

CONTENIDO

Artículos

1. Universidad, sistemas educativos y carreras académicas: un enfoque sistémico..... 13-36
Herrera, Rodolfo.
2. Sistema y lo sistémico en el pensamiento contemporáneo 37-52
Herrera, Rodolfo.
3. Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto..... 53-70
Navas, Alejandro.
4. Capacidad estructural de juntas T de perfiles de acero laminado en frío 71-86
Romanjek, Marija.
5. Control adaptivo utilizando programación dinámica heurística..... 87-102
Gólcher, Luis.
6. Análisis de la capacidad de drenado de celulosa de bagazo de caña..... 103-113
Aguilar, Noé.

Notas técnicas

1. Evaluación de los modelos utilizados en los estudios del control PID..... 117-129
Alfaro, Víctor.
2. Cálculo para Costa Rica de la aceleración de la gravedad y su incertidumbre aplicando el método de Monte Carlo a la Fórmula Internacional de la Gravedad..... 131-138
Paniagua, Carlos.
3. Traducción del resumen de la octava edición del SI brochure 139-143
Paniagua, Carlos.

Análisis y comentarios

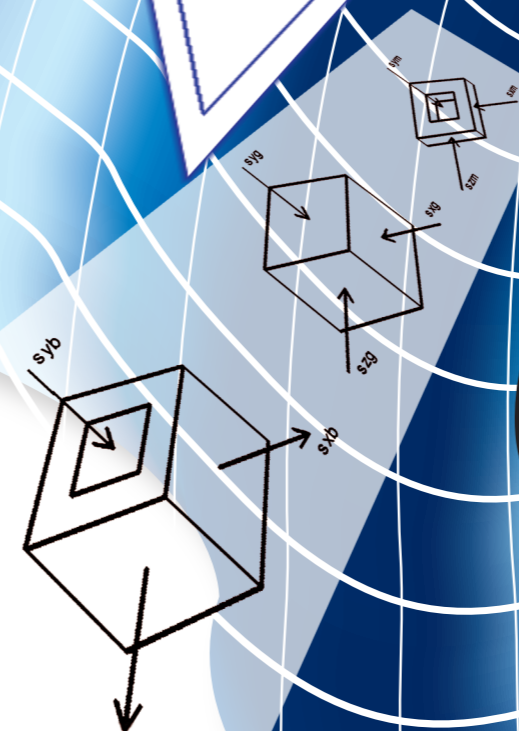
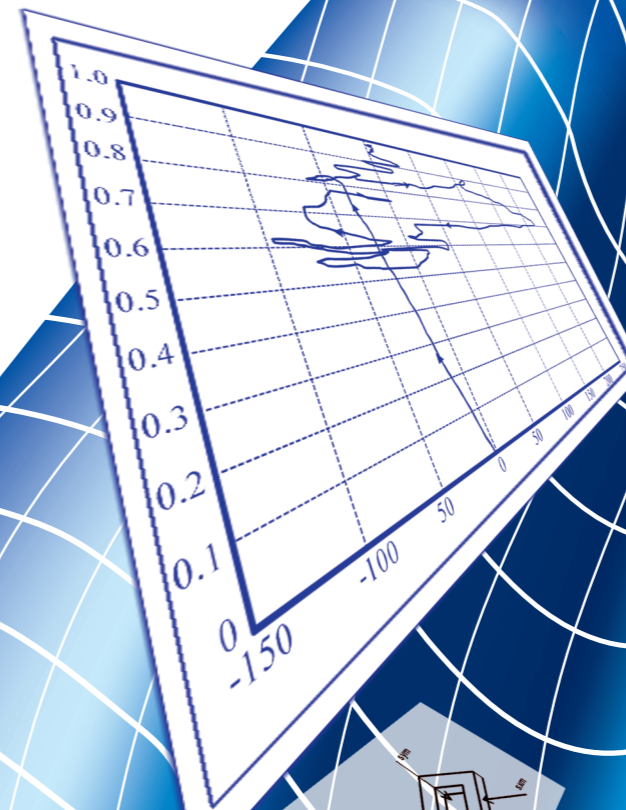
1. Reseña del libro La modernización entre cafetales. San José, Costa Rica, 1880:1930 147-149
Sanou, Ofelia.

Trabajos de Graduación 2007

- Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2007 de la Facultad de Ingeniería 153-170

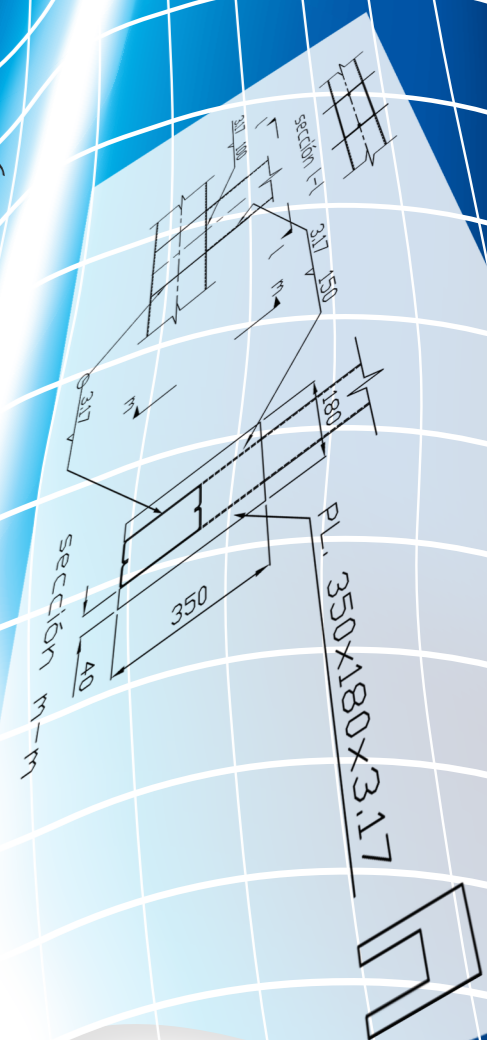
Normas

- Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 173-180



INGENIERÍA

UCR



CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE JUNTAS T DE PERFILES DE ACERO LAMINADO EN FRÍO

Marija Romanjek Blimel

Resumen

Este estudio es consecuencia del uso extendido de tubo estructural y cajones formados con dos secciones tipo C (ambas de acero laminado en frío) en las estructuras principales de diferentes tipos de edificaciones. Dichas prácticas han puesto en evidencia la necesidad de cuantificar la resistencia de la unión viga y columna elaboradas con este material. Se investigaron cuatro diferentes tipos de uniones, con el propósito de determinar la capacidad máxima correspondiente. Esta evaluación se realizó por medio de experimentación directa a escala natural, con el complemento de análisis por el método de elementos finitos. Se comparó la resistencia y el comportamiento macroscópico de cada tipo y se indica la unión óptima resultante.

Palabras clave: unión viga y columna, acero laminado en frío

Abstract

The extensive use of structural tube and double C-sections (both cold-formed steel structural members) as the main structural members for many kinds of buildings in Costa Rica compels the need to evaluate the resistance of welded beam-column joints with those materials. Therefore, four different types of joint were tested to evaluate maximum allowable loads for each case. This was performed through direct experimentation with real-life scale joints complemented with finite element modeling. Load resistance values and macroscopic behavior are compared and an optimal joint is chosen.

Key words: beam-column joints, cold-formed steel structural members

Recibido: 10 de diciembre del 2007 • **Aprobado:** 01 de febrero del 2008

1. INTRODUCCIÓN

Durante un sismo, las zonas con mayores esfuerzos serán las conexiones viga-columna¹. Por lo tanto, en un diseño óptimo, estas conexiones deben tener la capacidad de resistir tanto como el elemento más débil que concurra a la conexión². Los elementos de lámina delgada tienen espesores muy pequeños en comparación con su ancho y se pandean bajo esfuerzos pequeños que resultan de cargas de compresión, de flexión, de corte o de aplastamiento. En las conexiones viga-columna, la transmisión del momento de la viga a la columna es con un par de fuerzas. La fuerza de compresión que actúa sobre el alma de la columna puede provocar su pandeo, si no ha sido reforzada con rigidizadores.

En Costa Rica, es muy común ver este tipo de uniones en las construcciones, realizadas mediante soldadura manual y sin refuerzo alguno para el alma de la columna³. Por esto, surgió la necesidad de investigar la capacidad de dichas uniones, así como de ciertas variantes que sí tienen refuerzos, algunas de ellas ideadas para este trabajo. Aunque se han hecho estudios de uniones soldadas para aceros trabajados en frío⁴, ninguno se refiere a uniones soldadas viga-columna de acero en lámina trabajada en frío; este artículo no tiene precedente específico.

Se prepararon, en total, diecisiete muestras agrupadas en cuatro tipos de uniones distintas. Se distribuyeron como tres muestras de uniones tipo: 1C, 2C, 3C, 1T y 3T; y dos muestras de unión tipo 4T.

Todas las muestras fueron preparadas en las instalaciones de la empresa Tubotico y llevadas al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), en donde se realizaron las pruebas con el personal, maquinaria e instrumentación, propiedad de dicho laboratorio. Para tener el mejor panorama posible del comportamiento del material en los nudos durante el ensayo, y para comparar las deformaciones locales con los resultados que se obtuvieron con modelos por elementos finitos, se instalaron en algunas muestras, galgas extensométricas y se midieron las deformaciones globales en diversos puntos del nudo.

Las propiedades mecánicas del acero de las muestras se determinaron con pruebas destructivas, a probetas extraídas de las muestras

una vez que se fallaron, de acuerdo con la normativa vigente⁵. Para evitar las zonas que hayan sufrido endurecimiento por deformación durante el ensayo, las probetas se sacaron de la parte de la muestra que fue menos esforzada y donde los esfuerzos fueron muy inferiores al esfuerzo de fluencia. Esta decisión de sacar las probetas de las muestras se debe a que las uniones construidas con tubo presentaban mayor resistencia en uniones idénticas, pero con cajón formado por 2C. Se esperaba lo contrario, en vista de que la sección del cajón 2C tiene un momento de inercia ligeramente mayor. Por ello, se sospechó que el tubo estructural y el perfil C fueron hechos de diferentes lotes de acero y que tendrían diferentes propiedades mecánicas, y esto se comprobó después de fallar las probetas.

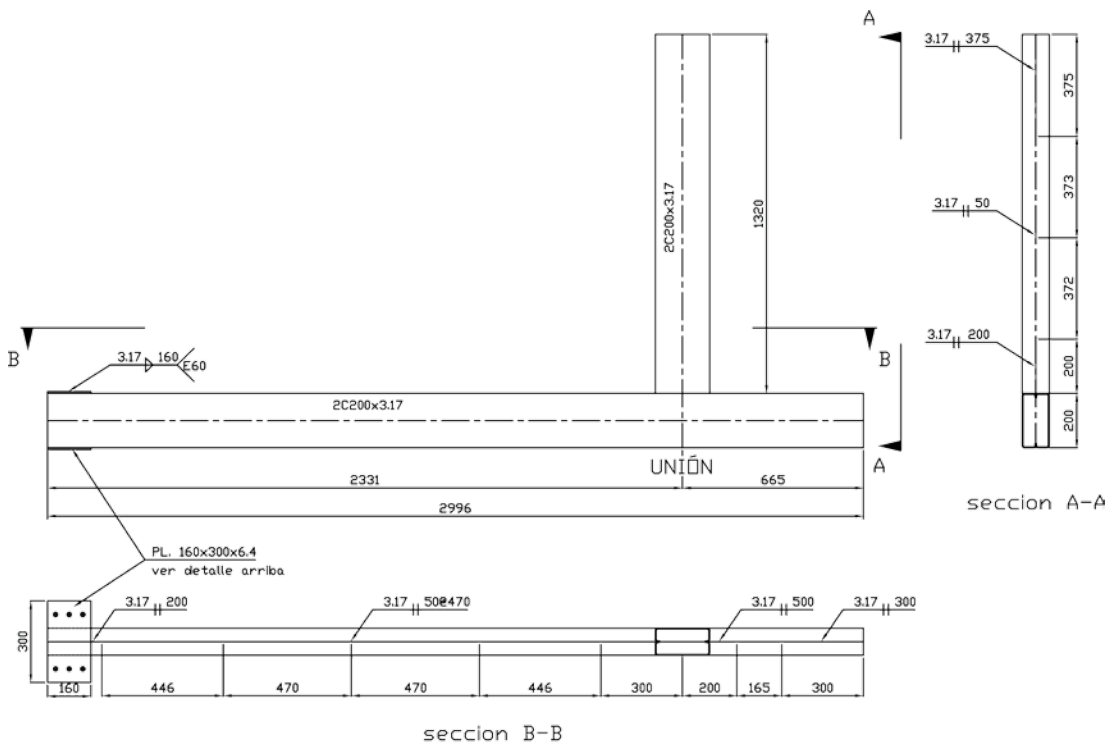


Figura 1. Geometría y dimensiones de las muestras (cotas en milímetros).

Fuente: (La autora, 2004).

2. MUESTRAS Y APLICACIÓN DE LA CARGA

En la Figura 1 se muestran las dimensiones y la geometría, de las muestras para el caso de las pruebas de las secciones tipo cajón, formadas por dos perfiles tipo C 50 x 200 x 317 mm, unidas por la soldadura intermitente indicada. El tramo horizontal de la muestra corresponde a la columna en una unión, mientras la pieza vertical corresponde a la viga. En el extremo izquierdo de las muestras se soldaron dos placas (una arriba y otra abajo) con el propósito de conformar un apoyo empotrado en la pared rígida. En el extremo derecho la columna se encuentra simplemente apoyada, lo que es equivalente a una articulación móvil en dirección horizontal (ver Figura 2).

La carga se aplicaba en el extremo superior de la viga, por medio del gato disponible en

LANAMME y con base en los desplazamientos del gato preprogramado. Se aplicaba en series de tres ciclos. Cada serie consistía de tres ciclos de desplazamientos de la misma magnitud, en cada dirección. Dirección positiva corresponde al estiramiento del gato, mientras la dirección negativa, corresponde al encogimiento del gato.

En la primera serie de ciclos, el desplazamiento del gato equivalía al 25% del desplazamiento con el cual empezaría la fluencia del material (Δ_y), según las propiedades mecánicas de la sección de la muestra y el límite de fluencia del acero anunciado por el fabricante: 2310 kg/cm² (226 MPa). El valor del Δ_y y la fuerza correspondiente P_y , se obtuvieron realizando el cálculo estático en el esquema de la muestra. Con cada serie nueva, según los cálculos, el desplazamiento se incrementaba, según lo mostrado en el Cuadro 1.

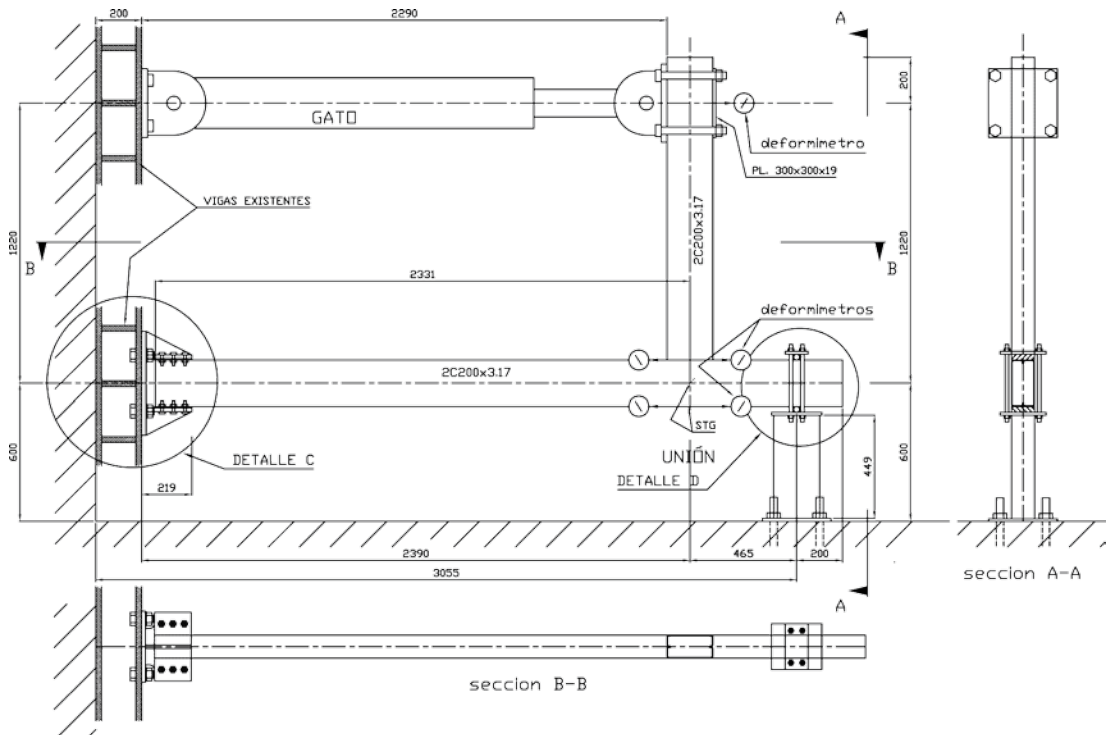


Figura 2. Montaje experimental de las muestras (cotas en milímetros).

Fuente: (La autora, 2004).

Cuadro 1. Desplazamientos (Δ) y velocidad (v) del movimiento del gato correspondiente a cada serie de ciclos, según como se realizaron las pruebas.

% Δy	2C50x100x3.17		T100x200x3.17	
	Δ (mm)	v (mm/s)	Δ (mm)	v (mm/s)
25	3,81	0,5	2,94	0,4
50	7,62	1	5,88	0,8
75	11,43	1,5	8,81	1,2
100	15,24	2	11,75	1,6
125	19,05	2,5	14,69	2
150	22,86	3	17,63	2,4
200	30,48	4,1	23,5	3,1
250	38,1	5,1	29,38	3,9
300	45,72	6,1	35,25	4,7
400	60,96	8,1	47	6,3
500	76,2	10,2	58,75	7,8
600	91,44	12,2	70,5	9,4
700			82,25	11

Fuente: (González & la autora, 2005).

3. TIPOS DE LAS UNIONES ENSAYADAS

3.1 Unión tipo 1 (1C y 1T)

La unión tipo 1 consta en hacer una soldadura alrededor de toda la junta de los dos elementos involucrados. Es el tipo de unión que se realiza con mayor frecuencia en las construcciones en el país⁶. La viga está simplemente soldada a la columna. Se prepararon seis muestras de este tipo de unión: tres en sección cajón formado por dos secciones en C de dimensiones 50 x 200 x 3,17 mm (designadas como unión tipo 1C) y tres en sección tubular de dimensiones 100 x 200 x 3,17 mm (designadas como unión tipo 1T). El detalle de la unión tipo 1 se muestra en la Figura 3.

3.2 Unión tipo 2C

En la Figura 4 se muestra el detalle de la unión tipo 2. Esta unión se parece al tipo 1, con la diferencia de que las almas de la columna

(elemento horizontal en la figura y en la prueba) se rigidizan con dos juegos de dos placas de 3,17 mm de espesor, según se muestra en la Figura 3. Cada placa se encuentra en el interior de la sección C, coincidente con las alas de la viga (elemento vertical en la figura y en la prueba) y se indicó soldadura a lo largo del alma. Posteriormente, se comprobó que las placas adicionalmente fueron soldadas en las alas del perfil.

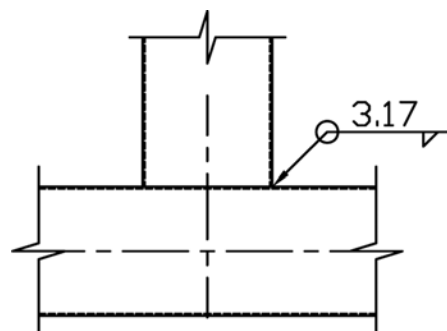


Figura 3. Detalle de la unión tipo 1.

Fuente: (La autora, 2004).

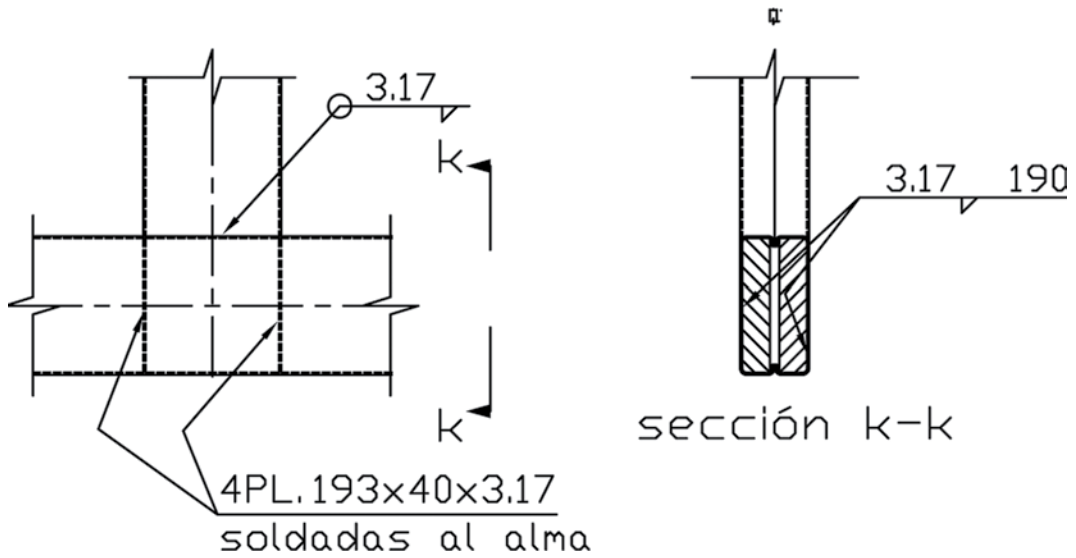


Figura 4. Detalle de la unión tipo 2.

Fuente: (La autora, 2004).

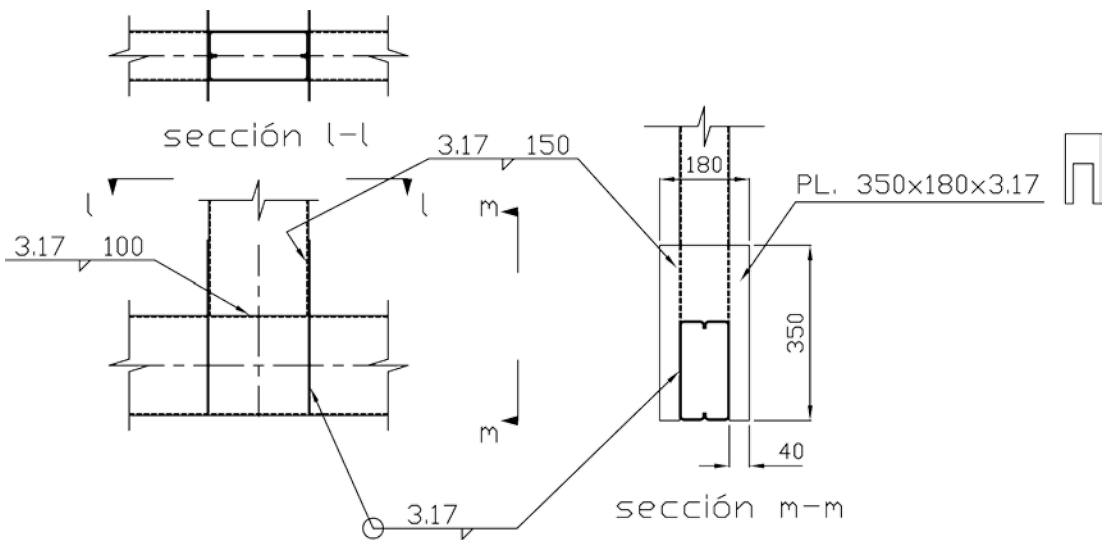


Figura 5. Detalle de la unión tipo 3.

Fuente: (La autora, 2004).

Naturalmente, es imposible colocar y soldar un conjunto de placas similar en el interior de un tubo, por lo que únicamente se hicieron estas uniones para secciones tipo cajón con 2C. Se hicieron y se probaron tres muestras de esta unión y se la designó como unión tipo 2C.

3.3 Unión tipo 3 (3C y 3T)

En la unión tipo 3 las almas de las columnas están rigidizadas por medio de piezas exteriores, que consisten en dos placas en forma de U invertida, según se muestra en la Figura 5. Las placas se soldaron a las vigas en todas las aristas de contacto con ella, al igual que con la columna. De esta manera se transmite con mejor uniformidad el momento flector de la viga a la columna⁷. Aparte de la unión a través de las placas, el alma de la viga se soldó a la columna para que las placas no tengan que transmitir la fuerza cortante proveniente de

la viga. Se prepararon seis muestras de este tipo de unión: tres en sección cajón formado por dos secciones C con dimensiones (50 x 200 x 3,17) mm (designadas como unión tipo 3C) y tres en sección tubular de dimensiones (100 x 200 x 3,17) mm (designadas como unión tipo 3T).

3.4 Unión tipo 4T

En un principio se iban a probar los tres primeros tipos de unión ya descritos, pero se evaluó un cuarto tipo de unión, preferida por algunos profesionales en la práctica de la construcción, dado que ha proliferado por su supuesta mejor resistencia y facilidad de ensamble. Esta unión hecha con tubo estructural está reforzada con dos placas laterales de 3,17 mm de espesor y se denominó como unión tipo 4T. La empresa Tubotico preparó las dos muestras de este tipo y ambas se probaron.

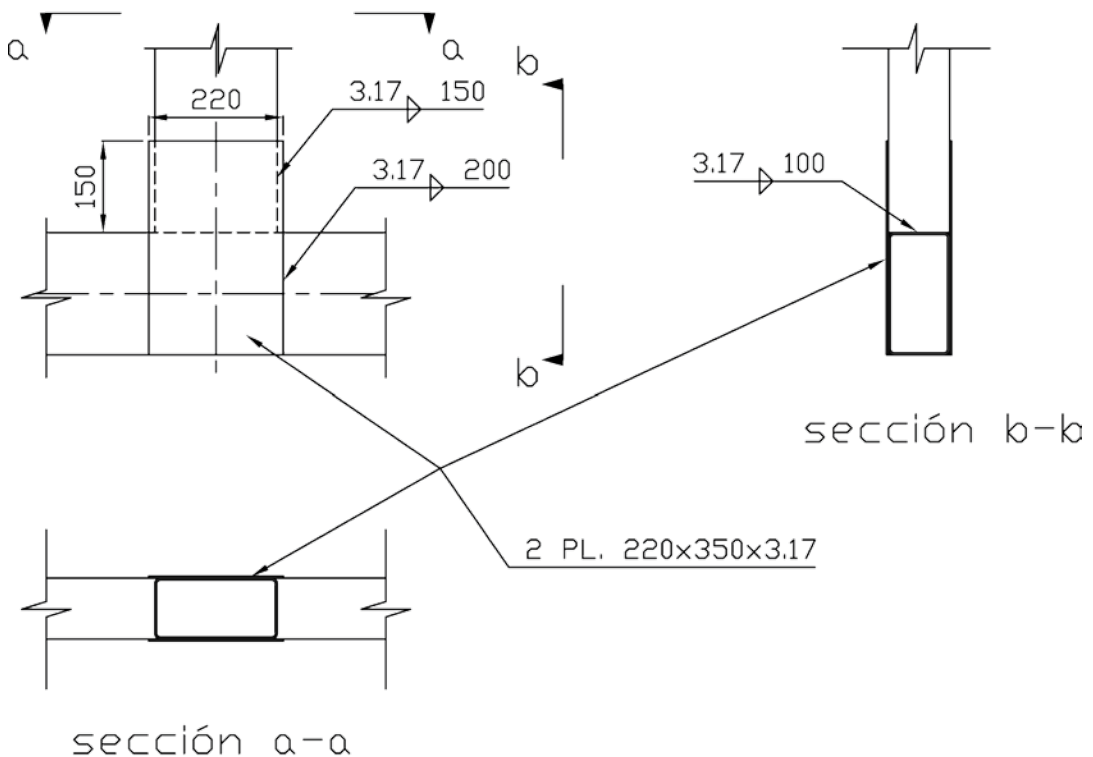


Figura 6. Detalle de la unión tipo 4.

Fuente: (La autora, 2005).

4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

4.1 Generalidades

En el Cuadro 2 se presentan los resultados generales de las pruebas. El valor P_{max} indica la resistencia máxima que presentó la determinada muestra al movimiento de avance del gato durante el ensayo y P_{ymax} muestra el valor de la carga con la cual la unión o alguna sección del perfil empezó a fluir. Con P_{min} se indica la resistencia máxima que presentó la muestra al retroceso del gato durante el ensayo y P_{ymin} muestra el valor de la carga con la cual la unión o la sección del perfil empiezan a fluir durante el retroceso del gato. P_{prom} y P_{yprom} indican los valores promedio de los valores máximos absolutos de las cargas correspondientes. Con P_{AISI} se indica la capacidad máxima que tiene la sección en combinación de

la fuerza cortante y el momento correspondiente calculados según las especificaciones de AISI con los factores de resistencia: $\Phi_b = \Phi_v = 0.95$ y con el límite de fluencia obtenido de las pruebas de las probetas sacadas de las muestras. Para que la unión sea eficiente debe resistir lo que es la capacidad de la sección o sea P_{AISI} . La última columna del Cuadro 2 muestra la relación entre lo que la muestra resistió y lo que debería haber resistido.

Según muestra la última columna del Cuadro 2, solamente las uniones tipo 2, tipo 3 y tipo 4 superaron la capacidad de la sección. **Las uniones tipo 1 no fueron suficientes.**

Resulta algo inesperado que las uniones de tubo estructural ofrecieron en general mayor resistencia en vista de que su momento de inercia es ligeramente menor que el de las secciones 2C.

Cuadro 2. Resumen de los resultados de las pruebas y comparación con la capacidad según las especificaciones de AISI

UNIÓN TIPO	MUESTRA	P_{max} (kN)	P_{ymax} (kN)	P_{min} (kN)	P_{ymin} (kN)	P_{prom} (kN)	P_{yprom} (kN)	P_{AISI} (kN)	P_{prom}/P_{AISI}
1C	#1	20,1	18,98	-19,52	-18,52	20,6	19,4	35,3	0,58
	#2	20,9	19,76	-20,1	-18,24				
	#3	22,1	22,3	-20,9	-18,35				
1T	#1	29,7	28,5	-26,8	-25,2	27,7	25,6	33,8	0,82
	#2	28,6	25,9	-26,3	-24,4				
	#3	28,3	25,4	-26,5	-24,2				
2C	#1	36,4	33,5	-38,8	-35,9	37,1	34,6	35,3	1,05
	#2	36,7	34,0	-37,3	-36,4				
	#3	34,6	32,0	-38,8	-36				
3C	#1	41,1	38,8	-45,2	-42,7	41,6	39,3	40,6	1,02
	#2	32,8	31,1	-46,9	-45,4				
	#3	40,6	38,0	-42,7	-39,9				
3T	#1	46,4	42,5	-46,8	-44,7	47,5	44,1	38,9	1,22
	#2	47,7	44,7	-46,7	-42,4				
	#3	47,7	44,7	-49,4	-45,5				
4T	#1	33,8	30,4	-35,0	-34,5	33,9	20,7	23,6	1,43
	#2	35,2	31,5	-31,4	-27,6				

Fuente: (La autora, 2007).

Sin embargo, la resistencia al momento depende también del límite de fluencia del acero, y las probetas que se sacaron de ambos tipos de acero muestran que esta resistencia varía mucho. Los resultados hacen evidentes diferencias entre el acero de los tubos en las uniones 1T y 3T ($F_y = 418$ MPa) y el acero en las uniones 4T ($F_y = 252$ MPa) que pertenecían a lotes distintos, puesto que se fabricaron posteriormente. El acero usado para formar las secciones C mostró un límite de fluencia promedio de $F_y = 405$ MPa. Como la diferencia en los límites de fluencia entre el acero de los tubos y las secciones C no es tan amplia como la que hay entre las cargas máximas, es probable que hubo problemas con el control del etiquetado de las probetas de las muestras para las uniones tipos 1, 2 y 3, con lo que se pudieron confundir los resultados⁸.

También merece especial atención la diferencia considerable entre las cargas P_{max} y P_{min} de la muestra #2 de la unión tipo 3C. Es probable que el gato hidráulico tuviera una carga inicial sin que los operadores se percataran; esto había

pasado en algunas de las otras pruebas, por lo que esta carga se consideraba a la hora de analizar los datos.

4.2 Modos de falla de las muestras y observaciones

4.2.1 Unión tipo 1

En todas las muestras, ya sea en la sección tipo cajón o en la sección de tubo, los primeros indicios del colapso se manifiestan como pandeo local del alma de la columna debajo de la unión con la viga⁹. Dicho pandeo se debe a la concentración de los esfuerzos provenientes del momento que transmite la viga; conforme se incrementa la carga, se incrementa el pandeo y ocurren deformaciones suficientes en las esquinas e inmediatamente por encima o por debajo de la soldadura como para que se inicien grietas visibles. Después, la grieta se propaga a lo largo de la unión, hasta que la viga queda desligada de la columna.

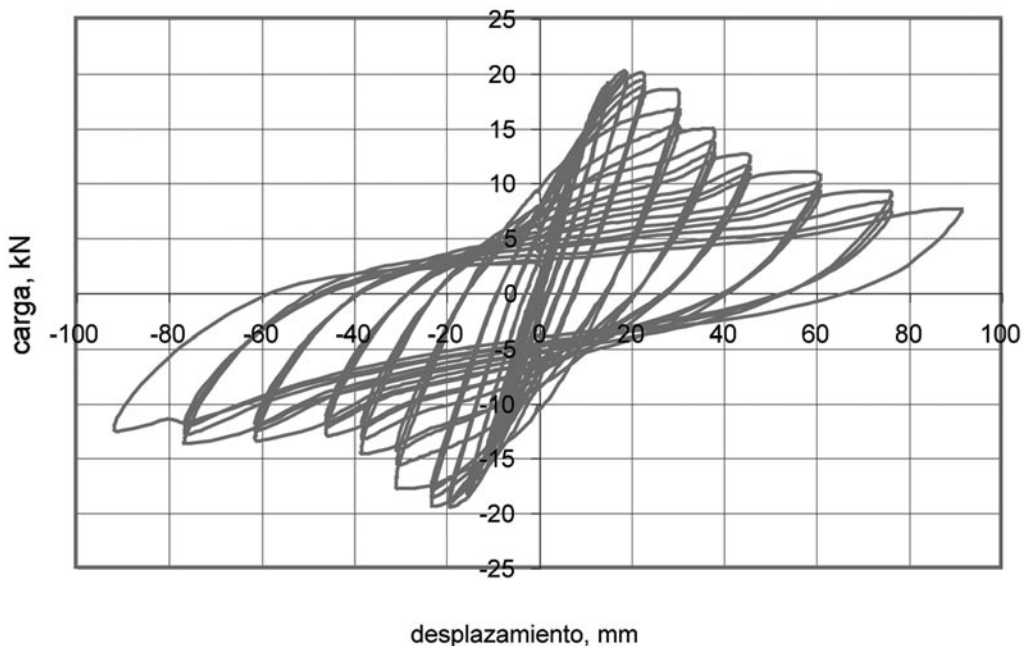


Figura 7. Diagrama típico de la unión tipo 1C, según muestra #1.

Fuente: (La autora, 2007).

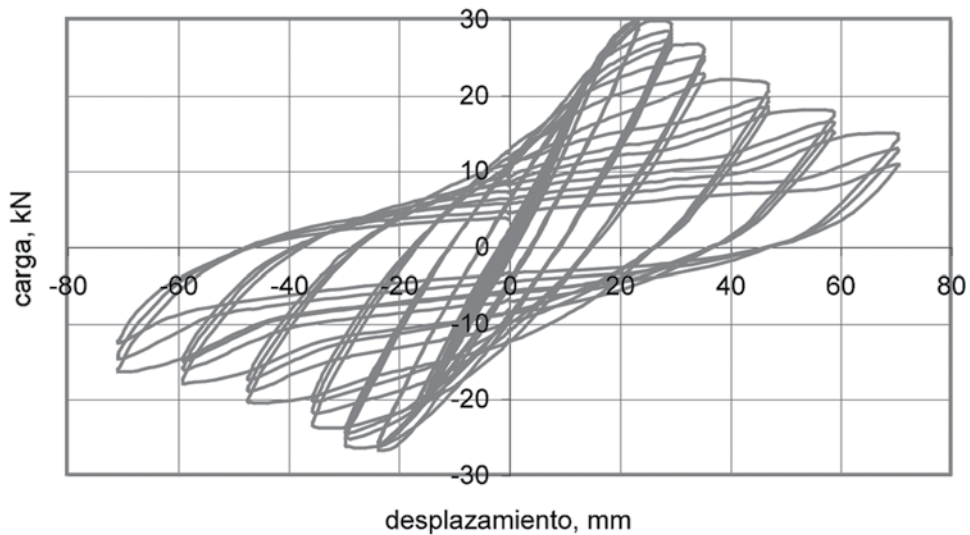


Figura 8. Diagrama típico de la unión tipo 1T, según muestra #1.

Fuente: (La autora, 2007).

Calculando las capacidades nominales de las secciones según el límite de fluencia obtenido de las probetas y de acuerdo con las especificaciones de AISI 2001, esta unión debió resistir al menos lo que es la capacidad nominal de la viga en una combinación de fuerza cortante y flexión, tal que, $M = 1,12V$. En el Cuadro 2 se muestra la relación entre lo que las uniones resistieron y lo que deberían haber resistido. La unión tipo 1C resistió apenas un 58% de lo que es la capacidad de la sección 2C, mientras la unión tipo 1T resistió un 82% de lo que es la capacidad de la sección del tubo¹⁰.

Según la forma que muestran los diagramas carga – desplazamiento del gato (Figuras 7 y 8) se nota que una vez alcanzada la carga máxima y conforme se incrementa el desplazamiento, la carga rápidamente va disminuyendo. Esto significa que la sección no tiene la capacidad de mantener el momento de fluencia y tampoco puede desarrollar una articulación plástica. La ductilidad es muy poca.

4.2.2 Unión tipo 2

A diferencia de la unión tipo 1, el primer indicio de colapso se muestra como pandeo local del alma

de la viga. Se debe a la combinación de flexión y fuerza cortante en la sección de la viga cercana a la unión. Según los cálculos, la capacidad de la viga en combinación con la cortante y flexión ($M=0,97V$) es 35,3 kN, un poco menos que P_{prom} (37,1 kN), o sea, la unión resistió un 5% más de lo que es la capacidad de la sección calculada según AISI con los factores de resistencia $\Phi_b = \Phi_v = 0,95$. Igual como en la unión tipo 1, las primeras grietas aparecen en las esquinas inmediatamente a la par de la soldadura.

Posteriormente al ensayo, se cortó la columna a través de una sección a la par de la unión. Así se pudo constatar que los rigidizadores del alma de la columna también estaban pandeados. Se supone que este pandeo sucedió posteriormente al pandeo del alma de la viga y la aparición de las grietas, debido a que en el alma de la columna no se notó abombamiento. Se concluye esto con base en las deformaciones que mostró la roseta de la deformación. Calculando los esfuerzos en el centro del nudo, con base en las deformaciones, estos superaron el límite de fluencia. De todas formas, los rigidizadores cumplieron con su función. La unión colapsó después del pandeo local en la viga, o sea, la unión resistió un poco más (5%) que el elemento que se juntaba.

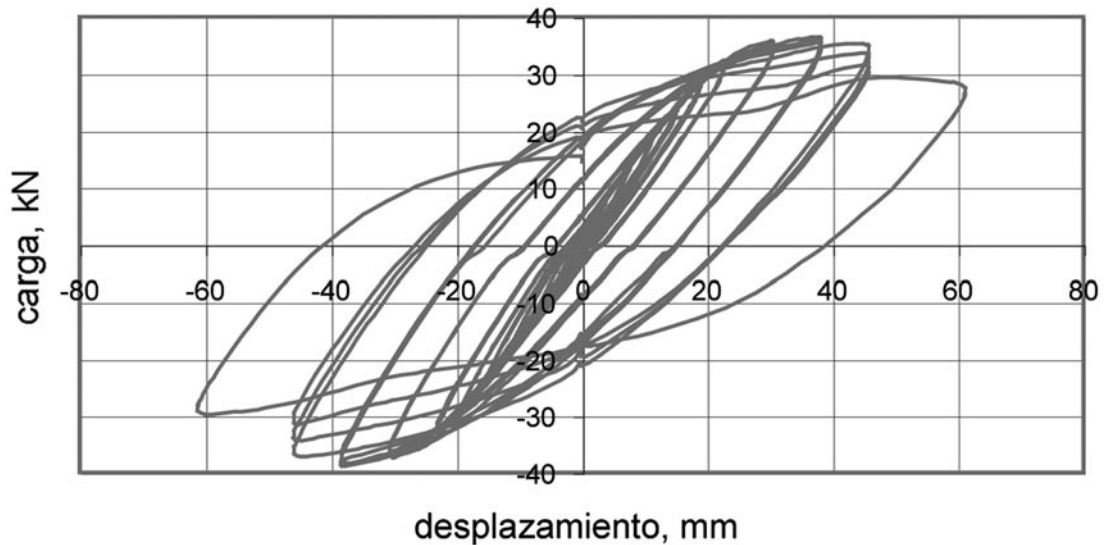


Figura 9. Diagrama típico de la unión tipo 2C, según muestra #1.

Fuente: (La autora, 2007).

Con respecto a los diagramas carga – desplazamiento del gato (Figura 9) la carga disminuye después de alcanzada la máxima, aunque no tan rápido como en el caso de la unión tipo 1.

(Cuadro 2) con la carga P calculada (40,6 kN y 38,9 kN respectivamente), unión tipo 3T resistió 22 % más de lo que es la capacidad de la sección ensayada, mientras la unión tipo 3C resistió solamente un 2 % más.

4.2.3 Unión tipo 3

Las uniones tipo 3 fueron las que resistieron la mayor carga. El colapso empieza con el pandeo de las aletas (placas rigidizadoras) en las esquinas donde se unen la viga y la columna. Después aparecen las grietas a la par de la soldadura en las esquinas y se propagan a través de toda la unión. Inclusive, las aletas se cortan. En el momento cuando aparecen grietas, empieza el pandeo del alma de la columna. Debido a este pandeo del alma, los esfuerzos en el centro del nudo superaron el límite de fluencia.

Los diagramas carga – desplazamiento (Figuras 10 y 11), igual como los cálculos mostrados en el Cuadro 3, muestran algo mayor ductilidad que en la unión tipo 2. Comparando P_{prom} 41,6 kN en unión tipo 3C y 47,5 kN en unión tipo 3T,

4.2.4 Unión tipo 4

Esta unión no falló. Colapsó la viga, justo antes de la unión, por el pandeo de su alma que se debe a la combinación del momento y fuerza cortante. Además, el acero de estas muestras tuvo el límite de fluencia apenas del 60 % que el de las muestras en las uniones tipo 1 y tipo 3. Comparando $P_{prom} = 33,9$ kN obtenido de los ensayos con la capacidad nominal de la viga en combinación del cortante y flexión, esta es 23,6 kN, o sea, el sistema resistió un 43 % más de lo esperado según los cálculos de la capacidad de la sección.

Con respecto a los diagramas carga – desplazamiento del gato (Figura 12) la carga disminuye rápidamente después de alcanzada la máxima y según el Cuadro 3, esta muestra tiene la menor ductilidad entre todas.

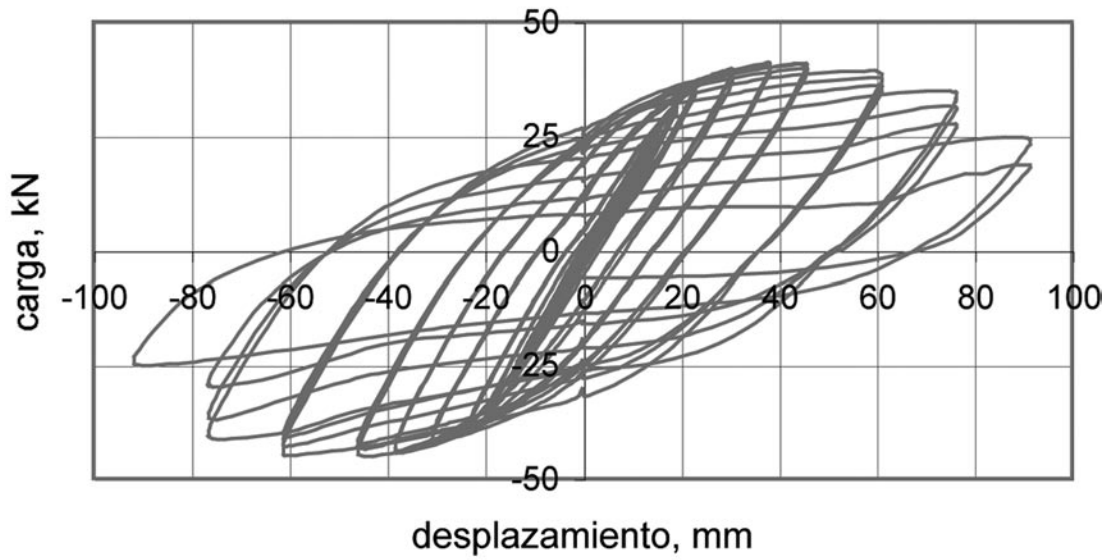


Figura 10. Diagrama típico de la unión tipo 3C, según muestra #1.

Fuente: (La autora, 2007).

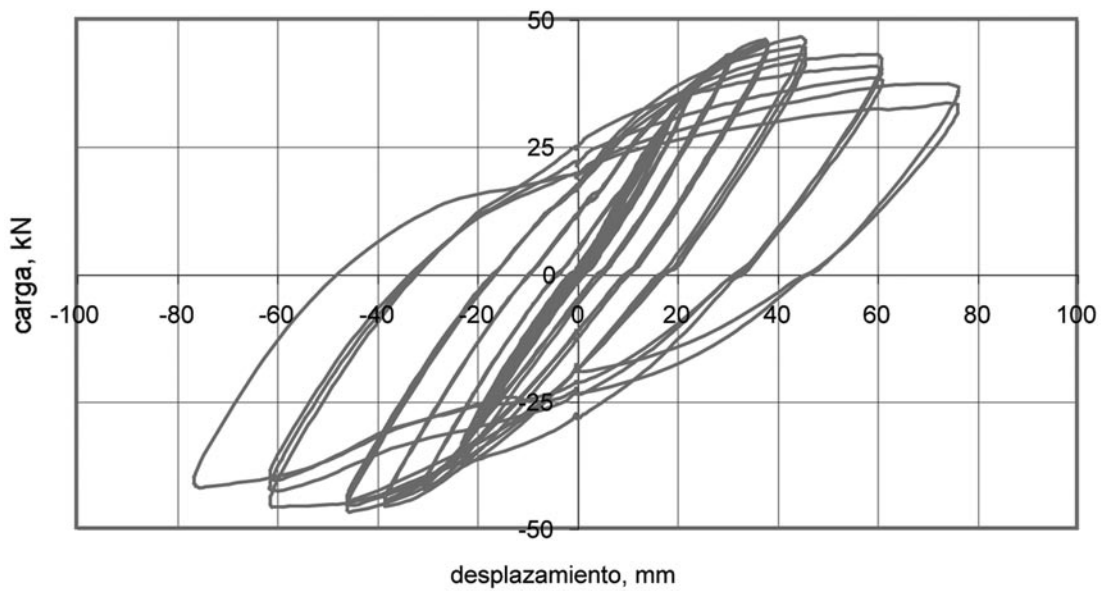


Figura 11. Diagrama típico de la unión tipo 3T, según muestra #1.

Fuente: (La autora, 2007).

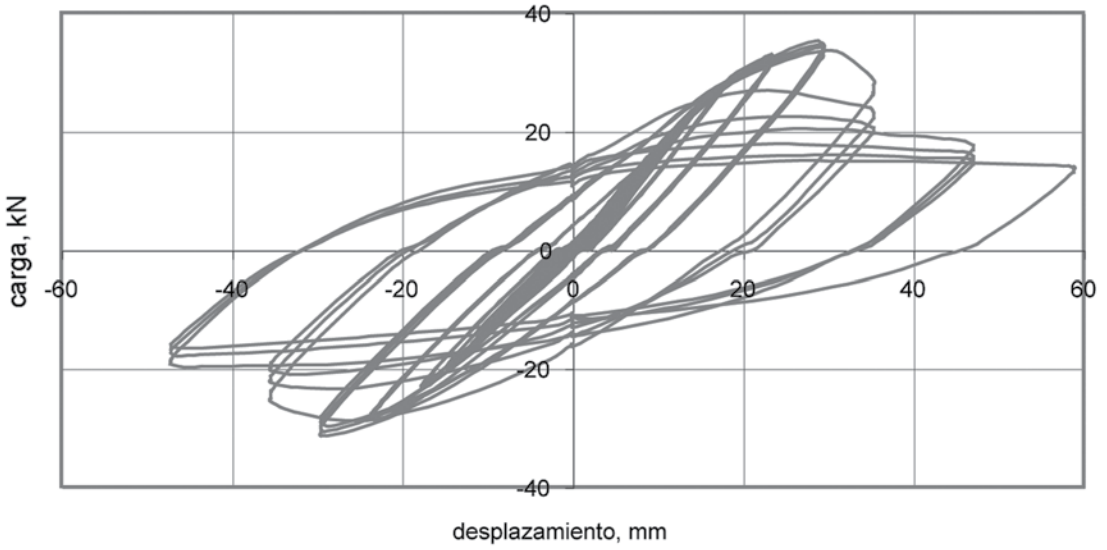


Figura 12. Diagrama típico de la unión tipo 4T, según muestra #2.
Fuente: (La autora, 2007).

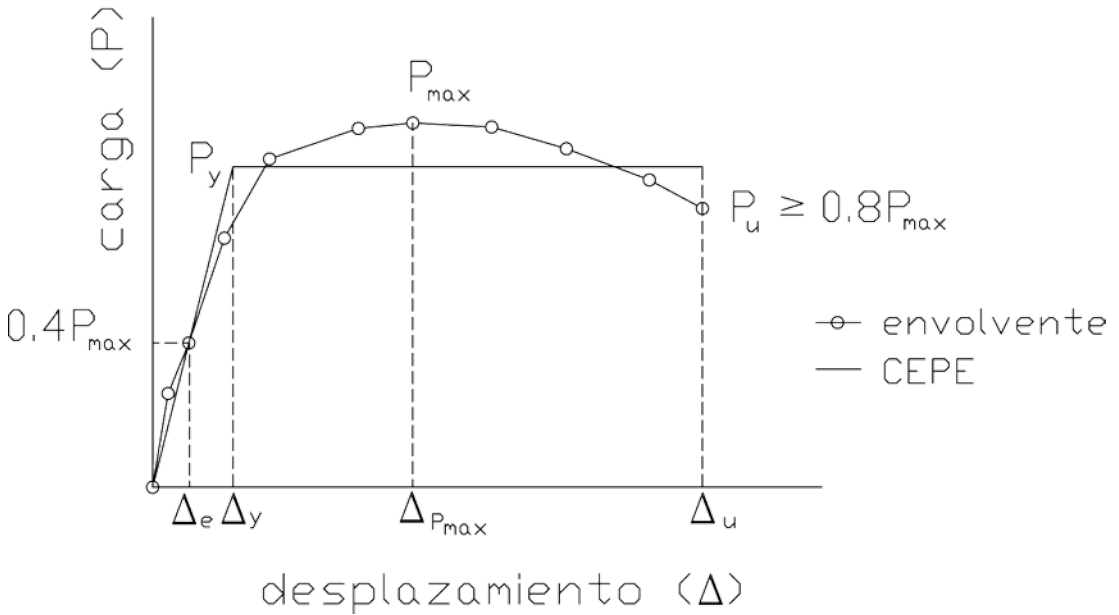


Figura 13. Parámetros para determinar la ductilidad de la unión.
Fuente: (ASTM, E 2126-05).

4.3 Ductilidad

Para determinar la ductilidad (D) en el caso de las cargas cíclicas se usa el método recomendado por la especificación American Society for Testing and Materials (ASTM E 2126-05). Según este método, se determina la curva envolvente en el diagrama carga-desplazamiento y se calcula el área (A) bajo la envolvente limitada entre cero y el Δ_u . El desplazamiento último, (Δ_u), se define como el desplazamiento que corresponde al $0,8P_{max}$ en la parte decreciente de la curva envolvente. Después se determina la curva elastoplástica equivalente (CEPE) basándose en que el área bajo esta curva debe ser igual al área bajo la envolvente original y que la pendiente en el tramo elástico (K_e) será igual a la pendiente correspondiente a $0,4P_{max}$, o sea $K_e = 0,4P_{max}/\Delta_e$ donde Δ_e será el desplazamiento correspondiente a $0,4P_{max}$. En la Figura 13 se muestran estos parámetros.

La carga de fluencia, P_y , se calcula según la expresión:

$$P_y = \left(\Delta_u - \sqrt{\Delta_u^2 - \frac{2A}{K_e}} \right) K_e \quad (1)$$

Desplazamiento correspondiente al límite de fluencia será:

$$\Delta_y = \frac{P_y}{K_e} \quad (2)$$

Donde:

$$K_e = \frac{0,4P_{max}}{\Delta_e} \quad (3)$$

La ductilidad será:

$$D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4)$$

Sin embargo, el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (2002), Artículo 4.4.1 b, pp. 4/10) indica lo que son las uniones dúctiles y dice: “Se clasifican como elementos, componentes y uniones dúctiles o gobernados por desplazamientos todos aquellos capaces de resistir deformaciones inelásticas, de naturaleza cíclica y reversible, manteniendo al menos 80 % de su capacidad máxima cuando sus deformaciones excedan el doble de las deformaciones correspondientes a dicha capacidad máxima”.

Se calculó también la relación $\Delta_u/\Delta P_{max}$ y los resultados se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Parámetros de ductilidad según CSCR y según ASTM

UNIÓN TIPO	DUCTILIDAD	
	según CSCR	según ASTM
1C	1,67	2,77
1T	1,65	2,35
2C	1,32	2,39
3C	1,78	3,4
3T	1,61	2,64
4T	1,12	1,701

Fuente: (CSCR y ASTM, 2007).

CONCLUSIONES

Tal como se sospechaba, las uniones con simple soldadura sin ningún refuerzo no son suficientes. No resisten lo que es la capacidad de la viga. La unión tipo 1C apenas alcanza resistir el 58 % lo que es la capacidad de la viga, mientras la unión tipo 1T alcanza resistir el 82 %. Por lo tanto, las uniones tipo 1 no son adecuadas.

La unión tipo 2, con los rigidizadores internos del alma de la columna, resistió un 5 % más de lo que es la capacidad de la viga. Entonces, esta unión es adecuada. El problema con esta unión es que se

puede preparar solamente en la sección tipo cajón formada por 2C y desde que se empezaron a fabricar los tubos, ya no se justifica formar cajones.

La unión tipo 3, con los rigidizadores externos del alma de la columna, fue la que mayor carga resistió, especialmente la unión tipo 3T que mostró una resistencia un 22% mayor que la capacidad calculada, mientras que la del tipo 3C resistió una carga muy cercana a la capacidad calculada de la sección. Se concluye que las uniones tipo 3 son adecuadas.

La unión tipo 4 es la única que no falló, aunque no resistió tanta carga como las del tipo 2 o del tipo 3. Pero, tomando en cuenta que el acero de las vigas tuvo el límite de fluencia (252 MPa) cerca del mínimo que especifica el fabricante (226 MPa) y según los cálculos la capacidad de la carga es inferior a la resistida. Entonces, esta unión también es adecuada con respecto a la resistencia, aunque muestra menor ductilidad en comparación con las uniones tipo 3; no obstante, según las especificaciones del CSCR 2002, ninguna unión se puede considerar dúctil.

Cabe mencionar que si las muestras de las uniones tipo 3 hubieran sido hechas del mismo acero que las muestras de las uniones tipo 4, hubieran colapsado, por el pandeo del alma de la viga antes de la unión, o sea, igual a la unión tipo 4. Esto debido a que la viga de las muestras 3 tendría la misma cortante y el momento, inmediatamente antes de la unión, que las muestras tipo 4.

Ahora, las estructuras son sistemas espaciales y no planos. En una columna comúnmente convergen vigas desde direcciones perpendiculares. En una columna central pueden llegar cuatro vigas, al mismo nivel, y desde cuatro direcciones ortogonales a las cuales hay que unir a la columna. En tal caso, la unión tipo 3 parece la más adecuada porque las placas de la unión, además de ser rigidizadores del alma de la columna, se pueden aprovechar para unir todas las vigas.

Si se quiere usar la unión tipo 4 en una columna donde convergen tres ó cuatro vigas, las vigas ortogonales deberían estar en niveles diferentes

para poder colocar las placas laterales. Y en tal caso, habrá que colocar las vigas de tal forma que las almas del tubo de la viga coincidan con las almas del tubo de la columna, o sea, el ancho de la viga debería ser igual al ancho de la columna. Considerando todo esto, la unión tipo 4 no parece práctica.

Y finalmente, según lo define el CSCR 2002, las muestras ensayadas son elementos o uniones frágiles.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a:

La empresa TUBOTICO por preparar todas las muestras y aportar los implementos necesarios para realizar las pruebas.

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) y a todo su personal que asistió en la realización de las pruebas.

La empresa SARET por recortar y elaborar las probetas de las muestras del acero que se usó para fabricar las muestras de los ensayos.

La ingeniera Hennia Cavallini, Directora de la Escuela de Ingeniería Mecánica, quien hizo los contactos con las empresas y consiguió que esta investigación se realizara.

El Ingeniero Juan Gabriel Monge Gapper por su colaboración y ayuda durante los ensayos y la elaboración del informe.

NOTAS

- 1 AISC (1), AISI (2), Bresler (6)
- 2 CFIA (7)
- 3 Romanjek (12)
- 4 Hancock (8) (9), Chung Beng (11), Britvec (13), Yu (15)

- 5 ASTM (3), (4) y (5) *materials [metric]*. (CD-ROM) West Conshohocken: ASTM Media.
- 6 Romanjek (12)
- 7 Ugural (14)
- 8 Cabe mencionar que sobre la confección de las probetas de las muestras correspondientes a las uniones tipo 1, 2 y 3 y su etiquetado, no hubo control adecuado y es posible que existiera confusión y que el límite de fluencia del acero de las secciones C, sea aún menor al que mostraron los ensayos de las probetas.
- 9 Hancock (8), Tsai, Popov (10)
- 10 Esta diferencia grande entre lo que debería haber resistido la sección en cajón en comparación con la sección en tubo, probablemente se debe a que se usó el límite de fluencia supuestamente sobreestimado para las secciones en cajón, razón ya explicada anteriormente.
- Bresler, W., Lin, W. & Scalzi, T. (1988). *Diseño de estructuras de acero*. México, D.F.: Limusa Editores, S.A.
- Britvec, S. J., Chajes, A., Karren, K. W., Uribe, J. & Winter, G. (1970). Effects of cold work in cold-formed steel structural members. *Cornell Engineering Research Bulletin*, 70-1. New York: Cornell University Press.
- Chung-Beng, K. (1987). *Building design using cold formed steel sections: worked examples to BS 5950: Part 5*. The Steel Construction Institute 1993, British Library.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2002). *Código Sísmico de Costa Rica 2002*. San José: CFIA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Institute of Steel Construction. (1998). *Manual of steel construction, load & resistance factor design* (2ª ed.). New York: AISI Press.
- American Iron and Steel Institute. (2002). *Cold - formed steel design manual* (2ª ed.). New York: AISI Press.
- American Society for Testing and Materials. (1993). *ASTM A370 – 92: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. West Conshohocken: ASTM Press.
- American Society for Testing and Materials. (1993). *ASTM E290 – 92: Standard test method for semi-guided bend test for ductility of metallic materials*. West Conshohocken: ASTM Press.
- American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM E8 - 94a: Standard test methods for tension testing of metallic materials* [metric]. (CD-ROM) West Conshohocken: ASTM Media.
- De Buen López, O. (1980). *Estructuras de acero, comportamiento y diseño*. México, D.F.: Editorial Limusa, S.A.
- Hancock, G., Wilkinson, T. & Teh, L. (2000). *Welded connections in high strength cold-formed steels*. Proceedings 4th International Conference on Connections in Steel Structures. Roanoke, USA.
- LaBoube, R. (1997). *Design of cold - formed steel structural members. Structural engineering handbook de E. H. Gaylord, Ch. N. Gaylord & J. E. Stallmeyer* (4ª ed.). New York: McGraw-Hill Book Company.
- Milosavljević, M., Radojković, M. & Kuzmanović, B. (1986). *Osnovi Čeličnih Konstrukcija*. Građevinska knjiga, Beograd.
- Romanjek, M. (2001). *Propiedades estructurales de perfiles de acero laminado en frío producidos en Costa Rica*. Tesis para optar por el grado de

Magister Scientiae, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Tsai, K. C. & Popov, E. P. (2000). *Seismic steel beam-column moment connections*. Background Report, Federal Emergency Management Agency.

Ugural, A. & Fenster, S. (1995). *Advanced strength and applied elasticity* (3^a ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Wilkinson T. J. & Hancock G. J. (1998). *Tests of stiffened and unstiffened welded*

knee connections in cold-formed RHS. Proceedings, Tubular Structures VIII. Singapore, Singapore, 177-186.

Yu, W. (2000). *Cold - formed steel structures* (3^a ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

SOBRE LA AUTORA

Marija Romanjek Blimel

Catedrática Mágister en Ingeniería Estructural.

Escuela de Ingeniería Mecánica.

Teléfono: 2207 5696

Correo electrónico: marija@terraba.fing.ucr.ac.cr