RESUMEN TÉCNICO · TRADUCCIÓN NO OFICIAL

Estudio paramétrico de un perfil de acero conformado en frío empleado en losas nervuradas mixtas

Síntesis en español del artículo original

André V.S. Gomes, Daniel C.M. Candido, Lucas F. Favarato, Johann A. Ferrareto, Juliana C. Vianna, Adenilcia F.G. Calenzani

Universidad Federal de Espírito Santo, Programa de Posgrado en Ingeniería Civil, Vitória, ES, Brasil · ArcelorMittal Tubarão – Flat Carbon Steel, Serra, ES, Brasil · ArcelorMittal Construction, Francia.

Documento de síntesis con fines internos. Elaborado a partir de: A.V.S. Gomes, D.C.M. Candido, L.F. Favarato, J.A. Ferrareto, J.C. Vianna, A.F.G. Calenzani, "Parametric study of a cold-formed steel profile employed in composite ribbed slabs", *Thin-Walled Structures* 216 (2025) 113742 (DOI: 10.1016/j.tws.2025.113742). No es una publicación de Elsevier ni sustituye al artículo original en inglés, que prevalece. Se traducen el resumen y las conclusiones como cita; el resto es una síntesis propia de contenido; las tablas reproducen datos numéricos del estudio y el gráfico es de elaboración propia.

Resumen

Los sistemas estructurales compuestos por sistemas de piso prefabricados y/o elementos de acero conformado en frío se emplean con frecuencia en la construcción por su versatilidad, su alta relación resistencia-peso y su facilidad de prefabricación, transporte y montaje en obra. La unificación de estos sistemas motivó la creación de las **losas nervuradas mixtas**, definidas en esta investigación como sistemas de piso nervurados en los que se emplean elementos de acero conformado en frío como viguetas y el espacio entre ellas se rellena con elementos inertes —la llamada **solución Trelifácil®**. El foco de la investigación es desarrollar estudios paramétricos para examinar la **capacidad a flexión y la rigidez** del perfil conformado en frío utilizado en la solución Trelifácil®. Se desarrolló un modelo de elementos finitos con **ANSYS® 2020R1**, validado con ensayos experimentales, para predecir el comportamiento a flexión y realizar dicho análisis. Adicionalmente, se desarrolla un modelo de elementos finitos de la configuración completa de la solución Trelifácil® para estudiar la interacción entre la armadura de celosía y el elemento de acero conformado en frío.

Palabras clave: análisis numérico; estructuras de acero conformado en frío; solución Trelifácil®; modelado por elementos finitos.

1. Introducción

La industria de la construcción avanza hacia soluciones más eficientes y económicas, en las que los sistemas prefabricados destacan por fabricarse en ambiente controlado y por su rápida instalación. Entre ellos, las armaduras de celosía (viguetas armadas) y los perfiles de acero conformado en frío (ACF) son el foco del trabajo. Los modelos de elementos finitos (EF) validados con datos experimentales se emplean habitualmente para evaluar la resistencia y la rigidez de perfiles ACF y permiten extender los resultados de laboratorio (concepto análogo al de "gemelo digital") sin recurrir únicamente a ensayos destructivos, costosos y de montaje complejo.

La revisión de la literatura (Torabian y Schafer; Kumar y Sahoo; Oey y Papangelis; Gkantou *et al.*; He *et al.*, entre otros) indica que las ecuaciones normalizadas —del código norteamericano AISI-S100, del Eurocódigo

y del Método de la Resistencia Directa (DSM)— tienden a ser **conservadoras** para perfiles flexionados respecto al eje menor de inercia. En ese contexto, el objetivo del estudio es realizar un análisis paramétrico para examinar la influencia de la **longitud del vano** y del **espesor de la sección** sobre la capacidad a flexión y la rigidez del perfil ACF de la solución Trelifácil® , así como estudiar, mediante un modelo de la configuración completa, la interacción entre la armadura de celosía y el perfil.

2. Metodología

2.1 Programa experimental

Perfil ACF. Se utilizó el modelo de EF validado por Gomes *et al.* [21], calibrado contra ensayos de flexión de cuatro puntos. Se ensayaron dos grupos de tres probetas, designados por su vano libre: los perfiles cortos (P0.5) con vano de 0,5 m (P0.5a/b/c) y las vigas de 0,90 m (P0.9a/b/c). Los ensayos se realizaron respecto al eje menor de inercia (labios en compresión), tal como en la aplicación final. Los datos se reportan mediante las cargas máximas P_u y los momentos flectores últimos M_u.

Configuración completa Trelifácil®. Para validar los modelos de la celosía acoplada al perfil ACF se emplearon los ensayos de flexión de cuatro puntos de Candido *et al.* [23]: cuatro grupos de dos probetas, designados por vano libre (1,0 / 1,4 / 1,8 m) y altura de la celosía (16 cm y 12 cm): PST1.0_16, PST1.4_16, PST1.8_16 y PST1.8_12.

2.2 Validación del modelo de elementos finitos

Perfil ACF. Se analizaron elementos tipo *shell* (SHELL181 y SHELL281, seis grados de libertad por nodo). Un estudio de malla, con tamaños de 100 mm a 3,5 mm, mostró convergencia rápida; se adoptó una malla de **4 mm (~33.000 elementos)**, con una desviación de solo 0,1 % respecto a la malla más fina, y se seleccionó el elemento **SHELL181**. Se empleó modelo de material multilineal, control por desplazamiento y método de Newton-Raphson completo con amortiguamiento artificial; no se aplicaron imperfecciones geométricas iniciales por su bajo impacto en el momento último. La relación media $M_{u,FE}/M_{u,exp}$ fue de **1,03**, indicando buena concordancia.

Configuración completa. El perfil ACF se representó con SHELL181 (4 mm) y endurecimiento isótropo multilineal; la **celosía** se modeló con elementos de viga **BEAM188** (11 elementos en las diagonales y 22 en los cordones superior e inferior), con material elástico-perfectamente plástico. Los separadores plásticos se simularon acoplando los grados de libertad (GDL) de nodos próximos a la conexión. Un estudio de sensibilidad de tres esquemas de acoplamiento (casos i, ii, iii) mostró que la acción mixta es más sensible al acoplamiento de los desplazamientos longitudinales (UZ) que al de los GDL de rotación: el caso (iii) aumentó la capacidad y la rigidez más del 50 % respecto al caso (i), mientras que el caso (ii) quedó por debajo del 10 %. La validación se realizó con el caso (i) —solo acoplamiento UX— dentro de la región del Estado Límite de Servicio (ELS) con desplazamiento límite **L/350** según la norma brasileña ABNT NBR 14762:2010; se consideraron solo los grupos de 1,4 y 1,8 m (el de 1,0 m colapsó en los apoyos). La relación media numérico/experimental fue de **0,96**.

2.3 Predicciones teóricas y 2.4 técnica del análisis paramétrico

Las predicciones teóricas de resistencia nominal a flexión se obtuvieron con el **Método de la Resistencia Directa (DSM)** de la ABNT NBR 14762:2010, y los momentos críticos de pandeo local y distorsional con el programa de fajas finitas **CUFSM**; en todos los casos, el **pandeo distorsional controló** la capacidad. Se

usaron valores medios de espesor (0,52 mm) y tensión de fluencia (290 MPa). Para el estudio paramétrico, siguiendo el Eurocódigo EN 1993-1-3, la distancia entre puntos de carga se fijó en 0,33 × vano; se restringieron los desplazamientos horizontales transversales (Ux) en ambos extremos y el longitudinal (Uz) en un extremo.

3. Resultados y discusión

3.1–3.2 Perfil de acero conformado en frío

El estudio paramétrico abarcó **8 longitudes de vano** (0,6 a 2,0 m) y **3 espesores** (0,65; 0,80 y 1,08 mm), totalizando **24 vigas**. La capacidad a momento resultó mayor para secciones más gruesas y crece de forma más gradual en las más delgadas; para vanos largos tiende a estabilizarse. Al comparar DSM con EF, el DSM resultó **conservador**, con mejor concordancia en vanos largos y secciones gruesas. Para vanos cortos aparece mayor divergencia: el DSM aumenta la resistencia al disminuir el vano, mientras que en EF ocurre lo contrario (influencia de estados límite asociados al aplastamiento en los puntos de carga y a la interacción cortante-flexión, fuera del alcance de este trabajo). Las relaciones medias $M_{u,FE}/M_{DSM}$ fueron:

Espesor	t = 0,65 mm	t = 0,80 mm	t = 1,08 mm
Media $M_{u,FE}/M_{DSM}$	1,37	1,30	1,16
Desviación estándar	0,22	0,17	0,11

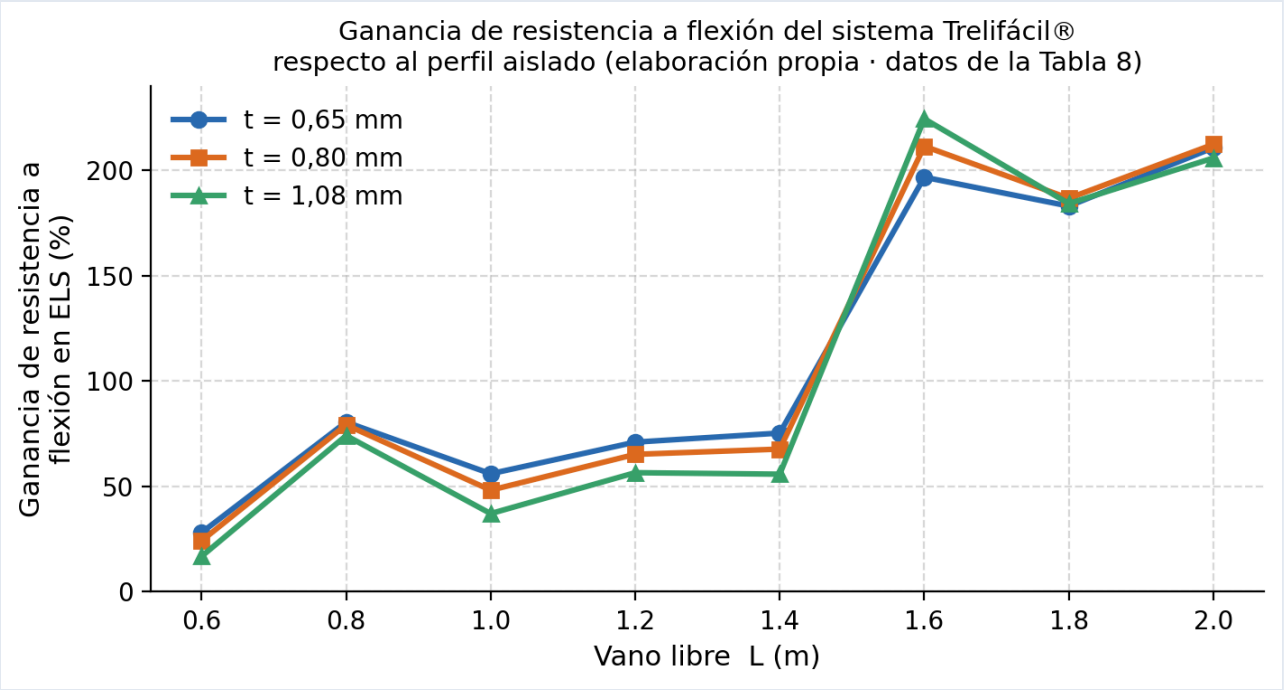
Datos del estudio (Tabla 7 del original). Valores > 1 indican predicción DSM conservadora frente al modelo de EF.

3.3–3.4 Configuración completa Trelifácil®

Se realizaron **24 análisis no lineales** del sistema completo (celosía TR16745, altura 160 mm), comparándolos con el perfil ACF aislado, evaluando las **ganancias de resistencia a flexión** en el desplazamiento máximo de ELS (L/350). El sistema Trelifácil® (perfil + celosía) exhibe un desempeño a flexión **muy superior** al del perfil aislado en todos los espesores. Para vanos cortos (0,5–1,0 m) las ganancias se sitúan aproximadamente entre **20 % y 80 %**; para vanos largos (1,5–2,0 m) crecen de forma marcada, alcanzando o superando el **200 %**. En vanos cortos los perfiles más delgados (0,65 mm) muestran ganancias algo mayores; en vanos largos la influencia del espesor sobre la ganancia disminuye.

Vano L (m)	t = 0,65 mm	t = 0,80 mm	t = 1,08 mm
0,6	28,1 %	24,2 %	16,8 %
0,8	80,5 %	79,2 %	74,1 %
1,0	56,0 %	48,2 %	37,1 %
1,2	71,0 %	65,2 %	56,5 %
1,4	75,3 %	67,7 %	55,8 %
1,6	196,7 %	211,4 %	224,4 %
1,8	183,0 %	186,7 %	184,2 %
2,0	210,7 %	212,3 %	205,8 %

Ganancia de resistencia a flexión en ELS (L/350) del sistema Trelifácil® frente al perfil aislado. Datos del estudio (Tabla 8 del original).



4. Conclusiones (traducción del texto original)

Se presentan dos modelos de elementos finitos validados para desarrollar estudios paramétricos que examinan el desempeño estructural de la solución Trelifácil® en la fase de construcción. Además, se evaluó la precisión del Método de la Resistencia Directa (DSM) para predecir la resistencia a flexión del elemento de acero conformado en frío respecto al eje menor de inercia, para diferentes longitudes de vano y espesores de sección.

Las principales conclusiones del análisis paramétrico son que la capacidad a momento de las vigas de acero conformado en frío tiende a estabilizarse al aumentar la longitud del vano, y aumenta con material más grueso. Al comparar las predicciones de momento flector del DSM con los resultados de elementos finitos, se obtuvieron resultados conservadores. En general, el DSM demostró ser una metodología aceptable para proporcionar el momento flector último para el diseño estructural de la solución Trelifácil® durante la fase de construcción.

No obstante, algunos resultados de elementos finitos presentaron una discrepancia alta respecto a las predicciones del DSM. Estos resultados señalan posibles líneas de investigación futura mediante análisis numérico, como el estudio del aplastamiento en los puntos de carga (*crippling*) y la interacción combinada de cortante y flexión. Ello daría soporte para realizar estudios robustos del comportamiento de estas vigas bajo las cargas y condiciones de contorno de servicio, o incluso bajo cargas extremas. Vigas continuas bajo carga uniformemente distribuida representarían, por ejemplo, una condición real del sistema, que implica el uso de apuntalamiento para sostener la losa hasta que adquiera resistencia suficiente para autosoportarse.

Por último, se desarrolló un modelo numérico para simular la acción mixta entre el perfil conformado en frío y la armadura de celosía acoplada, para la configuración completa de la solución Trelifácil®. Los resultados numéricos se contrastaron con datos experimentales, mostrando que los separadores plásticos no transfieren traslación longitudinal ni rotación.

Asimismo, el análisis paramétrico demostró que el sistema Trelifácil, que combina un perfil de acero con una celosía, mejora significativamente el desempeño a flexión en comparación con el perfil aislado. Esta mejora es evidente en todos los espesores ensayados y se hace más pronunciada al aumentar la longitud del vano, alcanzando ganancias superiores al 200 % para vanos entre 1,5 m y 2,0 m. Estos hallazgos resaltan la eficiencia estructural del sistema integrado, particularmente en vanos largos, y refuerzan la importancia de considerar esta configuración desde la fase previa al curado del concreto para permitir el diseño de losas sin apuntalamiento temporal.

Financiamiento. Los autores agradecen a ArcelorMittal Brasil S.A. y a las agencias brasileñas FAPES y CAPES por el apoyo financiero.

Fuente original: A.V.S. Gomes, D.C.M. Candido, L.F. Favarato, J.A. Ferrareto, J.C. Vianna, A.F.G. Calenzani. “Parametric study of a cold-formed steel profile employed in composite ribbed slabs”. *Thin-Walled Structures* 216 (2025) 113742. https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113742 · © 2025 Elsevier Ltd. Para las figuras, las ecuaciones y el texto completo, consúltese el artículo original.