estructural tome en cuenta, adicionalmente, que las ductilidades de referencia propias de estructuras aperticadas e indicadas en las distintas Normas sísmicas, son un aspecto muy importante a considerar, y en algunas investigaciones se ha recomendado, incluso, utilizar ductilidades con valores unitarios, que esencialmente resaltan el bajo nivel de disipación de energía que las STT presentan ante acciones sísmicas.

4. REFERENCIAS

Andara, J. (2007). *Análisis de Tubos Cuadrados de Acero Sometidos a Flexo-Compresión Uniaxial con Carga Axial Variable*. Trabajo de Grado para optar al título de Magister Scientiarum en Ingeniería Estructural. Universidad del Zulia. Maracaibo. 139 págs.

ANSI / AISC 360-10, (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, USA. 612 págs.

ANSI / AISC 358-10, (2010). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frame for Seismic Applications*. Chicago, USA. 178 págs.

ANSI / AISC 341-10, (2010). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago, USA. 402 págs.

ASTM A500/A500M-09. *Especificación Normalizada para Tubos Estructurales de Acero al Carbono Conformados en Frío, Electrosoldados y sin Costura, de forma Circular y no Circular.* (Versión en Español).

ASTM A572/A572M-07. *Especificación Normalizada para Acero Estructural de Alta Resistencia de Baja Aleación de Columbio-Vanadio.* (Versión en Español).

HERRERA, R. (2009). *Conexiones para Elementos Compuestos.* (s/i). 11 págs.

Carrasco, S. (2010). *Recomendaciones de Diseño de Columnas Compuestas de Acero – Hormigón Sometidas a Esfuerzos Básicos.* Trabajo Final de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 119 págs.

CIDECT No.9 (2005). *Design Guide for Structural Hollow Section Column Connections.* Colonia, Alemania. 213 págs.

COVENIN – MINDUR 1756-1:2001. *Edificaciones Sismorresistentes. Parte 1: Articulado.* Caracas. 89 págs.

Fernández, I. y CASTAÑEDA, J. (1999). *Evaluación de Uniones Viga – Columna Soldadas en Estructuras Tubulares Metálicas Aporticadas.* Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Metropolitana. Caracas.

Garza, L. (2011). *Conexiones PRM Calificadas en Colombia.* Encuentro Internacional del Acero en Colombia (EAC).

Loges, S. (2016). *Dibujo y Detallado de Conexiones Soldadas y Empernadas. Coherencia del Análisis, Detallado y Construcción.* Taller de Diseño y Detallado de Conexiones, Pagmarketing Soluciones-SIVENSA. Caracas. 221 págs.

Murray, T. (2011). *Prequalification of Moment Connections.* Encuentro Internacional del Acero en Colombia (EAC).

Ugarte A., SARCOS A. y FLORES J. (2006). *Comportamiento de Tubos Cuadrados a Flexión Monotónica.* Boletín Técnico IMME v.44 n.2, pp. 01-20. Caracas.

Safina, S. y GONZALEZ, F. (2011). *Diseño de Estructuras de Acero con Perfiles Tubulares UNICON.* Caracas. 304 págs.