

## ANÁLISIS DE LA DESCOMPOSICIÓN MODAL DE LAS DEFORMACIONES POR PANDEO EN PERFILES DE SECCIÓN OMEGA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE GBT VALIDADO CON MEF

### MODAL DECOMPOSITION ANALYSIS OF BUCKLING DEFORMATIONS IN OMEGA SECTION PROFILES BY APPLYING GBT VALIDATED WITH FEM

Alejandro R. Ratazzi<sup>a</sup> y Daniel H. Felix<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional del Sur (UNS), Avenida Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina  
Departamento de Ingeniería (UNS), Instituto de Ingeniería-II-UNS (UNS-CIC)

*alejandro.ratazzi@uns.edu.ar, dhfelix@uns.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>.*

**Palabras clave:** pandeo, carga critica, GBT, perfil, pared delgada, modos, omega.

**Resumen.** La teoría generalizada de vigas, conocida principalmente como GBT por su sigla en inglés, cuya base cinemática se fundamenta en la descomposición de los modos de deformación, ha recibido un creciente interés en las últimas décadas. Dicha teoría tiene la capacidad de distinguir entre las deformaciones provocadas por pandeo local y las causadas por pandeo global, siendo en consecuencia, de gran utilidad cuando se aplica a perfiles de pared delgada y abierta conformados en frío. Sin embargo, su difusión en los países de habla hispana resulta mucho más escasa por lo que se pretende aquí realizar el estudio de casos simples que muestren su potencial de aplicación. Se analizaron en detalle perfiles de sección delgada y abierta de tipo Omega, de diferentes espesores, mediante la aplicación del software libre GBTUL 2.0 con la validación de resultados, mediante el uso del programa de elementos finitos FEMAP. De los estudios realizados, pudo concluirse que para los casos analizados, ambos programas arrojan resultados similares y resultan complementarios: FEMAP aporta mayor precisión y GBTUL 2.0 permite interpretar con mayor detalle la contribución de los diferentes modos de pandeo en la deformación total.

**Keywords:** buckling, critical load, GBT, profile, thin wall, modes, omega.

**Abstract.** Generalized beam theory, known primarily as GBT, whose kinematic basis is based on the decomposition of deformation modes, has received increasing interest in recent decades. This theory is able to distinguish between deformations caused by local buckling and those caused by global buckling, making it highly useful when applied to cold-formed thin-walled and open-walled profiles. However, its diffusion in Spanish-speaking countries is much less widespread, so the purpose of this paper is to conduct simple case studies that demonstrate its application potential. Omega-type thin-walled and open-section profiles of varying thicknesses were analyzed in detail using the free software GBTUL 2.0, with results validated using the finite element program FEMAP. From the studies carried out, it was concluded that for the cases analyzed, both programs yield similar and complementary results: FEMAP provides greater precision and GBTUL 2.0 allows for a more detailed interpretation of the contribution of the different buckling modes to the total deformation.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en la difusión y aplicación del software académico GBTUL 2.0, desarrollado en la Universidad de Lisboa, que permite estudiar la estabilidad elástica y las vibraciones en miembros prismáticos de pared delgada, implementando la Teoría de Vigas Generalizada, conocida por su sigla en Inglés, GBT (*Generalized Beam Theory*), (Camotim et al., 2016).

La principal motivación para realizar esta investigación es el creciente interés por contar con métodos numéricos de elevada precisión. Por un lado, se utiliza el método de elementos finitos, implementado en este caso mediante el software FEMAP, (FEMAP, 2020) y por otra parte, se utiliza el software GBTUL 2.0, (Bebiano et al., 2014), que está basado en la GBT, para evaluar la estabilidad estructural elástica. La aplicación de este último programa permite profundizar en la naturaleza de la deformación asociada a la inestabilidad elástica, ya que se basa en una teoría cinemática de descomposición modal de la forma de pandeo, (Schafer y Ádany, 2006), (Li y Schafer, 2010). Siguiendo esta línea de trabajo, en Ratazzi et al. (2024) se ha utilizado una metodología basada en el método de bandas finitas, (FSM su sigla en inglés) (Davies y Philip, 1994), cuyos principios también se fundamentan en la GBT.

En este contexto, GBTUL 2.0 se posiciona como una alternativa libre, validada y de acceso abierto, particularmente adecuada para el análisis de perfiles de pared delgada, conformados en frío, donde la elevada esbeltez de las paredes los hace vulnerables al pandeo local.

Por último, vale la pena destacar que el software GBTUL 2.0 fue desarrollado por un grupo de investigadores de la Universidad de Lisboa, Portugal que implementaron en el mismo, el fruto de muchos años de investigación y difusión de la GBT y que dichos autores también han validado los resultados de sus trabajos mediante la utilización del método de elementos finitos.

## 2. BREVE SÍNTESIS DE LA FORMULACIÓN GBT

Por razones de espacio, únicamente se citan aquí las dos ecuaciones principales del método, ya que no es el propósito del trabajo la descripción de dicha teoría. No obstante se ofrecen al lector algunas referencias destacadas mediante las cuales puede obtener mayores detalles de la GBT, accediendo a las mismas.

La ecuación generalizada de autovalores que permite obtener los coeficientes de carga crítica proporcionada por la GBT, puede expresarse del siguiente modo, (Bebiano et al., 2014):

$$\begin{aligned} C_{ik}\phi_{k,xxxx} - D_{ik}\phi_{k,xx} + B_{ik}\phi_k \\ -\lambda \left[ X_{jik} (W_j^0 \phi_{k,x})_{,x} - X_{jki}^T (W_{j,x}^0 \phi_k)_{,x} + W_{j,x}^0 X_{jik}^T \phi_{k,x} \right] = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

siendo  $\lambda$ , el coeficiente de carga crítica,  $C_{ik}$ ,  $D_{ik}$ ,  $B_{ik}$  los coeficientes de rigidez elástica de la sección transversal y  $X_{jik}$ ,  $X_{jik}^T$  los coeficientes de rigidez geométrica, que se relacionan con las tensiones normales y cortantes. Por otra parte, los  $W_j^0 = W_j^0(x)$  con  $j = 1..,4$ , contienen las resultantes de las tensiones originadas en el estado de carga de prepandeo, y  $\phi_k$ ,  $\phi_{k,x}$ ,  $\phi_{k,xx}$  y  $\phi_{k,xxxx}$  son las funciones de amplitud modal y sus derivadas, que permiten extender los resultados de la sección transversal a todo el perfil.

La participación de cada modo en la deformación total se puede obtener mediante la participación de cada función de amplitud modal ponderada en la longitud del perfil, mediante la siguiente expresión, (Camotim y Basaglia, 2013):

$$P_i = \frac{\int_L |\phi_i(x)| dx}{\sum_{k=1}^{n_d} \int_L |\phi_k(x)| dx} \times 100 \% \quad (2)$$

siendo  $P_i$  los coeficientes de participación modal relativos a cada autovalor calculado,  $L$  la longitud del perfil y las  $\phi_i(x)$ , y  $\phi_k(x)$  las funciones de amplitud modal que deben hallarse mediante la resolución de la Ec. (1). En síntesis, primero se resuelve la deformación de la sección transversal, es decir las matrices  $C$ ,  $D$  y  $B$  de la Ec. (1) y posteriormente, mediante un método analítico si es posible o bien numérico, la propagación de dichas deformaciones a lo largo del perfil, o sea las funciones  $\phi_i(x)$ .

### 3. APLICACIÓN DE LA GBT A UN PERfil DE SECCIÓN OMEGA

#### 3.1. Definición del modelo

Siguiendo los lineamientos utilizados en trabajos anteriores, (Ratazzi et al., 2023), (Ratazzi et al., 2024) se analiza la inestabilidad provocada por pandeo lineal elástico, de un perfil de sección transversal tipo Omega que cumple con los requisitos de la Norma IRAM-IAS U 500-205 para uso en estructuras.

#### 3.2. Metodología de Cálculo

Se emplean dos métodos numéricos distintos para determinar las cargas que provocan la inestabilidad elástica del perfil. Por un lado, se utiliza el método implementado en el software GBTUL 2.0, basado en la Teoría Generalizada de Vigas (GBT). Por otro lado, la carga crítica de pandeo se obtiene mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM), implementado a través del software FEMAP.

Para los dos métodos se establece un perfil de 2000 mm de longitud máxima, libre en un extremo y empotrado en el otro extremo. La carga esta aplicada en el baricentro de la sección transversal abierta del perfil.

### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar, se estudió el perfil omega, cuya sección transversal se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Pueden apreciarse en la misma la disposición de los nodos naturales, que son aquellos que separan cada placa que conforma el perfil, o sea los puntos de plegado de la chapa. Dichos nodos se utilizan para discretizar la sección transversal del perfil.

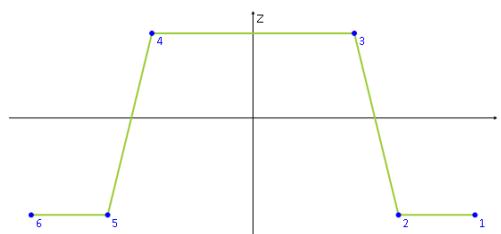


Figura 1: Esquema de la sección transversal del perfil Omega adoptado en el que se aprecia el eje de simetría  $z$  y la disposición de los nodos naturales.

Como puede apreciarse en dicha figura, el eje  $z$  es eje de simetría del perfil. Por medio del programa GBTUL se realizó el análisis del perfil de acero de pared delgada tipo omega, con el fin de obtener la carga crítica que provoca la inestabilidad elástica bajo compresión pura. El estudio se efectuó para cuatro espesores de chapa diferentes: 1,6 mm, 2,0 mm, 2,5 mm y 3,2 mm. La chapa del perfil corresponde a un acero al carbono AISI 1030, conformado en frío, con

un módulo de elasticidad  $E = 203,395,4 \text{ N/mm}^2$ , un coeficiente de Poisson  $\nu = 0,29$  y un peso específico  $\rho = 7,78,10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ .

Dado que el procedimiento de cálculo es similar para cada caso, se detalla dicho procedimiento únicamente para el perfil de 1,6 mm de espesor, y se dan los resultados de cargas críticas y nominales para los 4 perfiles.

La Figura 2 muestra la curva que indica el valor del primer coeficiente de carga crítica  $\lambda_b$  en función de la longitud del perfil  $L$ . Complementariamente a dicha información, el gráfico de la Figura 3 indica los niveles de participación modal  $P_i$ , correspondientes a cada modo  $i$  de deformación de la sección transversal, también en función de la longitud del perfil.

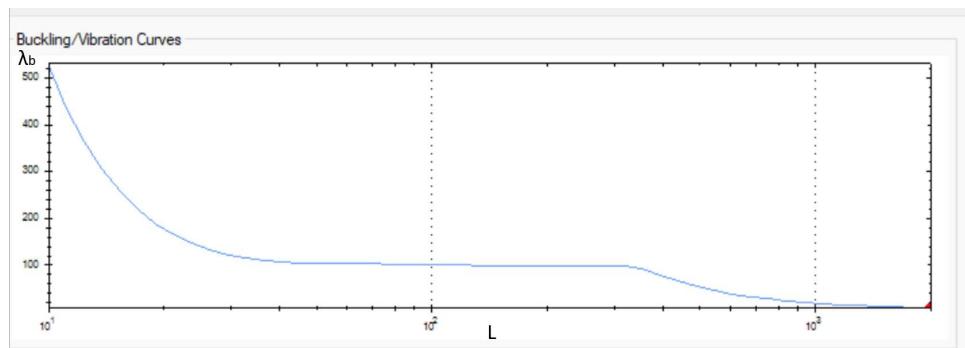


Figura 2: Primer coeficiente de carga crítica  $\lambda_b$  en un perfil de sección Omega de 1,6 mm de espesor vs. su longitud.

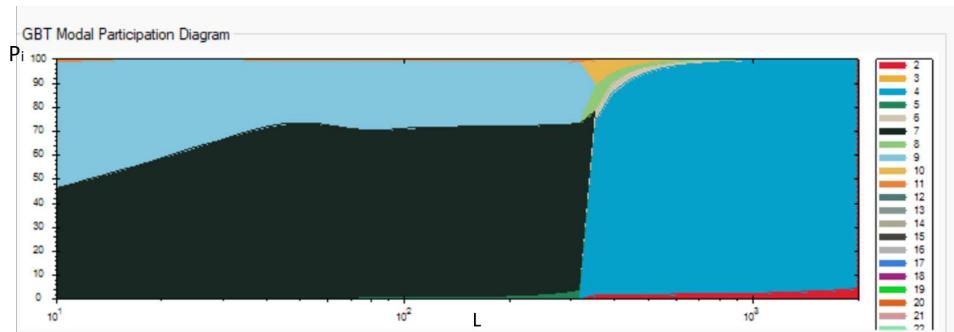


Figura 3: Niveles de participación modal  $P_i$  en un perfil de sección Omega de 1,6 mm de espesor vs. su longitud.

Por otra parte, se muestra el perfil deformado por pandeo en 3D, obtenido con un modelo de idéntica geometría, realizado con el software FEMAP, que tiene mayor capacidad gráfica, al que se le aplicaron las mismas condiciones de borde y estado de carga.

Para poder generar condiciones de carga en el modelo realizado con FEMAP, similares a las que se tienen con el modelo implementado en el software GBTUL se creó un nudo rígido del tipo RBE2, en el centroide del extremo del perfil Omega, como se muestra en la Figura 4.

Por otra parte, la Figura 5 muestra una vista en perspectiva del perfil Empotrado-Libre cargado en su extremo, obtenida con el software GBTUL.

#### 4.1. Caso 1: Comparación entre perfiles de diferente espesor

En la Tabla 1, se presentan los resultados correspondientes a perfiles de 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm de espesor. En dicha tabla se muestran para cada caso, el valor de carga crítica obtenido con FEMAP, el valor de carga crítica obtenido con GBTUL y la participación modal de los

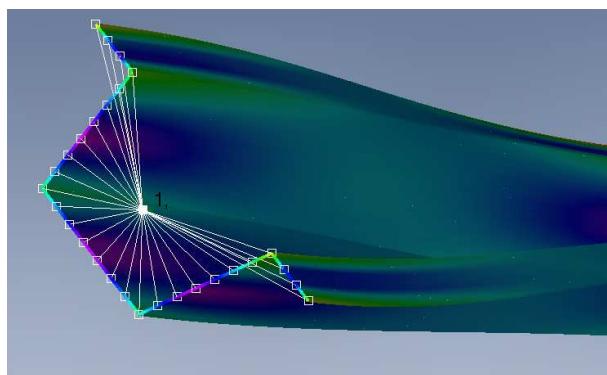


Figura 4: Perfil de sección Omega de 1,6 mm de espesor y 2 m de longitud creado con FEMAP: La imagen muestra el perfil deformado y la construcción del nodo rígido en el que se aplica la carga de prueba.

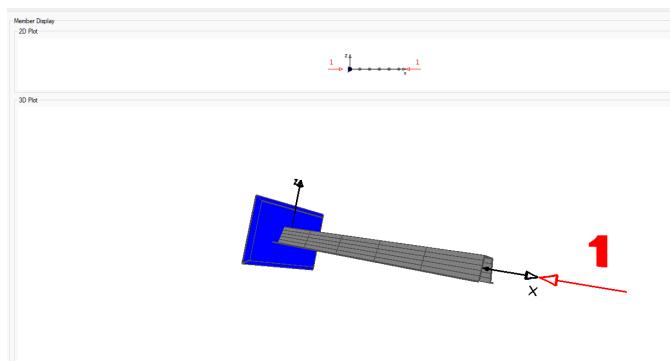


Figura 5: Vista en perspectiva del Perfil de sección Omega de 1,6 mm de espesor y 2 m de longitud, empotrado en un extremo y cargado en el extremo libre.

principales modos que intervienen en la deformación de la sección transversal, siendo cada  $P_i$  el porcentaje de participación modal del correspondiente modo  $i$ , los cuales se encuentran entre 0 y 100

Perfil $\Omega$ (espesor)	FEMAP (N)	GBTUL (N)	Modos de participación
1,6 mm	9 436,68	7 848,08	P4 = 95,37 % ; P2 = 4,15 % ; P8 = 0,36 %
2,0 mm	13 556,41	13 021,53	P4 = 93,84 % ; P2 = 5,60 % ; P8 = 0,32 %
2,5 mm	20 293,90	22 298,12	P4 = 91,33 % ; P2 = 7,96 % ; P8 = 0,40 %
3,2 mm	33 264,07	41 289,57	P4 = 87,01 % ; P2 = 12,18 % ; P8 = 0,41 %

Tabla 1: Valores de los coeficientes de carga crítica  $\lambda_b$  y de las participaciones modales dominantes en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm.

Los resultados del coeficiente de carga crítica  $\lambda_b$  pueden visualizarse también gráficamente en las curvas que se muestran en la Figura 6. Los correspondientes niveles de participación modal se pueden visualizar gráficamente en la Figura 7. Como es esperable, los resultados de las columnas 2 y 3 en la Tabla 1, muestran una tendencia creciente de la carga crítica a medida que aumenta el espesor de la chapas. Se destaca algunas diferencias entre los resultados obtenidos con ambos métodos, las cuales se describen a continuación:

- En el perfil de 1,6 mm se obtiene con FEMAP una carga mayor, (9.436 N) respecto a GBTUL (7.848 N), lo que representa una sobre estimación cercana al 20 %.

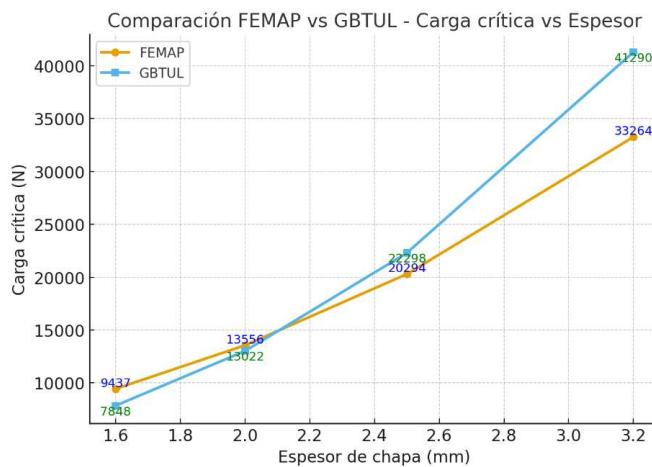


Figura 6: Comparación de valores de los coeficientes de carga crítica  $\lambda_b$  en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, obtenidos con FEMAP y con GBTUL.

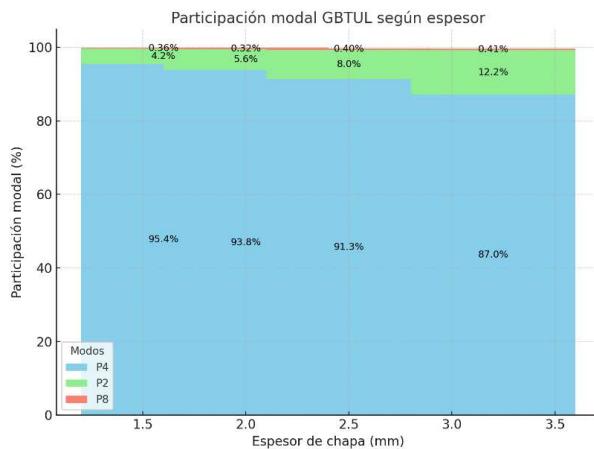


Figura 7: Presentación en forma gráfica de los diferentes niveles de participación modal en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, obtenidos con GBTUL.

- En el perfil de 2,0 mm los valores son más próximos entre sí, con FEMAP se obtiene (13.556 N), apenas un 4 % superior al obtenido con GBTUL, (13.021 N).
- En el perfil de 2,5 mm ocurre lo contrario; el valor obtenido con GBTUL (22.298 N), supera en aproximadamente un 10 % al valor de FEMAP, (20.294 N).
- En el perfil de 3,2 mm la diferencia se amplifica, con FEMAP se obtiene 33.264 N frente a 41.290 N de GBTUL, es decir, un 24 % más alto en este último.

En síntesis, FEMAP tiende a sobreestimar las cargas críticas en espesores delgados, mientras que GBTUL predice valores más elevados en espesores intermedios y gruesos. Esto refleja la sensibilidad de ambos programas frente a la geometría y la participación modal, siendo GBTUL más representativo para el análisis de pandeo en perfiles de pared delgada.

A partir de los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 1 puede observarse que:

- existe un fuerte dominio de la participación del modo 4 en todos los espesores, aunque la participación del modo 4 disminuye al aumentar el espesor de la chapa, reduciéndose del 95,37 % en el perfil de 1,6 mm al 87,01 % en el perfil de 3,2 mm.

- Por el contrario, la participación del modo 2 en la deformación total crece con el espesor, yendo de 4,15 % en el perfil de 1,6 mm al 12,18 % en el perfil de 3,2 mm.
  - En el mismo rango de espesores anterior, la pequeña participación del modo 8 aumenta del 0,32 % al 0,41 %.

El incremento de la contribución de  $P_2$  y el respectivo decrecimiento de la participación modal  $P_4$ , sugieren mayor 'mezcla' modal a medida que aumenta el espesor.

Se puede correlacionar la evolución en las participaciones modales con las diferencias crecientes entre GBTUL y FEMAP conforme aumenta el espesor del perfil.

Los autores consideran que la dispersión de valores en un rango razonablemente acotado de diferencias en los resultados, podría deberse también en parte a diversos aspectos en la construcción de los diferentes modelos, tales como la falta de coincidencia exacta en el punto de aplicación de la carga o el nivel de refinamiento de la malla de elementos finitos entre otros, y en la manera en que éstos son calculados por los respectivos programas.

#### 4.2. Caso 2: Comparación entre perfiles de diferente espesor y con nervio lateral

Para el segundo caso de estudio numérico propuesto, la Figura 8 muestra esquemáticamente la sección transversal del perfil que incluye la presencia de nervios laterales. Puede observarse

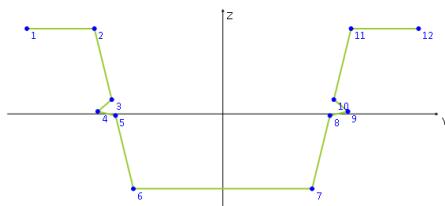


Figura 8: Vista esquemática de la sección transversal del perfil Omega, incluyendo la presencia de nervios laterales.

en dicha figura que la sección mantiene su eje de simetría.

Los resultados obtenidos para este caso se muestran en la Tabla 2. Los resultados del co-

<b>Perfil <math>\Omega</math> (espesor)</b>	<b>FEMAP (N)</b>	<b>GBTUL (N)</b>	<b>Modos de participación</b>
1,6 mm	10 953,29	8 253,60	P4 = 95,47 % ; P2 = 4,08 % ; P8 = 0,19 %
2,5 mm	23 142,95	23 528,53	P4 = 91,44 % ; P2 = 7,98 % ; P8 = 0,30 %
3,2 mm	37 404,38	43 634,02	P4 = 87,18 % ; P2 = 11,96 % ; P8 = 0,21 %

Tabla 2: Valores de los coeficientes de carga crítica  $\lambda_b$  y de las participaciones modales dominantes en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, que incluyen la presencia de nervios laterales.

eficiente de carga crítica  $\lambda_b$  pueden visualizarse también gráficamente en las curvas que se muestran en la Figura 9. Mientras que los correspondientes niveles de participación modal se pueden visualizar gráficamente en la Figura 10.

Se aprecia en este caso que la participación modal  $P_4$  es dominante en todos los espesores, variando de 95,47 % (1,6 mm) a 87,18 % (3,2 mm). En paralelo, la participación modal  $P_2$  aumenta progresivamente de 4,08 % al 11,96 %, lo que indica una mayor mezcla modal en espesores altos. la participación modal  $P_8$  se mantiene marginal (<0,5 %). Nuevamente se considera

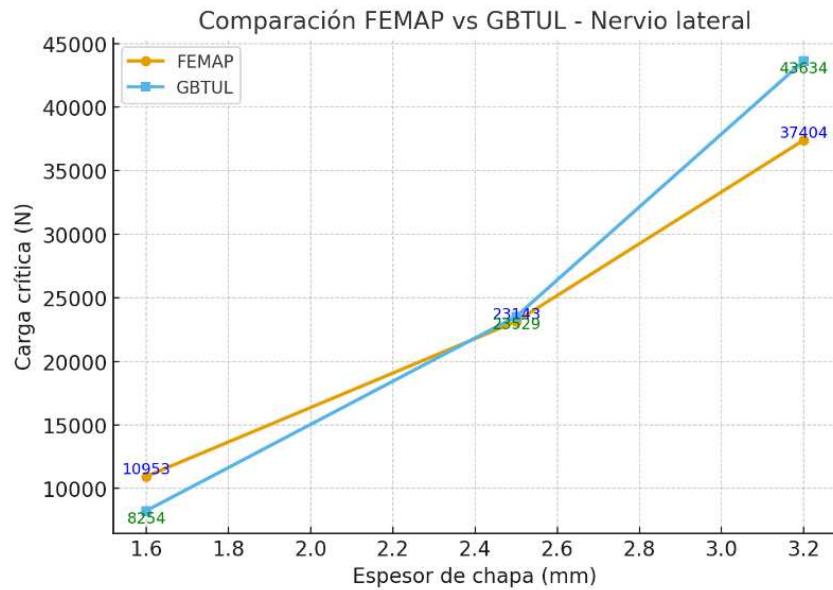


Figura 9: Comparación de valores de los coeficientes de carga crítica  $\lambda_b$  en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, con presencia de nervios laterales, obtenidos con FEMAP y con GBTUL.

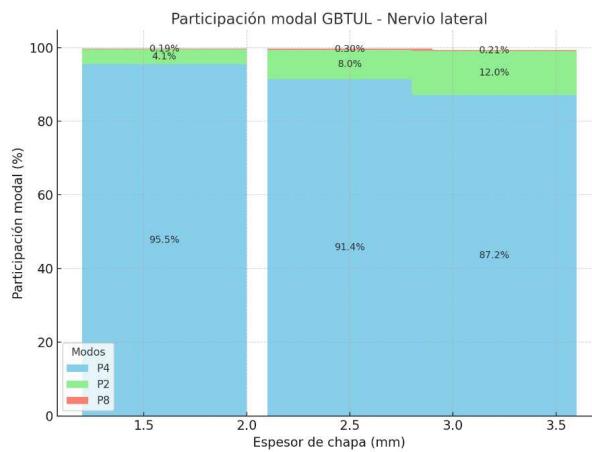


Figura 10: Presentación gráfica de los diferentes niveles de participación modal en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, con presencia de nervios laterales.

que esta evolución modal explica la diferencia creciente entre FEMAP y GBTUL, debido que GBTUL descompone explícitamente la contribución de cada modo de pandeo.

#### 4.3. Caso 3: Perfiles de diferente espesor vinculados parcialmente en el nudo medio

Por último se presenta el caso en el que el desplazamiento del perfil se restringe parcialmente en el nodo medio de la sección transversal (nodo 16). La Figura 11 muestra esquemáticamente la sección con la disposición de nodos naturales e interiores.

Los resultados obtenidos para este caso se muestran en la Tabla 3

Los resultados del coeficiente de carga crítica  $\lambda_b$  pueden visualizarse también gráficamente en las curvas que se muestran en la Figura 12.

En este caso, FEMAP y GBTUL entregan valores muy próximos en 1,6 mm (diferencia <1 %). A partir de 2,0 mm, GBTUL comienza a dar cargas más elevadas, registrándose en

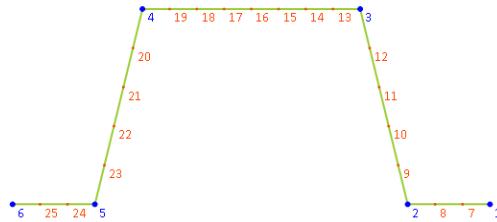


Figura 11: Vista esquemática de la sección transversal del perfil Omega, restringida en el nodo medio (nodo 16).

Espesor (mm)	FEMAP (N)	GBTUL (N)	Modos de participación
1,6	26 567,50	26 745,90	P4 = 56,36 % ; P2 = 49,63 % ; P8 = 0,21 %
2,0	35 389,50	39 310,30	P4 = 50,23 % ; P2 = 49,77 % ; P8 = 0,21 %
3,2	85 179,34	101 304,90	P4 = 50,09 % ; P2 = 49,01 % ; P8 = 0,30 %

Tabla 3: Valores de los coeficientes de carga crítica  $\lambda_b$  y de las participaciones modales dominantes en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, que se hallan restringidos en el nodo medio (nodo 16).

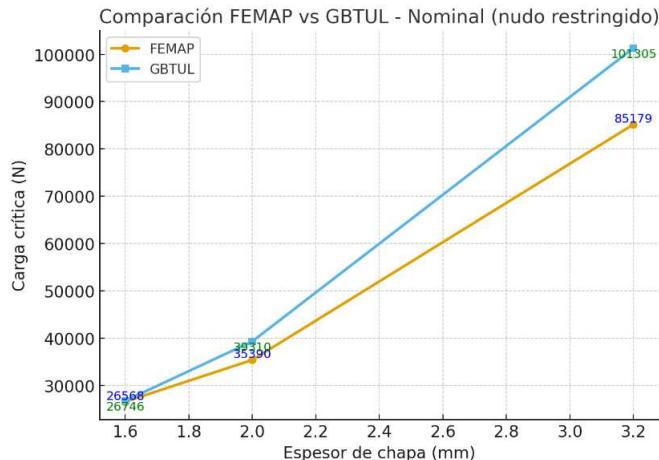


Figura 12: Comparación de valores de los coeficientes de carga crítica  $\lambda_b$  en perfiles Omega de 2 m de longitud y espesores de; 1,6; 2,0; 2,5 y 3,2 mm, con restricción al desplazamiento del nodo medio (nodo 16), obtenidos con FEMAP y con GBTUL.

dicho caso diferencias mayores al 11 %. En perfiles de 3,2 mm la diferencia se amplía notablemente, con un 19 % más en GBTUL. En cuanto a la participación modal, se observa un balance casi equitativo entre  $P_4$  y  $P_2$  siendo la participación de cada modo en todos los espesores, de aproximadamente un 50 %.

## 5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. La primera es un tanto obvia y predecible a priori, ya que se comprueba que la carga crítica aumenta con el espesor en todas las configuraciones analizadas.

2. FEMAP presenta mayores cargas críticas en espesores reducidos, mientras que GBTUL predice cargas más altas en espesores mayores.
3. El análisis modal demuestra que para el modelo propuesto, la participación modal  $P_4$  es dominante en perfiles completos, con nervios laterales y poco espesor, aunque pierde protagonismo frente al crecimiento de la participación modal  $P_2$  en espesores mayores.
4. En el caso nominal con nodo central restringido los modos correspondientes a las participaciones modales  $P_4$  y  $P_2$ , muestran aportes a la deformada que resultan semejantes, generando mayor inestabilidad por acoplamiento modal, lo cual reduce el valor de la carga crítica de pandeo.
5. Ambos programas resultan complementarios: FEMAP aporta precisión en el cálculo numérico y GBTUL permite interpretar con detalle la contribución de los modos de pandeo.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur (DI-UNS), bajo el auspicio de la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la UNS, (SGCyT-UNS) y del Instituto de ingeniería de la UNS, (II-UNS).

## REFERENCIAS

- Bebiano R., Camotim D., y Gonçalves R. GBTUL 2.0 - A new/improved version of the GBT-based for the buckling analysis of cold-formed steel members. *22<sup>nd</sup> International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Saint Louis, Missouri, USA*, 2014.
- Camotim D. y Basaglia C. Buckling analysis of thin-walled steel structures using generalized beam theory (gbt): state-of-the-art report. *Steel Construction*, 6(2):117–131, 2013.
- Camotim D., Dinis P., y Martins A. *Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction: Chapter 4-Direct strength methodd a general approach for the design of cold-formed steel structures*. Cheng Yu, 2016.
- Davies J.M. y Philip L. First-order generalised beam theory. *Journal of Constructional Steel Research*, 31:187–220, 1994.
- FEMAP. *Simcenter*. SIEMENS Digital Industries Software, 2020.
- Li Z. y Schafer B. Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using cufsm: conventional and constrained finite strip methods. *20<sup>th</sup> International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Saint Louis, Missouri, USA*, página 15, 2010.
- Ratazzi A.R., Felix D.H., y Gilardi J.G. Determinación numérica de cargas críticas de pandeo local en perfiles de pared delgada y abierta sometidos a cargas de flexocompresión. *Mecánica Computacional*, XXIX:207–216, 2024.
- Ratazzi A.R., Felix D.H., Maíz J.M., y Serralunga M.J. Estudio de la inestabilidad del equilibrio de perfiles metálicos abiertos utilizados en silos de almacenamiento de granos con modelos de elementos finitos. *Mecánica Computacional*, XL:269–278, 2023.
- Schafer B. y Ádány S. Buckling analysis of cold-formed steel members using cufsm: Conventional and constrained finite strip methods. *CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Saint Louis, Missouri, USA*, 2:1971–2018, 2006.