

EL ALUMINIO EN EL DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE LAS OBRAS CIVILES

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

Área de Estructuras, Depto. Ingeniería Civil y Agrimensura, Facultad de Ingeniería UNICEN

Correo Electrónico: mperalta@fio.unicen.edu.ar

Dirección: Avda. Del Valle 5737 Olavarría (7400), Buenos Aires, Argentina

Tópicos: Materiales, Diseño



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

I. Objetivo

Las características de interés de las aleaciones de aluminio, para su aplicación en las estructuras de las obras civiles, están relacionadas con la resistencia mecánica, rigidez y durabilidad, consideradas por los reglamentos correspondientes en la verificación de los Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio. En este trabajo se describen los aspectos mencionados, considerados en el Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio, CIRSOC 701, de reciente aprobación en el país, a efectos de comprender como influyen las propiedades de las aleaciones de aluminio en el diseño estructural y favorecer, asimismo, la difusión del aluminio para su uso con fines estructurales.

II. Justificación

Es creciente el uso del aluminio en el mundo con fines estructurales. En Argentina la generación de un marco normativo que regule el uso seguro surgió a partir de 2006 en el Área Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA con el apoyo de la CAIAMA (Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines) y del CIRSOC (Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles). A partir de 2007 se trabajó en la redacción del Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio, CIRSOC 701 [1], y sus comentarios, y la redacción del Reglamento de Soldadura de Estructuras de aluminio, CIRSOC 704 [2], aprobados ambos en el año 2013. A partir de contar con el marco normativo de seguridad para las obras se espera, e incentiva a través de la difusión, que haya un incremento de su uso en el país para el diseño de las estructuras de las obras de civiles. Dicha difusión, además de las especificidades de las verificaciones estructurales, involucra lo relacionado con la tecnología del aluminio, particularmente, las características de las aleaciones de aluminio que tienen directa relación con el comportamiento estructural

III. Alcance

El Reglamento CIRSOC 701, adopta como lineamiento internacional base la especificación norteamericana Aluminum Design Manual [3], que utiliza el denominado Método de los Factores de Carga y Resistencia LRFD (Load and Resistance Factor Design), también conocido como Método por Estados Límites, adaptando y orientando dicha especificación al formato y esquema general del cuerpo de los Reglamentos Argentinos recientemente actualizado. Comprende el estudio por Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio.

“El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles”

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

Estos reglamentos se complementan con las normas IRAM vigentes a la fecha de ejecución. Es de destacar que las normas IRAM e IRAM-IAS nacionales de materiales y productos se encuentran actualmente en proceso de revisión e integración con las de los restantes países del MERCOSUR. Hasta tanto no estén disponibles se podrán utilizar las normas ASTM o ISO correspondientes.

El cuerpo del Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio, CIRSOC 701 consta de 10 capítulos que abordan los siguientes temas:

- Capítulo A: Disposiciones Generales y Bases de Proyecto
- Capítulo B: Requerimientos de Proyecto
- Capítulo C: Reglas de Generales de Diseño
- Capítulo D: Reglas de Diseño Especiales
- Capítulo E: Uniones Mecánicas
- Capítulo F: Uniones Soldadas
- Capítulo G: Proyecto para Condiciones de Servicio
- Capítulo H: Fabricación, Montaje y Control de Calidad
- Capítulo I: Piezas de Aluminio Fundido
- Capítulo J: Ensayos

En el presente trabajo se pone énfasis en la influencia de las propiedades de las aleaciones de aluminio para lograr un comportamiento adecuado en las estructuras de aluminio de las obras civiles [4] y en el tratamiento que se da al respecto en el CIRSOC 701. En ese sentido se hace referencia, por un lado, al Capítulo A en el que se describen las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio relevantes para el comportamiento estructural. Por otro lado, se describe el abordaje que en el Capítulo F se realiza al tema de Uniones Soldadas cuyo análisis es de interés dado que la temperatura afecta las propiedades mecánicas. Asimismo, se aborda el tratamiento que se hace en el Capítulo G a la influencia de las propiedades de las aleaciones en el comportamiento para condiciones de servicio relacionadas con deformaciones y desplazamientos, vibraciones, durabilidad y protección contra la corrosión. Finalmente, se hace referencia al Capítulo H analizando la influencia de la temperatura de exposición en los procesos de fabricación y montaje.

"El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles"

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

IV. Desarrollo

IV.1 Influencia de las propiedades en la verificación de los Estados Límites Últimos

Los Estados Límites Últimos se establecen con el fin de lograr seguridad y definir una capacidad máxima de transferencia de carga, es decir que se relacionan directamente con la resistencia de la estructura.

Para extrusión se utilizan, en su mayoría, aleaciones de las series que se indican a continuación con sus componentes:

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.

Las series 6000 y 7000 son termotratables. Son las aleaciones de extrusión más comúnmente utilizadas y poseen una amplia gama de aplicaciones.

La serie 6000 posee una alta extrusionabilidad y puede ser termotratada por solubilización a la temperatura de extrusión. Asimismo, estas aleaciones poseen una resistencia entre media y alta, son fáciles de soldar y ofrecen una excelente resistencia a la corrosión, incluso en entornos salinos. La mayoría del material extruido para estructuras está fabricado en estas calidades. Se los utiliza para construcciones bajo carga, tanto en tierra como en el mar

En el Capítulo A del CIRSOC 701 se establecen las propiedades mecánicas mínimas utilizadas para aleaciones de aluminio no soldadas y soldadas. Se consideraron las mismas aleaciones de la especificación base. En las siguientes Tablas IV.1 y IV.2 se transcriben dichas propiedades para las aleaciones 6061 y 6063. Las propiedades mecánicas listadas que se utilizan en el dimensionamiento de secciones son:

F_{utr} , F_{uv} tensión de rotura a tracción y corte del aluminio respectivamente

F_{yc} , F_{yt} , F_{yv} tensión de fluencia por compresión, tracción y corte respectivamente.

“El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles”

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

Tabla IV. 1: Propiedades mecánicas mínimas para aleaciones de aluminio

Aleación y Temple	Producto	Rango de espesores mm	F_{ut} MPa	F_{yt} MPa	F_{yc} MPa	F_{uv} MPa	F_{yv} MPa	Módulo de elasticidad en compresión		
								E (MPa)		
6061 -T6, T651	Chapas y placas	0,25 a 100,0	290	240	240	185	138,6	69 600		
	Extrusiones	Todos	260	240	240	165	138,6	69 600		
		Hasta 200	290	240	240	170	138,6	69 600		
	Varillas y barras acabadas en frío	Tubos estirados	Caños	0,63 a 12,5	290	240	240	185	138,6	69 600
				Todos	260	240	240	165	138,6	69 600
6063 -T5	Extrusiones	Hasta 12,5	150	110	110	90	63,5	69 600		
	Extrusiones	Hasta 25,0	150	110	110	90	63,5	69 600		
	Extrusiones	12,5 a 25,0	145	105	105	85	60,6	69 600		
	Extrusiones y caños	Todos	205	170	170	130	98,2	69 600		

Tabla IV.2: Propiedades mecánicas mínimas para las aleaciones de aluminio soldadas

Aleación y Temple	Producto	Rango de espesores mm	Tracción		Compresión	Corte	
			F_{uwt} MPa	F_{ywt} MPa	F_{ywc} MPa	F_{uwv} MPa	F_{yvw} MPa
6061-T6, T651, T6510, T6511 ³	Todos		165	105	105	105	60,6
6061-T6, T651, T6510, T6511 ⁴	Todos	Más de 9,5	165	80	80	105	46,2
6063-T5, T52, T6	Todos		115	55	55	75	31,8

"El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles"

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

El reglamento contempla la posibilidad de disponibilidad de otras aleaciones que ofrecen resistencias más altas, y/o mejores resistencias post-soldadura, pero dado que estas resistencias pueden ser logradas con el detrimento de otras propiedades, se advierte al proyectista que las mismas pueden utilizarse con una cuidadosa consideración y estrecha consulta con un fabricante. Las propiedades a considerar deben incluir durabilidad, soldabilidad, resistencia a la propagación de grietas y comportamiento en servicio. Las aleaciones de la serie 7*** que tienen resistencias de prueba más altas, requieren control particular en los procesos de fabricación, por ejemplo, control de micro estructura, esfuerzos residuales y trabajo en frío. Por lo tanto el reglamento contempla que se podrán utilizar aleaciones no incluidas en el capítulo A siempre y cuando su uso en estructuras esté autorizado en normas expedidas por entidades de reconocida autoridad.

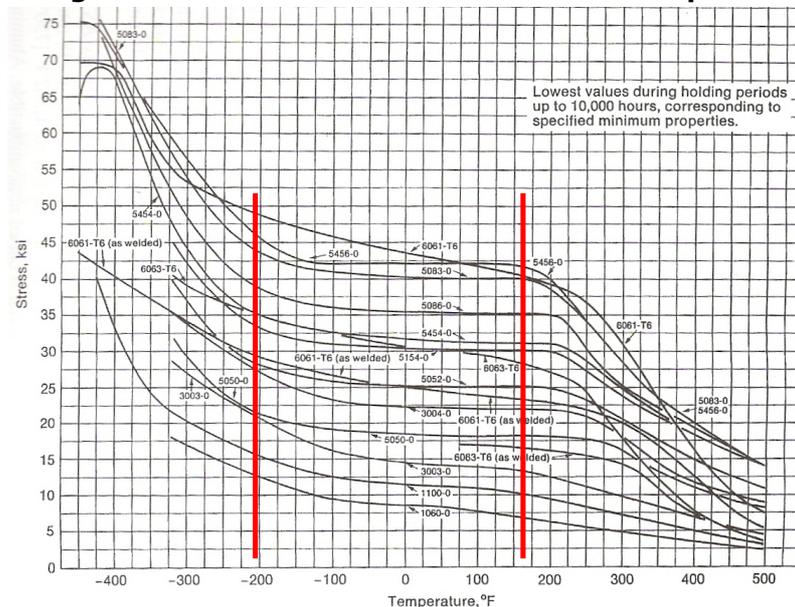
Es importante la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas. Cuando la temperatura decrece, la tensión de tracción se incrementa como se observa en la Figura 1 [2]. Lo indicado convierte al aluminio en un excelente material para aplicaciones estructurales a baja temperatura con las limitaciones impuestas por el incremento de la deformabilidad con la temperatura.

Dado el bajo punto de fusión del aluminio la tensión decrece significativamente a partir de los 95 °C (201,4 °F) para la mayoría de las aleaciones, este aspecto es contemplado en el CIRSOC 701 limitando el uso en construcciones que estén durante su vida útil sometidas a temperaturas entre -45°C (-95,4 °F) y 95°C (201,4 °F). No obstante, para las aleaciones de la serie 5XXX con contenidos de magnesio superiores a 3% se limita la temperatura máxima a 66°C (139,92 °F) dado que si se mantienen en el rango de temperatura de 66°C a 230°C (487,6 °F) pueden posteriormente sufrir exfoliación y consecuentemente fisuración por corrosión bajo tensiones. El tiempo de permanencia a temperatura elevada es un factor crítico que determina el grado de sensibilización a la exfoliación y a la fisuración por corrosión bajo tensiones.

“El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles”

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

Figura 1: Variación de la Tensión con la temperatura.



La resistencia del metal templado se puede reducir luego de su exposición a procesos que involucran temperaturas elevadas (como por ejemplo el curado con pintura en fábrica, la cocción de los revestimientos con esmalte porcelánico y el conformado en caliente). La magnitud de la reducción de la resistencia varía dependiendo de la aleación, del temple y del tiempo de exposición. Se puede consultar a los proveedores sobre las resistencias del material sujeto a tales procesos. En el Capítulo H del CIRSOC 701 se dan los límites de temperatura para las aleaciones, temple y tiempo de exposiciones consideradas para los cuales no es necesario reducir las tensiones de diseño. En Tabla IV.3 se indican dichos límites.

Tabla IV.3 Máximo Tiempo de Exposición a Temperatura para Aluminios 6005, 6061 y 6063 Templados y Envejecidos Artificialmente

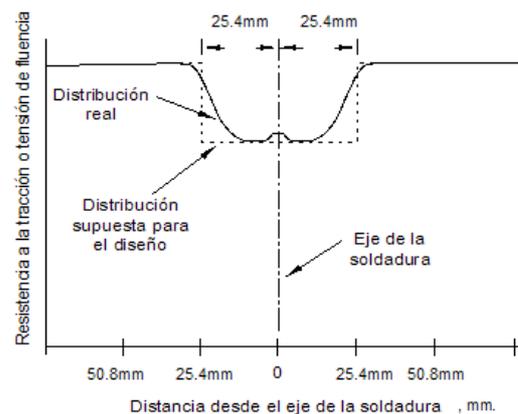
Temperatura ¹		Tiempo
°F	°C	
450	230	5 min
425	220	15 min
400	205	30 min
375	190	2 hr
350	175	10 hr
325	165	100 hr
300	150	1000 hr
212	100	100 000 hr

¹ Para otras temperaturas (T) interpolar el tiempo (t) de la forma indicada en el proyecto de reglamento.

Las soldaduras provocan revenido localizado que produce una zona de menor resistencia a lo largo de ambos lados de la soldadura. En Figura 2 se indica la zona de menor resistencia que contempla el Reglamento 701 en su Capítulo F [5, 6].

La resistencia de las soldaduras en las aleaciones tratadas térmicamente, tales como la 6061-T6, está comprendida entre la resistencia del material revenido y la resistencia del material original tratado térmicamente. La mínima resistencia a la tracción de las aleaciones soldadas indicada en la Tabla IV.2 son las resistencias correspondientes a la clasificación de soldaduras del Reglamento CIRSOC 704, que son iguales a las resistencias "revenidas" en el caso de las aleaciones no tratables térmicamente y levemente menores que las resistencias "tratadas térmicamente por solución" en el caso de las aleaciones tratables térmicamente [7].

Figura 2: Zona afectada por la soldadura.



La serie 7000 posee la mayor resistencia de las aleaciones utilizadas en la extrusión. Posee una óptima soldabilidad y una menor reducción de la resistencia en zonas afectadas térmicamente que la serie 6000. Sin embargo, su resistencia a la corrosión y facilidad de conformado no son tan buenas como las de la serie 6000. Esta particularidad puede mejorarse añadiendo pequeñas cantidades de Zn, Cr o Mn.

IV.2 Influencia de las propiedades en la verificación de los Estados Límites de Servicio

Los Estados Límites de Servicio se establecen con el fin de que la estructura presente un comportamiento normal y aceptable bajo condiciones de servicio. Ellos son:

- (1) Deformaciones, desplazamientos o rotaciones que puedan afectar el aspecto, funcionamiento o desagües de la estructura, o puedan causar daño a componentes no estructurales de la construcción y/o a sus accesorios.
- (2) Daño local excesivo (fluencia local, pandeo, deslizamiento o agrietamiento) que pueda requerir un costoso y reiterado mantenimiento o conducir a la corrosión.
- (3) Vibraciones excesivas producidas por el viento o cargas variables

Estos aspectos se contemplan fundamentalmente en el diseño estructural adoptando una tipología acorde a las luces del proyecto. Desde el punto de vista material la propiedad de la aleación que influye estos aspectos es el módulo de elasticidad. El mismo es aproximadamente el promedio de los módulos de los elementos componentes de la aleación, y por ende es el mismo valor para cada serie de aleación. El templeado no afecta dicho módulo de elasticidad. La soldadura no afecta el módulo de elasticidad a diferencia de las tensiones de fluencia que sí son afectadas. Los valores extremos del módulo de elasticidad varían entre 69600 MPa y 75200 MPa, que representa una variación de aproximadamente el 7.5 %.

- (4) Durabilidad y Protección contra la corrosión

Para atender este estado límite, en la instancia de proyecto de las estructuras de aluminio, debe seleccionarse la aleación y temple adecuados al tipo de ambiente al que estará expuesta la estructura. La especificación base [3] no establece consideraciones para contemplar la prevención de la corrosión, el CIRSOC 701 incluye, en Capítulo G lo especificado por Eurocódigo 9 [7] considerando niveles de durabilidad según el tipo de aleación y la necesidad o no de protección según el tipo de ambiente, según lo indicado en Tablas IV.3 y IV.4 para algunas aleaciones. El proyectista deberá prevenir los problemas por corrosión a través de un adecuado diseño atendiendo a la prevención de la corrosión galvánica provocada por el contacto entre diferentes materiales, a la selección de juntas apropiadas, adoptando sistemas de protección apropiados (a través de capas de protección) y/o planificando programas de mantenimiento.

Tabla IV.3: Durabilidad de aleaciones de aluminio

Aleación	Producto	Clasificación de Durabilidad
6061	Extrusiones	B
	Tubería Extruída	
6063	Extrusiones	B
	Tubería Extruída	
	Forjados	
	Lámina	
	Plancha	
	Tubería Extruída	
7020	Extrusiones	C
	Lámina y Plancha	
	Fundición con enfriamiento	
	Fundición con enfriamiento rápido	
5083	Extrusiones	A
	Lámina y Plancha	
	Tubería Extruída	
	Forjados	
	Lámina y Plancha	

Tabla IV.4: Protección general contra la corrosión de estructuras de aluminio

Durabilidad de la aleación	Espesor (mm)	Protección necesaria de acuerdo con el ambiente							
		Atmosférico						Sumergido	
		Rural	Industrial/urbano		Marino			Agua dulce	Agua salada
Moderado	Severo		No Industrial	Moderado	Severo				
A	Todos	Ninguna	Ninguna	P	Ninguna	Ninguna	P	Ninguna	Ninguna
B	Menos de 3	Ninguna	P	P	P	P	P	P	P
	3 ó más	Ninguna	Ninguna	P	Ninguna	Ninguna	P	P	P
C	Todos	Ninguna	P ¹⁾	P	P	P	P	P ²⁾	NR

P Requiere protección

P¹⁾ Requiere sólo protección local contra la corrosión en la soldadura y la zona afectada por el calor en ambientes urbanos no industriales.

P²⁾ No se recomienda la protección si se trata de construcción soldada. NR No se recomienda la inmersión en agua salada.

“El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles”

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy

V. Conclusiones

El Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio, CIRSOC 701, contempla el uso de todas las aleaciones de la especificación base dada su disponibilidad en el país.

Un comportamiento adecuado desde el punto de vista estructural requiere de una adecuada selección de las aleaciones de acuerdo al destino de la estructura, al ambiente de exposición, al tipo de uniones a utilizar.

Por lo indicado, el proyectista debe conocer las distintas posibilidades de uso de calidades de aleaciones que dispone para desarrollar sus proyectos, el fabricante debe asesorar en cuanto a las propiedades del producto que ofrece y los investigadores debemos esforzarnos por profundizar el estudio de todos los aspectos involucrados en el comportamiento estructural y material y en difundirlos apropiadamente. Si se dan estas condiciones y dada la amplia variedad de calidades de aleaciones disponibles se puede indicar que es posible lograr comportamientos adecuados en las estructuras de las obras civiles construidas con aleaciones de aluminio.

VI. Referencias

- [1] CIRSOC 701, "Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio" INTI-CIRSOC, 2013
- [2] CIRSOC 704, "Reglamento Argentino de Soldadura de Estructuras de Aluminio" INTI-CIRSOC, 2013
- [3] Aluminium Design Manual. Specifications & Guidelines for Aluminum Structures of the Aluminum Association. Parte I-B y II-B. Edición 2005.
- [4] Kissell, R., Ferry, R., Aluminum Structures. A Guide to their Specifications and Design. Second Edition, editorial John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [5] Moore, R.L., Jombock, J.R. and Kelsey, R.A.(1971), Strength of Welded Joints in Aluminum Alloy 6061-T6 Tubular Members, The Welding Journal
- [6] Doerr, D.D., (1966), "Engineering Design Considerations of Aluminum", Proceeding of Aluminum Welding Seminar, The Aluminum Association.
- [7] Nelson, F.G. Jr., and Howell, F.M., (1952), "The Strength and Ductility of Welds in Aluminum Alloy Plate", The Welding Journal.
- [8] Eurocódigo 9, UNE-ENV_1999: Proyecto de Estructuras de Aluminio. 1999.

"El aluminio en el diseño de las estructuras de las obras civiles"

M. H. Peralta, M. I. Montanaro, M. L. Godoy