

EL COMPORTAMIENTO POST-CRÍTICO DE LAS VIGAS DE ACERO ARMADAS CON CHAPAS DELGADAS

(POST CRITICAL PERFORMANCES OF STEEL BEAMS REINFORCED WITH THIN PLATES)

C. L. Torregiani, H. A. Cervera, A. E. F. Cecchini y N. E. Moncada (*)

422-19

RESUMEN

Se presenta un avance de planteamientos relativos al método de la resistencia última o resistencia post-crítica de vigas de acero armadas con chapas delgadas, el cual está siendo objeto de investigaciones experimentales en el Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario (República Argentina).

SUMMARY

An advance of expositions concerning the method of ultimate strength or post-critical strength of steel beams reinforced with thin plates is presented. This method is being object of experimental researches at the Applied Mechanics and Structures Institute (IMAE) of the Mathematics and Engineering Faculty, National University, Rosario (Argentina).

Antecedentes

En el Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario (República Argentina), con el apoyo del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), de la Sociedad Mixta Siderurgia Argentina –única productora nacional de chapas laminadas en caliente– y de los talleres metalúrgicos MANFERRO, S. A. y ARCOMETAL, S. A., un grupo de profesionales, docentes e investigadores, movidos por el interés de acercar al proyectista de nuestro medio, información acerca del método de la resistencia última o resistencia post-crítica y su aplicabilidad a los materiales de producción nacional y a nuestras modalidades constructivas, han encarado un programa de investigación tecnológica sobre el particular. El mismo estará destinado a promover, en un futuro cercano, la modificación de los reglamentos vigentes para construcciones metálicas, con el objeto de lograr un uso más racional del acero.

(*) Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Rosario, Argentina.

Este trabajo es un avance que tiene como finalidad divulgar resultados obtenidos, estableciendo a la vez el intercambio de conocimientos y opiniones con otros profesionales interesados en el tema.

Introducción

Quizás el problema más acuciante que sufre la construcción metálica actualmente en muchos países del mundo, entre los que se encuentra Argentina, es el altísimo costo del acero. Esto aumenta la necesidad de profundizar nuestros conocimientos acerca del comportamiento de las estructuras construidas con este material, a los efectos de emplearlo racionalmente, sin por ello disminuir el grado de seguridad de las mismas, pero minimizando su peso.

Uno de los factores que más incide en el diseño de las estructuras metálicas es el problema de la estabilidad, ya sea de barras o de placas. Es precisamente en este último caso, donde un cambio en el criterio adoptado en nuestro reglamento para el cálculo de secciones armadas con chapas delgadas, nos permitiría obtener significativas ventajas.

Siguiendo la tradición impuesta en nuestro país, por el empleo durante tiempo prolongado, de la

norma alemana DIN 4114 de 1952, los nuevos Reglamentos de 1982 para construcción metálica –CIRSOC 301 y CIRSOC 302– han adoptado para secciones medianas y pesadas, armadas con chapas soldadas, abulonadas o remachadas, cualquiera que sea su uso, el criterio de diseño en estado elástico pre-crítico. No ocurre lo mismo con CIRSOC 303 –normas de aplicación en estructuras livianas de chapa plegada–, el cual se orientó según la corriente estadounidense, impuesta principalmente por el «Light Gage Cold-Formed Steel Design Manual» redactado por el AISI de los Estados Unidos de Norteamérica, pero con amplia difusión en todo el mundo.

Como puede verse, la fuerza de la costumbre, la poca agilidad en la recepción de información bibliográfica y el escaso desarrollo de la investigación tecnológica que han caracterizado durante años a medios como el nuestro, puede llevar a la inexplicable adopción de criterios muy dispares de dimensionamiento, no pudiendo argüirse como razón de ello la seguridad, puesto que ambos tipos de estructuras deberían ofrecer las mismas condiciones de seguridad, diferenciándose solamente por el grado de aprovechamiento de la resistencia de las placas que forman una pieza estructural.

Con el propósito de conseguir estructuras que garanticen **resistencia óptima con peso mínimo**, hemos dirigido nuestra atención hacia la evaluación de la resistencia última de las secciones armadas pesadas, sometidas a distintos tipos de sollicitación tales como flexión, corte, ambos combinados, etc., entendiendo por resistencia última la carga que produce el colapso de la estructura, habiéndose superado las tensiones de abollamiento; o bien aquella carga que introduce en la estructura deformaciones inadmisibles, debido a su incompatibilidad con la función a la que fue destinada.

El análisis de la resistencia de post-abollamiento, para cada tipo de sollicitación, requiere un desarrollo particular y extenso, por ello serán tratados en forma especial, cada uno por separado. Este trabajo sólo tiene por objeto introducir al lector en el tema, permitiendo la visualización en forma clara de las grandes diferencias, ventajas y desventajas que caracterizan a cada criterio de diseño y la importancia de la elección de uno de ellos.

Diferencias entre los distintos criterios de diseño

Los reglamentos de construcción metálica vigentes destinados al proyecto de estructuras sometidas a cargas predominantemente

estáticas de los cuales tenemos conocimientos, están gobernados por dos criterios bien diferenciados en lo que a piezas de alma delgada se refiere.

I. Criterio de la carga crítica

Este criterio establece como límite de aptitud de las secciones de alma delgada, abiertas o en cajón, a la carga que produce la bifurcación *teórica* del equilibrio o carga crítica. Sobre dicha carga se aplican luego coeficientes de seguridad, a los efectos de determinar cargas admisibles, como en DIN 4114 (Alemana) y CIRSOC 302 (República Argentina) o bien se compara el valor de la carga crítica con las cargas aplicadas ponderadas, tal como lo hace MV 103 (España).

Deben hacerse aquí algunas observaciones:

- No es cierto que exista la carga crítica teórica y menos aún cuando se trabaje con chapas de espesores muy pequeños donde son inevitables las deformaciones constructivas debidas a soldaduras o falta de plenitud de las chapas originada por planchado defectuoso de las mismas o golpes durante su transporte, ya que dichas deformaciones condicionarán el comportamiento de las placas al ser sometidas a cualquier estado de carga.
- Aun en el caso de tratarse de placas ideales, sin deformaciones previas al estado crítico, no es cierto que al producirse el abollamiento de la chapa de alma de una sección armada, ésta agote su capacidad de carga. Simplemente se producirá un cambio de su configuración geométrica, acompañado por una redistribución de tensiones.
- La existencia de resistencia posterior al abollamiento es reconocida en forma implícita y sólo cualitativamente por MV 103 (España), DIN 4114 (Alemania) y CIRSOC 302 (República Argentina) a través de la adopción de coeficientes de abollamiento mayores a los teóricos o bien coeficientes de seguridad menores, al considerar el problema de la estabilidad.

Para los métodos de dimensionamiento por carga ponderada, en particular para MV 103, es:

$$\frac{\text{coef. de abollamiento adoptado}}{\text{coef. de abollamiento teórico}} = 1,25$$

ejemplo: K flexión: $\left\{ \begin{array}{l} \text{valor teórico: } 23,9 \\ \text{valor adoptado: } 29,9 \end{array} \right.$

Para DIN 4114 y CIRSOC 302, normas que dimensionan en función de las tensiones admisibles, resulta:

a) *DIN 4114*:

Coef. de seguridad general (H): 1,71

Coef. de seguridad frente al abollamiento: 1,35

Reducción aplicada: $\frac{1,35}{1,71} = 0,79$

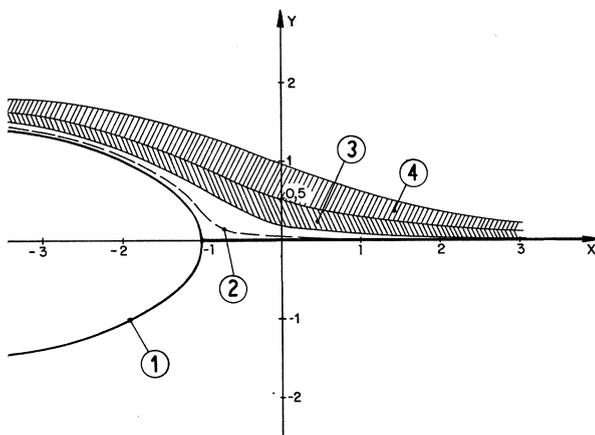
b) *CIRSOC 302*:

Coef. de seguridad general (S/destino y recaudos constructivos): 1,50

Coef. de seguridad frente al abollamiento: 1,40

Reducción aplicada: $\frac{1,40}{1,50} = 0,93$

- Las tolerancias de fabricación de las piezas estructurales, diseñadas con este criterio, deberán ser sumamente estrictas si se quiere lograr, por parte de la pieza en cuestión, un comportamiento similar al propuesto como hipótesis de cálculo.



- 1 = comportamiento ideal del alma de una viga armada
 2 = vigas de aluminio
 3 = vigas remachadas
 4 = vigas soldadas

$$X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cr}}$$

ε = Deformación específica longitudinal

ε_{cr} = deformación específica longitudinal correspondiente a la carga crítica

$$Y = \frac{t}{\omega \cdot \alpha}$$

ω = apartamiento de su plano sufrido por el alma
 α = coeficiente de proporcionalidad
 t = espesor del alma de la viga

Fig. 1.-Comportamiento del alma de las vigas armadas.

- El coeficiente de seguridad adoptado por el proyectista de una estructura, resultará, en general, muy diferente al real, siendo este último totalmente desconocido.

II. Criterio de la resistencia post-crítica

Como ya se ha dicho, el abollamiento teórico no produce el agotamiento total y repentino de una pieza estructural. El método de diseño, en estado post-crítico, cuantifica la resistencia adicional, estableciendo el valor de la carga que producirá el colapso de la pieza.

Acerca de este criterio deben destacarse los siguientes puntos:

- Las cargas últimas resultan casi independientes de las deformaciones iniciales, tal como puede verse en el gráfico de la figura 1.
- La aplicación de este criterio de dimensionamiento permite tolerancias constructivas menos exigentes que el método anterior, en lo que a chapas de alma de vigas se refiere.
- El criterio de diseño en periodo post-crítico, no sólo tiene como resultado un uso más económico del material, sino que además se trata de una concepción más realista desde el punto de vista del conocimiento de la seguridad real ofrecida por una estructura, ya que considera la capacidad última efectiva.
- La determinación de la capacidad última o post-crítica exige un cambio fundamental en el concepto de falla imperante en Argentina, ya que la misma no estará determinada por el fenómeno de abollamiento del alma de la pieza y sí por el colapso de una de sus alas o uno de sus rigidizadores, según sea la sollicitación predominante y las características geométricas de la misma.

Para poner de manifiesto con mayor claridad la gran diferencia existente, en el aprovechamiento de la resistencia de las placas de alma, se han trazado las curvas de la gráfica de la figura 2,b), las cuales representan la relación entre valores críticos y últimos correspondientes a la resistencia al corte y a flexión de una sección genérica «doble T», armadas con chapas delgadas. Los datos necesarios para la confección de dichas curvas fueron obtenidos en nuestro Instituto, mediante la ayuda de computadora, estudiando una gran variedad de relaciones de formas posibles para este tipo de secciones.

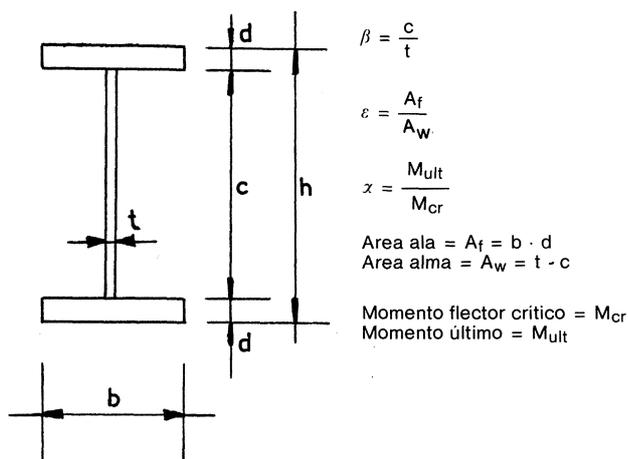
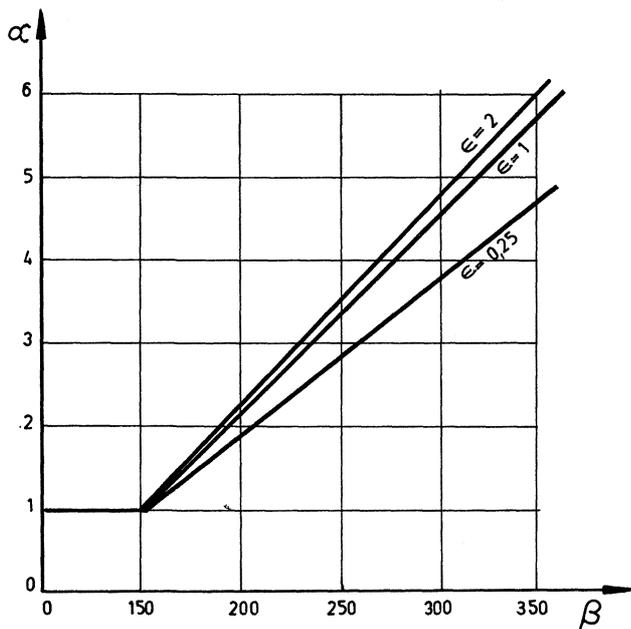


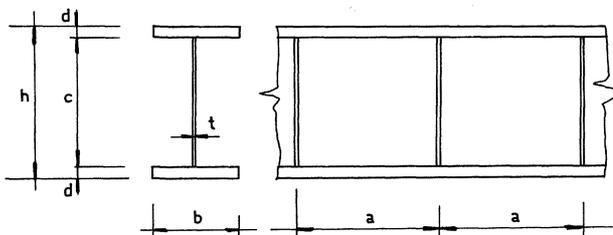
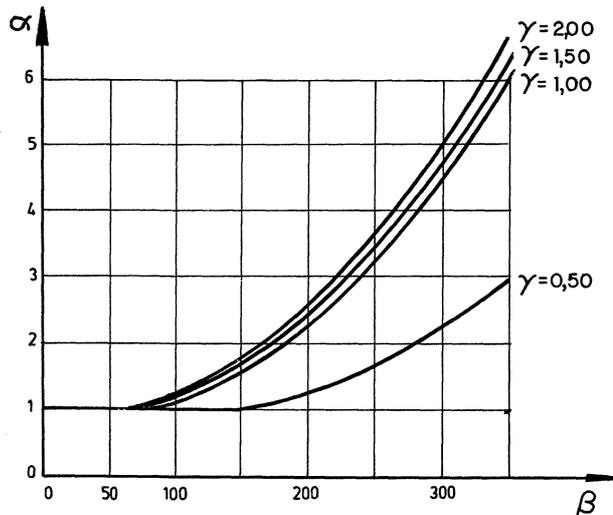
Fig. 2a).-Solicitaciones de flexión.

BREVE DESCRIPCION DEL COMPORTAMIENTO POST-CRITICO

La redistribución de tensiones y cambio en la forma de trabajo ocasionadas por la aplicación de cargas superiores a la crítica, en una pieza armada con chapas soldadas, adquiere diferentes características según sea el tipo de solicitaciones predominante:

a) *Flexión predominante*

Al superarse el momento flector crítico, el alma pierde capacidad para resistir incrementos de esta solicitación. Todo aumento en el valor del momento flector aplicado deberá ser resistido entonces por la cabeza comprimida (ala y pequeño ancho colaborante del alma) y por la zona traccionada. Esto traerá aparejados:



Corte crítico = Q_{cr}
 Corte último = Q_{ult}

$\alpha = \frac{Q_{ult}}{Q_{cr}}$

$\gamma = \frac{a}{c}$

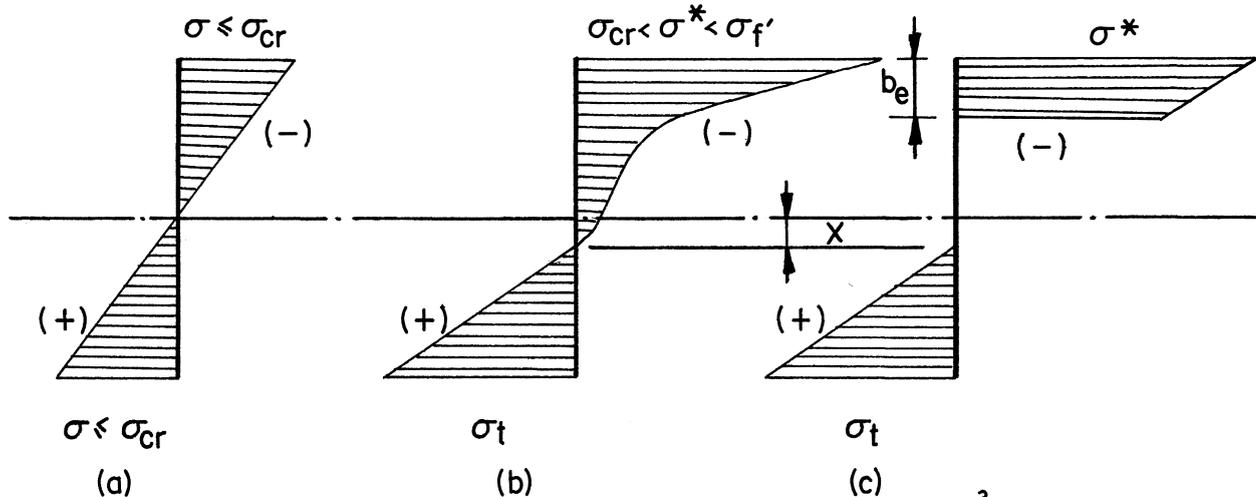
$\beta = \frac{c}{t}$

Fig. 2b).-Solicitaciones de corte.

- un fuerte incremento de las tensiones extremas de compresión (Fig. 3);
- el comportamiento de la cabeza de compresión casi como el de una columna aislada (Fig. 3);
- la posibilidad de falla de la viga quedará restringida a pandeo lateral, vertical o torsional de su cabeza comprimida o bien a la plastificación de la fibra extrema (Fig. 3);
- el cambio de configuración provocará un descenso del eje neutro (Fig. 3).

b) *Corte predominante*

Mientras las tensiones de corte actuantes en el alma de una viga no superen su valor crítico, éste será igual al de las tensiones principales de compresión y tracción. Al superarse el corte



a = distribución pre-crítica de tensiones
 b = distribución post-crítica de tensiones
 c = diagrama simplificada de la distribución post-crítica de tensiones

- 1 = falla por pandeo lateral de la zona comprimida
- 2 = falla por pandeo vertical de la zona comprimida
- 3 = falla por pandeo torsional de la zona comprimida

Fig. 3.-Distribución de tensiones en el alma y modos de falla en vigas armadas sometidas a flexión.

crítico, el incremento aplicado sólo podrá ser resistido por un aumento de la componente de tracción, puesto que la compresión está imposibilitada de crecer (Fig. 4).

De este modo comienza a generarse en la viga un comportamiento similar al de una viga tipo Pratt, donde los cordones están materializados por las alas, los montantes por los rigidizadores y las diagonales por una banda traccionada del alma, superpuesto con el comportamiento de

viga de alma llena correspondiente a $\tau \geq \tau_{cr}$. En estos casos la falla sobreviene por colapso de las alas, de los rigidizadores, o bien por plastificación o rotura de la diagonal traccionada.

c) Corte y flexión combinados

La combinación de corte y flexión es el estado que más frecuentemente actúa sobre una pieza estructural. La interacción de ambas

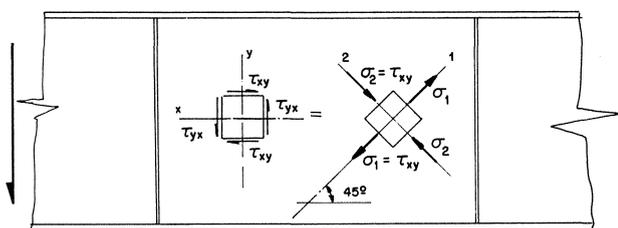


Fig. 4.-Comportamiento pre-crítico.

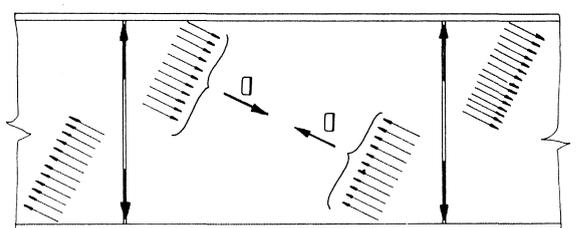
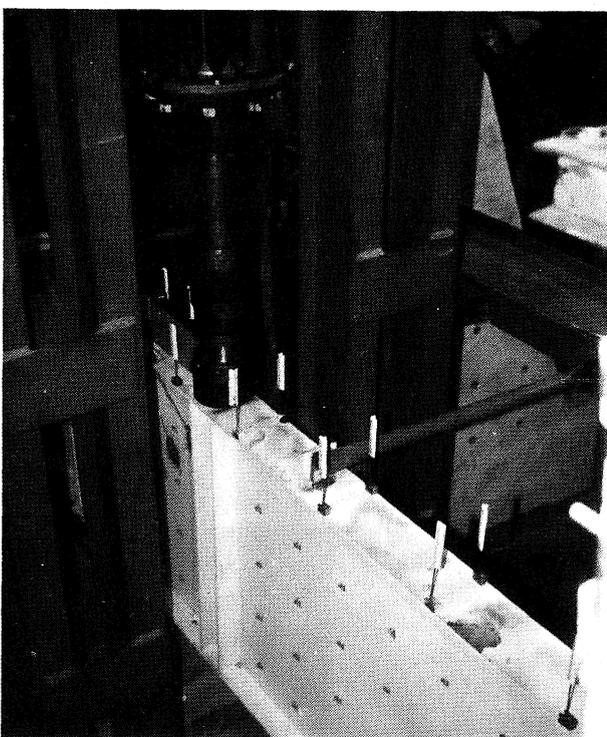
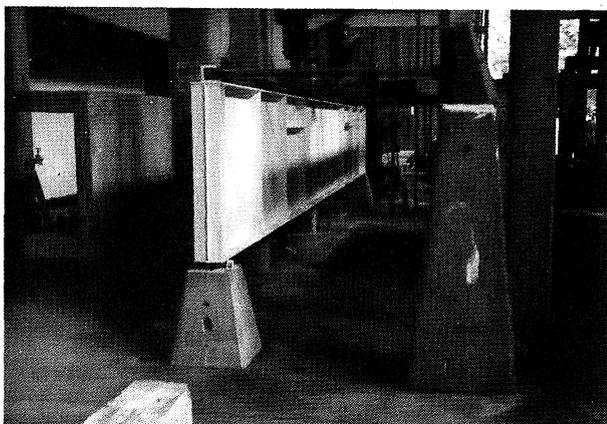


Fig. 5.-Comportamiento post-crítico.



Figs. 6 y 7.-Aspectos generales de los ensayos realizados.

solicitaciones estará relacionada con el reordenamiento de tensiones en la viga en estudio; dicho reordenamiento se debe principalmente a las deformaciones del alma que provocan la transferencia de la resistencia del momento flector a las alas, sin pérdida de la capacidad portante de corte suministrada principalmente por la contribución del campo de tensiones, en el caso de almas muy esbeltas.

Debe destacarse que si bien el criterio de diseño de estructuras ligeras mencionado en la primera parte de este trabajo, se basa en la resistencia de las mismas por encima de su límite de abollamiento, la forma de aprovechar esta resistencia post-crítica en piezas pesadas difiere profundamente, en especial debido a la posibilidad de colocar rigidizadores de alma en las vigas armadas, en las cuales se emplean chapas de espesores mayores que los usados para plegados.

También merece destacarse que la resistencia post-crítica de una pieza **no puede** predecirse en función de su resistencia crítica, ya que en su determinación intervienen otros parámetros, diferentes a los considerados al determinar su carga de abollamiento.

En nuestro laboratorio se llevan a cabo experiencias con modelos sometidos a flexión pura, corte predominante y corte y flexión combinados. En las figuras 6 y 7 pueden verse aspectos de dichos ensayos. Los especímenes con los que se trabaja han sido construidos en talleres especializados en construcciones metálicas, pero sin aplicación de recaudos especiales, a los efectos de que los mismos fuesen representativos de las características constructivas de nuestro medio.

El material empleado es acero común para construcción, de denominación F-24 según norma IRAM 503 - CIRSOC 301 (equivalente aprox. St. 37). Las características mecánicas reales del material de todos los modelos se obtuvieron mediante ensayo de probetas extraídas de los mismos.

La segunda parte de esta investigación se destina exclusivamente al tratamiento del comportamiento bajo solicitaciones de flexión pura, con el análisis de los resultados obtenidos hasta el momento en nuestro laboratorio.

Nota: Los autores agradecerán comentarios. Dirigir correspondencia a Ing. Carlos Torregiani / Ing. Nora Moncada. Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras - Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería - Universidad Nacional de Rosario - Riobamba y Berutti - 2000 Rosario - República Argentina.