

EL ALUMINIO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

PERALTA María Haydée, MONTANARO María Inés

Docentes Investigadoras Área Estructuras – Fac. de Ingeniería - UNCPBA
Olavarría. Argentina.

CASTELLANO Carlos E.

Asesor Técnico de la Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines (CAIAMA).

RESUMEN

El Aluminio está siendo cada vez más utilizado en el mundo con fines estructurales y toda la información disponible indica que esta tendencia se verá acentuada en los años venideros.

Existen ejemplos de estructuras construidas con este material y normativas que rigen su aplicación. En nuestro país, si bien se cuenta con una significativa cantidad de normas y documentos sobre sus propiedades y comportamiento, no se dispone de reglamentos o recomendaciones que permitan su aplicación estructural en las obras civiles con la seguridad que se requiere.

La Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines (C.A.I.A.M.A.) tiene entre sus objetivos la estimulación de todas las acciones que tiendan a generar nuevas aplicaciones para el aluminio ya sea por la penetración en nuevos mercados o por la ampliación sustentable de los existentes.

En el presente trabajo se realiza una recopilación bibliográfica referida al uso estructural del aluminio. Se aborda, asimismo, un estudio comparativo entre elementos de acero y aluminio sometidos a compresión para evaluar ventajas y/o desventajas del uso de ambos materiales. Para dicho estudio, realizado desde el punto de vista teórico-práctico, se utiliza la normativa americana en el caso del aluminio y la propuesta CIRSOC 301-EL para el acero.

ABSTRACT

Structural applications of Aluminum become more widely used in the world and the available information indicates that this tendency will be marked in the coming years. There are numerous examples around the world of structures constructed with this material and in several countries there are also norms and regulations that govern their application. In our country, although there are a significant amount of norms and documents on Aluminum properties and behavior, does not exist regulations or recommendations that allow their safe structural application in civil works. The Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines (C.A.I.A.M.A.) has among his objectives the stimulation of all the actions tend to generate new applications for aluminum either by the penetration in new markets or by the sustainable extension where the Aluminum is already present.

The present paper presents a bibliographical compilation referred the structural use of aluminum. It is approached also, a comparative study between elements of steel and aluminum under compression to evaluate advantages and/or disadvantages of the use of both materials. For this study, made from the theoretical-practical point of view, the American norm for aluminum and the proposal CIRSOC 301-EL for steel are applied in order to carry out the calculations.

1. INTRODUCCIÓN

El Aluminio está siendo cada vez más utilizado en el mundo con fines estructurales y toda la información disponible indica que esta tendencia se verá acentuada en los años venideros.

Existen en el mundo numerosos ejemplos de estructuras construidas con este material. En nuestro país, si bien se cuenta con una significativa cantidad de normas y documentos sobre sus propiedades y comportamiento, no se dispone de Reglamentos o Recomendaciones que permitan su aplicación estructural en las obras civiles con la seguridad que se requiere.

La Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines (CAIAMA) con el fin de generar nuevas aplicaciones para el aluminio motoriza en el país el Proyecto para la generación de los mencionados Reglamentos que permitan regular el uso del aluminio con fines estructurales. A tal fin, se cuenta con el aval de la Comisión Permanente de Estructuras Metálicas del CIRSOC para el desarrollo del proyecto y con la disposición de docentes del Área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de UNCPBA para la ejecución.

En la actualidad se está desarrollando etapa previa de difusión del proyecto para lo cual se ha recopilado información. Asimismo, en el presente trabajo se presenta un análisis comparativo entre elementos de aluminio y acero sometidos a compresión continuando en el futuro con otras solicitaciones a efectos de evaluar ventajas y desventajas del uso del aluminio respecto del acero.

2. COMPETITIVIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE ALUMINIO

Las principales razones que impulsan el crecimiento de la aplicación del aluminio para fines estructurales, puede encontrarse en múltiples aspectos, todos relacionados con las ventajas sobre otros materiales:

- Durabilidad.
- Mantenimiento, bajo o nulo.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Bajo peso (1/3 de la densidad del acero).
- Alta relación resistencia/peso.
- Resistencia a la tracción de 912 a 6.180 Kg/cm².
- Mayor capacidad autoportante (por el menor peso propio).
- Facilidad de mecanizado, altamente fabricable.
- Buenas propiedades de las soldaduras.
- Facilidad para el armado y ensamble (por su menor peso). Útil para montajes en zonas y / o lugares con difícil acceso.
- Muy buenas posibilidades de obtener formas funcionales en los perfiles que conforman la estructura, para permitir el paso de las canalizaciones de los servicios.
- Muy buena adaptación a decorados (formas, colores y tonalidades).
- Alta reciclabilidad. Muy superior a otros materiales (hierro y hormigón).
- Propiedades “anti – Chispas”.

- Fácil de instalar. Por ejemplo un Domo de 104 mts y con capacidad de 14.000 asientos, se instala en 3 meses. Ahorros en la instalación, ahorros en tiempo de ejecución.
- Sistema de techado libre de fugas. Comprobadamente hermético.
- Más fresco en el interior. El aluminio es un material con alta capacidad para reflejar la luz solar, muy poca radiación y baja emisividad.
- Puede ser aislado térmicamente y acústicamente

Los sistemas que pudiesen ser desarrollados sobre la base de partes de aluminio en su estructura permitirán llevar a cabo la construcción de cualquier tipo de obra en forma similar y con ciertas ventajas si se las compara con las realizadas con otros materiales metálicos.

Tiene todas las ventajas asignadas a las estructuras metálicas, tales como rapidez para su montaje, nulo o casi nulo requerimiento de obra húmeda, seguridad, confortabilidad, y presenta otras ventajas sobre los otros materiales metálicos debido a las posibilidades que ofrece de integrar las soluciones estructurales con los requerimientos de las canalizaciones para la instalación y pasaje de los servicios (sanitarios, eléctricos, electrónicos, etc.) y la armonía arquitectónica. Esto último asociado a la mayor facilidad que presenta para obtener formas y configuraciones funcionales a los requerimientos de las obras.

Las características del aluminio indicadas permiten diseños de estructuras utilizando tipologías apropiadas para cubrir grandes luces. Los ejemplos de obras construidas muestran las posibilidades de uso de este material en obras como estadios, salones exposición, templos, auditorios, etc.

La aplicación de Aluminio para estos fines es una clara evolución tecnológica. Este material, por lo expresado más arriba, reúne todas las características para resultar apto aún en condiciones muy rigurosas.

3. SU USO EN EL MUNDO

Como ya se indicó el uso del aluminio con fines estructurales en el mundo se ha difundido. Prueba de ello es la existencia de normativas, y obras construidas.

3.1 Normativas para el uso estructural del aluminio vigentes en el mundo

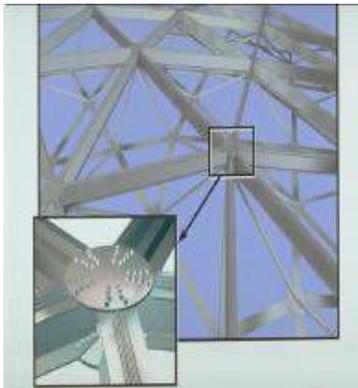
En muchos países del mundo existen diversas normativas vigentes, algunas de las cuales se detallan a continuación:

Norma Australiana: AS/NZS, Aluminum structures Part 1: Limit state design, Australian/New Zealand Standard AS/NZS 1664.1:1997, Standards Australia, Sydney (Australia)

Norma Estadounidense: Aluminum Design Manual 2005 editado por The Aluminum Association , 2005.

Norma Europea: Eurocódigo 9 UNE-EN 1999-1-1 editado AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación

3.2 Obras Construidas



Diámetro: 68 mts.
Capacidad: 4.000 asientos.
Uso: Competencias de gimnasia nacionales e internacionales.
Año de Construcción: 1997.

Figura 1: CENTRO DE GIMNASIA INTERNACIONAL. SHANGHAI, CHINA.

El Centro de Gimnasia mostrado en Figura 1 posee una estructura espacial de aluminio, formada por perfiles de ala ancha, cubierta con paneles triangulares, los cuales son asegurados mediante un sistema de fijación y sellado patentado por la empresa constructora. La estructura armada no requiere de ninguna columna en toda su luz. Los perfiles están unidos en sus extremos por platos o nodos, y son armados formando triángulos. La fijación de los perfiles a los platos se realiza mediante remaches estructurales, del mismo tipo que se utiliza en la industria aeronáutica.

La estructura que se visualiza en la Figura 2 es un sistema que consta de pirámides regulares de base cuadrada, rectangular o triangular hechas con tubos de aluminio de sección circular de diámetro y espesor variable, apernados en los extremos. Es una estructura susceptible de crecer y fácil de armar o desarmar. El sistema de construcción es portátil, simple, flexible, eficiente y económico. La construcción es fabricada y montada, todo en una sola operación y justo en el sitio de trabajo. Los paneles son cocidos unos con otros, eliminando tornillos, tuercas, selladores y cualquier posibilidad de filtraciones o goteras. La fabricación y montaje de los paneles es rápida, 500 m²/día

BELL COUNTY EXPOSITION CENTER
 BELTON, TEXAS, USA.
 Diámetro: 97,5 m.
 Capacidad: 9.500 asientos
 Uso: Múltiples
 Año de Construcción: 1986



Figura 2: Centro de exposiciones en Texas.

4. JUSTIFICACIÓN DEL DESARROLLO DEL PROYECTO PARA LA GENERACIÓN DEL REGLAMENTO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO

En la siguiente tabla 1 se observa la distribución mundial de la producción de aluminio primario en el mundo¹ y en la tabla 2 el consumo por habitante para varios países con el fin de situar a la Argentina en el contexto mundial

REGIÓN	2000	2004	2005	Pronóstico 2006	Pronóstico 2009	Participación 2005 [%]	Variación 00-05 [%]	Variación Prevista 00-09 [%]
AFRICA	1.367	1.710	1.752	1.889	1.966	5,5%	28,2%	43,8%
ASIA (exc. Japón)	1.246	1.487	1.756	1.923	2.849	5,5%	40,9%	128,7%
JAPÓN	908	1.113	1.198	1.393	1.630	3,8%	31,9%	79,5%
Sub Total	3.521	4.310	4.706	5.205	6.445	14,7%	33,7%	83,0%
OCEANÍA	2.115	2.246	2.252	2.266	2.307	7,1%	6,5%	9,1%
CHINA	3.130	6.645	7.811	8.990	11.337	24,5%	149,6%	262,2%
FED. RUSA+ SAT.	3.907	4.099	4.185	4.317	5.345	13,1%	7,1%	36,8%
EUROPA DEL ESTE	372	456	481	467	588	1,5%	29,3%	58,1%
Sub Total	9.524	13.446	14.729	16.040	19.577	46,1%	54,7%	105,6%
AMÉRICA LATINA	2.199	2.357	2.391	2.514	3.104	7,5%	8,7%	41,2%
NORTE AMÉRICA	6.809	5.110	5.382	5.361	5.334	16,9%	-21,0%	-21,7%
EUROPA	4.190	4.651	4.709	4.607	4.556	14,8%	12,4%	8,7%
Sub Total	13.198	12.118	12.482	12.482	12.994	39,1%	-5,4%	-1,5%
ARGENTINA	272	269	273	275	510	0,9%	0,4%	87,5%
TOTALES	26.243	29.874	31.917	33.727	39.016		21,6%	48,7%

Tabla 1: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ALUMINIO PRIMARIO [En miles de toneladas anuales]

<i>País</i>	<i>2000</i>	<i>2001</i>	<i>2002</i>	<i>2003</i>	<i>2004</i>	<i>2005</i>	<i>2006</i>
<i>Alemania</i>	28,6	29,3	30,6	33,1	32,2	31,0	30,9
<i>Argentina</i>	3,8	2,5	1,2	1,7	2,4	2,5	3,3
<i>Australia</i>	19,3	17,5	19,9	22,0	22,2	22,9	
<i>Brasil</i>	4,1	4,5	4,5	4,1	4,3	4,4	4,3
<i>China</i>	3,6	3,4	4,0	5,0	5,8	7,0	7,8
<i>España</i>	19,0	19,1	20,3	21,7	22,2	23,1	
<i>México</i>	5,7	4,9	4,8	5,1	7,3	7,8	

Tabla 2: CONSUMO “PER CAPITA [En kg / habitante año]

Como se puede apreciar en la tabla 2, el actual consumo de aluminio per cápita en nuestro país es muy bajo (alrededor de 3 kg/habitante año) si se lo compara con los valores correspondientes a los países desarrollados (este valor puede superar los 30 kg / habitante año).

Para el actual nivel del ingreso per cápita en Argentina, el consumo per cápita de aluminio es de casi la mitad del consumo teórico que surge de la estimación promedio de países con similar nivel de ingresos.

De acuerdo a la evidencia recogida, el valor del consumo per capita de aluminio en Argentina debería situarse en torno a los 5.8 kg/habitante año.

El análisis de estos valores y del actual desarrollo del mercado de las diferentes aplicaciones del Aluminio en nuestro país, nos indica que los rubros en los cuales será posible incrementar la utilización del Aluminio, están vinculados a la construcción y el transporte.

La Cámara Argentina de la Industria del Aluminio y Metales Afines (CAIAMA) con el fin de generar nuevas aplicaciones para el aluminio impulsa, en el país, el Proyecto para la generación de los Reglamentos que permitan regular el uso del aluminio con fines estructurales dentro del marco de seguridad que otorgan los reglamentos.

5. ALEACIONES DE USO ESTRUCTURAL

En estructuras se utilizan dos tipos o tres tipos de materiales: los perfiles, las chapas y piezas fundidas.

En perfiles, las aleaciones mas usadas son: 6063 y 6061 (casi exclusivamente).

Las aleaciones de la serie 5000 y 3000 son laminados y la serie 2000 puede ser barras trefiladas (2014) o para su trabajado mecánico (2011). En estos casos, se utilizan como complemento de las estructuras (salvo en la industria automotriz, donde los laminados también se usan como componentes estructurales).

Los temples más comúnmente aplicados son: 6061-T6, 5052-H36, 6063-T5, 3003-H14, 5456-H321, 5052-H34, 2014-T6, 3004-H151, 3003-H16, 5052-H32

Todas las aleaciones y elementos necesarios para realizar este tipo de construcciones podrían ser fabricadas en el país y en países del MERCOSUR.

6. DISEÑO A COMPRESIÓN

Se evalúa a continuación el comportamiento estructural de elementos de aluminio sometidos a compresión y se realiza una comparación con elementos comprimidos de acero.

El Manual de diseño del Aluminio² posee 2 métodos de análisis: el Método de las Tensiones Admisibles (ASD) y el Método de Factores de Carga y resistencia(LRFD). En este trabajo sólo se analiza el último método pues es el implementado en la nueva reglamentación CIRSOC para estructuras de acero y hormigón.

El diseño de miembros a compresión de acuerdo al Método de Factores de Carga y Resistencia implica la realización de una verificación global y una local para los elementos de las secciones por separado. De los valores obtenidos se toma la menor resistencia de diseño hallada.

Los elementos constitutivos de las columnas pueden ser: *elementos rigidizados*, cuando poseen dos apoyos paralelos a la dirección de la carga, tal el caso del alma de los perfiles doble te y *elementos no rigidizados*, cuando tienen un solo apoyo en la dirección de la carga como sería el caso de las alas del perfil doble te. Para la verificación al pandeo global divide a las columnas en tres grupos de acuerdo a su esbeltez global $\lambda=KL/r$ siendo K el factor de longitud efectiva, L la longitud de la barra y r el radio de giro mínimo y utiliza un factor de resistencia variable en función de la esbeltez modificada como en acero para independizarse de la calidad del material. El factor de resistencia f_{cc} se obtiene de la siguiente forma en función de la esbeltez:

$$f_{cc} = 1 - 0.21I \leq 0.95 \quad \text{para} \quad I \leq 1.2 \quad \text{Ec. 1}$$

$$f_{cc} = 0.58 + 0.14I \leq 0.95 \quad \text{para} \quad I \geq 1.2 \quad \text{Ec. 2}$$

En la verificación del pandeo local de acuerdo a la esbeltez b/t (b es el ancho efectivo y t es el espesor) se aplica un factor de resistencia de 0.85 o 0.95.

En la tabla 3 se resume el análisis comparativo entre estructuras de Aluminio y Acero considerando los principales ítems del diseño de columnas a compresión del reglamento CIRSOC 301-EL³ y el Manual de Diseño del Aluminio.

Resistencia de miembros sometidos a compresión		
Item	Acero: Cirsoc 301-EL	Aluminio: Manual
Factor de resistencia	Fijo	Variable
Verificación al pandeo local y global	Conjunta	Por separado
Uso de parámetro esbeltez modificada	Si	Si
Tramos considerados de la curva de pandeo	Dos	tres
Consideración de elementos rigidizados y no rigidizados	Si	si
Consideración de un rigidizador intermedio	No	Si
Consideración de placas curvas por separado	No	si

Tabla 3: Consideraciones sobre la verificación a compresión

6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN ENTRE ELEMENTOS DE ACERO Y ALUMINIO

A continuación se analizan 2 casos de elementos comprimidos utilizando el método LRFD de acuerdo al CIRSOC 301-EL y al Manual de Diseño del Aluminio. El material empleado en los ejemplos es: aluminio 6061-T6 y acero F-24.

Caso 1: Se ha analizado el ejemplo 9 de la Parte VIII: Ejemplos del Manual del Aluminio que calcula la resistencia de diseño de una columna biarticulada sometida a compresión de 2.44 m de altura de un perfil doble te que posee las dimensiones que se detallan en la Figura 3.

La esbeltez de ala es 6.8 y la esbeltez del alma es 31.7. Estos valores resultan menores que los límites establecidos por la norma de 10 y 33 respectivamente.

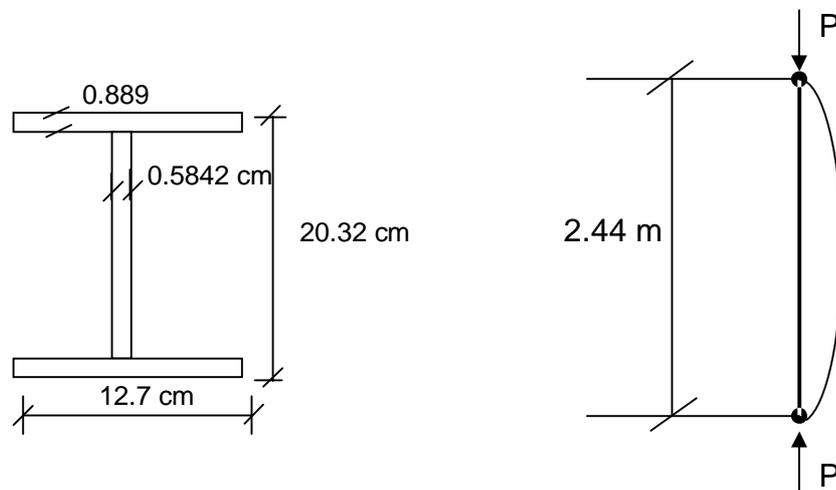


Figura 3: Caso 1-Columna biarticulada comprimida

El área del perfil que constituye la sección transversal es 33.93 cm^2 y el peso total de la columna es 22.4 kg.

El análisis del elemento a compresión permite obtener una *tensión crítica de 104.8 MPa*.

A efectos de realizar un análisis comparativo se considera un perfil de acero de similar sección para lo cual se adopta el IPN 200⁴, cuya sección es de 33.4 cm^2 . Una columna, de la misma luz que la de aluminio, tendría un peso de 63.93 kg. El análisis correspondiente del elemento de acero a compresión permite obtener una *tensión crítica de 224.34 MPa*

Se considera como parámetro de comparación la relación resistencia/peso. En el caso planteado dicho parámetro es para el aluminio 4.68 MPa/kg y para el acero es 3.5 MPa/kg.

Caso 2: El segundo caso a analizar corresponde al ejemplo número 11 de la Parte VIII: Ejemplos del Manual del Aluminio que calcula la tensión crítica en una columna que posee elementos esbeltos, que es el ala en este caso. Este hecho introduce diferencias en el proceso de cálculo respecto del utilizado en el caso 1. La longitud de la columna del ejemplo, en este caso, es 1.07 m y está biarticulada como se indica en Figura 4. La sección transversal tiene una espesor constante de 0.4775 cm. La esbeltez de ala es 11.97 mayor que el valor límite 10, mientras que el alma posee una esbeltez de 19.3 menor que el límite de 33 que da la norma.

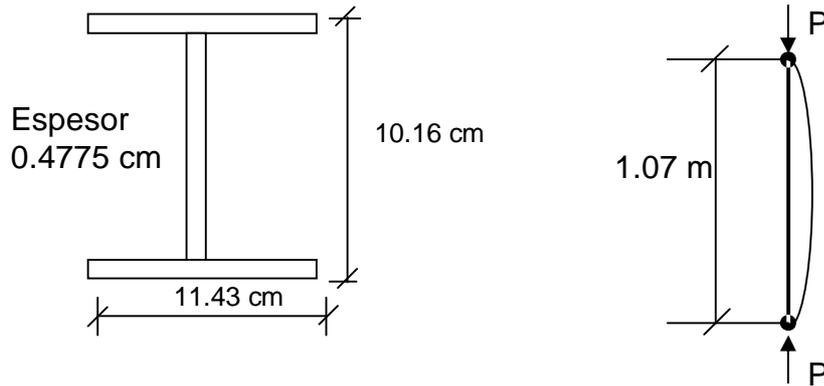


Figura 4: Caso 2-Columna biarticulada comprimida

El peso de la columna es 4.56 kg y el cálculo correspondiente permite obtener la *tensión crítica* que en este caso es *92.39 MPa*.

Considerando que la columna se construyera en acero con un perfil laminado de la misma sección que el anterior, su análisis indicaría que no posee elementos esbeltos. El peso de la columna de las mismas características que la de aluminio sería 13.02 kg y la *tensión crítica* *217.16 MPa*.

Utilizando, como en el caso anterior, la relación resistencia/peso como parámetro de comparación se obtiene para el aluminio *20.26 MPa/kg* y para el acero *16.62 MPa/kg*

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los sencillos casos analizados permiten observar que, la tensión crítica para los ejemplos de aluminio es menor que la del acero. No obstante, a efectos de evaluar rendimientos en lo referido al comportamiento a compresión en la comparación se debe considerar la diferencia de peso del aluminio frente al acero. La comparación de la relación resistencia/peso permite observar que la diferencia se invierte a favor del aluminio.

Es importante destacar que las tipologías de las estructuras de aluminio se corresponden a entramados con elementos de poca luz. Ello justifica la geometría de los ejemplos analizados.

8. CONSIDERACIONES FINALES

Lo indicado precedentemente permite arribar a las siguientes consideraciones:

- El uso del aluminio está muy difundido en el mundo para tipologías estructurales de grandes luces.
- Los ejemplos permiten verificar para el diseño a compresión que en los 2 casos analizados se obtuvieron una relación resistencia/peso superior a la del acero del orden del 20 % a 30 %.
- Desde el punto de vista económico la diferencia indicada en el punto anterior permite cubrir la diferencia del mayor costo por kg de aluminio.
- El aluminio presenta una importante ventaja en lo referido a la durabilidad ya que prácticamente no requiere mantenimiento
- La concreción del desarrollo del Proyecto para la generación de la reglamentación sobre estructuras de aluminio permitirá crear las condiciones necesarias para que la construcción civil pueda aplicar opciones que le permitan mejorar su calidad y prestación accediendo a tecnologías que permitan alcanzar estándares internacionales.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. CRU Magazine - 2Q2006
2. Manual de diseño del aluminio. Segunda edición. Año2000
3. CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES. "Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios". CIRSOC 301, Buenos Aires, 2001.
4. TABLAS. Perfiles laminados y tubos estructurales. CIRSOC. 2005