

DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON SECCIONES DE ALUMINIO

María Inés Montanaro

Ingeniero en Construcciones. Olavarría. Prov. de Buenos Aires.

mmontana@fio.unicen.edu.ar. Facultad de Ingeniería UNCPBA.

Docente e Investigador en el Área de Estructuras de la UNCPBA. Magister en Ingeniería Estructural U. N. de Tucumán. Ha presentado numerosos trabajos en congresos nacionales e internacionales, y posee publicaciones relacionadas con el Análisis de Estructuras en revistas nacionales e internacionales. Es integrante del Grupo de Trabajo que redactó el Proyecto CIRSOC 701 de Estructuras de Aluminio.

Irene Elisabet Rivas

Ingeniero en Construcciones. Olavarría. Prov. de Buenos Aires.

irivas@fio.unicen.edu.ar Facultad de Ingeniería UNCPBA.

Docente e Investigador en el Área de Estructuras de la UNCPBA. Magister en Tecnología y Construcciones de Hormigón UNCPBA. Ha presentado numerosos trabajos en congresos nacionales e internacionales, y posee publicaciones relacionadas con el Análisis de Estructuras en revistas nacionales e internacionales. Es integrante del Grupo de Trabajo que redactó el Proyecto CIRSOC 701 de Estructuras de Aluminio.

RESUMEN

En el campo de las estructuras metálicas se ha incrementado notablemente el empleo del aluminio como material estructural, prevaleciendo el uso del mismo en estructuras destinadas a cubrir grandes luces.

En Argentina ha finalizado la etapa de discusión pública nacional del Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 que establece, entre otros, los requisitos mínimos para el proyecto y cálculo de las estructuras de aluminio para edificios. Este Reglamento se basa en los lineamientos dados por la especificación norteamericana Aluminum Design Manual. Specifications & Guidelines for Aluminum Structures of the Aluminum Association versión 2005.

En este trabajo se presenta un estudio para el diseño de domos de aluminio considerando que una forma típica de los mismos lo constituyen las celosías triangulares simples.

Particularmente se analiza el comportamiento de las barras de domos aplicando la mencionada reglamentación. Concluyendo en algunas recomendaciones y corroborando que las cubiertas de aluminio, de grandes luces, se deben materializar con elementos estructurales relativamente cortos.

ABSTRACT

The use of aluminum as a structural material, considering it being used in structures with the aim of covering large spans, has greatly increased in the field of metal structures. The stage of national public discussion of the Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 which provides, among others, the minimum requirements for the design and calculation of aluminum structures for buildings, has been

completed in Argentina. This regulation is based on the guidelines given by the "American Aluminum Design Manual specification". "Specifications & Guidelines for Aluminum Structures of the Aluminum Association 2005 version".

This paper presents a study for the design of aluminum domes whereas a typical form is triangular space truss.

In particular, we analyze the behavior of the domes bars using the proposed CIRSOC 701. Concluding, the aluminum structures for clear-span roof systems, should be done with relatively short structural elements.

1. Introducción

Una de las tipologías estructurales más usada, para cubrir grandes luces empleando aluminio como material portante, es la correspondiente a los domos.

La configuración más común de estos domos es la de cúpulas laminares reticulares, y consisten en un gran número de barras unidas entre sí formando, por lo general, triángulos. Es importante destacar que las estructuras laminares son muy eficaces, resisten bien las cargas de compresión y también las cargas accidentales aunque éstas sean concentradas, ya que las mismas se difunden rápidamente a hacia las barras circundantes. En las cúpulas laminares la distribución de tensiones en las distintas barras es sensiblemente uniforme, Zignoli^[1].

Numerosos domos de aluminio se han construido en el mundo y sus características varían en función de las aplicaciones y destino. En particular en Estados Unidos de América se encuentra un símbolo de estas estructuras representado por la "corteza" exterior de la gigantesca esfera geodésica (Figura 1), centro visual y temático inaugurado en el año 1982, y construida en el parque temático EPCOT (Comunidad Experimental Prototípica del Mañana) de Walt Disney World en Orlando.



Figura 1: Spaceship Earth. Esfera gigante

Es común el uso de estas estructuras de gran atractivo estético para cubrir estadios, salones de exposiciones, gimnasios, templos y también se los emplea como cubiertas de tanques de tratamiento de líquidos cloacales, depósitos, etc..

Algunos ejemplos de las mismas se encuentran en la Planta de Aksa en Alemania con siete depósitos cuyos diámetros varían entre 25 m y 42 m (Figura 2); en la Planta de Estatoil en Suecia en la cubierta de un depósito de gasolina con diámetro de tanque de 36 m (Figura 3) y en Wilhelmshaven, Alemania, depósito de gasolina de 21 m de diámetro (Figura 4).



Figura 2: Planta de Aksa. Turquía



Figura 3: Planta de Estatoil. Suecia



Figura 4: Wilhelmshaven. Alemania

Se puede decir que el aluminio como material estructural tiene todas las ventajas asignadas a las estructuras metálicas, tales como rapidez para su montaje, requerimiento casi nulo de obra húmeda, seguridad, confortabilidad, etc. Como se ha mencionado permite diseños de estructuras utilizando tipologías apropiadas para cubrir grandes luces. Dentro de las ventajas del aluminio se pueden mencionar su durabilidad y bajo mantenimiento, además frente al acero presenta menor peso casi un tercio con una alta relación resistencia / peso que a igualdad de condiciones permite un mejor y más rápido montaje.

Las características y las propiedades del aluminio, para uso estructural, varían en función de los diferentes tipos de aleaciones y del tratamiento térmico (temple) correspondiente. Para las estructuras de los domos se utilizan perfiles y chapas de aluminio. En perfiles, las aleaciones más usadas son: 6063 y 6061 (casi exclusivamente).

La serie 6000 posee una alta extrusionabilidad y puede ser termotratada por solubilización a la temperatura de extrusión. Así mismo, estas aleaciones poseen una resistencia media y alta, son fáciles de soldar y ofrecen una excelente resistencia a la corrosión, incluso en entornos salinos. Se las puede utilizar para construcciones bajo carga, tanto en tierra como en mar.

Las aleaciones de la serie 5000 y 3000 se presentan generalmente como laminados, es decir que son las que conforman los paneles que se utilizan para las cubiertas.

La denominación de las aleaciones de aluminio usadas para propósitos generales de ingeniería, e incluidas en el Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 ^[2] está de acuerdo con el sistema de clasificación internacional de cuatro dígitos. La primera parte de la designación de una aleación de aluminio indica el grupo de aleación, y consta de cuatro dígitos así para el grupo de aleaciones de aluminio 6*** sus mayores elementos aleados son el magnesio y silicio, mientras que para las 3*** es el manganeso, para las 4*** el silicio y para las 5*** el magnesio. El segundo dígito indica modificaciones en la aleación, si es cero indica la aleación original.

El sistema de designación de templados es válido para todas las formas y aleaciones de aluminio. El mismo está basado en una secuencia de tratamientos básicos usados para producir la variedad de templados. La designación del templado se indica con una letra y se ubica detrás de la designación de la aleación, separada por un guión.

Este trabajo comprende, particularmente, el análisis-dimensionado de las barras de domos considerados como entramados de aluminio sin tener en cuenta la forma en que se desarrollará la unión de los extremos de las mismas. Si bien los nudos de enlace de las barras constituyen el elemento fundamental para estas estructuras, este tema se abordará en una instancia posterior de la presente investigación. Para el caso de los entramados de barras de aluminio resulta válido lo recomendado para barras de entramados de acero, es decir que se debe ser cuidadoso al elegir los tipos de uniones en un reticulado y de evitar el uso extensivo de refuerzos ya que los mismos resultan costosos. La economía aparente, obtenida con la elección de las barras de menor peso, desaparece rápidamente con el diseño de las uniones si el calculista no tiene conocimiento de las consideraciones críticas que influyen la eficiencia de las uniones. Pueden ejecutarse mediante tornillos, soldadura, etc., los extremos de las barras se unen en el nudo directamente y por lo general con la ayuda de elementos especiales: cartelas, esferas, etc. habiendo gran variedad de dispositivos, para nudos de unión, patentados.

En el presente trabajo se emplean y analizan las formulaciones y requisitos, provistos por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 ^[2] y por los correspondientes Comentarios ^[3] al Reglamento, para el tratamiento y verificación de las barras. Si bien aquí se pretende mostrar, a través del diseño de un domo de aluminio, la aplicación de los requisitos de diseño es importante aclarar que el mismo no debe ser considerado como un análisis exhaustivo de todos los requisitos de diseño de domos de aluminio. Esto se debe a que, entre otras cosas, no se han evaluado ni incluido todos los estados de cargas que pueden actuar sobre una estructura y además, tal como se ha indicado previamente, no se establece la forma en que se materializarán las uniones elementos importantes para la determinación de la sección.

2. Metodología empleada

Para efectuar el análisis y dimensionado de los mencionados entramados, formados por barras de aluminio, que se constituyen como el esqueleto portante de los domos se emplean las siguientes herramientas:

(a) Un Software basado en el Método de los Elementos Finitos, conocido comercialmente con el nombre de ALGOR FEMS (Finite Element Modeling Software) program ^[4]. Con él se determina el estado tensional que se origina en las diferentes barras que componen el domo. Se realizaron análisis estáticos espaciales utilizando elementos tipo viga (beam). Las cargas se dispusieron concentradas en cada uno de los nudos de la malla principal considerando sólo las de tipo gravitatorio: peso propio, peso de los paneles de cubierta y sobrecarga de uso.

(b) El Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 ^[2], Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio y sus respectivos Comentarios al Reglamento ^[3] para efectuar la determinación de las diferentes resistencias de diseño, y por ende el dimensionado y la verificación de todos los elementos - barras que componen la estructura.

Respecto del Proyecto de Reglamento es importante mencionar que, a la fecha, ya ha finalizado la etapa de discusión pública nacional del mismo. Dicho Proyecto de Reglamento tiene como base la especificación norteamericana: Aluminum Design Manual ^[5], que utiliza el denominado método de los factores de carga y resistencia LRFD (Local and Resistance Factor Design), también conocido como Método por Estados Límites, adaptando y orientando la misma al formato y esquema general del cuerpo de los Reglamentos Argentinos recientemente actualizado.

Dadas las características estructurales de los domos, y la carga considerada, las barras se hallan sometidas a esfuerzos combinados, resultando ser preponderantes los esfuerzos axiales de compresión y de tracción, aparecen además flexiones menores. A continuación se presenta una breve reseña del tratamiento que el Proyecto de Reglamento ^{[2],[3]} establece para la verificación y dimensionado de las barras bajo las mencionadas solicitaciones. Se considera que, por razones de espacio, no es necesario incluir aquí todas las expresiones y requisitos propios de la verificación, teniendo en cuenta que dicha información se encuentra disponible en la página web de CIRSOC (<http://www.inti.gov.ar/cirsoc>).

En todos los casos se deberá corroborar que la resistencia de diseño ϕRn sea mayor que la resistencia requerida Pu . Ecuación 1.

$$\phi Rn \geq Pu \quad (1)$$

- Compresión axial: con la finalidad de obtener el valor de la resistencia de diseño a compresión ϕPn presenta tablas que contienen fórmulas que permiten hallar los valores de las constantes de pandeo para elementos estructurales de aluminio en función del templado, del tipo de elemento y de la sollicitación que afecta al mismo. Para estos últimos casos considera: la compresión en barras y alas de vigas, la compresión axial: en los elementos planos y/o en los elementos curvos que componen la sección transversal de las barras. Esas constantes de pandeo forman parte de las expresiones que permiten determinar las resistencias de diseño en función de los denominados límites de esbeltez que permiten ubicar la zona o campo en que está trabajando el elemento estructural que se analiza.

El diseño de miembros a compresión axial se trata en el Capítulo C, Sección C.4 del mencionado Proyecto de Reglamento ^[2] e implica, por un lado la verificación global de la barra y por otro la evaluación de los posibles pandeos locales correspondientes a los elementos que componen la sección transversal. La esbeltez de la barra $k.L/r$ deberá ser menor o igual que 200.

Para la verificación al pandeo global considera que la barra a evaluar pertenece a alguno de los tres grupos que presenta de acuerdo con el valor de su parámetro de esbeltez global λ_c . Este parámetro es función del factor de longitud efectiva, k , la longitud de la barra, L , el radio de giro mínimo, r , y las características del material: tensión de fluencia a compresión F_{yc} y el módulo de elasticidad del aluminio en compresión E . Utiliza, además, un factor de resistencia ϕ_{cc} , variable en función del parámetro de esbeltez global.

En la verificación del pandeo local y de acuerdo con la relación de esbeltez b/t (siendo b el ancho efectivo y t el espesor) se aplica un factor de resistencia de 0.85 ó 0.95.

La expresión para determinar la resistencia de diseño ϕP_n de barras sometidas a compresión axial está dada en función de la tensión de diseño a compresión axial ϕF_{np} . A su vez esta última será función de la relación entre: la tensión de diseño global ϕF_{ng} y la tensión de diseño local a compresión ϕF_{nLi} de cada uno de los elementos que componen la sección transversal. De dicha relación surge que la tensión de diseño a compresión axial ϕF_{np} puede resultar igual a la tensión de diseño global ϕF_{ng} , o bien igual a la tensión de diseño promedio de los elementos que componen la sección, donde la tensión en cada elemento se pondera de acuerdo con la relación entre el área del elemento y el área total de la sección.

- Tracción axial: La resistencia de diseño ϕPn de barras traccionadas axialmente será el menor valor que resulte de la consideración de los estados límites de fluencia en la sección bruta y rotura en la sección neta. Para encontrar el valor de ésta última resistencia es necesario conocer las características de la unión en los extremos (incluida en área neta, área neta efectiva, etc.). La esbeltez de la barra $k.L/r$ deberá ser menor o igual que 300.

- Flexión axial: el momento de diseño ϕMn de una barra sometida a flexión simple será el menor valor de los que resulten de la evaluación de los diferentes estados límites últimos que pueden ser críticos para la misma:

plastificación de la fibra extrema traccionada, pandeo lateral torsional, pandeo local del ala uniformemente comprimida o pandeo local de alma. El estado límite de pandeo lateral torsional no es aplicable a barras flexadas con respecto al eje principal de menor inercia ni a barras con secciones tubulares circulares o cuadradas ni a secciones macizas circulares o cuadradas. Se deben evaluar y obtener las resistencias de diseño ϕMn_x para la barra flexando alrededor del eje fuerte y ϕMn_y para la barra flexando alrededor del eje débil.

- Flexo-compresión: Para verificar los elementos estructurales de aluminio sometidos a una combinación de esfuerzos, es decir cuando se tiene simultáneamente una resistencia requerida a compresión P_u , y momentos requeridos M_{ux} y M_{uy} , se emplea la Ecuación 2. Se trata de una ecuación de interacción conocida que ha sido adoptada en diferentes especificaciones para el cálculo de las denominadas vigas-columnas.

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1 \quad (2)$$

- Flexo-tracción: resulta válida la Ecuación 1 colocando los valores de las resistencias, requerida y de diseño, a tracción y los correspondientes valores de momentos requeridos y de diseño, compatibles.

3. Modelos Analizados

Para la ejecución del presente trabajo se consideraron los datos generales, de forma, de un ejemplo que se encuentra en Kissell and Ferry ^[6]. Se trata de un domo cuyas luces (diámetro) **D** es de 60.60 m y posee una flecha **f** igual a 20.40 m. El semiángulo central **β** es de 33.72° y el radio de la directriz **R** es de 54.60 m tal como se indica en la Figura 5.

Como se ha mencionado previamente, el domo se halla sometido sólo a la acción de cargas gravitatorias. Para materializar los elementos estructurales se usan barras de aluminio de aleación 6061-T6 que es la que comúnmente se emplea para fines estructurales en la construcción civil. En dichas barras se fijan paneles, también de aluminio, de aleación 3003-H16, con la finalidad de completar la cubierta. Se considera que estos paneles proveen arriostamiento continuo alrededor del eje débil. Es por ello que para la determinación del estado límite de pandeo lateral torsional la distancia entre puntos de arriostamiento contra el desplazamiento lateral del ala comprimida L_b resulte igual a cero, esto hace que la resistencia de diseño a flexión correspondiente a este estado límite sea igual a la resistencia de diseño que se obtiene para el estado límite de plastificación.

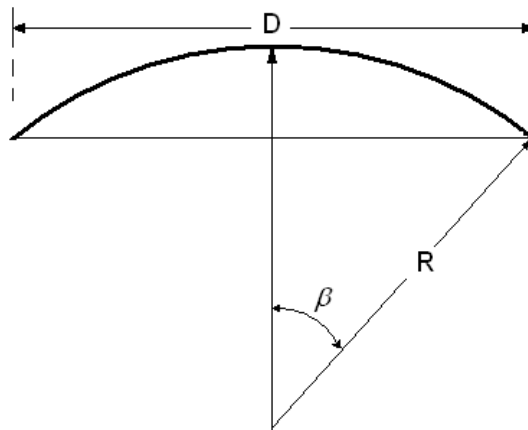


Figura 5: Geometría del domo

Se generaron dos modelos de domo, para su modelización se ha considerado que ambos se encuentran apoyados en todos los nodos ubicados sobre el perímetro (sólo tienen permitida la rotación en los tres ejes). El modelo material utilizado es el elástico lineal con una aleación 6061-T6 cuyo módulo de elasticidad es de 69600 MPa y su límite elástico de 240 MPa. Se identificará a los mismos como “Domo A” y “Domo B”.

Algunas características de ambos domos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 : Datos generales

Parámetros	Domo A	Domo B
Número total de nodos	350	511
Número total de barras	980	1444
Longitud máxima de barra [m]	5.92	4.43
Longitud mínima de barra [m]	3.11	2.25

- Domo A: similar al domo que presentan Kissell-Ferry ^[6], la igualdad se da para la disposición de las barras (forma del entramado). Igual número total de nudos, igual número total de barras e igual longitud de las barras de acuerdo con su ubicación. Se destaca que la vinculación adoptada para la zona de apoyos es diferente a la de la bibliografía de referencia. Un esquema del mismo se puede observar en la Figura 6.

- Domo B: de igual geometría global, que el domo A, es decir mantiene la forma general del entramado de barras pero modificando, disminuyendo, sus longitudes. Un esquema del mismo se puede observar en la Figura 7.

Se evaluaron los domos con secciones de aluminio, en particular se usaron los perfiles de Tabla 8: Aluminum Association Estandard I-BEAMS y los tubos de Tabla 22: Pipes de Referencia ^[5].

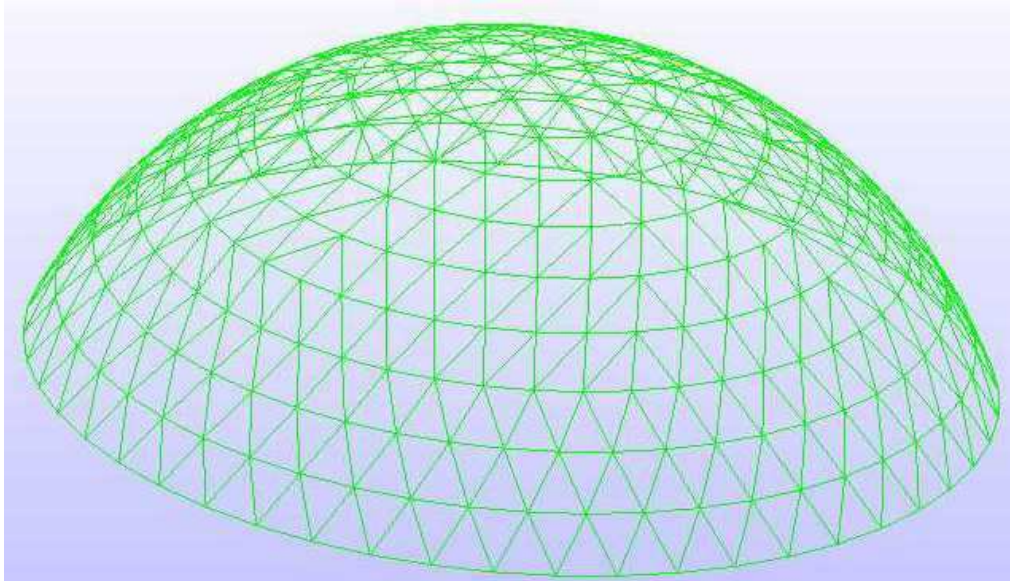


Figura 6: Vista general del entramado de barras. Domo A

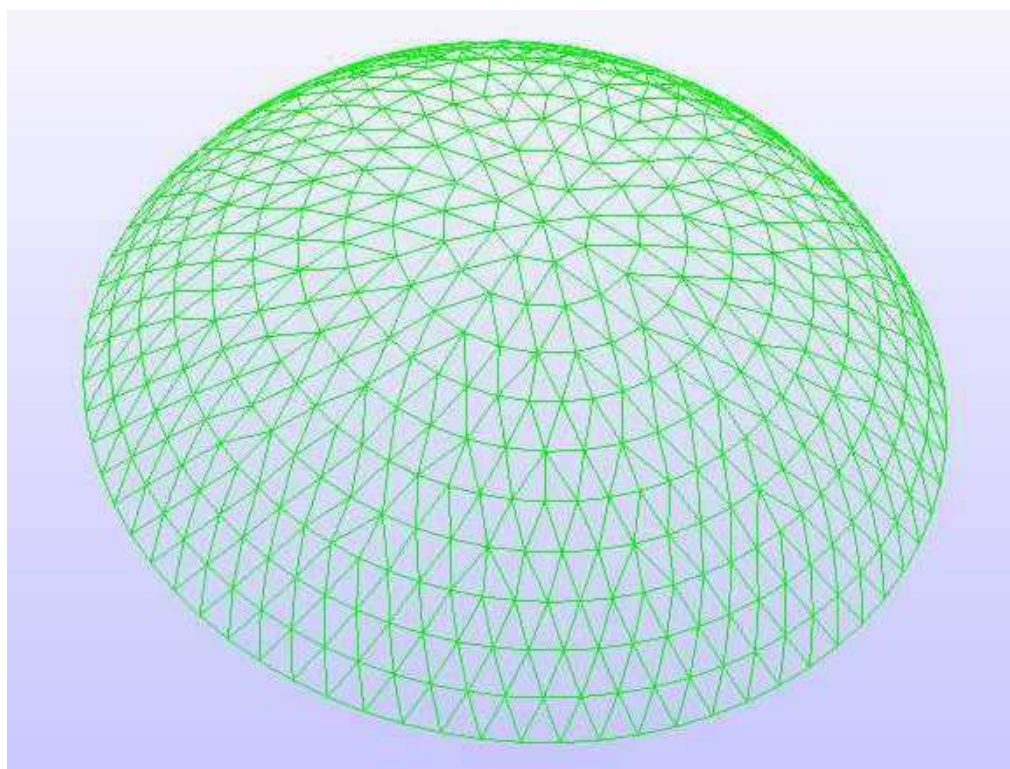


Figura 7: Vista general del entramado de barras. Domo B

Numerosas investigaciones han demostrado que las cúpulas de una sola capa reticular están potencialmente sujetas a la no linealidad geométrica ^[6], principalmente en función de la geometría de la estructura. El comportamiento lineal asume que las deformaciones de la estructura son tan pequeñas que cualquier cambio en la rigidez resulta insignificante. Sin embargo, cuando las deformaciones son suficientemente grandes la estructura se comportará de manera diferente en su forma deformada que en su forma original. Si la rigidez de la estructura cambia sensiblemente bajo carga, entonces la relación carga-deformación ya no es lineal.

Debido al bajo módulo de elasticidad que posee, el aluminio está sujeto a mayores deformaciones que el acero, por lo tanto este problema (no linealidad) se amplifica en las cúpulas de aluminio. Cuando el inicio de la inestabilidad (pandeo) ocurre mientras la tensión en los diferentes elementos que componen la estructura se encuentra todavía en el campo elástico, se denomina la inestabilidad elástica.

La no linealidad geométrica lleva a que se pueda presentar otra forma de comportamiento al pandeo y que es adicional al pandeo de los elementos individuales que se analizan de manera rutinaria. Este modo adicional se denomina pandeo general, y puede darse en las grandes superficies de las cúpulas formadas por entramados metálicos. Estas inestabilidades no son predichas por modelos elástico lineales de elementos finitos. Si bien varias formulaciones de elementos finitos no lineales están disponibles, cuando se las aplica a problemas como éste han demostrado tener una gran variabilidad en sus resultados, Referencia [6]. En la misma referencia se puede encontrar una expresión general de pandeo (Ecuación 3), para el caso específico de cúpulas formadas por una sola capa de celosía triangular, que fue propuesta en 1965 por Douglas Wright. La misma está basada en la premisa que la estructura reticulada se comporta como una lámina sólida, es decir se supone que las juntas de las barras del entramado son lo suficientemente rígidas para que la estructura actúe como un continuo. Vuelve a destacarse aquí la importancia de la vinculación – unión entre las barras.

La ecuación también es sensible a las imperfecciones iniciales, incluyendo las debidas a las tolerancias de fabricación y montaje.

$$P_{cr} = C \cdot (3 \cdot \sqrt{2}) \cdot \frac{A \cdot E \cdot r}{L \cdot R^2} \quad (3)$$

Siendo:

P_{cr} : presión crítica aplicada uniformemente distribuida y normal a la lámina [MPa].

C: coeficiente cuyo valor varía entre 0.365 (propuesto por Kenneth Buchert) y 0.38 (propuesto por Douglas Wright).

A: área de la sección transversal de una barra del entramado del domo [cm²].

E: módulo de elasticidad del material [MPa].

r: radio de giro [cm].

L: longitud típica – promedio de las barras [cm].

R: radio de la directriz del domo [cm].

4. Análisis de Resultados

Luego de efectuar la evaluación de todos los esfuerzos provenientes de la resolución estática del Domo A y del Domo B se seleccionaron las barras más solicitadas (diferentes combinaciones compatibles de esfuerzo axial y de flexión), las barras de mayor longitud (particularmente y por su mayor esbeltez, para su verificación a flexo compresión, aunque para ellas los esfuerzos resultaron ser relativamente pequeños comparados con los valores de las barras más solicitadas) y además se tuvieron en cuenta las barras en que la combinación de esfuerzos (sin que éstos sean los máximos) podía resultar definitiva. Posteriormente, y en base a esta selección - análisis preliminar, se consideraron para el dimensionado sólo algunas de las barras, es decir las más representativas asegurando que la sección transversal resultante cumpla también con los requisitos de las restantes barras.

Aplicando las especificaciones dadas por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 ^[2] se obtuvieron los valores de las correspondientes resistencias de diseño para las diferentes barras seleccionadas. A modo de ejemplo se presentan, en Tabla 2 y en Tabla 3, los valores numéricos de tres barras representativas y definitorias por cada domo. Se aclara que finalmente se utilizó una misma sección transversal de iguales dimensiones para todas las barras del domo, es por ello que en las Tablas 2 y 3 se observa una marcada diferencia entre resistencia requerida y resistencia de diseño para las barras de menor longitud.

Tabla 2 : Datos representativos para barras del Domo A

Longitud de barra [m]	Esfuerzo	Tubo circular 4SCH40		Perfil I 7x580	
		Resistencia Requerida	Resistencia de Diseño	Resistencia Requerida	Resistencia de Diseño
3,36	Compresión	48,30kN	148,19kN	49,49kN	158,03kN
	Flexión x	1.604kNm	14.05kNm	0.17kNm	24,39kNm
	Flexión y			2.82kNm	6.62kNm
	Interacción	0.440		0.746	
3.70	Tracción	64.75kN	466.90kN	65.99kN	725.27kN
	Flexión x	0.045kNm	14.05kNm	0.001kNm	24,39kNm
	Flexión y			0.042kNm	6.62kNm
	Interacción	0.142		0.097	
3,93	Compresión	88,55kN	113,54kN	90,80kN	101,47kN
	Flexión x	0.21kNm	14.05kNm	0.087kNm	24,39kNm
	Flexión y			0.07kNm	6.62kNm
	Interacción	0.795		0.909	

Tabla 3 : Datos representativos para barras del Domo B

Longitud de barra [m]	Esfuerzo	Tubo circular 3SCH40		Perfil I 5x370	
		Resistencia Requerida	Resistencia de Diseño	Resistencia Requerida	Resistencia de Diseño
2.26	Compresión	61.60kN	131.81kN	64.76kN	109.81kN
	Flexión x	0.80kNm	7.54kNm	0.35kNm	20.21kNm
	Flexión y			0.05kNm	3.53kNm
	Interacción	0.573		0.621	
2.66	Tracción	44.43kN	327.80kN	46.35kN	463.30kN
	Flexión x	2.49kNm	7.54kNm	0.001kNm	20.21kNm
	Flexión y			0.01kNm	3.53kNm
	Interacción	0.466		0.103	
3.52	Compresión	30.30kN	62.14kN	31.80kN	53.29kN
	Flexión x	0.54kNm	7.54kNm	2.25kNm	20.21kNm
	Flexión y			0.01kNm	3.53kNm
	Interacción	0.559		0.708	

En las mencionadas tablas se pueden observar también los valores que surgen de aplicar la ecuación de interacción (Ecuación 2). Respecto de los mismos

se puede decir que sólo hay un resultado que se aproxima más al límite (1.00) y que el mismo corresponde a una barra perteneciente al Domo A cuando se emplea un Perfil I 7x580.

Es importante aclarar que los valores, de resistencias de diseño, asociados a las barras sometidas a esfuerzos de tracción no son representativos pues, como se ha mencionado anteriormente, aquí no se tiene en cuenta el modo en que se efectivizará la unión entre barras y sólo se ha evaluado el estado límite de fluencia en el área bruta.

Por otra parte resulta interesante mostrar gráficos con las curvas que representan la variación de las resistencias de diseño en función de valores representativos de la longitud de las diferentes barras. Dichos gráficos se presentan en la Figura 8 y en la Figura 9, para las secciones consideradas. Se aclara que en los mismos no se han representado las resistencias requeridas de cada una de las barras ya que debían de incluirse 980 puntos para el Domo A y 1444 puntos para el Domo B, pero se destaca que todos esos puntos o nubes de puntos se ubican bajo las curvas de resistencia de diseño, ya que todas las barras verifican los diferentes estados límites.

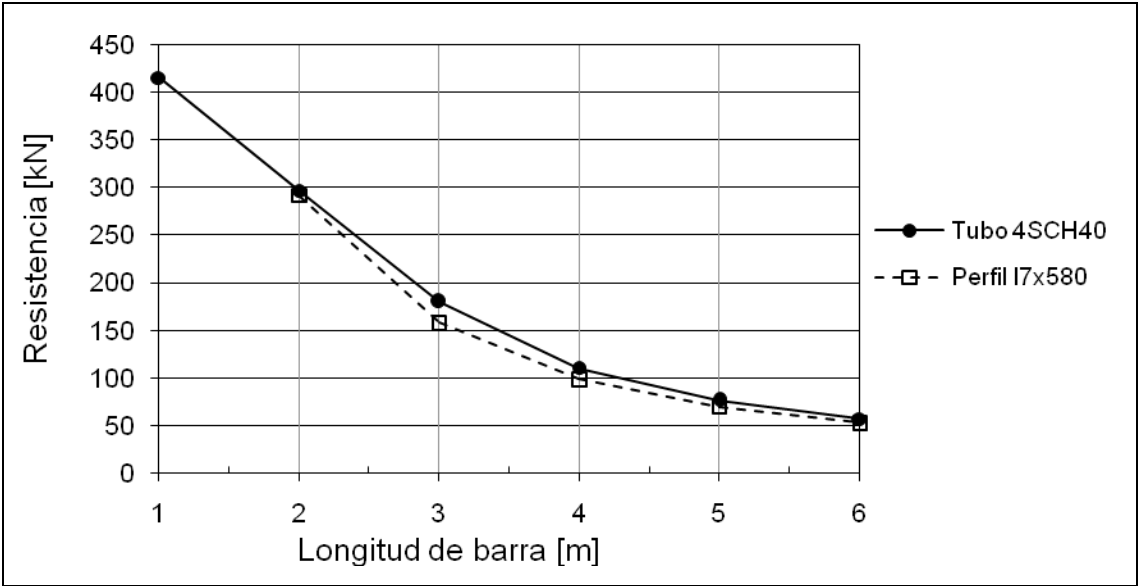


Figura 8: Resistencia de diseño en función de la longitud de barras - Domo A

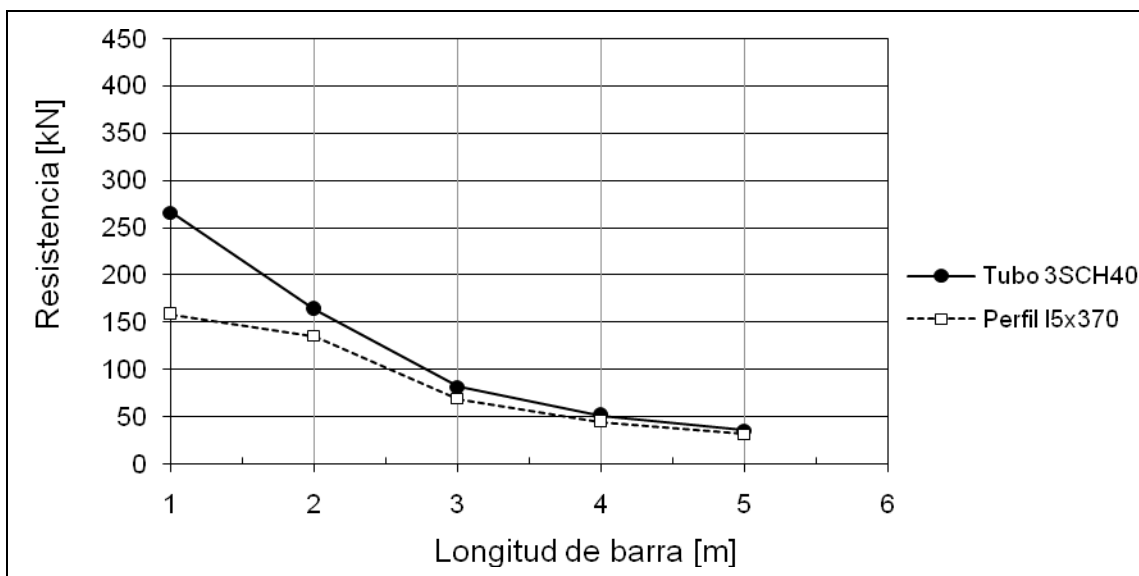


Figura 9: Resistencia de diseño en función de la longitud de barras - Domo B

Con posterioridad al dimensionado de los elementos, y garantizando que no se produciría el pandeo global de los mismos ni el pandeo local de los elementos de la sección transversal, se empleó la Ecuación 3 para determinar la posibilidad de que se produzca o no el pandeo general. Se pudo observar, en función de los resultados obtenidos, que suelen ser más restrictivos los requerimientos de sección para cumplir con la verificación de pandeo total del domo frente a lo que surge del análisis de cada una de las barras componentes en función de los esfuerzos requeridos.

Es así que sólo verificaría esta condición el Domo A cuando se considera para las barras Perfil I 7x580, esto fue corroborado al efectuar un análisis de grandes deformaciones aplicando el Software ALGOR ^[4], es decir que se deberían rever las otras secciones de modo tal de verificar este requisito. Para ello o bien para un predimensionado se puede partir despejando de la Ecuación 3 el valor del producto de área por radio de giro de la sección, esto llevaría a poder encontrar un perfil que cumpla con esa condición de pandeo general y que posteriormente cumpla con todas las especificaciones dadas por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 que motivaron la realización del presente trabajo.

Evaluated the total weight of the bars for each dome they have the following values:

Domo A: Tubo circular 4SCH40Peso de todas las barras = 213.88kN
 Perfil I 7x580Peso de todas las barras = 332.22kN

Domo B: Tubo circular 3SCH40Peso de todas las barras = 183.70kN
 Perfil I 5x370Peso de todas las barras = 259.63kN

De estos datos se observa que el menor peso se tiene para las barras de sección tubular que son las que normalmente presentan mayores resistencias de diseño.

5. Consideraciones Finales

Resulta sumamente importante contar con una normativa (Proyecto de Reglamento CIRSOC 701) para conocer el tratamiento, dimensionado, etc. de las estructuras de aluminio y de los diferentes elementos que la componen, el mismo provee un marco legal al proyecto y ejecución de las mismas.

En este trabajo se han presentado los lineamientos para el dimensionado de barras de aluminio, aplicado a estructuras de domos. De la ejecución del mismo se pueden efectuar las siguientes consideraciones finales:

- En el análisis a compresión de las barras, y como era de esperar, la resistencia de diseño disminuye al aumentar la longitud, se observa una disminución brusca de la misma para longitudes entre 1m y 3m, y muy baja resistencia para barras de longitudes mayores de 3m. Por lo tanto para obtener un mejor aprovechamiento del material es conveniente utilizar barras cortas.
- La aplicación de la fórmula de Douglas Wright es una herramienta sencilla para evaluar cuando resulta necesario efectuar un análisis de grandes deformaciones. Además se convierte en una expresión útil al momento de efectuar el predimensionado de la sección transversal de las barras.
- Se puede observar que suelen ser más restrictivos los requerimientos de sección para cumplir con la verificación de pandeo total del domo.
- El menor peso se logra con barras de sección tubular que son las que normalmente presentan mayores resistencias de diseño.
- Resulta de interés extender el estudio de los elementos de las estructuras de aluminio considerando la disposición de las uniones entre los mismos.

6. Referencias

- [1] Construcciones Metálicas. Vittorio Zignoli. Editorial Dossat S.A. 1978.
- [2] Proyecto de Reglamento CIRSOC 701. Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio. Diciembre 2008.
- [3] Comentarios al Reglamento Argentino de Estructuras de Aluminio CIRSOC 701. Diciembre 2008.
- [4] ALGOR 12 Professional Mech/VE. Docutech, Linear Stress and Dynamics, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania, 1999.
- [5] Aluminum Design Manual. Specifications & Guidelines for Aluminum Structures of the Aluminum Association. Parte I-B y II-B. Edition 2005.
- [6] Aluminum Structures. A Guide to their Specifications and Design. Kissell and Ferry. Second Edition, Editorial John Wiley & Sons, Inc. 2002