

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MIEMBROS DE ACERO CONFORMADO EN FRÍO MEDIANTE ANÁLISIS DE PANDEO CON ELEMENTOS FINITOS TIPO PLACA

Durán Mendoza, Mario Alberto

Miembro del Comité Técnico de la Norma Boliviana de Diseño de Estructuras Metálicas

mario.duran@sdstruct.com

Palabras clave: pandeo local, conformado en frío, elementos finitos tipo placa.

RESUMEN

El diseño de miembros estructurales de acero conformados en frío requiere la verificación frente al pandeo local, distorsional y global. La Especificación AISI S100 establece dos metodologías para considerar el pandeo local: el Método del Ancho Efectivo y el Método de Resistencia Directa. Históricamente, el Método del Ancho Efectivo ha sido el más utilizado en las oficinas de ingeniería, puesto que, si bien es un método laborioso, no requiere de herramientas avanzadas de cálculo. En contraste, el Método de Resistencia Directa depende del análisis de pandeo elástico, tradicionalmente asociado al uso de software especializado. No obstante, en la actualidad es habitual que los programas de análisis estructural incluyan rutinas de análisis de pandeo. En este contexto, se desarrolla una metodología basada en modelos de elementos finitos tipo placa para el análisis e interpretación de los resultados de pandeo aplicados a un conjunto de secciones tipo, con el objetivo de calcular la resistencia correspondiente a los distintos modos de pandeo. Los resultados se comparan con los calculados mediante el Método del Ancho Efectivo y, como se demuestra, el Método de Resistencia Directa permite en algunos casos un incremento significativo en la resistencia del miembro.

ABSTRACT

The design of cold-formed steel structural members requires the check of local, distortional, and global buckling. The AISI S100 Specification indicates two methodologies to consider the local buckling: the Effective Width Method (EWM) and the Direct Strength Method (DSM). Historically, the EWM has been the most widely used in engineering offices, since, although it is a laborious method, it does not require advanced calculations tools. On the other hand, the DSM requires the use of specialized software. However, today it is quite common for structural analysis software to include buckling analysis. Therefore, and using plate finite elements, a methodology is developed to model and interpret the results of the buckling analysis applied to a set of typical cross-sections, to calculate the strength for the buckling modes. The results are compared to those obtained using the traditional EWM, and as demonstrated, the DSM allows for some cases a significant increase in the member strength.

INTRODUCCIÓN

El diseño de miembros estructurales de acero conformado en frío se distingue del diseño de perfiles laminados en caliente, fundamentalmente, por la sensibilidad al pandeo local como consecuencia de la elevada esbeltez de los elementos de la sección transversal. La Especificación AISI S100-2024 (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members) — norma de referencia para este trabajo — identifica tres modos relevantes de pandeo elástico: local, distorsional y global.

El pandeo local se caracteriza por la deformación de los elementos planos de la sección transversal, manteniéndose rectas las líneas de intersección entre elementos y sin variación de los ángulos entre ellos. El pandeo distorsional involucra un cambio en la forma de la sección transversal que incluye tanto traslación como rotación en las líneas de plegado. Por su parte, el pandeo global corresponde a los modos de inestabilidad del miembro como barra, incluyendo flexión, torsión o flexo-torsión, sin distorsión apreciable de la sección transversal.

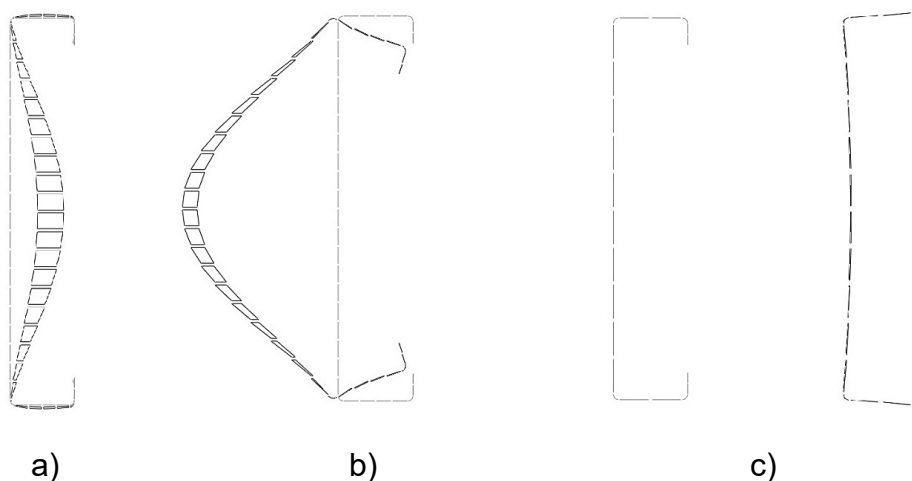


Figura 1. Pandeo local (a), pandeo distorsional (b) y pandeo global (c).

La Especificación aborda el estudio de la resistencia al pandeo local mediante dos metodologías: el Método del Ancho Efectivo (Effective Width Method, EWM) y el Método de Resistencia Directa (Direct Strength Method, DSM).

El EWM ha sido históricamente —y probablemente continúa siendo— el procedimiento más utilizado en la práctica profesional. Su amplia difusión se explica por el hecho de que, aun cuando su aplicación puede ser laboriosa, el procedimiento puede implementarse de manera relativamente directa mediante hojas o planillas de cálculo. Sin embargo, cuando se trata de secciones con geometría compleja, con

perforaciones o con detalles no convencionales, su aplicación puede volverse considerablemente más exigente desde el punto de vista operativo, llegando incluso a resultar poco práctica o inadecuada para representar con fidelidad dichas configuraciones.

En contraste, el método DSM ha sido asociado al uso de software especializado. Este método se basa en la carga crítica elástica de pandeo local. Para la determinación de la carga crítica de pandeo, la Especificación reconoce diversos métodos numéricos indicados en los comentarios del Apéndice 2 (AISI, 2024, Commentary C-2.2.2): el Método de la Franja Finita (Finite Strip Method), el Método de Elementos Finitos con elementos tipo placa o cascarón (Shell Finite Element Method), y la Teoría Generalizada de Vigas (Generalized Beam Theory), entre otros.

El Método de la Franja Finita, implementado en programas como CUFSM (Schafer, 2006), es eficiente para la determinación del pandeo elástico de secciones de acero conformado en frío.

No obstante, el Comentario de la Especificación señala explícitamente que mientras más compleja es la situación, mayor es la preferencia por el uso del método de elementos finitos tipo placa. En este contexto, el presente trabajo desarrolla una metodología basada en modelos de elementos finitos tipo placa para la determinación de la carga crítica elástica de pandeo local. El estudio se centra en casos de compresión pura y de flexión pura. A partir de los valores obtenidos de carga y momento crítico elásticos, se aplican las disposiciones del método DSM para el cálculo de la resistencia nominal. Los resultados obtenidos se comparan con aquellos determinados previamente mediante el método EWM, con el propósito de validar la metodología propuesta y poner en evidencia las ventajas del enfoque directo en distintos tipos de secciones.

La nomenclatura, simbología y abreviaciones empleadas en este trabajo son consistentes con las adoptadas por la Especificación AISI S100-2024.

MARCO NORMATIVO - MÉTODO DEL ANCHO EFECTIVO

El Método del Ancho Efectivo constituye el enfoque tradicional para considerar el pandeo local en miembros de acero conformado en frío. Este método conceptualiza al miembro como una colección de "elementos" (alas, almas, rigidizadores) y evalúa el pandeo local de cada elemento por separado. La resistencia se calcula mediante un ancho efectivo reducido que representa la capacidad post-pandeo del elemento.

Para el diseño a compresión, la resistencia nominal, P_{nl} , a pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global se calcula de acuerdo con la ecuación Eq. E3.1-1:

$$P_{nl} = A_e F_n \leq P_{ne}$$

donde F_n es el esfuerzo de compresión definido en la Sección E2, A_e es el área efectiva calculada para el esfuerzo F_n , y P_{ne} es la resistencia nominal considerando fluencia y pandeo global. El cálculo de A_e se hace en base a la suma de los anchos efectivos de cada elemento que compone la sección transversal.

Para el diseño a flexión, la resistencia nominal a pandeo local, M_{nl} , se determina según la ecuación Eq. F3.1-1:

$$M_{nl} = S_{ec} F_n \leq S_{et} F_y$$

donde S_{ec} es el módulo resistente elástico de la sección efectiva calculada para la fibra extrema en compresión para un esfuerzo F_n , S_{et} es el módulo resistente elástico de la sección efectiva para la fibra extrema en tracción con F_y . El cálculo del módulo resistente de la sección efectiva suele ser un proceso de naturaleza iterativa, ya que el eje neutro se va desplazando de su posición original hasta lograr la convergencia, y generalmente para ello son necesarias entre 3 a 5 iteraciones.

MARCO NORMATIVO - MÉTODO DE RESISTENCIA DIRECTA

Este método adopta un enfoque fundamentalmente distinto: todos los modos de pandeo se determinan para el miembro en su conjunto, garantizando compatibilidad y equilibrio en las uniones entre los elementos de la sección transversal. Como se indicó anteriormente, este método se basa en métodos de análisis numéricos para predecir la carga crítica de pandeo local. A continuación se indican los requerimientos de la Especificación para calcular el pandeo local haciendo uso del DSM.

Para miembros en compresión, la resistencia nominal, P_{nl} , a pandeo local se determina mediante la ecuación Eq. E3.2-1:

$$P_{nl} = 1.2 P_{ne} \left(\frac{1 + 0.10 \lambda_l^2}{1 + 0.55 \lambda_l^2} \right) \leq P_{ne}$$

Con:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}}$$

Donde P_{crl} es la carga crítica elástica de pandeo local. Este valor será determinado mediante análisis de pandeo utilizando elementos finitos tipo placa como se propone en este trabajo.

Para miembros sujetos a flexión, la resistencia nominal, M_{nl} , a pandeo local se determina con la ecuación Eq. F3.2-1:

$$M_{nl} = k_s \bar{M}_{ne} \left(\frac{1 + 0.10 \alpha_s \lambda_l^2}{1 + 0.55 \beta_s \lambda_l^2} \right) \leq M_{y3}$$

Con:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{\bar{M}_{ne}}{M_{crl}}}$$

$\alpha_s = 1$ para esquinas en compresión y 0 para otros casos

$$k_s = \frac{M_p}{M_y}$$

$$\beta_s = \frac{2y_c}{d} \geq 0.4$$

$$M_{y3} = M_p - (M_p - M_y)/9$$

$\bar{M}_{ne}$ = el menor entre M_{ne} y M_y

Donde M_{crl} es el momento crítico elástico de pandeo local, M_{ne} es el momento nominal a fluencia y pandeo global de acuerdo con la Sección F2.2. M_p y M_y son los momentos plástico y de fluencia respectivamente, de la sección transversal.

M_{crl} es el valor por determinar aplicando la metodología propuesta.

METODOLOGÍA – DESCRIPCIÓN GENERAL

La metodología propuesta se fundamenta en la modelación de miembros estructurales de acero conformado en frío mediante elementos finitos tipo placa (shell). El procedimiento general comprende las siguientes etapas:

- Creación del modelo de cálculo del miembro o perfil en cuestión con elementos finitos tipo placa.
- Aplicación de placas rígidas en los extremos del modelo para la transmisión de cargas. Estas placas garantizan la distribución de las cargas de acuerdo con el comportamiento esperado: distribución de esfuerzos uniformes para los casos de compresión y distribución lineal de esfuerzos gradientes para los casos de flexión.
- Ubicación del centroide de la sección transversal en cada extremo, es decir, el centroide estará contenido en las placas rígidas de extremo.
- Aplicación de apoyos necesarios y suficientes en el centroide.
- Aplicación de carga unitaria (compresión o momento flector).

Organiza:

- Ejecución del análisis de pandeo (eigen-buckling analysis).
- Identificación del modo de pandeo local y obtención del BLF (buckling load factor).
- Cálculo de la resistencia nominal mediante el DSM.

SOFTWARE UTILIZADO

Para la implementación de la metodología se emplea el programa de análisis y diseño estructural RAM Elements de Bentley Systems Inc. La elección de este software responde exclusivamente a la disponibilidad del mismo; la metodología es igualmente aplicable mediante cualquier otro software comercial que disponga de elementos finitos tipo placa y análisis de pandeo por autovalores, tales como SAP2000 o RFEM.

HERRAMIENTA DE GENERACIÓN DE MODELOS

La creación de modelos con elementos tipo placa para secciones de acero conformado en frío puede resultar laboriosa, particularmente cuando se estudian múltiples secciones y longitudes. Para agilizar este proceso, se desarrolló con ayuda de la IA, una aplicación web que permite definir elementos estructurales con secciones cold-formed y generar directamente un archivo DXF compatible con RAM Elements. Esta herramienta fue de gran utilidad para la generación sistemática de todos los casos analizados en el presente trabajo.

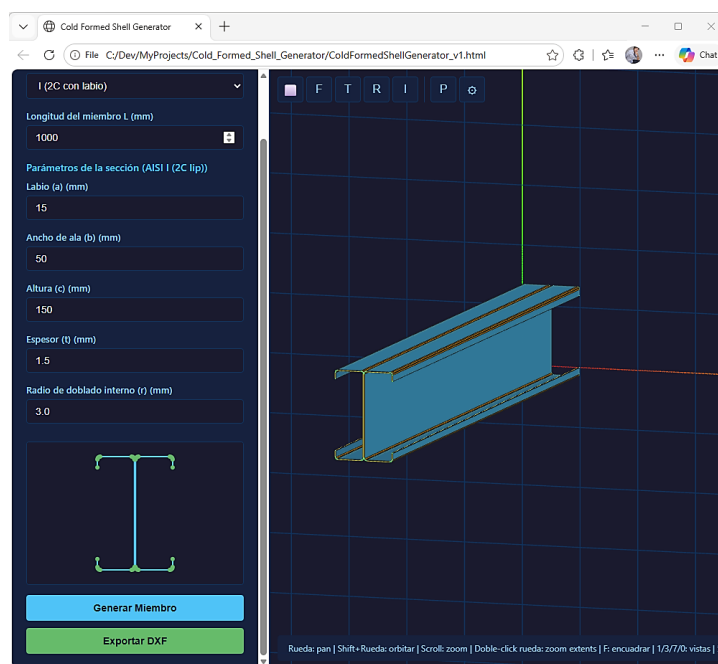


Figura 2. Herramienta desarrollada con IA para generar modelos DXF con placas.

MODELACIÓN

El miembro estructural se modela como un conjunto de elementos finitos tipo placa que reproducen la geometría de la sección transversal a lo largo de la longitud del miembro. Cada esquina se modela con tres elementos para formar la curvatura. En cada extremo del miembro se disponen placas rígidas que permiten la transmisión de las solicitaciones hacia la sección transversal. Es fundamental identificar la posición del centroide de la sección transversal en ambos extremos. En dicho centroide se aplican las condiciones de apoyo y las cargas, garantizando que la distribución de tensiones sea coherente con las hipótesis del tipo de esfuerzo requerido.

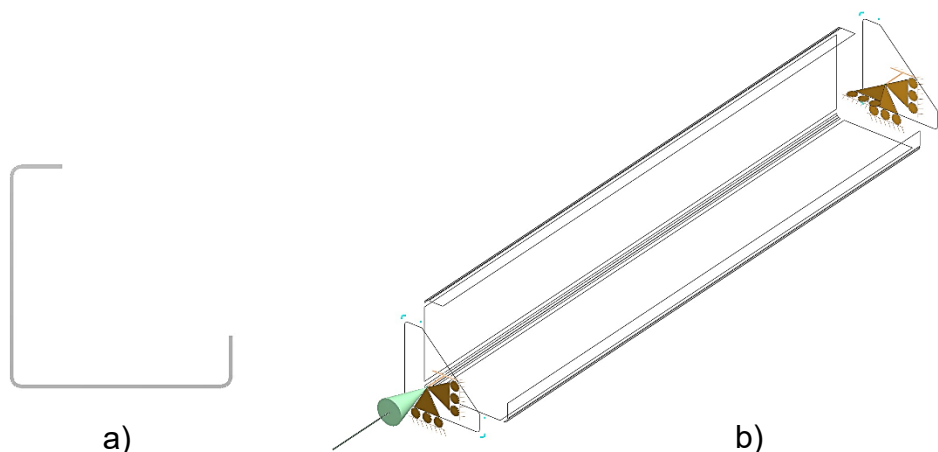


Figura 3. Angular con rigidizadores de borde en compresión pura: sección transversal (a) y modelo de cálculo (b) en el que se aprecian las placas rígidas de extremo, los centroides, la carga aplicada y las condiciones de apoyo.

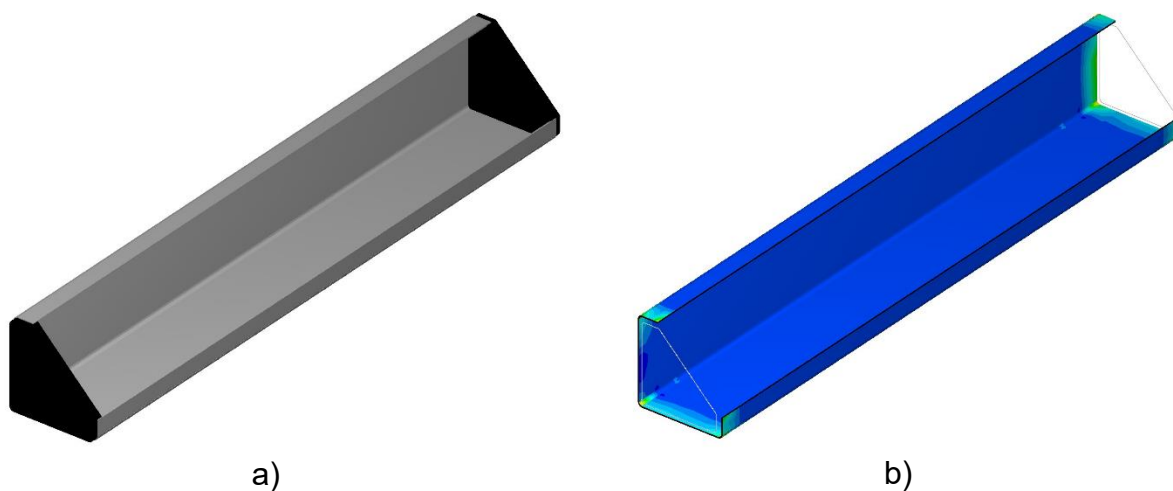


Figura 4. Modelo renderizado (a) y esfuerzos uniformes de compresión (b).



Figura 5. Poste de rack en flexión uniforme: sección transversal (a) y modelo de cálculo (b) en el que se aprecian las placas rígidas de extremo, los centroides, la carga aplicada y las condiciones de apoyo.

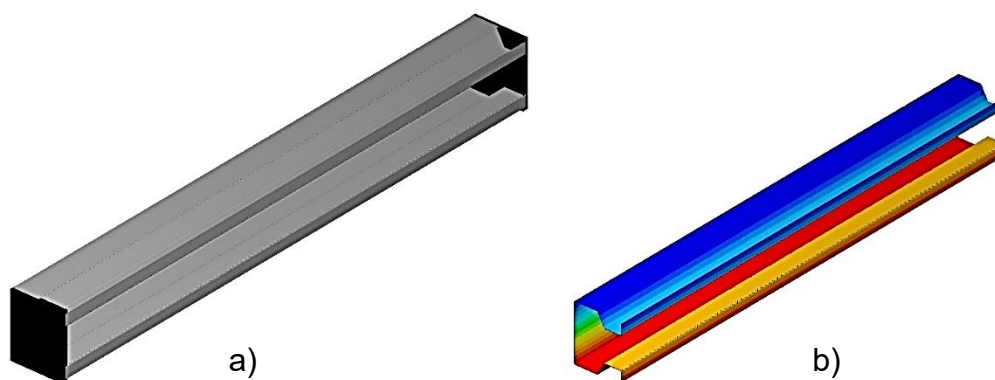


Figura 6. Modelo renderizado (a) y esfuerzos gradiente por flexión (b).

CONDICIONES DE CARGA

Para el caso de compresión pura, se aplica una carga de compresión unitaria ($P = 1$, ver Figura 3) en el centroide de uno de los extremos del miembro, manteniendo el extremo opuesto restringido adecuadamente. Al ser la carga unitaria, el Factor de Carga de Pandeo (BLF — Buckling Load Factor) obtenido del análisis corresponde directamente a la carga elástica crítica de pandeo:

$$P_{crl} = BLF \times P = BLF \times 1 = BLF$$

Para el caso de flexión pura, se aplican momentos flectores unitarios opuestos ($M = 1$, ver Figura 5) en ambos extremos del miembro, de modo que el elemento quede sujeto a un momento flector uniforme a lo largo de toda su longitud. Análogamente:

$$M_{crl} = BLF \times M = BLF \times 1 = BLF$$

ANÁLISIS DE PANDEO

El análisis de pandeo (eigen-buckling analysis) resuelve el problema de valores propios generalizado:

$$[K + \lambda K_g]\phi = 0$$

donde K es la matriz de rigidez elástica, K_g es la matriz de rigidez geométrica, λ es el eigenvalor (BLF) y ϕ es el eigenvector (modo de pandeo).

El resultado del análisis proporciona una serie de modos de pandeo ordenados de menor a mayor BLF. Es necesario realizar una inspección visual de los modos de pandeo para identificar correctamente el modo de pandeo local, descartando aquellos que correspondan a:

- Pandeo global (flexural, torsional, flexo-torsional o lateral-torsional).
- Pandeo distorsional.
- Modos acoplados que no representen pandeo local puro.

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA NOMINAL

Una vez determinadas las cargas elásticas críticas de pandeo local P_{cr1} (compresión) o M_{cr1} (flexión), se aplican las ecuaciones del DSM descritas en el marco normativo para obtener las resistencias nominales a pandeo local P_{nl} y M_{nl} , respectivamente.

CASOS DE ESTUDIO

Se analizan seis tipos de secciones representativas de la práctica constructiva en acero conformado en frío, considerando casos de compresión y flexión puras. Para cada sección se evalúan distintas longitudes, cubriendo un rango de esbeltez que abarca desde el dominio del pandeo local hasta el control por pandeo global.

A continuación se indican las secciones utilizadas para los casos de compresión pura:

N°	Sección	Descripción
1	PGU 100x90	Perfil U – Steel Frame
2	Clip 72x36x15x1	Perfil C con rigidizador de borde
3	Le 70x17x1.20	Perfil ángulo con rigidizador de borde
4	Hat 50x100x20x2	Perfil sombrero
5	I2PGC150x2	Perfil I formado por 2 perfiles C
6	RackPost 120x3.75	Perfil tipo poste de rack

Tabla 1. Perfiles utilizados para los casos de compresión.

Para los casos de flexión pura se consideraron las siguientes secciones:

N°	Sección	Descripción
1	PGU 100x90	Perfil U – Steel Frame
2	PGC 100x90	Perfil C – Steel Frame
3	Le 110x17x1.20	Perfil ángulo con rigidizador
4	Hat 50x100x20x0.9	Perfil sombrero
5	I2PGC150x0.9	Perfil I formado por 2 perfiles C
6	RackPost 120x0.9	Perfil tipo poste de rack

Tabla 2. Perfiles utilizados para los casos de flexión.

Para todos los casos, las resistencias a pandeo local mediante EWM se calcularon con planillas propias y se validaron con los programas CFS y RAM Elements.

PERFIL PGU 100x90 – COMPRESIÓN PURA

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	P_{ne} [kN]	P_{crl} [kN]	P_{nl} [kN]	
			EWM	DSM
600	31.49	9.06	15.68	17.49
1200	19.09	8.92	11.58	12.78
1800	9.31	8.90	7.35	7.83
2400	5.24	8.89	4.95	5.03
3000	3.35	8.88	3.35	3.46

Tabla 3. Perfil PGU 100x90 compresión pura – resultados.

PERFIL CLIP 72x36x15x1 – COMPRESIÓN PURA

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	P_{ne} [kN]	P_{crl} [kN]	P_{nl} [kN]	
			EWM	DSM
250	39.98	34.03	35.22	32.57
500	37.11	32.91	32.99	30.58
750	32.86	32.71	29.65	27.95
1000	27.84	31.15	25.62	24.40
1250	22.68	31.25	21.38	20.87
1500	17.86	31.17	17.31	17.23
1750	13.69	31.12	13.66	13.81
2000	10.82	31.08	10.82	11.28

Tabla 4. Perfil Clip 72x36x15x1 compresión pura – resultados.

PERFIL LE 70x17x1.20 – COMPRESIÓN PURA

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	P_{ne} [kN]	P_{crl} [kN]	P_{nl} [kN]	
			EWM	DSM
250	44.69	47.41	35.20	38.65
500	31.06	45.47	27.85	28.94
750	18.20	45.09	18.20	18.60
1000	11.34	44.94	11.34	12.25
1250	8.16	44.89	8.16	9.06

Tabla 5. Perfil Le 70x17x1.20 compresión pura – resultados.

PERFIL HAT 50x100x20x2 – COMPRESIÓN PURA

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	P_{ne} [kN]	P_{crl} [kN]	P_{nl} [kN]	
			EWM	DSM
200	110.46	206.67	105.12	107.91
400	104.37	189.20	99.96	101.39
600	95.29	185.95	92.29	93.78
800	84.46	184.48	82.94	84.67
1000	73.10	183.97	72.92	74.85

Tabla 6. Perfil Hat 50x100x20x2 compresión pura – resultados.

PERFIL I2PGC150x2 – COMPRESIÓN PURA

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	P_{ne} [kN]	P_{crl} [kN]	P_{nl} [kN]	
			EWM	DSM
600	228.45	199.43	183.33	187.45
1200	190.44	196.54	158.03	163.52
1800	140.61	195.46	123.38	129.59
2400	91.79	195.45	86.89	91.65
3000	58.75	195.35	58.75	62.31
3600	40.80	195.18	40.80	44.83

Tabla 7. Perfil I2PGC150x2 compresión pura – resultados.

PERFIL RACKPOST 120x3.75 – COMPRESIÓN PURA

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	P_{ne} [kN]	P_{cri} [kN]	P_{nl} [kN]	
			EWM	DSM
600	313.49	1432.62	313.49	343.12
1200	272.32	1406.81	272.32	301.06
1800	219.18	1402.00	219.18	245.98
2400	166.83	1400.00	166.83	190.12
3000	122.28	1400.00	122.28	141.23

Tabla 8. Perfil RackPost 120x3.75 compresión pura – resultados.

COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS CASOS DE COMPRESIÓN PURA

PGU 100x90 ($\lambda_l = 1.87 \rightarrow 0.61$)

Resistencias hasta 11.6% superiores de DSM sobre EWM cuando el pandeo local controla el diseño. A medida que el pandeo global se hace crítico, esta diferencia disminuye hasta converger en la resistencia a pandeo global.

Clip 72x36x15x1 ($\lambda_l = 1.08 \rightarrow 0.59$)

Para longitudes cortas a intermedias EWM proporciona resistencias mayores que DSM, invirtiéndose esta tendencia para longitudes mayores ($L \geq 1750$ mm).

Le 70x17x1.20 ($\lambda_l = 0.97 \rightarrow 0.43$)

DSM supera a EWM en todas las longitudes analizadas.

Hat 50x100x20x2 ($\lambda_l = 0.73 \rightarrow 0.63$)

Las diferencias son pequeñas y estables con DSM levemente por encima de EWM.

I2PGC 150x2.0 ($\lambda_l = 1.07 \rightarrow 0.46$)

Tendencia clara y ventaja de DSM a medida que disminuye λ_l (aumenta la longitud). Es uno de los perfiles donde mejor se aprecia la relación inversa entre esbeltez local y beneficio del DSM.

RackPost 120x3.75 ($\lambda_l = 0.47 \rightarrow 0.30$)

Presenta las mayores diferencias de toda la investigación: +9.5% a +15.5%, crecientes con la longitud. Al tratarse de un perfil con secciones muy robustas localmente (λ_l bajo en todo el rango estudiado), evidencia el caso más favorable para el DSM, y probablemente sea el ejemplo más representativo para ilustrar el incremento significativo que se menciona en el resumen.

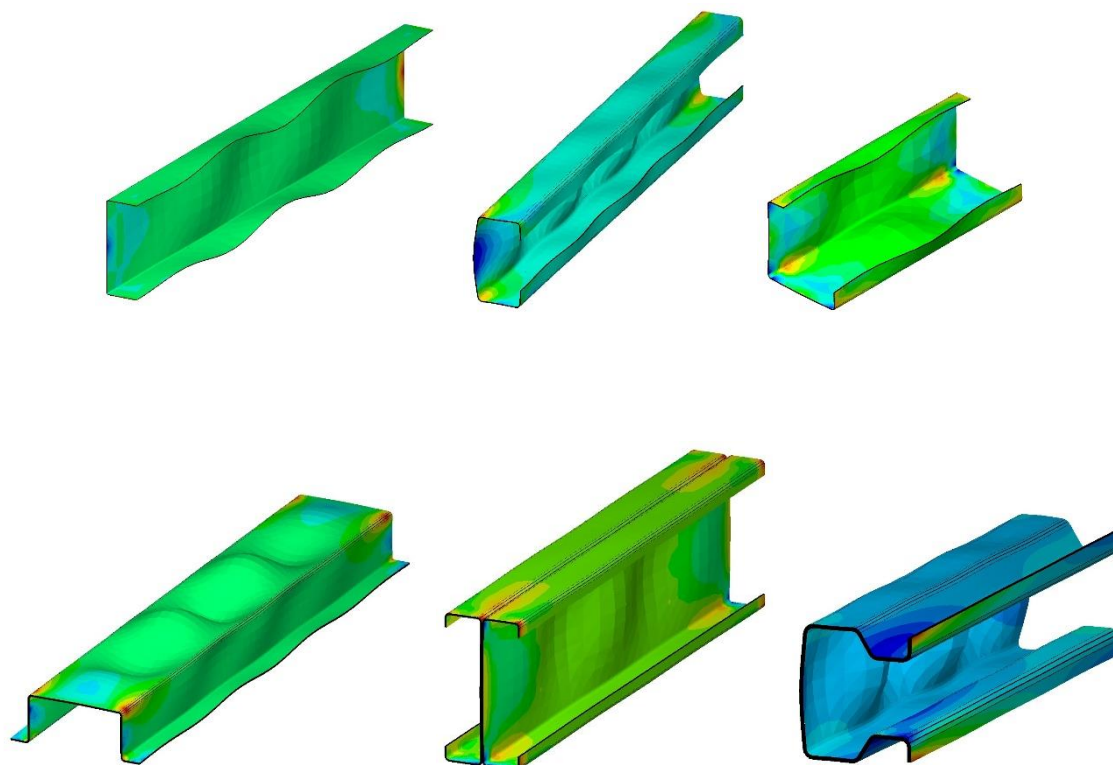


Figura 7. Modos de pandeo local para las secciones de estudio – compresión pura.

PERFIL PGU 100x90 – FLEXIÓN PURA EJE PRINCIPAL MAYOR

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	M_{cre} [kN-m]	M_{ne} [kN-m]	M_{cri} [kN-m]	M_{nl} [kN-m]	
				EWM	DSM
600	4.09	1.13	0.50	0.81	0.73
1200	1.05	0.91	0.50	0.65	0.63
1800	0.49	0.49	0.49	0.39	0.41
2400	0.29	0.29	0.49	0.25	0.27
3000	0.20	0.20	0.49	0.18	0.20

Tabla 9. Perfil PGU 100x90 flexión alrededor del eje mayor – resultados.

PERFIL PGC 100x90 – FLEXIÓN PURA EJE PRINCIPAL MAYOR

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	M_{cre} [kN-m]	M_{ne} [kN-m]	M_{cri} [kN-m]	M_{nl} [kN-m]	
				EWM	DSM
600	11.66	1.42	2.25	1.35	1.31
1200	2.95	1.42	2.24	1.31	1.30
1800	1.33	1.14	2.24	1.09	1.09
2400	0.77	0.77	2.24	0.77	0.78
3000	0.50	0.50	2.24	0.50	0.53

Tabla 10. Perfil PGC 100x90 flexión alrededor del eje mayor – resultados.

PERFIL LE 110x17x1.20 – FLEXIÓN PURA EJE PRINCIPAL MAYOR

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	M_{cre} [kN-m]	M_{ne} [kN-m]	M_{cri} [kN-m]	M_{nl} [kN-m]	
				EWM	DSM
500	20.49	2.26	1.88	1.17	1.88
1000	5.42	2.26	1.85	1.15	1.87
1500	2.22	2.02	1.84	1.06	1.74
2000	1.62	1.62	1.84	0.94	1.51
2500	1.15	1.15	1.84	0.80	1.18
3000	0.88	0.88	1.82	0.69	0.96

Tabla 11. Perfil Le 110x17x1.20 flexión alrededor del eje mayor – resultados.

PERFIL Hat 50x100x20x0.9 – FLEXIÓN PURA EJE PRINCIPAL MAYOR (eje vertical)

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	M_{cre} [kN-m]	M_{ne} [kN-m]	M_{cri} [kN-m]	M_{nl} [kN-m]	
				EWM	DSM
500	22.69	1.47	1.75	1.35	1.57
1000	5.72	1.47	1.74	1.35	1.57
1500	2.58	1.47	1.73	1.28	1.57
2000	1.48	1.36	1.73	1.12	1.48
2500	0.97	0.97	1.73	0.92	1.13
3000	0.69	0.69	1.72	0.69	0.85

Tabla 12. Perfil Hat 50x100x20x0.9 flexión alrededor del eje mayor – resultados.

PERFIL I2PGC 150x0.9 – FLEXIÓN PURA EJE PRINCIPAL MAYOR

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	M_{cre} [kN-m]	M_{ne} [kN-m]	M_{cri} [kN-m]	M_{nl} [kN-m]	
				EWM	DSM
600	66.19	4.91	3.97	4.62	3.91
1200	16.59	4.91	3.96	4.62	3.91
1800	7.41	4.69	3.95	4.30	3.79
2400	4.19	3.81	3.95	3.68	3.25
3000	2.71	2.71	3.95	2.71	2.51
3600	1.90	1.90	3.95	1.90	1.88

Tabla 13. Perfil I2PGC 150x0.9 flexión alrededor del eje mayor – resultados.

PERFIL RackPost 120x0.9 – FLEXIÓN PURA EJE PRINCIPAL MAYOR

Se tienen los siguientes resultados:

L [mm]	M_{cre} [kN-m]	M_{ne} [kN-m]	M_{cri} [kN-m]	M_{nl} [kN-m]	
				EWM	DSM
1000	105.98	2.86	3.26	2.58	2.65
2000	26.56	2.86	3.26	2.58	2.65
3000	11.86	2.86	3.26	2.58	2.65
4000	6.71	2.86	3.26	2.54	2.65
5000	4.30	2.85	3.26	2.38	2.64
6000	3.03	2.53	3.26	2.19	2.41

Tabla 14. Perfil RackPost 120x0.9 flexión alrededor del eje mayor – resultados.

COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS CASOS DE FLEXIÓN PURA

PGU 100x90 ($\lambda_l = 1.51 \rightarrow 0.63$)

Para las longitudes menores, en las que la esbeltez local es elevada ($\lambda_l > 1.4$), DSM entrega valores ligeramente inferiores a EWM. Al aumentar la longitud, el pandeo lateral global comienza a gobernar y la relación se invierte, superando las resistencias de DSM a las de EWM.

PGC 100x90 ($\lambda_l = 0.79 \rightarrow 0.47$)

Coincidencia casi exacta entre los valores de DSM y EWM.

Le 110x17x1.20 ($\lambda_l = 1.10 \rightarrow 0.70$)

Este perfil constituye el caso más destacado del estudio a flexión. DSM supera a EWM en todo el rango de longitudes, con un incremento que alcanza el 61% en el miembro más corto y se mantiene por encima del 40% en longitudes intermedias. El

resultado ilustra el potencial DSM para aprovechar capacidad que EWM desestima en secciones de geometría no convencional.

Hat 50x100x20x0.9 ($\lambda_l = 0.91 \rightarrow 0.63$)

Los resultados favorecen a DSM con diferencias considerables que llegan al 32% en las longitudes intermedias. DSM, al evaluar la sección como un conjunto, reconoce la reserva post-pandeo disponible y entrega resistencias apreciablemente mayores a lo largo de todo el rango de longitudes.

I2PGC 150x0.9 ($\lambda_l = 1.11 \rightarrow 0.69$)

Este es el único caso a flexión en el que EWM resulta más favorable que DSM. Sin embargo, es importante aclarar que esta aparente ventaja de EWM se debe a una simplificación en el tratamiento de la sección compuesta. EWM asume que ambas secciones PGC que conforman el perfil I interactúan monolíticamente como un único elemento, lo cual no refleja la realidad física del miembro. En este caso específico, ambas secciones se encuentran unidas mediante tornillos espaciados cada 150 mm a lo largo de toda la longitud del miembro. En contraste, el modelo con elementos finitos tipo placa captura fielmente esta condición mediante la representación explícita de los tornillos como elementos lineales. Esta modelación más realista permite que el análisis de pandeo por autovalores identifique no solo los modos de pandeo acoplados entre ambas secciones, sino también los modos de pandeo independientes de cada sección individual, así como los modos localizados en las zonas de conexión. En consecuencia, DSM proporciona una predicción de resistencia más veraz del comportamiento real de la estructura.

RackPost 120x0.9 ($\lambda_l = 0.94 \rightarrow 0.88$)

En este perfil, DSM supera a EWM en todas las longitudes, con una ventaja que crece de forma sostenida, desde cerca del 3% en el miembro más corto hasta aproximadamente el 11% en los más largos.

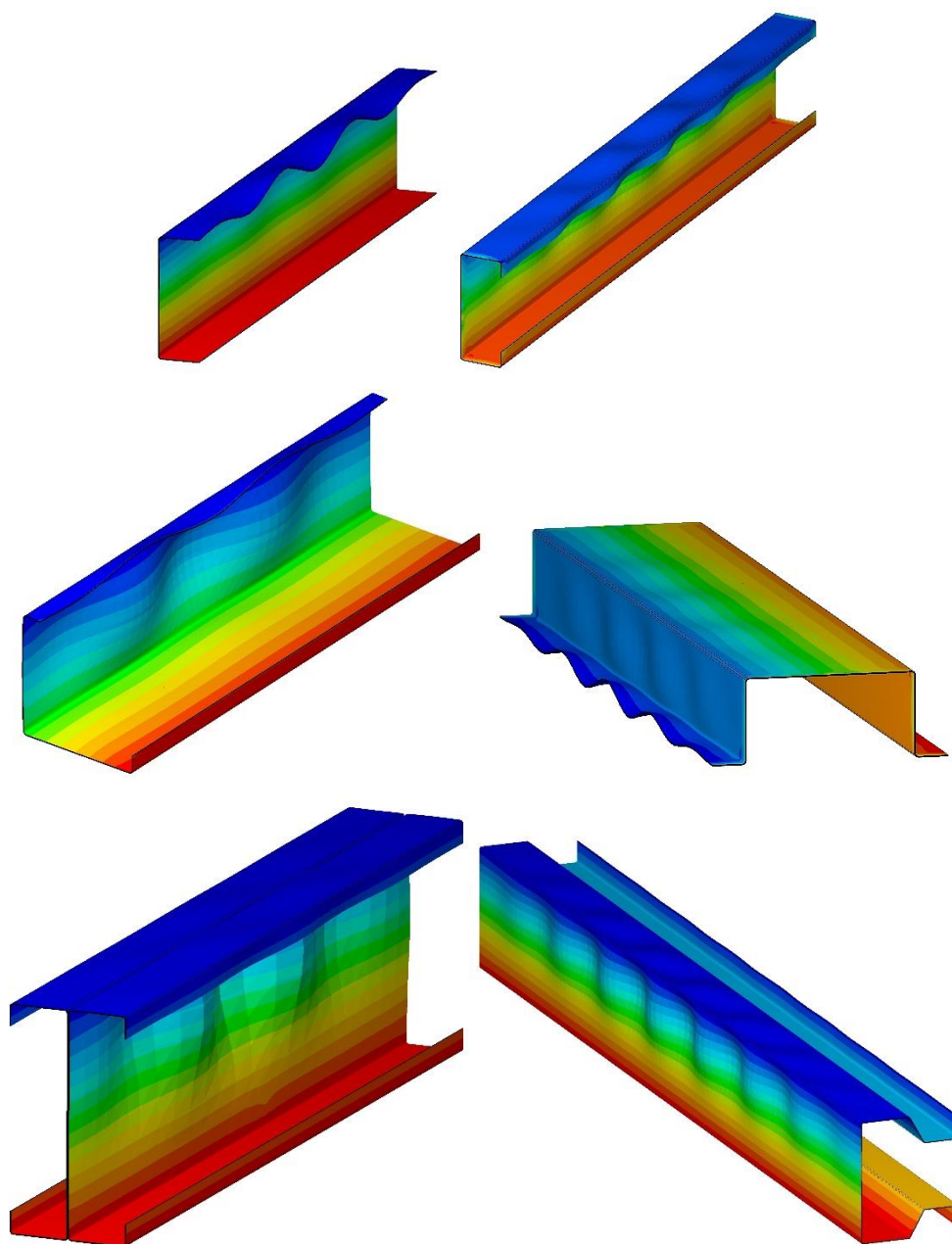


Figura 8. Modos de pandeo local para las secciones de estudio – flexión pura.

VENTAJAS DE DSM ANTE EL AUMENTO DE LA COMPLEJIDAD

Si bien los casos de estudio presentados corresponden a secciones típicas, sin perforaciones y con configuraciones estándar, el objetivo de esta selección fue validar la metodología propuesta frente a EWM sobre una base de comparación común. Sin embargo, la ventaja de DSM se acentúa —y en muchos casos se vuelve indispensable— a medida que aumenta la complejidad geométrica de la sección transversal o del miembro estructural.

EWM exige idealizar la sección como una colección de elementos individuales (almas, alas, rigidizadores de borde o intermedios), cada uno verificado mediante ecuaciones de ancho efectivo calibradas para geometrías estándar. Esta hipótesis de comportamiento por elemento se vuelve cada vez más difícil de sostener, o directamente inaplicable, en secciones con perforaciones (que alteran la sección neta y generan concentración de esfuerzos alrededor de los huecos), con múltiples rigidizadores intermedios o de borde de geometría no convencional (no cubiertos por las ecuaciones estándar de la Especificación), o en miembros armados por más de un perfil unido mediante conectores discretos (tornillos, remaches), donde la hipótesis de acción monolítica entre componentes deja de ser representativa.

El caso del perfil I2PGC 150x0.9 en flexión, presentado en este trabajo, ilustra esta ventaja de DSM más allá de la comparación numérica de resistencias. EWM, al idealizar ambas secciones PGC como un único elemento monolítico, no logra representar que en la realidad ambas secciones se encuentran unidas mediante tornillos espaciados cada 150 mm. El modelo de elementos finitos tipo placa, en cambio, representa explícitamente los conectores como elementos lineales, permitiendo que el análisis de pandeo por autovalores identifique tanto los modos acoplados entre ambas secciones como los modos independientes y los localizados en las zonas de conexión. En consecuencia, DSM entrega una predicción más representativa del comportamiento físico real del miembro, no solo una diferencia numérica de resistencia.

Esta observación es consistente con lo señalado en el Comentario de la Especificación (AISI, 2024, C-2.2.2), que recomienda expresamente el uso de elementos finitos tipo placa cuanto mayor es la complejidad de la situación analizada.

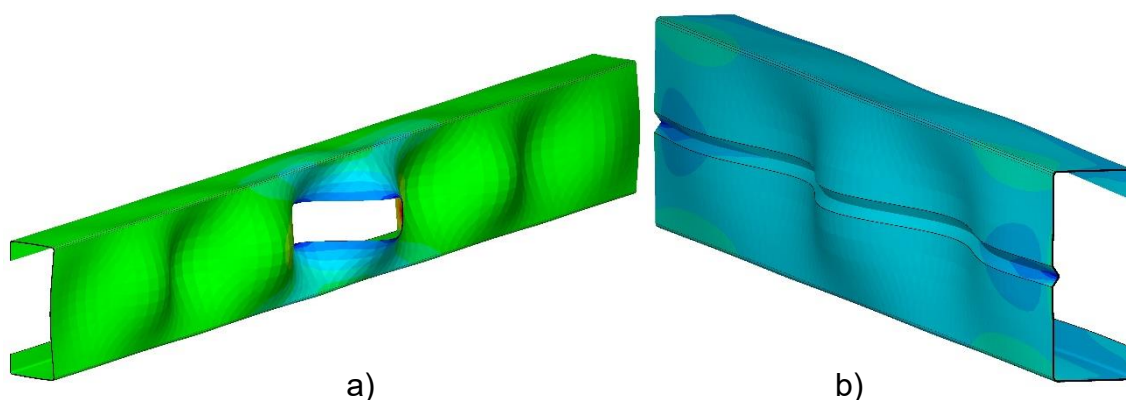


Figura 9. Pandeo local en miembro con hueco (a) y en perfil con rigidizador intermedio (b).

CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló y aplicó una metodología basada en modelos de elementos finitos tipo placa para la determinación de la carga y el momento crítico elástico de pandeo local, con el fin de calcular la resistencia nominal mediante el Método de Resistencia Directa (DSM). A partir del análisis comparativo con el Método del Ancho Efectivo (EWM) para seis tipos de secciones representativas, tanto en compresión como en flexión puras, se establecen las siguientes conclusiones:

- La metodología propuesta constituye una alternativa viable, general y eficiente para incorporar el pandeo local en el diseño de miembros de acero conformado en frío.
- El análisis de pandeo por autovalores con elementos finitos tipo placa permite obtener directamente los valores de P_{cr} y M_{cr} requeridos por DSM.
- En los casos de compresión pura, DSM proporcionó resistencias iguales o superiores a las de EWM en la mayoría de las secciones analizadas. El beneficio del DSM resultó inversamente proporcional a la esbeltez local: a menor esbeltez, mayor fue el aprovechamiento de la reserva post-pandeo. El caso más favorable correspondió al perfil RackPost 120x3.75, con incrementos de entre 9.5% y 15.5%, mientras que el perfil Clip 72x36x15x1 mostró la única inversión de la tendencia en longitudes cortas a intermedias.
- En los casos de flexión pura, el comportamiento fue más variado y dependiente de la geometría de la sección. El perfil Le 110x17x1.20 constituyó el resultado más destacado, con incrementos en DSM sobre EWM que alcanzaron el 61% en el miembro más corto. El perfil Hat en su eje débil mostró ventajas de hasta 32%, mientras que las secciones con rigidizadores de borde y baja esbeltez local exhibieron una coincidencia entre ambos métodos.
- El único caso en que EWM resultó numéricamente más favorable que DSM fue el perfil compuesto I2PGC 150x0.9 en flexión. No obstante, dicha diferencia no representa una ventaja real de EWM, sino una consecuencia de su hipótesis de comportamiento monolítico de la sección compuesta. El modelo con elementos finitos tipo placa, al representar explícitamente los conectores, reproduce con mayor fidelidad el comportamiento real del miembro y, por tanto, entrega una predicción más veraz de su resistencia.

En conjunto, los resultados confirman que DSM permite en numerosos casos un incremento significativo de la resistencia nominal respecto a EWM, a la vez que amplía el alcance del diseño a configuraciones que el método tradicional aborda con dificultad o no logra representar adecuadamente.

RECOMENDACIONES

La aplicación de la metodología propuesta requiere criterio ingenieril en su implementación. Con base en la experiencia adquirida durante el desarrollo del presente trabajo, se formulan las siguientes recomendaciones prácticas.

- **Identificación del modo de pandeo.** Es indispensable realizar una inspección visual de los modos obtenidos del análisis por autovalores, a fin de aislar correctamente el pandeo local y descartar los modos globales, distorsionales o acoplados. Esta etapa es la que demanda mayor experiencia.
- **Modelación de la sección.** Se recomienda modelar cada esquina con al menos tres elementos para representar adecuadamente la curvatura del plegado, así como disponer placas rígidas en los extremos y aplicar las cargas y apoyos en el centroide, garantizando distribuciones de tensiones coherentes con el tipo de solicitación analizada.
- **Secciones compuestas.** En perfiles conformados por más de una sección unida mediante conectores, se recomienda representar explícitamente dichos conectores en el modelo, de modo que el análisis capture tanto los modos acoplados como los modos independientes y localizados en las zonas de conexión.

BIBLIOGRAFÍA

AISI (2024). ANSI/SDI AISI S100-2024, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Steel Deck Institute, Florence, SC.

Hancock G.J., Murray, T. and Ellifritt D. (2001). Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification, Marcel Dekker, New York.

Schafer, B.W., Peköz, T. (1998). "Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions." Proceedings of the 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, MO, pp. 69–76.

Schafer, B.W. (2008). "Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design." Journal of Constructional Steel Research, 64(7/8), 766-778.

Schafer, B.W. (2019). "Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design." Thin-Walled Structures, Vol. 140, pp. 533–541.