

Influence of web stiffeners in the bearing capacity of steel castellated beams subjected to failure by web post instability

Influencia de los rigidizadores de alma en la capacidad última de vigas alveoladas de acero sujetas a la ruina por inestabilidad del montante de alma

W. Vieira ^{1*}, G. Veríssimo **, J. L. Rangel **, J. Lopes **

* Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. BRASIL

** Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. BRASIL

Fecha de Recepción: 10/08/2016

Fecha de Aceptación: 06/12/2016

PAG 93-107

Abstract

This work presents a numeric study using the Finite Element Method for castellated beams manufactured from Brazilian steel rolled I-sections, which collapse by web post buckling. After the beam analysis for the limit buckling state, other analyses were carried out, adding web post stiffeners in the region that would suffer the buckling. The results show significant influence of the stiffeners in the bearing capacity and in the collapsing mode presented in the analyzed beams.

Keywords: Castellated beams, finite element methods, web post buckling, web stiffeners

Resumen

Este trabajo presenta un estudio numérico usando el método de los elementos finitos para vigas alveoladas fabricadas en Brasil a partir de perfiles de acero laminados en I que colapsan por pandeo del montante de alma. Después de analizar las vigas a fin de conocer su estado de pandeo límite, se llevaron a cabo otros análisis, añadiendo rigidizadores del montante de alma en la región que sufrirá el pandeo. Los resultados muestran la influencia significativa de los rigidizadores en la capacidad portante y en el modo de colapso presentado en las vigas.

Palabras clave: Vigas alveoladas, método de los elementos finitos, pandeo del montante de alma, rigidizadores del alma

1. Introducción

Las vigas alveoladas de acero surgieron en la primera mitad del siglo XX en Europa, por la necesidad de contar con vigas de mayor altura que las secciones en I laminadas en caliente fabricadas por la industria en esa época. Según Grünbauer (2014), a comienzos de la década de 1930, las vigas alveoladas con tramos libres de 12 metros eran fabricadas por la compañía Skoda en la República Checa. Como las vigas eran soldadas, su desarrollo está directamente relacionado al avance de la tecnología de la soldadura a fines de la década de 1920.

Convencionalmente, las vigas alveoladas eran fabricadas cortando en zig-zag una viga de acero laminada en caliente, dividiéndola a lo largo en dos mitades con un patrón en forma dentada; luego eran desplazadas a una distancia específica y soldadas en los extremos de los dientes.

El resultado fue una viga más alta que la versión original de sección I de la que fue elaborada, con una secuencia de huecos hexagonales en el alma y con el mismo peso en acero (Figura 1a). Es posible obtener una viga alveolada aún más alta soldando placas cuadradas o rectangulares de acero entre las mitades, obteniendo una secuencia de huecos octagonales (Figura 1b). Unas pocas décadas más tarde, se dejaron de usar las vigas alveoladas debido al aumento del costo de la mano de obra en los países desarrollados, ya que el proceso de fabricación era completamente manual.

Últimamente ha vuelto a surgir el interés por las vigas de acero alveoladas. Estos elementos han ganado competitividad en el mercado debido al desarrollo tecnológico en la automatización de los procesos de fabricación (Figura 2).

¹ Autor de correspondencia:

Eng. Civil (UFV, 2009), Doutor em Eng. Civil (UFV, 2015), Prof. Adjunto (UNIFEI-Campus Itabira).

E-mail: vieira@unifei.edu.br



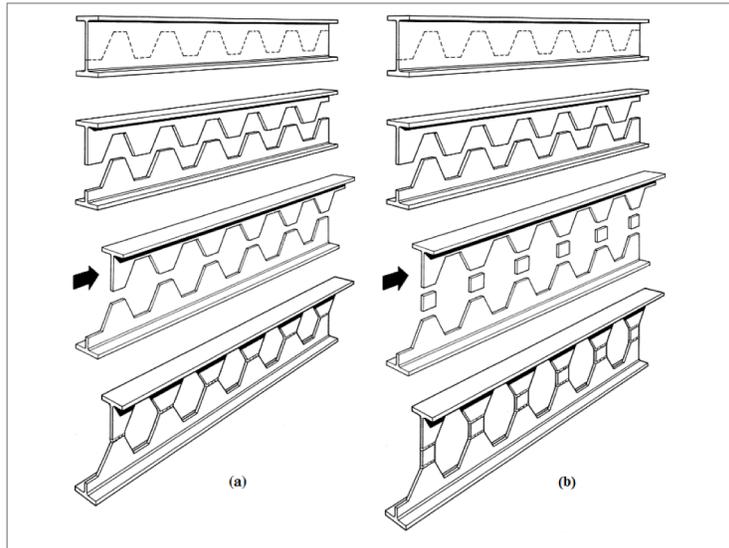


Figura 1. Esquema de fabricación de vigas alveoladas. (a) Sin placa intermedia y (b) con placa intermedia (Grünbauer, 2014)

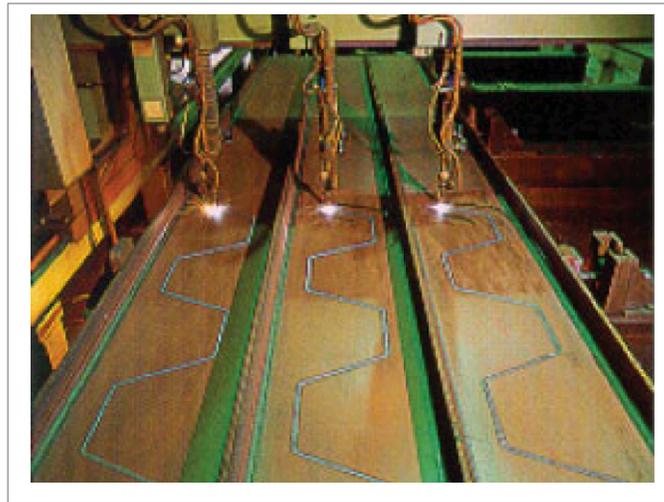


Figura 2. Fabricación de vigas alveoladas: corte CNC (Gemperle, 2007)

En el siglo pasado se realizaron muchas investigaciones teóricas y experimentales para explicar el comportamiento estructural de las vigas alveoladas. Sin embargo, a pesar de que esos estudios entregaron procedimientos para diseñar y calcular algunas vigas alveoladas específicas, elaboradas a partir de las vigas laminadas en I que se fabricaban en ese tiempo, se realizaron sobre bases que actualmente se consideran anticuadas, especialmente en base al análisis elástico y se hicieron compatibles con el Método de Diseño de Esfuerzo Permisible. Además, durante un periodo de 30 años, cuando las vigas alveoladas aún estaban olvidadas, los aceros y las secciones laminadas producidas por la industria fueron modificados por lo que el comportamiento estructural de los actuales perfiles pueden presentar diferencias respecto de los antiguos.

En un estudio experimental relativamente reciente, Zaarour y Reedwood (1996) realizaron ensayos a flexión con vigas alveoladas fabricadas con vigas Bantam, una serie de vigas laminadas esbeltas fabricadas por Chaparral Steel en los Estados Unidos. Estas vigas tenían láminas con mayor esbeltez que las antiguas secciones laminadas en I y, en los ensayos, mostraron modos de falla relacionados con la inestabilidad, a diferencia de los antiguos perfiles laminados que tenían una sección más compacta.

Con la relativamente reciente activación del laminador de perfiles del Grupo Gerdau, en 2002, algunas de las nuevas secciones laminadas en I producidas en Brasil también tenían láminas esbeltas, con esbeltez de alma más allá del rango cubierto por los estudios experimentales realizados en el pasado, como se aprecia en la Figura 3.

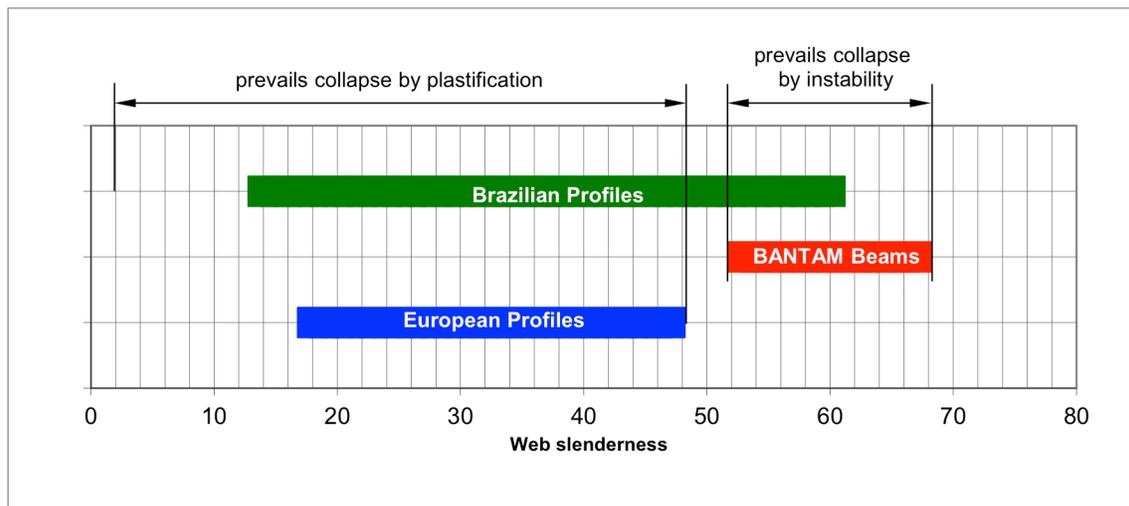


Figura 3. Rangos de esbeltez del alma de las vigas de acero laminado europeas, brasileras y Bantam

Esta particularidad llama la atención de los investigadores brasileros que han estado desarrollando nuevos estudios sobre el comportamiento estructural de las vigas alveoladas y celulares (vigas con aberturas circulares).

Abreu *et al.* (2010) presentaron un estudio relacionado con el pandeo lateral-torsional en las vigas celulares. Bezerra *et al.* (2010) presentaron un estudio similar para las vigas alveoladas. Silveira *et al.* (2011) realizaron un estudio numérico para vigas alveoladas y celulares con énfasis en los modos de falla cuando el acero alcanzaba el punto de fluencia y presentaron una fórmula para verificar la capacidad portante de las vigas para varios valores últimos aplicables. Vieira *et al.* (2011) desarrollaron un modelo numérico para simular el comportamiento estructural de las vigas alveoladas. Posteriormente, realizaron un estudio enfocado en el colapso por inestabilidad de los montantes del alma observando que, algunas características relacionadas con la geometría y carga de las vigas, reducían la carga de pandeo del montante.

Este trabajo presenta un estudio sobre la influencia de los rigidizadores en el comportamiento estructural de las vigas alveoladas, usando un modelo numérico de elementos finitos desarrollado con el software ABAQUS. Para los modelos analizados, se estudió la respuesta estructural para diversos tipos de rigidizadores, con el fin de evaluar su comportamiento y evitar el pandeo fuera del plano de los montantes del alma e incrementar la capacidad portante de las vigas.

2. Definiciones y simbología

La Figura 4 muestra las partes constitutivas de una viga alveolada genérica con placas intermedias, así como la simbología usada en este trabajo. Con frecuencia, a las aberturas o huecos se les llama alveolos y a este tipo de vigas, vigas alveoladas.

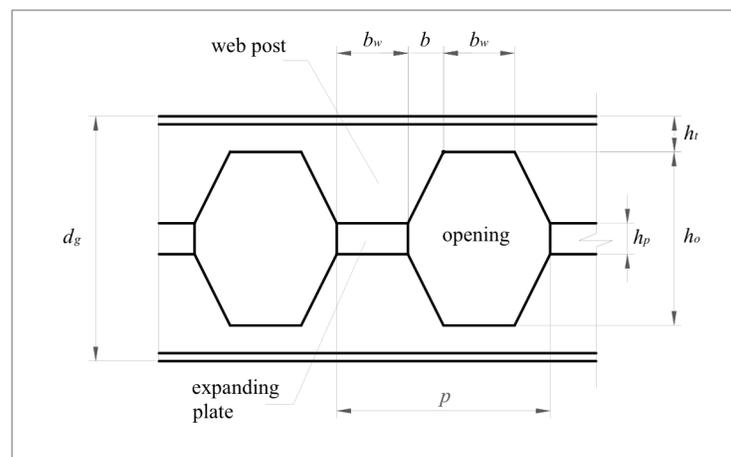


Figura 4. Simbología usada para el dimensionamiento y espaciado de las aberturas de las vigas alveoladas

La Figura 5 presenta las características geométricas de los tres patrones más usados de las vigas alveoladas: anglosajón, Peiner y Litzka.

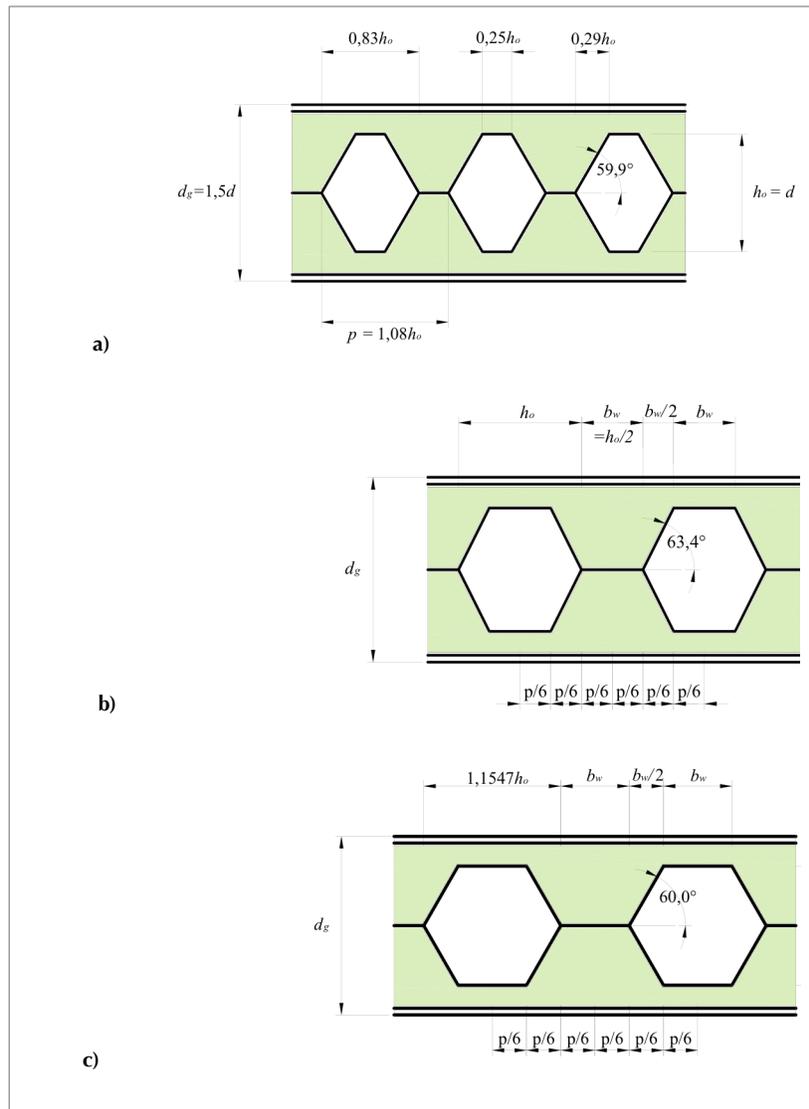


Figura 5. Patrones geométricos de las vigas alveoladas: (a) anglosajón, (b) Peiner, (c) Litzka

3. Modos de falla en las vigas alveoladas

La presencia de aberturas en las vigas alveoladas provoca un cambio en su comportamiento estructural, que las lleva a presentar modos de falla diferentes a los observados en las vigas de sección sólida.

Los estudios experimentales realizados en las décadas pasadas identificaron diferentes modos de falla en las vigas alveoladas (Kerdal y Nethercot, 1984; Demirdjian, 1999). Los modos de falla más frecuentes en las vigas alveoladas son: formación de un mecanismo de flexión (articulación), formación del mecanismo de Vierendeel, ruptura de una unión soldada en un montante del alma, pandeo lateral-torsional de todo el tramo e inestabilidad del montante del alma.

- *Mecanismo de flexión* – en vigas alveoladas con secciones compactas, la carga máxima se obtiene por fluencia de las secciones en T sobre y bajo el alveolo.
- *Mecanismo de Vierendeel* – modo de falla caracterizado por la formación de cuatro articulaciones plásticas en las esquinas de las aberturas con distorsión de los paneles, por la combinación de los esfuerzos de cortante y normales. Sucede con más frecuencia en vigas de luces más cortas, con una larga longitud de soldado y secciones en T, de menor altura en relación a la altura expandida de la viga. (Kerdal y Nethercot, 1984).
- *Ruptura de una unión soldada en un montante del alma* – generalmente ocurre cuando el esfuerzo de cortante en las regiones soldadas alcanza la tensión de fluencia del material.
- *Pandeo torsional-lateral* – las vigas alveoladas, con una longitud no arrostriada insuficiente para contener la sección en T comprimida, pueden fallar por pandeo torsional-lateral.

- *Pandeo del montante del alma*– se presenta en la sección 0.

3.1 Pandeo del montante del alma

Kerdal y Nethercot (1984) describen diversos casos de vigas alveoladas que fallan por pandeo del montante del alma (web post buckling, WPB), mayormente en el rango inelástico.

Delesques (1968) investigó el WPB asumiendo un comportamiento elástico, pero concluyó que rara vez ocurre el pandeo elástico. Aglan y Redwood (1974) analizaron las vigas alveoladas usando una aproximación por diferencias finitas y asumiendo un material elastoplástico con endurecedor. Descubrieron que los montantes del alma alcanzaban un estado avanzado de fluencia antes de que ocurriera el WPB.

La inestabilidad del montante del alma se puede producir de dos formas: por cortante de la sección mínima o por compresión del alma.

3.1.1 Pandeo del montante del alma por cortante

Por analogía con una viga Vierendeel, el montante del alma de una viga alveolar tiene fuerzas internas como se aprecia en la Figura 6. La fuerza de cortante F a lo largo de la unión soldada provoca flexión en el montante del alma. El borde AB del montante está sometido a resistencias a la tracción, mientras que el borde CD está sometido a resistencias a la compresión, provocando el WPB. Cuando esto ocurre, el desplazamiento lateral de algunas porciones del alma será acompañado por la torsión de la línea diagonal xx' (Figura 6) Este modo de falla se denomina pandeo del montante del alma por cortante.

La Figura 7 muestra el estado de una viga celular ensayada por Nadjai *et al.* (2008) que falló por inestabilidad en el montante del alma causada por cortante.

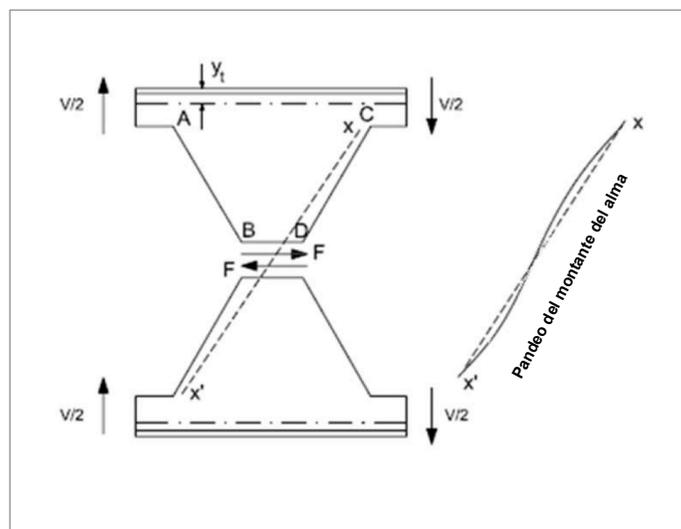


Figure 6. Pandeo del montante del alma por cortante (adaptación de Kerdal y Nethercot, 1984)





Figura 7. Pandeo del montante del alma de un viga celular compuesta (Nadjai et al., 2008)

El pandeo del montante del alma por cortante está influenciado por las siguientes relaciones geométricas: h_o/d_g ; h_o/b_w ; b_w/t_w ; h_p/h_o ; h_p/t_w (Zaarour y Redwood, 1996; Redwood y Demirdjian, 1998), donde: h_o es la altura del alveolo; d_g es la altura de la viga alveolada; h_p es la altura de la placa de expansión; b_w es el ancho mínimo del montante del alma y t_w es el espesor del alma.

3.1.2 Pandeo del montante del alma por compresión

En general, este modo de falla ocurre en los puntos donde se aplica una carga concentrada sobre el montante del alma o en la región de los apoyos, especialmente cuando no existen rigidizadores. El WPB por compresión es similar al corrugado del alma que se puede observar en las vigas de sección sólida sometidas a una carga concentrada. A diferencia de lo que sucede en el pandeo del montante del alma por cortante, el desplazamiento lateral del montante por compresión no va acompañado. La Figura 8 muestra la configuración deformada obtenida a través de los modelos de elementos finitos de vigas alveoladas que sufrieron el pandeo del montante del alma por compresión.

Cuando una viga alveolada es sometida a cargas distribuidas uniformemente, los montantes del alma están sometidos a fuerzas verticales y horizontales. Las fuerzas horizontales se producen por la fuerza de cortante y producirán el cortante, flexión o pandeo del montante del alma por cortante. Las fuerzas verticales en el montante del alma son el resultado de la acción directa de la carga aplicada, la que puede causar pandeo por compresión, similar al que sucede en una columna.

Normalmente, en los montantes del alma de los extremos de la viga, las fuerzas horizontales son preponderantes en relación a las fuerzas verticales, mientras que en los montantes cercanos al centro de la luz – donde el cortante es nulo – las fuerzas de compresión tienden a regir el comportamiento. Las fuerzas de compresión en los montantes del alma son más significativas en el caso de las vigas de longitud corta, cuando la carga distribuida que soporta la viga es mayor y, en consecuencia, la carga de compresión es mayor.

4. Modelo numérico

Se desarrolló un modelo numérico en el software ABAQUS, usando el Método de elementos finitos para simular el comportamiento estructural de las vigas alveoladas, que tenían las siguientes características (Vieira et al., 2011):

- (a) Modelo tridimensional de placa delgada, representando las superficies intermedias de las placas de acero que componen las vigas alveoladas;
- (b) Malla con elementos tipo S3 en las regiones triangulares cercanas a las aberturas y elementos S4R en el resto de la viga (Figura 9);
- (c) La objetividad de la malla se alcanzó usando lados de 1 cm;
- (d) Para representar al acero, se adoptó un modelo constitutivo para un material perfectamente elastoplástico sin endurecedor;
- (e) Se realizó un análisis de pandeo elástico para obtener los valores propios y sus correspondientes vectores propios (los valores propios representan el factor de carga en el que ocurre la inestabilidad y los vectores propios representan el modo de pandeo asociado);
- (f) Después del análisis de inestabilidad, se realizó un análisis no lineal geométrico y material para simular el comportamiento de la estructura durante el proceso de carga, incluyendo la fase posterior al pico. A continuación se mencionan las características de este análisis:
 - i. el análisis fue realizado usando el método Riks modificado, aplicando una imperfección inicial al modelo, correspondiente al modo de pandeo seleccionado en el análisis de pandeo elástico, para encontrar la resistencia máxima de la estructura; la concordancia con los resultados experimentales fue mejor cuando la imperfección era igual a $d_g/2000$;
 - ii. se usó una distribución simple de las fuerzas residuales, considerando uniforme la resistencia a la tracción en las alas y uniforme las resistencias a la compresión en el alma, calculadas por la distribución parabólica de Young (1972 *apud* Szalai y Papp, 2005), de modo que la fuerza resultante en el alma y en las alas del modelo simplificado fuera igual al modelo parabólico; las resistencias residuales utilizadas para el alma y para las alas se puede calcular usando las Ecuaciones (1) y (2) respectivamente (en MPa):

$$f_{r,alma} = \frac{100 t_w (h - t_f)}{9 t_f \cdot b_f} + \frac{230}{3} \quad (\text{compression}) \quad (1)$$

$$f_{r,mesa} = \frac{225 t_w (h - t_f)}{4 t_f \cdot b_f} - \frac{25}{3} \quad (\text{tension}) \quad (2)$$

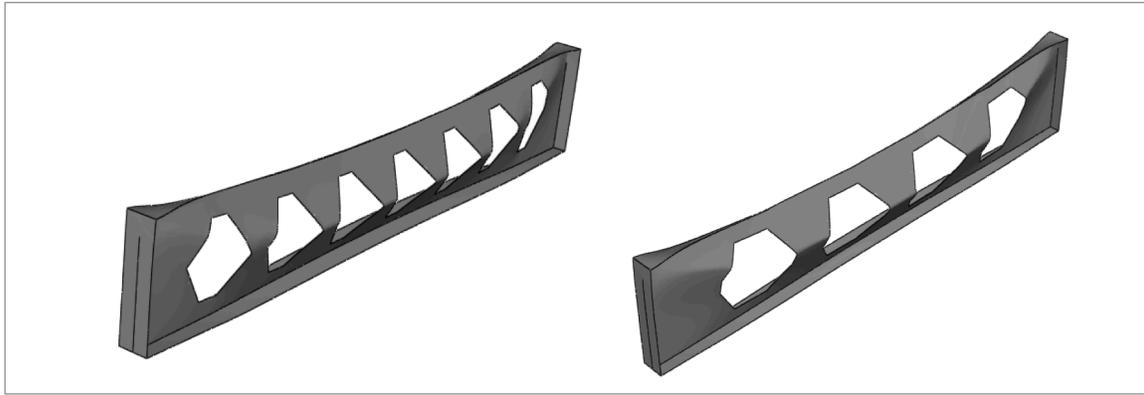


Figura 8. Aspecto de las vigas alveoladas que sufrieron pandeo en el montante del alma por compresión

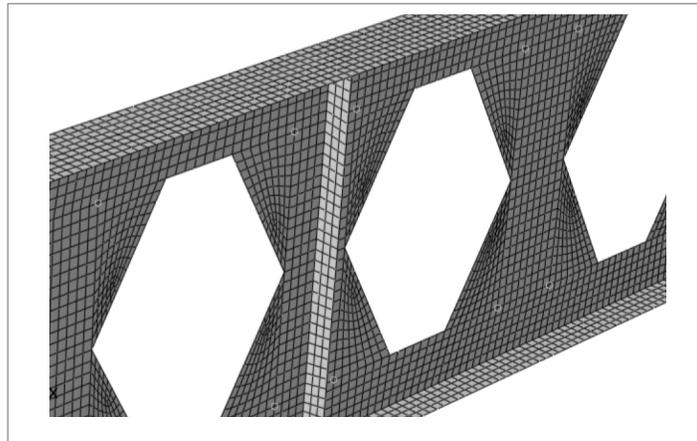


Figure 9. Malla de elementos finitos de un modelo con elementos rectangulares y cuadrados

El método numérico fue validado mediante el análisis de 14 vigas alveoladas de cuatro programas experimentales diferentes cuyos resultados se presentan en Vieira et al. (2011).

5. Análisis numérico de la influencia de los rigidizadores en el montante del alma

Se realizó un estudio numérico para 14 vigas alveoladas, con diferentes configuraciones geométricas y de carga, y con las siguientes características, compartidas por todas las vigas:

- Sección laminada en I original W360 x 32,9.... de Gerdau, con tasa de expansión igual a 1,5
- Vigas soportadas en forma simple, con uno de los apoyos restringiendo el desplazamiento longitudinal
- Arriostramiento lateral continuo a lo largo del eje de las alas, para evitar el pandeo lateral-torsional
- Acero con $f_y = 345$ MPa;
- Luz de 3000 mm para garantizar la falla por pandeo del montante del alma

- Distribución alveolar de manera que los extremos del montante tuvieran al menos el ancho de los montantes intermedios
- Rigidizadores de montante insertados en los apoyos y en los puntos de aplicación de la carga concentrada.

Las otras características de las vigas analizadas se presentan en la Tabla 1.

In the beams submitted to an uniformly distributed load (M1 a M6), the failure occurred by WPB by compression, and the largest lateral displacement has been observed in the central web posts. In these cases, a web stiffener was welded in the center of the span, as shown in Figure 10 (M5). In some cases, the center of the spans coincides with the center of an alveolus. In these cases, in addition to the beam with the stiffener in the center, another beam with stiffeners in the web posts adjacent to the center of the span was analyzed, as shown in Figure 11 (M1).

Las vigas sometidas a una carga concentrada (M7 a M14), con rigidizadores colocados solamente en el punto de aplicación de la carga y en los apoyos, sufrieron pandeo del montante del alma por cortante en los montantes sin rigidizadores más cercanos a los apoyos. Asimismo, se analizaron versiones de esas vigas con rigidizadores en los montantes del alma cercanos a los apoyos, como se muestra en la Figura 12.

Tabla 1. Características de las vigas analizadas

vigas	patrón	h_p (mm)	Nº de aberturas	Tipo de carga
M1	AS	-	7	carga uniformemente distribuida a lo largo de toda la luz
M2	AS	100	7	
M3	PN	-	5	
M4	PN	100	5	
M5	LT	-	4	
M6	LT	100	4	
M7	AS	-	7	carga concentrada en el centro de la luz
M8	AS	100	7	
M9	PN	-	5	
M10	PN	100	5	dos cargas concentradas en el centro de los tercios de la luz
M11	AS	-	7	
M12	AS	100	7	
M13	PN	-	5	
M14	PN	100	5	

Nota: AS – Anglosajón; LT – Litzka; PN - Peiner

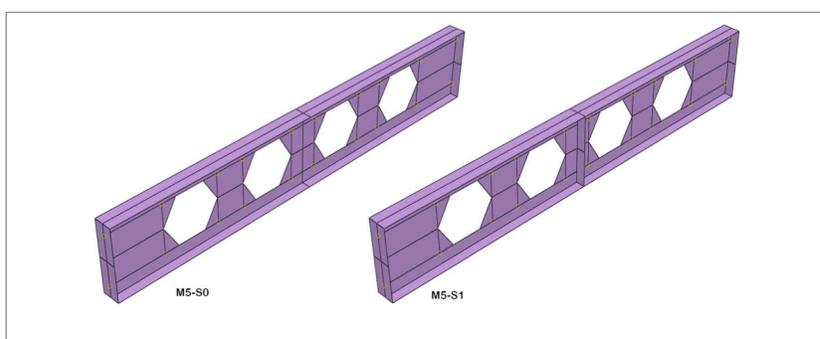


Figura 10. Viga M5, con y sin rigidizador adicional

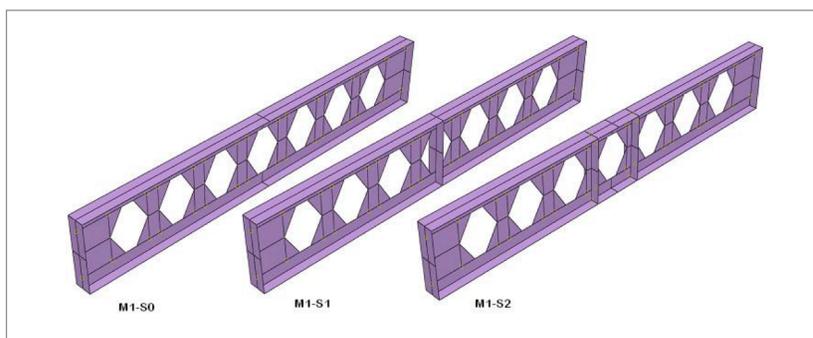


Figura 11. Viga M1, sin y con (uno y dos) rigidizadores adicionales

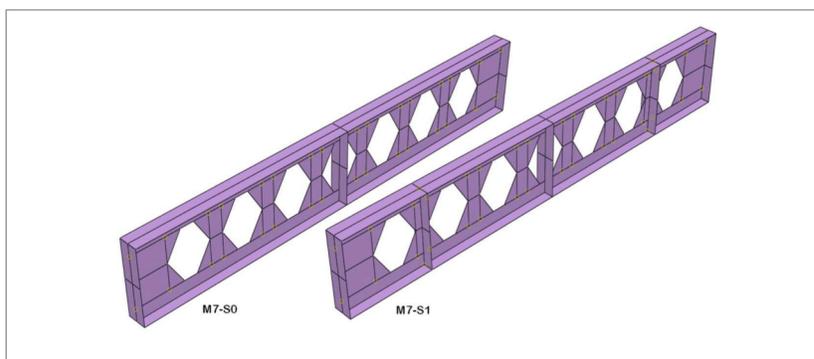


Figura 12. Viga M7, sin rigidizador adicional y con dos rigidizadores colocados simétricamente

SPANISH VERSION.....

Las Tablas 2, 3 y 4 muestran los resultados para la capacidad última de las vigas. Los nombres de las vigas van acompañados por la terminología S0, S1 o S2, que

corresponde a las vigas sin rigidizador adicional, con un rigidizador y con dos rigidizadores respectivamente.

Tabla 2. Ultimate capacity and failure mode in the analyzed beams – distributed load

Viga	Modo de falla	Carga última (kN/m)	Ganancia
M1-S0	WPB por compresion	107,8	-
M1-S1	WPB	128,3	19%
M1-S2	WPB	129,3	20%
M2-S0	WPB por compresion	70,7	-
M2-S1	WPB	99,1	40%
M2-S2	WPB	101,4	43%
M3-S0	WPB por compresion	118,6	-
M3-S1	Vierendeel; WPB	132,1	11%
M3-S2	WPB; Vierendeel	135,6	14%
M4-S0	WPB por compresion	84,3	-
M4-S1	WPB	113,5	35%
M4-S2	WPB	115,6	37%
M5-S0	WPB por compresion	121,3	-
M5-S1	Vierendeel	141,7	17%
M6-S0	WPB por compresion	86,6	-
M6-S1	WPB	134,4	55%

Tabla 3. Capacidad última y modo de falla en las vigas analizadas – carga concentrada

Viga	Modo de falla	Carga última (kN/m)	Ganancia
M7-S0	FMA	266,7	-
M7-S1	FMA	281,1	5%
M8-S0	FMA	182,2	-
M8-S1	FMA	201,7	11%
M9-S0	FMA	269,1	-
M9-S1	Vierendeel	280,8	4%
M10-S0	FMA	222,0	-
M10-S1	FMA	257,5	16%

Table 4. Ultimate capacity and failure mode in the analyzed beams – two concentrated loads

Viga	Modo de falla	Carga última (kN/m)	Ganancia
M11-S0	FMA	144,9	-
M11-S1	Vierendeel	189,3	31%
M12-S0	FMA	120,0	-
M12-S1	FMA; Vierendeel	165,8	38%
M13-S0	FMA	144,0	-
M13-S1	Vierendeel	149,6	4%
M14-S0	FMA	124,8	-
M14-S1	Vierendeel	149,4	20%



6. Discusión de los resultados

Las Figuras siguientes presentan las curvas de carga-desplazamiento de cada grupo de vigas, con el fin de mostrar el incremento en su capacidad de resistencia. Se puede observar que la rigidez en el rango elástico no cambia porque el rigidizador trabaja sólo como elemento de restricción lateral para los montantes de alma sometidos a cualquier tipo de inestabilidad.

En las vigas M1 con adición de rigidizadores (Figura 13), es posible observar un incremento del 20% de su capacidad de portante si se compara con la viga que no tiene rigidizador. El pandeo del montante del alma ocurre en la

viga M1-S0, con un cambio en la dirección de desplazamiento vertical en el punto monitoreado, debido a las deformaciones ocurridas (Figura 8). En las vigas M1-S1 y M1-S2, ocurre un pandeo del montante del alma por cortante, con los valores de carga máxima muy cercanos. Lo anterior indica que la presencia del rigidizador en la viga M1-S1, ubicado en el centro del alveolo, es suficiente para evitar los desplazamientos laterales en la parte central de la viga y, en consecuencia, para evitar que ocurra el WPB por compresión. En las vigas M2 (Figura 14), la presencia de rigidizadores provocó un incremento de alrededor de un 40% de la capacidad de portante, mostrando un comportamiento similar en relación a las vigas M1.

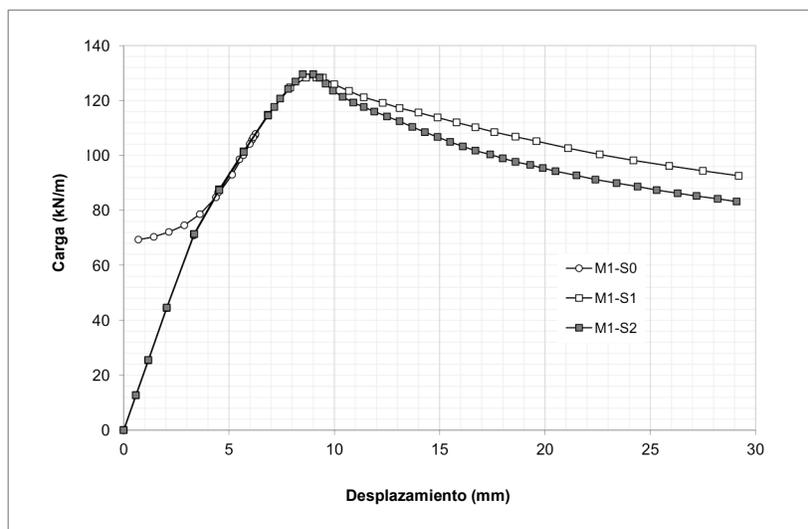


Figura 13. Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M1

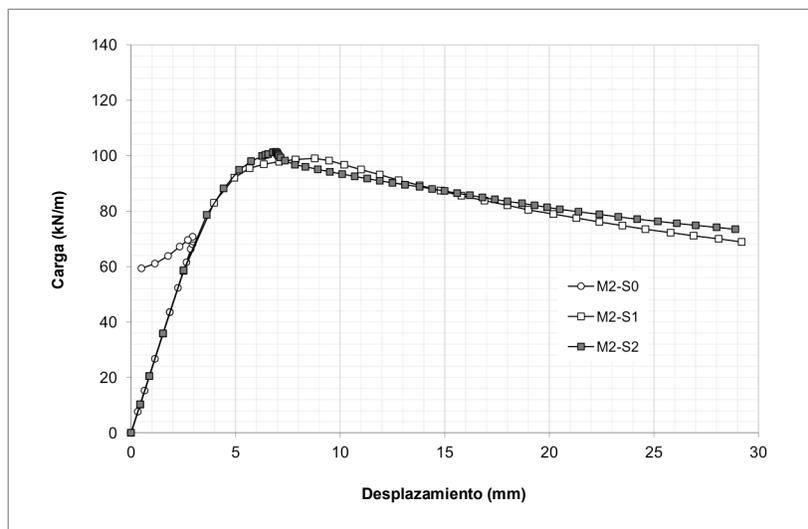


Figura 14. Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M2

En las vigas M3 a M6 (Figuras 15 a 18 – Curvas carga-desplazamiento por influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M5), es posible observar un comportamiento que es similar al de las vigas analizadas previamente, con un incremento significativo en la capacidad última cuando se usan rigidizadores de montante que previenen la ocurrencia del WPB por compresión. De manera

similar, las vigas cuyos rigidizadores en el centro de la luz coinciden con el centro de un alveolo, obtuvieron una capacidad de portante similar a aquellos con dos rigidizadores colocados en el centro del montante del alma. Es posible observar que el incremento de la resistencia es más significativo en las vigas donde el alma es más esbelta (vigas con placas de expansión).

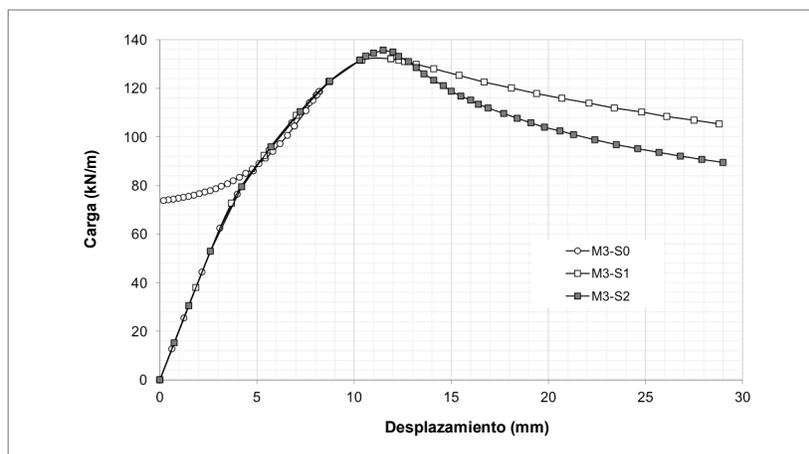


Figura 15. Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M3

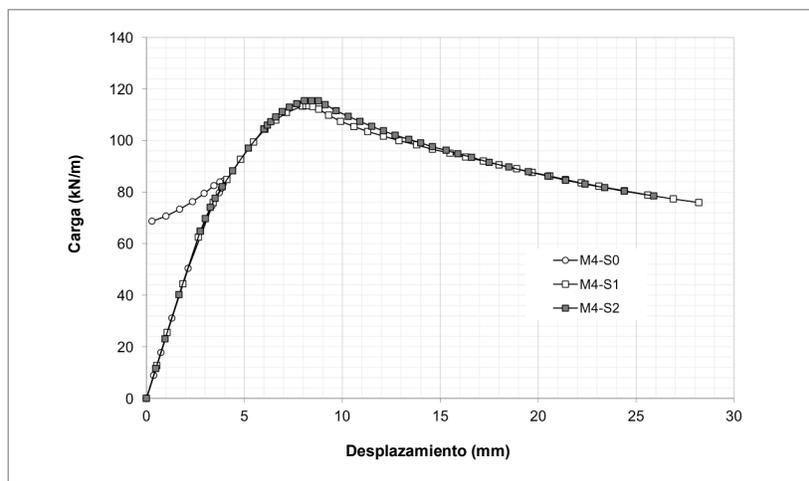


Figura 16. Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M4

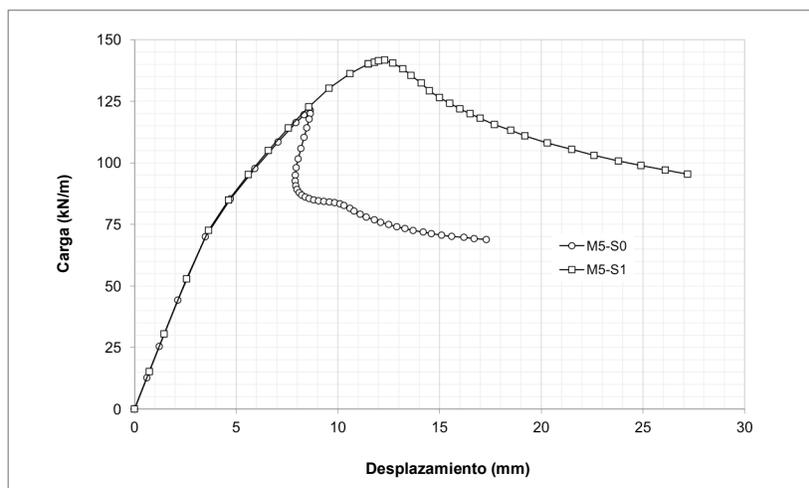


Figura 17. Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M5



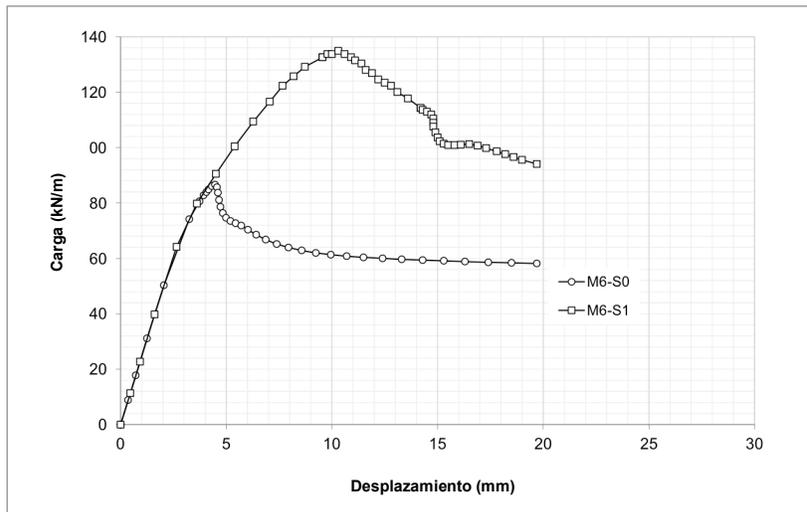


Figura 18. Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M6

En las vigas M7 a M10 sometidas a una carga concentrada en el centro de la luz y en las vigas M11 a M14 sometidas a dos cargas concentradas en el medios de los tercios, el modo de falla prevalente en las vigas sin rigidizadores en lo fue el pandeo del montante del alma por

cortante. Con adición de rigidizadores en los puntos críticos del montante, fue posible observar un incremento en la capacidad de portante de las vigas (Figuras 19 a 26 Curvas carga-desplazamiento por la influencia de los rigidizadores del montante del alma en vigas M13)

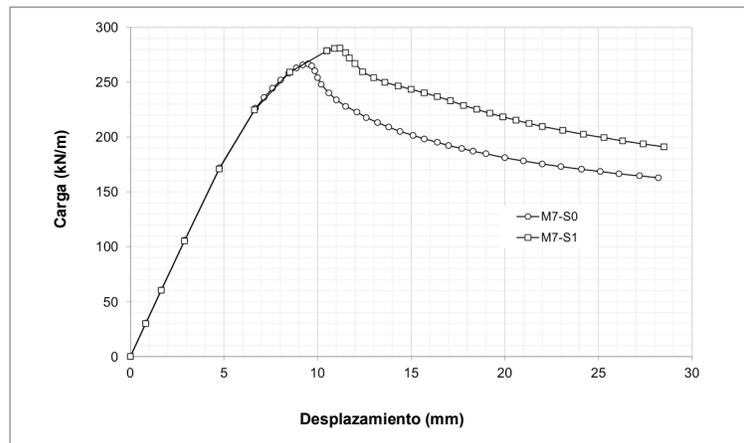


Figura 19. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el montante del alma en vigas M7

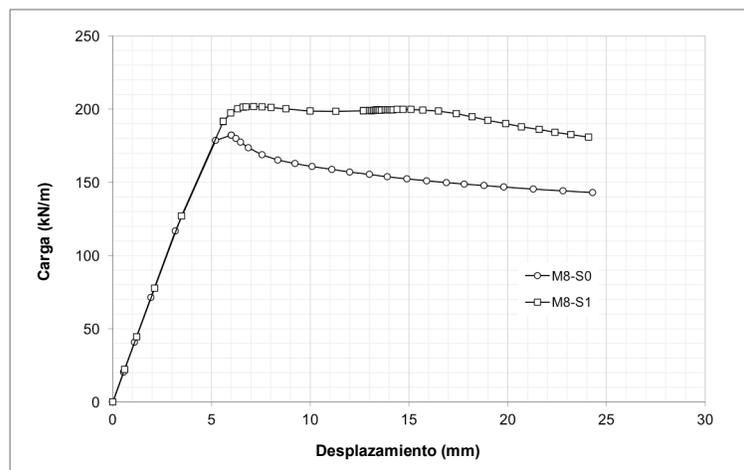


Figura 20. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el montante del alma en vigas M8

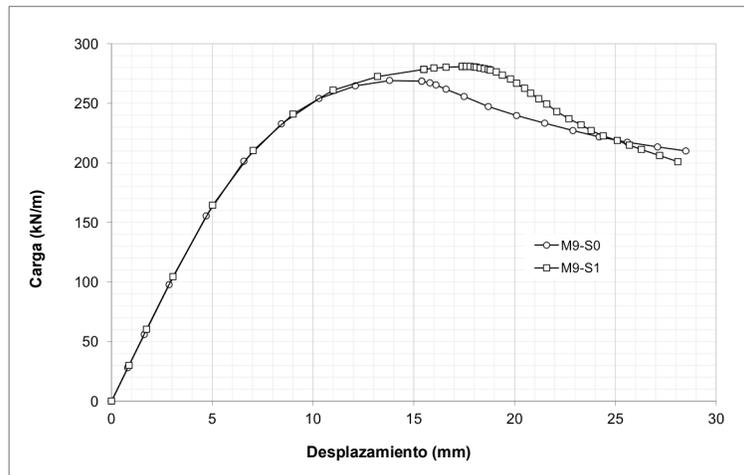


Figura 21. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el montante del alma en vigas M9

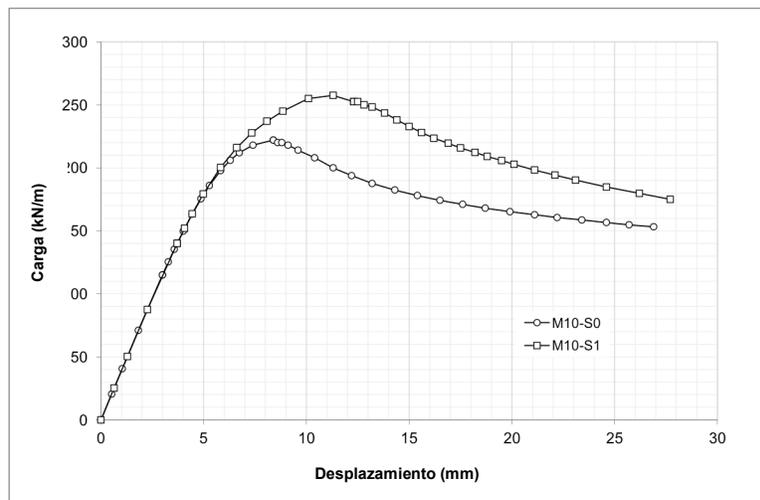


Figura 22. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el alma en vigas M10

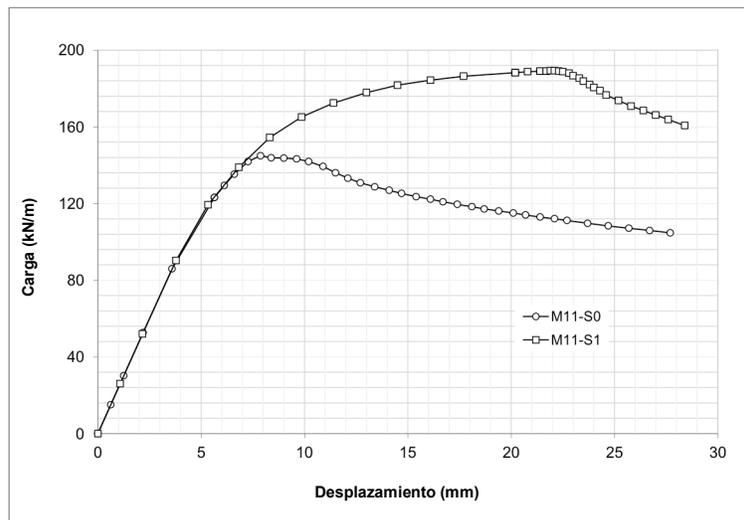


Figura 23. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el alma en vigas M11

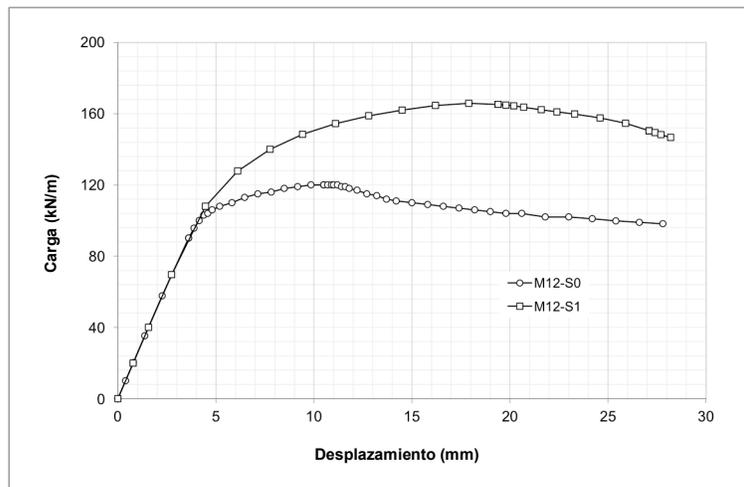


Figura 24. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el alma en vigas M12

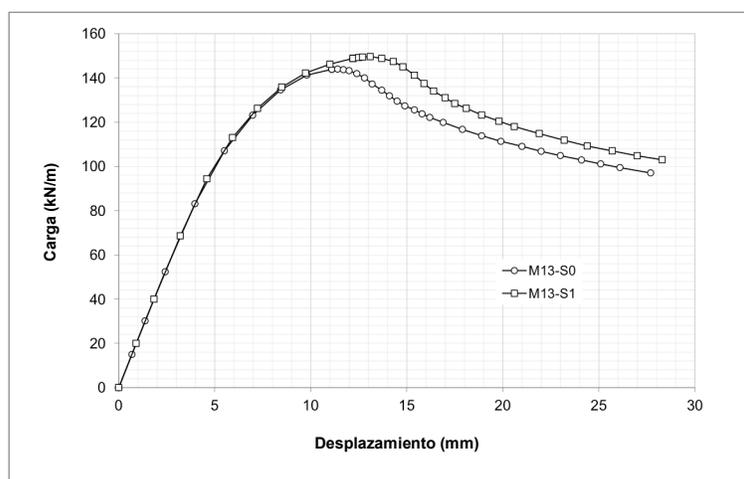


Figura 25. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el alma en vigas M13

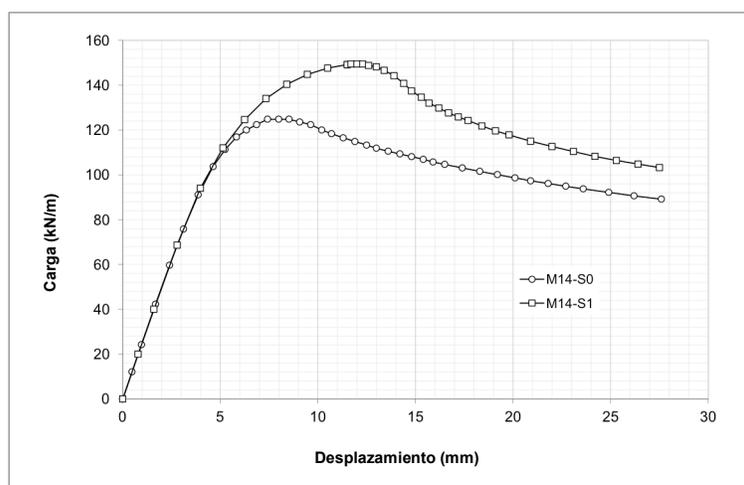


Figura 26. Curvas carga-desplazamiento para influencia de los rigidizadores en el montante del alma en vigas M14

El incremento promedio de la capacidad de portante en las vigas sometidas a carga concentrada fue inferior a las de con carga distribuida. Esto sucede porque, en las vigas con carga distribuida, el pandeo del montante del alma ocurre por compresión y, cuando se aplica, el rigidizador trabaja bajo compresión axial, creando una sección cruciforme con el alma de la viga. En el caso de la carga concentrada, la fuerza que causa el pandeo del montante del alma se encuentra en dirección horizontal, haciendo que el rigidizador trabaje bajo pandeo.

7. Conclusiones

En vigas con alma de bajo espesor, sometidas a carga distribuida uniformemente, la tendencia es la ocurrencia del pandeo del montante del alma cerca de la región de soporte, causado por la interacción de las tensiones normales y de cortante en la región. Si la viga es demasiado corta y, la carga aplicada llega cerca de su capacidad última, existe la posibilidad de pandeo por compresión del montante del alma cerca del centro de la luz. En estos casos, la presencia de un rigidizador de alma en la región de apoyo produce un efecto favorable, ayudando a evitar el pandeo del montante del alma cerca de los apoyos. En las simulaciones que se realizaron, la adición de un rigidizador con esas características en la luz libre de la viga mostró el efecto beneficioso del rigidizador, incrementando la capacidad de portante de la viga.

Es posible observar que el pandeo del montante del alma por compresión se evitó con la colocación del rigidizador en todas las vigas, y que la falla por pandeo del montante del alma por cortante ocurre en la región de cortante máximo. En las vigas donde ocurre el pandeo del

montante del alma por cortante, la adición de rigidizadores también aumenta la carga última y, en la mayoría de los casos, evita la ocurrencia de pandeo del montante del alma, con la falla produciéndose por el mecanismo de Vierendeel.

Es posible observar en las curvas carga-desplazamiento presentadas en este trabajo que el comportamiento de la viga en el rango elástico es idéntico para las vigas con o sin rigidizadores, ya que estos elementos sólo trabajan por restricción lateral para los montantes del alma sometidos a inestabilidad.

Por la forma en que los rigidizadores funcionan en las vigas sometidas a cargas distribuidas y con pandeo del montante del alma por compresión, se observó mayor efectividad de los rigidizadores, incrementando la capacidad de portantes hasta en un 50% en relación a las vigas sin rigidizadores adicionales.

En las vigas con montantes de alma más esbeltos (con placas de expansión) existe un mayor incremento en la capacidad de portante, ya que los rigidizadores rigidizan el montante del alma, alejando la posibilidad de pandeo elástico.

También fue posible observar, en los análisis realizados, que la presencia de un rigidizador, aún si se coloca en el centro de un alveolo, es suficiente para evitar el desplazamiento lateral de los montantes de alma en esa región.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen a FAPEMIG por su apoyo financiero, a la Universidade Federal de Viçosa y a la Universidade Federal de Itajubá.

9. Referencias

- Abreu L.M.P., Fakury R.H., Castro e Silva A.L.R. (2010)**, Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares. CILAMCE 2010 – XXXI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering: Argentina.
- Aglan A. A. y Redwood R. G. (1974)**, Web buckling in castellated beams. Procedure Institution of Civil Engineers, London, U.K., Part 2, Vol. 57, pp 307-320.
- Bezerra E.M., Fakury R.H., Castro e Silva A.L.R. y Caldas R.B. (2010)**, Determinação do momento fletor resistente a flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas. XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural: Argentina.
- Delesques R. (1968)**, Stabilité des montants de poutres ajourées. Construction Métallique. 3:26-33.
- Demirdjian S. (1999)**, Stability of Castellated Beam Webs. Montreal, Canadá: McGill University.
- Gemperle C. (2007)**, Vereinfachte Vordimensionierung von Wabenträgern. Stahlbau. 76:530-536.
- Grünbauer B.V. (2014)**, Web Page: <http://www.grunbauer.nl/eng/waarom.htm>. Accessed in 10/12/2014
- Kerdal D., Nethercot D.A. (1984)**, Failure modes for castellated beams. Journal of Constructional Steel Research. 295-315; 1984.
- Nadjai A., Goodfellow N., Vassart O., Ali F., Choi S. (2008)**, Simple calculation method of composite cellular beams at elevated temperatures. Fifth International Conference on Structures in Fire: 551-559.
- Redwood R.G. y Demirdjian S. (1998)**, Castellated beam web buckling in shear. Journal of Structural Engineering. 124:1202-1207.
- Silveira E. G., Vieira W. B., Veríssimo G. S. Paes J. L. R. y Ribeiro J. C. L. (2011)**, Numerical analysis of alveolar steel beams with emphasis on failure modes based by yielding. CILAMCE 2011 – XXXII Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Ouro Preto, 2011.
- Szalai J. y Papp F. (2005)**, A new residual stress distribution for hot-holled I-shaped sections. Journal of Constructional Steel Research. 845-861; 2005.
- Vieira W. B., Veríssimo G. S., Silveira E. G., Paes J. L. R. y Ribeiro J. C. L. (2011)**, Development and validation of a numerical model for behaviour assessment of castellated beams susceptible to collapse by web post buckling. CILAMCE 2011 – XXXII Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Ouro Preto.
- Zaarour W.J. y Redwood R.G. (1996)**, Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams. Journal of Structural Engineering. 860-866.

