

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TUBOS DE ALUMINIO

Raúl Bacchiarello, María I. Montanaro e Irene Rivas

*Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires,
Av. del Valle 5737, 7400 - Olavarría, Argentina, irivas@fio.unicen.edu.ar*

Palabras claves: soldadura, aluminio, tubos.

Resumen. El uso de barras de secciones tubulares de aluminio permite obtener estructuras más livianas. Teniendo en cuenta la forma en que se realiza la vinculación de las barras, se advierte que la soldadura es el medio de unión más usado en la actualidad. El proceso de soldadura disminuye la tensión de fluencia en las proximidades de la zona soldada adquiriendo relevancia, el estudio de este tipo de uniones, en elementos estructurales de aluminio. En este trabajo se efectúa una simulación numérica de tubos de aluminio soldados y no soldados, de secciones circular y rectangular, sometidos a esfuerzos de compresión mediante el software Algor. Los resultados obtenidos se contrastan con resultados experimentales disponibles en publicaciones y con los que surgen de aplicar el Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio CIRSOC 701 (2009).

1 INTRODUCCION

El aluminio cumple un papel clave en la sostenibilidad de los nuevos edificios y renovación de los existentes. Gracias a sus propiedades, contribuye en gran medida a la eficiencia energética, seguridad y confort de los edificios. Su versatilidad también permite una fácil rehabilitación de edificios existentes, incluidos los edificios históricos. Al mismo tiempo, el aluminio es un material reciclable cuyo proceso de fabricación se encuentra ampliamente desarrollado en nuestro país.

Las grandes ventajas por las cuales se puede decidir el empleo de este material en las estructuras es su resistencia, bajo peso y mínimo mantenimiento, seguido por su gran estabilidad y prolongada vida útil. Esto hace que la industria de la construcción sea una de las principales consumidoras de perfiles de aluminio.

En el año 2013 entraron en vigencia el Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio CIRSOC 701 (2009) y el Reglamento Argentino para la soldadura de Estructuras en Aluminio CIRSOC 704 (2009), proporcionando un marco legal para el desarrollo de las construcciones de aluminio en la Argentina. Esto contribuye a la incorporación del mencionado material para uso estructural y crea las condiciones necesarias para que la cadena productiva de la construcción civil, en lo que a partes de aluminio se refiere, se integre y pueda elevar de manera sustentable su competitividad accediendo a tecnologías que permitan cumplir con estándares internacionales.

Una temática importante en el campo de las estructuras metálicas en general lo constituyen las uniones, ya que son las zonas con mayor probabilidad de falla. En particular, para las estructuras de aluminio, es la soldadura como medio de unión la que presenta mayor problemática e incertidumbre al momento de diseñar o analizar una estructura.

Resultan notables los efectos de la soldadura sobre el comportamiento de elementos estructurales de aluminio. Su influencia varía en función de su ubicación, dirección y número de cordones. Se tienen dos grandes grupos: soldaduras longitudinales y soldaduras transversales. Generalmente se utilizan soldaduras transversales para conectar elementos estructurales entre sí, mientras que las soldaduras longitudinales se emplean para formar las secciones (Kissel et al., 2002).

En el presente trabajo se estudia la influencia de las soldaduras transversales. En este tipo de soldadura, el calor que se genera da origen al “ablandamiento” de la zona afectada por el mismo.

Algunos autores, como Zhu et al. (2006a; 2007), han efectuado estudios experimentales relacionados con la influencia de la soldadura en elementos de aluminio, presentando interesantes resultados para su contrastación con diferentes metodologías. En particular, en este trabajo, se obtienen resultados aplicando los lineamientos establecidos por el Reglamento CIRSOC 701 (2009) y resultados computacionales que surgen de aplicar el software ALGOR FEMPRO V22 basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF).

2 EL MATERIAL ALUMINIO

El aluminio es un metal muy liviano, con un peso específico de 2700 kg/m^3 , que es aproximadamente un tercio del peso específico del acero. La resistencia del metal puede ser ajustada mediante la adición de pequeñas cantidades de otros metales formando así distintas aleaciones. La técnica de la extrusión, en la que el material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada, combinada con la aleación correcta y el tratamiento térmico apropiado, ofrece infinitas oportunidades de aplicación y diferencias en sus propiedades mecánicas.

2.1 Aleaciones

La mayoría de los perfiles extruidos de aluminio están fabricados a partir de aluminio aleado con otros metales. Los elementos más comúnmente utilizados son el magnesio (Mg), el silicio (Si), el manganeso (Mn), el zinc (Zn) y el cobre (Cu) y el total de material aleante fluctúa entre el 0,2% y el 0,7%.

El aluminio para extrusión utiliza, en su mayoría, aleaciones con los siguientes números de series:

Serie 1000 – Al

Serie 6000 – Al + Mg + Si

Serie 7000 – Al + Zn + Mg

La serie 1000 no es susceptible de tratamiento térmico. Estas aleaciones son con frecuencia elegidas para los productos en los que se desea una alta conductividad térmica y eléctrica. Poseen una baja resistencia mecánica.

Las series 6000 y 7000 son termotratables. Son las aleaciones de extrusión más comúnmente utilizadas y poseen una amplia gama de aplicaciones. La mayoría del material extruido para estructuras está fabricado en estas calidades. Se utiliza para construcciones bajo carga, tanto en tierra como en el mar. La serie 6000 posee una alta extrusionabilidad y puede ser termotratada por solubilización a la temperatura de extrusión. Asimismo, estas aleaciones poseen una resistencia mecánica entre media y alta, son fáciles de soldar y ofrecen una excelente resistencia a la corrosión, incluso en entornos salinos. (Peralta, M. et al., 2009)

2.2 Tratamiento térmico

Las aleaciones con endurecimiento estructural, que es un procedimiento por el que se consigue la resistencia deseada mediante el desequilibrio provocado por un tratamiento térmico, se obtienen según la secuencia de los siguientes procesos:

- Puesta en solución.
- Temple.
- Maduración (natural o artificial).

La puesta en solución se hace a temperatura elevada, del orden de 530° C para las aleaciones de la familia 6000. Luego, el temple consiste en un enfriamiento muy rápido del metal que se hace normalmente por inmersión o ducha en agua fría. El enfriamiento brusco del metal busca impedir la precipitación de los compuestos intermetálicos.

La velocidad de temple es un parámetro muy importante del que dependen ciertas propiedades, como son las características mecánicas de tracción, la tenacidad o el comportamiento a la corrosión. Existe para cada aleación una velocidad crítica de temple, la cual no puede ser disminuida.

Finalmente, después del temple la solución sólida sobresaturada se encuentra en un estado metaestable, es decir un estado de equilibrio débilmente estable. La vuelta al equilibrio, es decir la precipitación de los compuestos intermetálicos que provocan el endurecimiento estructural, se puede hacer de dos maneras:

- Por maduración a temperatura ambiente (también llamado envejecimiento natural).
- Por revenido, es decir un calentamiento de varias horas entre 160°C y 180° C para la serie 6000. El revenido (envejecimiento artificial) acelera la precipitación. Se realiza inmediatamente después del temple. Las condiciones del revenido dependen de las aleaciones.

La nomenclatura para los distintos tipos de tratamientos es la siguiente:

T1 Enfriado y envejecido naturalmente

T2 Recocido (solo productos fundidos)

T3 Tratamiento en solución y luego trabajado en frío

- T4 Tratamiento en solución y envejecido naturalmente
- T5 Envejecimiento artificial
- T6 Tratamiento en solución y envejecido artificialmente
- T7 Tratamiento en solución y estabilizado
- T8 Tratamiento en solución, trabajado en frío y envejecido artificialmente
- T9 Tratamiento en solución, envejecido artificialmente y trabajado en frío
- T10 Enfriado, envejecido artificialmente y trabajado en frío

2.3 Características de la soldadura

El objetivo fundamental en cualquier operación de soldadura es el de conseguir una junta con la misma característica del metal base. Procesos de soldadura, como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) o TIG y GMAW (Gas Metal Arc Welding) o MIG, están sustituyendo actualmente a otros más tradicionales, como el SMAW (Arco Manual), en sus aplicaciones a las aleaciones de aluminio, ya que producen soldaduras de excelente calidad con distorsiones mínimas. Así mismo, en estas técnicas no se requiere el empleo de fundentes de protección, que puedan influir posteriormente en la resistencia a la corrosión de las uniones soldadas. Las soldaduras pueden realizarse en todas las posiciones y la calidad final de la unión es generalmente elevada, (Gómez de Salazar et al., 1998).

La soldadura TIG se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno. Dada la elevada resistencia a la temperatura del tungsteno, acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado. Los gases más utilizados para la protección del arco en esta soldadura son el argón y el helio. Según el Reglamento CIRSOC 704 (2009), estos gases deben tener una pureza de 99,997% y 99,995% y un punto de rocío igual o menor a -60°C y -57°C , respectivamente.

En cambio, la soldadura MIG es un proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible. El arco se produce mediante un electrodo, formado por un hilo continuo y las piezas a unir, quedando este protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte.

Como se mencionó antes, la mayoría de las aleaciones de aluminio utilizadas para elementos estructurales obtienen su resistencia mediante tratamientos térmicos o endurecimiento por deformación. Las soldaduras provocan revenido localizado que produce una zona de menor resistencia. El Reglamento CIRSOC 701 (2009) considera que la longitud de la zona de ablandamiento es de una pulgada (2,54 cm) a ambos lados de la soldadura, mientras que Eurocodigo 9 (1998) considera que la zona afectada por el calor es de 3 cm a cada lado de la soldadura. Esta afecta la resistencia al pandeo, según el rango de relaciones de esbeltez en el cual la resistencia es determinada.

3 TUBOS ANALIZADOS

Para la presente investigación se analizan tubos de sección circular, cuadrada y rectangular soldados en sus extremos y sometidos a esfuerzos de compresión, para todos los casos se estudian dos aleaciones distintas. Se tomaron como referencia ensayos publicados por Zhu et al. (2006a; 2007) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Pokfulam Road, Hong Kong. Se adoptaron las características geométricas y aleaciones utilizadas en los ensayos experimentales por los autores antes mencionados, con la finalidad de poder contrastar los resultados. De la misma manera, se obtuvieron los resultados en base al cálculo de las diferentes secciones y longitudes mediante el Reglamento CIRSOC 701 (2009) y mediante modelos de elementos finitos.

Para organizar la presentación de los datos y resultados se empleó la siguiente

nomenclatura:

Según la aleación:

N: 6063-T5

H: 6061-T6

Según la sección:

C1: circular de 50 mm de diámetro exterior y 1,6 mm de espesor. (Fig. 1)

C2: circular de 50 mm de diámetro exterior y 3 mm de espesor. (Fig. 1)

S1: cuadrada de 44 mm x 44 mm y 1,1 mm de espesor. (Fig. 1)

R2: rectangular de 100 mm x 44 mm y 3 mm de espesor. (Fig. 2)

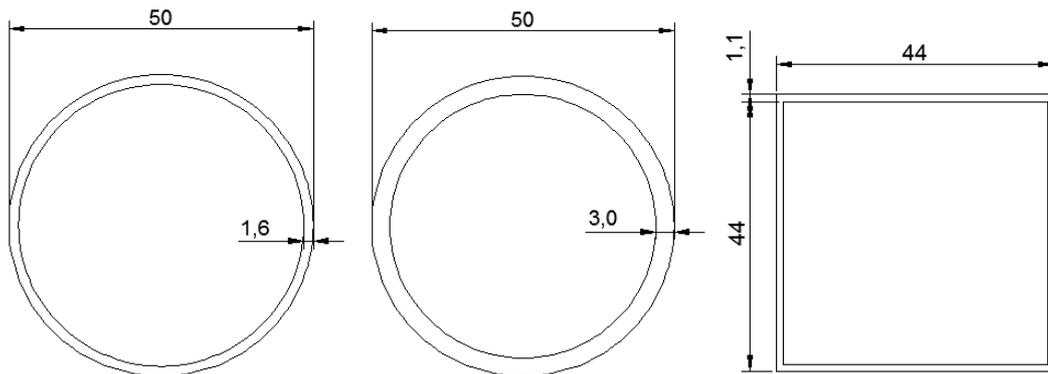


Figura 1: Sección C1, Sección C2 y Sección S1, respectivamente

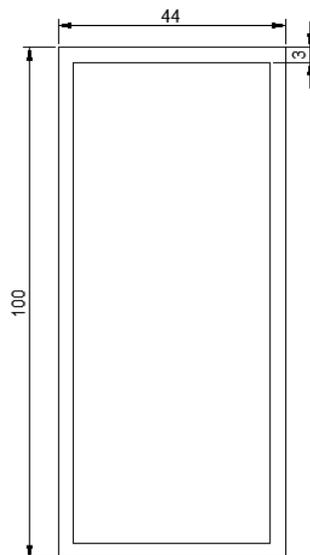


Figura 2: Sección R2, respectivamente

Según la soldadura:

S: barra soldada en ambos extremos

NS: barra no soldada

Según la longitud:

L-300: barra de 300 mm de largo

L-1000: barra de 1000 mm de largo

L-1650: barra de 1650 mm de largo

L-2350: barra de 2350 mm de largo

4 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

En este trabajo, los modelos de elementos finitos fueron realizados con el Software ALGOR. Se tuvieron en cuenta los diferentes modos de falla según la esbeltez de los elementos así como también se consideró la no-linealidad material de los mismos, para poder así representar el debilitamiento generado por la soldadura.

En cuanto a la modelización propiamente dicha de los tubos se utilizaron mallas cuadradas de aproximadamente 10 mm x 10 mm, tanto para los tubos circulares, como para los cuadrados y rectangulares. El elemento utilizado fue el denominado “Cáscara” (Shell de 4 nodos) y se representaron las zonas de influencia de la soldadura ingresando las propiedades del material con su correspondiente debilitamiento en los extremos. Estos fueron considerados empotrados pero, en el extremo superior, desde donde se aplican las cargas se permite la traslación a lo largo del eje vertical.

Como se mencionó anteriormente, las mallas con las que se modelaron los tubos eran de aproximadamente 10 mm x 10 mm. En situaciones normales, un mallado más pequeño puede asegurar mejores resultados. Sin embargo, en estos casos de compresión, donde la deformación esperada es grande, estas mallas son susceptibles a distorsionar los elementos y esto puede acarrear dificultades en la convergencia del cálculo. Es por esto que en los distintos modelos realizados no se utilizaron mallas más pequeñas que la presentada anteriormente.

Para el modelado numérico se pueden emplear alguno de los tres tipos de análisis que se detallan a continuación:

-Carga de Pandeo Crítica (CPC): Este análisis examina la estabilidad geométrica de los modelos bajo carga axial. Dado que este es un análisis lineal, se obtienen resultados más adecuados en las columnas que siguen la curva de comportamiento de Euler. Consecuentemente, con el análisis de carga de pandeo crítica se han modelado las columnas de mayor esbeltez para cada sección.

-Simulación de Eventos Mecánicos RIKS: Mediante este análisis se representó el modo de falla por pandeo inelástico, ya que permite ingresar las características de no-linealidad del material mediante las curvas tensión-deformación de cada aleación y sección.

En un modelo con Análisis RIKS deben definirse el número total de pasos y el incremento de carga por cada paso, a través de un multiplicador.

-Simulación de Eventos Mecánicos con materiales no lineales (MES): En este análisis, los campos “duración” y “pasos por segundo” se utilizan para definir la duración del análisis y las cargas aplicadas siguen un historial de tiempo especificado en una curva de carga. A medida que el tiempo avanza de manera uniforme, las cargas aplicadas son escaladas sobre la base de la curva de carga, y se calculan los desplazamientos. Estos desplazamientos, por lo general, no son lineales con el tiempo.

Estos dos análisis últimos se pueden aplicar cuando la no linealidad es geométrica y material, lo que cambia es la respuesta después del valor máximo alcanzado.

En la [Figura 3](#) se puede observar el modelo del tubo N-S1-S-L300, apreciándose el cambio de color en la malla que representa la soldadura. En la [Figura 4](#) se muestra una salida de resultados del modelo, indicando la variación de la carga con respecto a la deformación axial de la pieza.

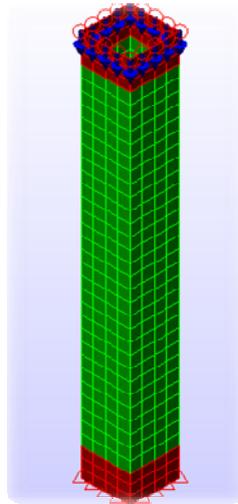


Figura 3: Modelo N-S1-S-L300

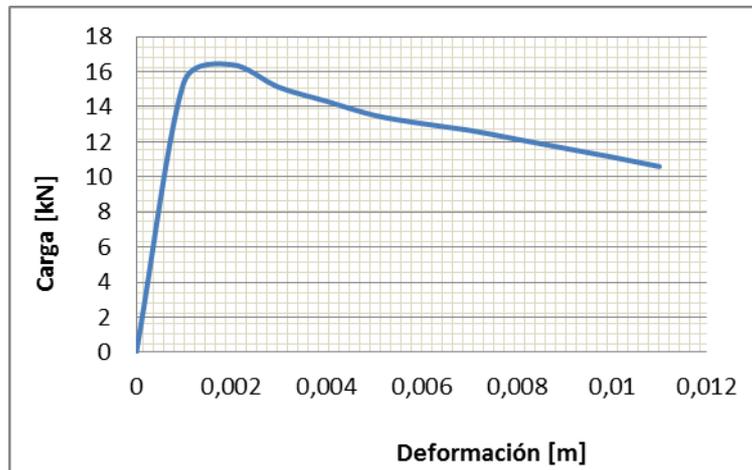


Figura 4: Respuesta del modelo

4.1 Modelo material

Las curvas tensión-deformación ingresadas en los distintos análisis numéricos fueron modeladas a partir de la tensión de fluencia y de la tensión última con sus respectivas deformaciones unitarias, siendo estos valores los publicados por Zhu et al. (2006a; 2007), obtenidos experimentalmente a través del ensayo de testigos de los mismos tubos. El modelo material más usado para simular el comportamiento de perfiles de aluminio utiliza la Ecuación (1) de Ramberg-Osgood (Kissel et al., 2002) que se presenta a continuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{F_{yc}} \right)^n \quad (1)$$

donde:

ε : es la deformación

σ : es la tensión

E: es el módulo de Young

F_{yc} : tensión de fluencia
 n : constante que depende del material.

Los valores del parámetro n de la ecuación 1 obtenido para las distintas aleaciones y secciones, ya sean soldadas o no, se presentan a continuación, en la [Tabla 1](#).

Aleación	E [MPa]	F_{yc} [MPa]	n
N-C1-NS	66700	194,6	40
N-C2-NS	66700	185,9	35
N-S1-NS	70400	188,5	35
N-R2-NS	67500	189	34
N-C1-S	73000	71,3	7
N-C2-S	71600	75,3	6
N-S1-S	71100	65	7
N-R2-S	67500	70	6,6
H-C1-NS	67100	286	48
H-C2-NS	70200	276	103
H-C1-S	72600	92,5	8,3
H-C2-S	71700	94,3	7,4

Tabla 1: Parámetro n para cada tipo de aleación

Se observan, para la misma aleación, diferencias en el comportamiento del material en el caso que este soldado y también sin soldadura.

5 ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultados de modelos de elementos finitos

En la siguiente [Tabla 2](#) se muestra la comparación de la carga de rotura a compresión entre resultados experimentales (P_{exp}) y los modelos numéricos (P_{mod}) para los distintos tubos analizados, indicando en cada caso el tipo de análisis más adecuado:

Nomenclatura	P_{exp} [kN]	P_{mod} [kN]	P_{exp}/P_{mod}	Análisis
N-C1-NS-L300	48,5	46,6	1,04	MES
N-C1-NS-L1000	45,9	45,5	1,01	RIKS
N-C1-S-L300	35,9	30,3	1,18	MES
N-C1-S-L1000	30,3	25,2	1,20	RIKS
N-C1-S-L1650	27,9	32	0,87	CPC
N-C1-S-L2350	21,4	16,3	1,31	CPC
		Promedio	1,10	
N-C2-NS-L300	102,4	107,4	0,95	MES
N-C2-NS-L1000	86,1	77,6	1,11	RIKS

N-C2-S-L300	69,4	61,7	1,12	MES
N-C2-S-L1000	65,1	55,7	1,17	RIKS
N-C2-S-L1650	48,6	57,7	0,84	CPC
N-C2-S-L2350	35,3	34,7	1,02	CPC
		Promedio	1,04	
H-C1-NS-L1000	71,7	64	1,12	RIKS
H-C1-S-L300	47,2	36	1,31	MES
H-C1-S-L1000	39,0	35,5	1,10	RIKS
H-C1-S-L1650	36,8	34,1	1,08	CPC
H-C1-S-L2350	25,3	17,1	1,48	CPC
		Promedio	1,21	
H-C2-NS-L300	129,6	122	1,06	MES
H-C2-NS-L1000	119,6	112	1,07	RIKS
H-C2-S-L300	88,0	84,7	1,04	MES
H-C2-S-L1000	84,5	79,9	1,06	RIKS
H-C2-S-L1650	66,9	62,4	1,07	CPC
H-C2-S-L2350	44,6	32	1,39	CPC
		Promedio	1,11	
N-S1-NS-L300	34,1	35,7	0,96	MES
N-S1-NS-L1000	33,7	33,6	1,00	CPC
N-S1-NS-L1650	33,6	30,2	1,11	CPC
N-S1-S-L300	18,8	16,4	1,15	MES
N-S1-S-L1000	19,2	16,6	1,16	MES
N-S1-S-L1650	19,8	13,5	1,47	MES
N-S1-S-L2350	18,4	14,4	1,28	CPC
		Promedio	1,16	
N-R2-NS-L300	147,9	144	1,03	RIKS
N-R2-NS-L1000	145,8	144	1,01	RIKS
N-R2-S-L300	101,0	96	1,05	RIKS
N-R2-S-L1000	89,7	96	0,93	RIKS
N-R2-S-L1650	85,4	96	0,89	RIKS
N-R2-S-L2350	74,3	79,2	0,94	CPC
		Promedio	0,98	

Tabla 2: Comparación de resultados experimentales y de modelos de elementos finitos

Como se puede apreciar en la [Tabla 2](#), los promedios de las relaciones entre resultados experimentales y resultados de modelos numéricos obtenidos para las distintas series presentan un valor medio de 1,10 para tubos soldados y no soldados; y de 1,13 solo para tubos soldados. Todos estos valores numéricos fueron obtenidos considerando que la zona afectada por la soldadura se corresponde con una longitud de 2.54 cm, que es el valor recomendado por el Reglamento CIRSOC 701 (2009).

En Zhu et al. (2008) para tubos de sección circular y Zhu et al. (2006b) para tubos de sección cuadrada y rectangular se encuentran los resultados de una simulación numérica utilizando el software ABAQUS, con una malla de similares características a las del presente trabajo pero con diferentes longitudes de la zona afectada por el calor. Mediante esta aplicación el valor medio que obtuvieron para tubos circulares es de 1,09 para una zona afectada por el calor de 2 cm, mientras que el valor promedio es de 1,06 para tubos

rectangulares con una zona afectada por el calor de 2,5 cm.

Como se observa en la [Tabla 2](#), la carga de rotura de un elemento soldado es del 54 % al 75 % de la carga de rotura del mismo elemento sin soldar en los extremos.

5.2 Resultados obtenidos aplicando el Reglamento CIRSOC 701

Para obtener las resistencias de diseño que propone el Reglamento CIRSOC 701 (2009) para los tubos analizados, los valores de tensiones de fluencia a compresión (F_{yc}) a utilizar son los expuestos en las tablas A.2-1 o A.2-2 del mismo, según sean elementos no soldados o soldados respectivamente. En el caso de la aleación y temple 6063-T5, para productos extruidos de espesores hasta 12,5 mm el valor de F_{yc} es de 55 MPa para soldados y 110 MPa para no soldados. Para la aleación y temple 6061-T6, estos valores de F_{yc} resultan 105 MPa y 240 MPa. El módulo de elasticidad en compresión (E) es de 69600 MPa para todos los casos.

En la [Tabla 3](#), presentada a continuación, se exponen los resultados de carga experimental y de diseño para los diferentes tipos de tubos definidos por su nomenclatura explicada anteriormente en este trabajo. La última columna se refiere al Estado Límite dominante, es decir aquel que provoca la falla, ya sea para biarticulados como empotrados, salvo que se aclare entre paréntesis.

En el Reglamento CIRSOC 701 (2009) se aclara que en la práctica raramente existen columnas con extremos verdaderamente articulados. Aún las columnas nominalmente articuladas en sus extremos tienen algún grado de restricción, y la mayoría están restringidas por su unión a la base o a elementos que se conectan en sus extremos. De todas maneras, el Reglamento CIRSOC 701 (2009) considera que las columnas soldadas en sus extremos se deben verificar con una vinculación biarticulada para aumentar el grado de confiabilidad. Cuando los tubos no son soldados en sus extremos, la vinculación de ellos puede considerarse como empotramiento.

Nomenclatura	P_{exp} [kN]	$P_{exp}/P_{dCIRSOC}$ (biarticulado)	$P_{exp}/P_{dCIRSOC}$ (empotrado)	Estado Límite dominante
N-C1-NS-L300	48,5		1,98	Pandeo local
N-C1-NS-L1000	45,9		1,92	Pandeo flexional
N-C1-S-L300	35,9	2,98	2,98	Pandeo local
N-C1-S-L1000	30,3	2,74	2,50	Pandeo flexional
N-C1-S-L1650	27,9	3,38	2,55	Pandeo flexional
N-C1-S-L2350	21,4	3,38	2,19	Pandeo flexional
N-C2-NS-L300	102,4		2,23	Pandeo local
N-C2-NS-L1000	86,1		2,02	Pandeo flexional
N-C2-S-L300	69,4	3,04	3,04	Pandeo local
N-C2-S-L1000	65,1	3,44	2,93	Pandeo flexional
N-C2-S-L1650	48,6	3,25	2,43	Pandeo flexional
N-C2-S-L2350	35,3	3,15	1,98	Pandeo flexional
H-C1-NS-L300	75,9		1,46	Pandeo local
H-C1-NS-L1000	71,7		1,42	Pandeo flexional
H-C1-S-L300	47,2	2,06	2,06	Pandeo local
H-C1-S-L1000	39,0	2,21	1,75	Pandeo flexional
H-C1-S-L1650	36,8	2,95	1,92	Pandeo flexional

H-C1-S-L2350	25,3	3,55	1,56	Pandeo flexional
H-C2-NS-L300	129,6		1,29	Pandeo local
H-C2-NS-L1000	119,6		1,40	Pandeo flexional
H-C2-S-L300	88,0	2,01	2,24	Pandeo local
H-C2-S-L1000	84,5	2,63	2,07	Pandeo flexional
H-C2-S-L1650	66,9	2,95	1,91	Pandeo flexional
H-C2-S-L2350	44,6	3,56	1,52	Pandeo flexional
N-S1-NS-L300	34,1		2,17	Pandeo local
N-S1-NS-L1000	33,7		2,14	Pandeo local
N-S1-NS-L1650	33,6		2,14	Pandeo local
N-S1-S-L300	18,8	2,23	2,23	Pandeo local
N-S1-S-L1000	19,2	2,28	2,29 (PL)	Pandeo flexional
N-S1-S-L1650	19,8	3,02	2,36 (PL)	Pandeo flexional
N-S1-S-L2350	18,4	3,67	2,39	Pandeo flexional
N-R2-NS-L300	147,9		2,00	Pandeo local
N-R2-NS-L1000	145,8		1,92	Pandeo F y L
N-R2-S-L300	101,0	2,66	2,66	Pandeo local
N-R2-S-L1000	89,7	2,46	2,19 (PL y FL)	Pandeo flexional
N-R2-S-L1650	85,4	2,87	2,22	Pandeo flexional
N-R2-S-L2350	74,3	3,21	2,15	Pandeo flexional
	Promedio	3,01	2,06	

Tabla 3: Comparación de resultados experimentales y los obtenidos con el Reglamento CIRSOC 701 (2009)

Como se puede observar en la [Tabla 3](#), las relaciones entre la carga experimental y la carga de diseño obtenidas al aplicar el Reglamento CIRSOC 701 (2009), para columnas consideradas biarticuladas, arrojan un promedio de 3,01 para todos los valores de esa columna mientras que, para los tubos calculados como biempotrados, el promedio tiene un valor de 2,06. Se puede apreciar en tubos de gran esbeltez, que considerando la vinculación en el cálculo como biarticulado el grado de seguridad es elevado mientras que para el cálculo como biempotrado es marcadamente menor. Esto se debe a que al variar el parámetro de esbeltez global, por sus distintas condiciones de borde, varían también las ecuaciones de cálculo para los mismos tubos.

6 CONCLUSIONES

El comportamiento real de los elementos influenciados por soldadura se puede representar de manera adecuada, ya sea mediante la aplicación del Reglamento, con todas sus pautas de seguridad, o a través de la modelización con el método de los elementos finitos. Para ello, se debe contar con información correcta del material, en cuanto a propiedades mecánicas, tales como valores de tensión de fluencia o módulo de elasticidad, y al mismo tiempo se debe conocer su comportamiento estructural.

El tipo de análisis seleccionado debe ser coincidente con el modo de falla de la columna dependiendo si el mismo se produce en el rango elástico o inelástico. A tal efecto para el cálculo de los modelos que se analizan en el presente trabajo fueron seleccionados contemplando la esbeltez de las barras, la cual incide en su modo de falla. Por esta razón se

utilizaron:

1. Análisis de Carga de Pandeo Crítica, el cual es un análisis lineal para las barras de esbeltez mayor, representando el pandeo elástico,
2. Simulación de Eventos Mecánicos RIKS para barras de esbeltez media, asociadas a pandeo inelástico y, finalmente,
3. Simulación de Eventos Mecánicos con materiales no lineales, para simular la rotura de las piezas por falla del material.

Se puede establecer que los resultados obtenidos a través de los modelos numéricos han sido adecuados, ya que las relaciones entre resultados experimentales y de modelos toman valores en un rango de 1 a 1,20. Estos modelos fueron realizados considerando una de la zona de ablandamiento de 2.54 cm, teniendo en cuenta lo establecido por el Reglamento CIRSOC 701 (2009).

En el caso del Reglamento CIRSOC 701 (2009), las propiedades mecánicas publicadas son acordes a las posibilidades de fabricación en nuestro país y los métodos de cálculo son aceptados internacionalmente, obteniendo resultados correctos para luego, aplicando los factores de seguridad analizados, obtener resistencias de diseño.

En cuanto a la vinculación de las barras soldadas, si bien en la realidad pueden considerarse empotradas, la reglamentación exige su cálculo como articuladas en sus dos extremos. Esto aumenta notablemente el grado de seguridad, como se observa en los resultados presentados en la Tabla 3 de este trabajo.

REFERENCIAS

- ALGOR 22. Professional Mech/VE. *Docutech, linear stress and dynamics, reference Division*. Pittsburg, Pennsylvania, 2009.
- CIRSOC 701. “*Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio*”, CIRSOC-INTI, 2009.
- CIRSOC 704. “*Reglamento Argentino para la Soldadura de Estructuras en Aluminio*”, CIRSOC-INTI, 2008.
- CIRSOC 701. *Comentarios al Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio*, CIRSOC-INTI, 2009.
- Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1-1, CEN/TC250/SC9, Brussels (Belgium), 1998.
- Gómez de Salazar, J. M.; Ureña, A.; Villauriz, E.; Manzanedo, E.; Barrena, I. “*Soldadura TIG y MIG de las aleaciones de aluminio 6061 y 7020. Estudios microestructurales y de propiedades mecánicas*”, *Revista de Metalurgia*, vol. 34, 1998.
- Kissell, R., Ferry, R., “*Aluminum Structures. A Guide to their Specifications and Design*”, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- Peralta, M. H.; Montanaro, M. I.; Rivas, I.; Godoy, M. L. “*Propiedades de las aleaciones de aluminio en el comportamiento de las estructuras de las obras civiles*”, *Revista Aluminio de la Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines*, 14- 20, 2009.
- Zhu, J-H., Young, B. “*Experimental investigation of aluminum alloy circular hollow section columns*”, *Engineering Structures*, 28: 207–21, 2006a.
- Zhu, J-H., Young, B. “*Aluminum alloy tubular columns—Part I: Finite element modeling and test verification*”, *Thin-Walled Structures*, 44: 961–968, 2006b.
- Zhu, J-H., Young, B. “*Effects of transverse welds on aluminum alloy columns*”, *Thin-Walled Structures*, 45: 321–329, 2007.
- Zhu, J-H., Young, B. “*Numerical investigation and design of aluminum alloy circular hollow section columns*”, *Thin-Walled Structures*, 46: 1437-1449, 2008.