

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo
**UNIDAD ACADÉMICA INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TEMA “COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES
DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A
COMPRESIÓN”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: BERNAL RODRÍGUEZ LUIS ENRIQUE
VILLAVICENCIO SALINAS JORGE EMANUEL**

DIRECTOR: ING. PILAR ROXANA NASPUD URUCHIMA, MSC

AZOGUES - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Luis Enrique Bernal Rodríguez portador de la cédula de ciudadanía N° **0302828561**. Declaro ser el autor de la obra: **“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN”** sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 26 de marzo del 2025

F: 

Luis Enrique Bernal Rodríguez

C.I. 0302828561

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas portador de la cédula de ciudadanía N° 0350004693. Declaro ser el autor de la obra: **“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN”** sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 26 de marzo del 2025

F: 

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas

C.I. 0350004693

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Pilar Roxana Naspud Uruchima, MSc

DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

De mi consideración:

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: "**COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN**", realizado por: **Luis Enrique Bernal Rodríguez y Jorge Emanuel Villavicencio Salinas**, con documentos de identidad: **0302828561** y **0350004693**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** ha sido asesorado, orientado, revisado y supervisado durante su ejecución, bajo mi tutoría en todo el proceso, por lo que certifico que el presente documento, fue desarrollado siguiendo los parámetros del método científico, se sujeta a las normas éticas de investigación que exige la Universidad Católica de Cuenca, por lo que está expedito para su presentación y sustentación ante el respectivo tribunal.

Azogues, 26 de marzo del 2025



Ing. Pilar Roxana Naspud Uruchima, MSC

0302537261

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta etapa tan significativa de mi vida, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, han sido parte fundamental de este logro.

En primer lugar, agradezco a Dios, quien me ha brindado la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia para superar cada desafío en este camino académico. Su guía ha sido mi sostén en los momentos más difíciles, dándome la confianza para seguir adelante con determinación.

A mis padres, Luis Bernal y Marina Rodríguez, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo inquebrantable. Gracias por inculcarme el valor del esfuerzo y la dedicación, por creer en mí incluso en los momentos de duda, y por brindarme siempre su consejo y aliento. Su ejemplo de trabajo y honestidad ha sido mi mayor inspiración.

A mi hermana, Génesis Bernal, por su cariño, paciencia y compañía incondicional en cada paso de esta travesía. Sus palabras de ánimo y su confianza en mis capacidades han sido una fuente constante de motivación

A la Ing. Pilar Naspud y al Ing. Xavier Nieto, por su invaluable guía, paciencia y enseñanzas. Gracias por compartir su conocimiento, por su disposición a resolver mis inquietudes y por orientarme con dedicación en el desarrollo de esta investigación. Sus consejos han sido clave para alcanzar este objetivo.

A mi compañero de tesis, Emanuel Villavicencio, por su compromiso, esfuerzo y espíritu de trabajo en equipo. Ha sido un honor compartir este proceso con alguien tan dedicado y perseverante. Juntos enfrentamos retos, superamos obstáculos y logramos construir un trabajo del cual nos sentimos orgullosos

A mis familiares y amigos, por su compañía, su apoyo incondicional y los momentos de alegría que hicieron más llevadero este camino. Gracias por escucharme en los momentos difíciles, por celebrar mis logros y por brindarme su amistad sincera

A una persona muy especial, quien ha sido mi gran apoyo emocional y motivación constante. Gracias por estar a mi lado en los momentos más desafiantes, por comprenderme, alentarme y recordarme siempre la importancia de seguir adelante con fe y determinación

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han contribuido con su tiempo, conocimientos y apoyo a lo largo de mi formación académica. Cada palabra de aliento, cada enseñanza y cada gesto de confianza han dejado una huella imborrable en mi camino. A todos, mi más sincera gratitud.

Luis Enrique Bernal Rodríguez.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, quien me ha brindado la salud, la sabiduría y la fortaleza para recorrer este camino. A lo largo de este proceso, he encontrado en Él la guía y la convicción necesarias para seguir adelante.

No hay logro que pueda alcanzarse sin el apoyo de quienes son la base de nuestra vida. Por ello, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a toda mi familia: a mis padres, mis hermanos y mi sobrino, quienes han sido mi refugio, mi fuerza y mi mayor inspiración.

Este logro no sería posible sin la presencia y el respaldo de mi mamá, Narcisa, le debo más de lo que las palabras pueden expresar. Su amor, su sabiduría y su incansable entrega me han enseñado el verdadero significado de la dedicación y el sacrificio. Su ejemplo me ha guiado en cada paso, y su amor me ha dado la fortaleza para superar cualquier desafío.

A mi hija, Missy, la razón por la que cada día me esfuerzo por ser mejor. Su sonrisa es mi mayor motivación y su existencia ilumina mi vida y me impulsa a levantarme todos los días.

A mi esposa, Jasmin, mi compañera de vida, mi apoyo incondicional. Su paciencia, amor y comprensión han sido esenciales en este camino. Gracias por creer en mí, por estar a mi lado en cada momento y por ser mi equilibrio en los días difíciles.

Expreso mi agradecimiento a mis tutores, Ing. Pilar Naspud y al Ing. Xavier Nieto por su invaluable guía, apoyo y paciencia a lo largo del desarrollo de este proyecto. Aprecio profundamente el tiempo y la dedicación que han invertido.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a mi compañero de tesis Luis Bernal. Más que un colega en este camino, se ha convertido en un apoyo incondicional y en un gran compañero en todos los ámbitos. Le deseo el mayor de los éxitos en cada proyecto que emprenda.

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas.

DEDICATORIA

Con amor y gratitud, dedico este logro a Dios, cuya guía y fortaleza me han acompañado en cada paso de este camino.

A mis padres, Luis Bernal y Marina Rodríguez, por ser mi mayor inspiración, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo inquebrantable. Gracias por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia todo es posible.

A mi hermana, Génesis Bernal, por su cariño, paciencia y por estar siempre a mi lado, brindándome su aliento y confianza en cada momento.

A mi familia en general, por su amor y apoyo constante, por ser mi refugio y mi motivación para seguir adelante.

A mis amigos, quienes han sido mi segunda familia, por su compañía, su apoyo incondicional y por hacer de este camino una experiencia más llevadera y significativa.

A una persona muy especial, quien ha sido mi pilar en los momentos difíciles, mi fuente de motivación y mi mayor apoyo emocional. Gracias por creer en mí y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante con fe y determinación.

A todos aquellos que, de una u otra manera, han sido parte de esta etapa de mi vida, les dedico con todo mi corazón este logro.

Luis Enrique Bernal Rodríguez.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a mi amada hija Missy, la raíz de mi vida, mi luz y mi mayor inspiración. Cada esfuerzo, cada sacrificio, cada sueño construido ha sido pensando en ti, en darte un futuro lleno de amor y oportunidades.

A mi hermano Bolívar, quien ha sido más que un hermano: un padre, un ejemplo, un pilar en mi vida. Gracias por tu apoyo incondicional, por ser mi guía y por enseñarme con tu ejemplo el valor del esfuerzo, la perseverancia y el amor fraterno.

A mi madre, Narcisa, por su amor infinito, por sus sacrificios silenciosos y su entrega sin condiciones. Gracias, mamá, por ser mi refugio, mi impulso y mi fortaleza en los momentos más difíciles.

A mi padre, Jorge, por cuidar de mí, por brindarme su apoyo y cariño en cada paso de mi vida.

A mi esposa, Jasmin, por estar siempre a mi lado, en las alegrías y en las dificultades, con amor, paciencia y fortaleza. Gracias por ser mi compañera de vida, por sostenerme cuando más lo he necesitado y por creer en mí cuando las dudas intentaban vencerme.

A mi mascota BanBan, quien ha sido mucho más que un simple compañero de cuatro patas. Su amor puro y su lealtad me han enseñado a ser mejor persona, a valorar lo esencial y a encontrar felicidad en los pequeños momentos.

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas.

COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN

Luis Enrique Bernal Rodríguez, Jorge Emanuel Villavicencio Salinas, Pilar Roxana Naspud Uruchima

Universidad Católica de Cuenca, luis.bernal@est.ucacue.edu.ec,
jorge.villavicencio.93@est.ucacue.edu.ec

RESUMEN

El desempeño estructural de los elementos de acero conformado en frío (CFS) bajo compresión axial es fundamental para su aplicación segura en la construcción, especialmente en zonas sísmicas. Este estudio evalúa experimentalmente la capacidad de carga y los modos de falla de secciones CFS en configuraciones tubulares y armadas (2G). Se realizaron ensayos de compresión en especímenes de acero ASTM A36 con espesores de 2 mm y 3 mm. Los resultados muestran que los elementos tubulares presentan un comportamiento estructural más confiable, con variaciones de carga entre un 10% y un 32% (2 mm) y del 57% al 79% (3 mm) en comparación con los valores teóricos. En contraste, las secciones armadas evidenciaron menor confiabilidad estructural, lo que llevó a un ajuste del coeficiente de resistencia de diseño (ϕP_n), reduciéndolo de 0.85 a 0.68 para mejorar la precisión y alinearlos con valores recomendados en la ACI 318-19 para muros de concreto a compresión. El pandeo local y el aplastamiento fueron los mecanismos de falla predominantes, resaltando la importancia de considerar estos efectos en las normativas de diseño.

Palabras clave: acero conformado en frío, compresión axial, comportamiento estructural, secciones armadas, coeficiente de reducción de capacidad.

EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF COLD-FORMED THIN SHEET PROFILES (CFS) UNDER COMPRESSION

Luis Enrique Bernal Rodríguez, Jorge Emanuel Villavicencio Salinas, Pilar Roxana Naspud Uruchima

Catholic University of Cuenca, luis.bernal@est.ucacue.edu.ec,
jorge.villavicencio.93@est.ucacue.edu.ec

ABSTRACT

The structural performance of cold-formed steel (CFS) elements under axial compression is essential for their safe application in construction, particularly in seismic zones. This study experimentally evaluates the load capacity and failure modes of CFS sections in tubular and built-up (2G) configurations. Compression tests were conducted on ASTM A36 steel specimens with 2 mm and 3 mm thicknesses. The results show that tubular elements exhibit more reliable structural behavior, with load variations ranging between 10% and 32% (2 mm) and 57% to 79% (3 mm) compared to theoretical values. In contrast, built-up sections demonstrated lower structural reliability, requiring an adjustment to the design resistance factor (ϕP_n), which was reduced from 0.85 to 0.68 to improve accuracy and align with the values recommended in ACI 318-19 for concrete walls under compression. Local buckling and crushing were the predominant failure mechanisms, highlighting the importance of considering these effects in design standards.

Keywords: cold-formed steel, axial compression, structural behavior, built-up sections, capacity reduction factor.



Índice

Introducción	2
Materiales y métodos	4
Propiedades del material.....	4
Geometría de especímenes	5
Preparación de pruebas	6
Normativa	10
Resultados y discusión.....	14
Cálculos teóricos y datos experimentales	16
Curvas de carga y de desplazamiento.....	18
Evaluación de ensayos en elementos tubulares	21
Evaluación de ensayos en elementos 2G.....	25
Contraste de resultados entre secciones similares	27
Conclusiones	30
Recomendaciones.....	31
Referencias.....	32

Introducción

Los elementos de acero conformados en frío (CFS, por sus siglas en inglés) han adquirido un papel fundamental en la construcción moderna debido a su combinación de ligereza, resistencia y versatilidad. Estos elementos, fabricados a partir de láminas de acero delgadas mediante procesos de conformado en frío, ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia estructural y económica. Sin embargo, su comportamiento bajo cargas de compresión sigue siendo un desafío crítico, especialmente en lo que respecta a la estabilidad estructural [1].

Fenómenos como el pandeo local y global pueden comprometer su integridad, lo que resulta especialmente preocupante en regiones con alta actividad sísmica, como Ecuador. La falta de normativas específicas y actualizadas para el diseño de estructuras, más la falta de cumplimiento o desconocimiento de elementos CFS en zonas sísmicas ha generado vacíos en la práctica ingenieril, incrementando el riesgo de fallas estructurales [2].

Para abordar estos desafíos, diversas investigaciones han explorado soluciones estructurales que mejoran el desempeño de los elementos conformados en frío bajo carga de compresión. Por su parte I. Komara y su grupo [3] realizaron una revisión sobre conexiones soldadas en estructuras de acero conformado en frío, destacando que la soldadura no solo mejora la rigidez en uniones de marcos estructurales, sino que también optimiza su desempeño bajo cargas sísmicas.

El grupo de S. T. Vy y M. Mahendran [4], evaluaron elementos anidados (Nested Columns "NC") con longitudes de 1500mm y 3000mm con condiciones de apoyo fijo y apoyo articulado con secciones transversales de 100x50x1mm, sometidos a cargas axiales y excéntricas en una máquina de compresión. Los modos de falla principales fueron pandeo flexional y pandeo local-flexional, predominando el pandeo flexional en los elementos de 3000mm y el pandeo local en los de 1500mm. Los resultados mostraron que la capacidad de compresión de los miembros NC fue hasta un 35% mayor que la suma de las capacidades individuales de los elementos que los componen y encontraron que la estabilidad global aumentó un 28% debido a la reducción de la flexión por pandeo.

De manera similar F. J. Meza y otros [5], analizaron un total de 24 columnas con tipos de secciones geométricas diferentes incluyendo secciones armada espalda-espalda y cara a cara con secciones C y G con longitudes de 1800mm, 2500mm y 3000mm y separación entre conectores de 960mm, 720mm y 320mm. El estudio determinó que el espaciamiento de los conectores tiene un impacto limitado en la resistencia última, salvo cuando evita el pandeo local crítico. La interacción entre los componentes modificó los patrones de pandeo y aumentó el esfuerzo crítico entre un 11% y 34%.

Otros estudios han confirmado que la soldadura en elementos conformados en frío mejora la rigidez estructural y reduce la deformación. En su investigación S. Divya y otros [6], examinaron columnas de sección cerrada formadas por elementos C y Z soldados, sometidas a ensayos en una Máquina Universal de Ensayos, un dispositivo que mide la resistencia de los materiales al aplicarles fuerzas controladas. Observaron que la deformación lateral se redujo en un 30% bajo cargas críticas de pandeo.

En su estudio K. Thiyagu [7], analizaron columnas de acero conformado en frío ensambladas con secciones cerradas octagonales y secciones C soldadas con costuras continuas, encontrando que la

soldadura mejoró la estabilidad estructural en un 30% respecto a elementos individuales, es decir, secciones C sin ensamblar ni refuerzo adicional. Mediante ensayos experimentales y simulaciones

en ANSYS, un software de análisis por elementos finitos, se evaluaron especímenes de 1.6 mm de espesor y longitudes de 500 mm, 600 mm y 700 mm, obteniendo capacidades de carga entre 320 kN y 430 kN. Los resultados indicaron que el pandeo distorsional fue el modo de falla predominante y que una menor razón de esbeltez mejoró significativamente el desempeño estructural.

El grupo de X. Yao y otros [8], analizaron el comportamiento estructural y la capacidad de carga en columnas de ángulo con patín de acero conformado en frío bajo compresión axial. Se ensayaron 32 especímenes con secciones de 40x15 mm, 60x20 mm, 90x20 mm y 120x24 mm, de 2 mm de espesor y longitudes de 400 mm, 900 mm, 1500 mm y 2100 mm, registrando resistencias entre 33 kN y 140 kN. Se identificaron modos de pandeo flexotorsional en columnas largas con baja razón ancho-espesor y pandeo local en columnas cortas con alta razón ancho-espesor. Simulaciones en ABAQUS validaron los resultados experimentales y estudios paramétricos mostraron que la capacidad de carga disminuye con la esbeltez y que el aumento del ancho del patín mejora la resistencia.

El grupo de M. Mohan y otros [9], en su investigación analizaron el comportamiento de pandeo en columnas de acero conformado en frío reforzadas con rigidizadores en el alma, sometidas a compresión axial. Se ensayaron 36 especímenes con secciones de 90x60x15 mm y 150x75x15 mm, de 2 mm de espesor y longitudes variables con relaciones de esbeltez entre 20 y 120. Las pruebas registraron resistencias entre 192 kN y 272 kN, con modos de falla dominados por pandeo local y distorsional. Simulaciones en ABAQUS validaron los resultados experimentales, mostrando que la capacidad de carga disminuye con el aumento de la esbeltez, mientras que el uso de rigidizadores mejora el comportamiento post-pandeo.

Según el estudio de H. Krishnan [10], evaluó el comportamiento estructural de columnas compuestas de acero conformado en frío mediante ensayos de compresión en cuatro configuraciones: canales enfrentados (100x50x8 mm), canal con sección Z (100x50x8 mm y 100x50x7 mm), canales enfrentados con ángulos en L (100x50x8 mm y 50x50x5 mm) y canales espalda con espalda (100x50x8 mm), todas de 1250 mm de longitud. Se emplearon uniones soldadas TIG y tornillos autoperforantes. Los ensayos experimentales registraron capacidades de carga entre 195 kN y 398 kN, con variaciones del 15% al 30% respecto a los valores analíticos. La configuración con canal y sección Z presentó la mayor resistencia, mientras que la de canales con ángulos en L evidenció pandeo local, resaltando el mejor desempeño de columnas con esbeltez intermedia.

En su investigación M. T. Chen and B. Young [11], analizaron el comportamiento estructural y las propiedades del material en columnas cortas de acero conformado en frío con secciones huecas elípticas. Se ensayaron cuatro series con relaciones de aspecto de 1.65 a 3 y esbelteces transversales entre 77 y 107, utilizando especímenes de 140x85x3 mm, 150x50x5 mm, 150x70x3 mm y 180x65x5 mm, con longitudes de 350 mm, 375 mm, 450 mm y 270 mm. Las pruebas de compresión registraron resistencias entre 300 kN y 900 kN, mientras que las tensiones residuales alcanzaron hasta el 76.4% del límite elástico. Mediante simulaciones en ABAQUS, se validaron los resultados experimentales y se propusieron ajustes en los métodos de diseño DSM (Método de Resistencia Directa) y CSM (Método de Resistencia Continua) para mejorar la precisión en la predicción de la resistencia de estas columnas.

Finalmente W. Reyes and A. Guzmán [12], ensayaron 48 secciones tipo caja ensambladas con elementos G con diferente longitud, 24 de estos ensayos fueron puestos a prueba bajo condición de apoyos rígidos mientras que para los otros 24 se consideró la condición de apoyos articulados. La longitud de las muestras fue de 900mm unidos mediante soldadura con espaciados entre cordones de 100mm, 300mm, 600mm y 900mm, concluyendo que el índice de esbeltez modificado no es necesario para materiales de 1.5 y 2.0 mm de

espesor si el espaciado de soldadura es ≤ 600 mm, ya que no afecta significativamente la carga última

La Normativa Ecuatoriana de la Construcción [13], no regula específicamente su diseño y comportamiento bajo carga de estos elementos. La falta de lineamientos en la NEC obliga a recurrir a regulaciones extranjeras, cuya aplicabilidad en el contexto ecuatoriano no siempre está verificada, en especial porque este material no se considera sísmo resistente por la falta de geometría que permita disipar energía.

Este estudio se enfoca en evaluar el comportamiento experimental de elementos CFS sometidos a compresión axial, usando elementos de acero negro ASTM A36 en sección transversal tubular y de caja por la unión cara a cara de elementos tipo G. El objetivo principal es comparar los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio con los predichos por métodos analíticos basados en normativas estadounidenses como la American Iron and Steel Institute (AISI) [14] y la normativa Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) [15]. Se busca determinar la capacidad de carga y el comportamiento estructural bajo compresión, comparando resultados teóricos y experimentales

Materiales y métodos

Propiedades del material.

En este estudio se utilizó acero negro estructural A36, el cual presenta un módulo de elasticidad de 200,000 MPa y un límite de fluencia de 250 MPa, [1], [15], [16] y [17]. Para caracterizar su comportamiento mecánico, se llevaron a cabo ensayos de compresión en un total de 30 especímenes, divididos en dos categorías (Table 1). Con longitud de 300mm.

Geometría de los especímenes

Para los ensayos de compresión se determinaron las propiedades geométricas en base al capítulo F4 de la NSR-10 [1]. De estos, 12 especímenes son de secciones tubulares de fábrica, con geometrías cuadradas y rectangulares. La sección transversal se muestra en la (Figure 1) El espesor nominal de estas probetas fue de 2mm y 3mm. Donde A representa la longitud del alma, B indica la longitud de las alas, w1 corresponde a la cara plana del alma, w2 representa las caras planas de las alas, t es el espesor del material, r es el radio de curvatura en las esquinas y L denota la longitud total del perfil.

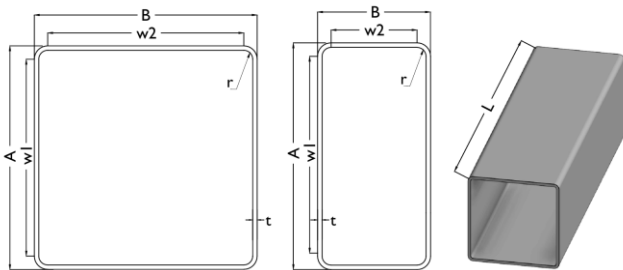


Figure 1. Box section cross-section shape and dimensions
Source: Authors

Mientras que para los otros 18 especímenes se fabricaron columnas utilizando perfiles 2G ensambladas cara a cara. La sección transversal se muestra en (Figure 2), De igual manera los espesores nominales son de 2mm y 3mm. El diseño teórico se realiza considerando la sección individual del perfil y el resultado se multiplica por dos para representar el comportamiento global del sistema compuesto.

Se toma la recomendación del manual del proveedor de elementos de lámina delgada de Colombia, para las dimensiones de soldadura con electrodo E6011 ACESCO [18].

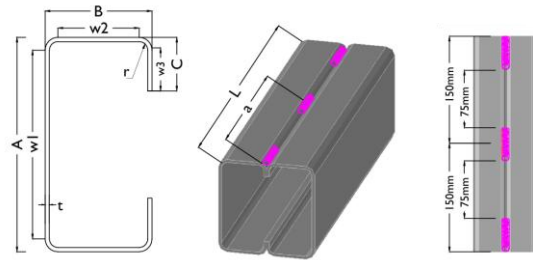


Figure 2. Box section cross-section shape and dimensions for a welded assembly in 2G position.
Source: Authors

Preparación de las pruebas.

Etiquetado de especímenes.

Las reglas de etiquetado de las probetas se definen en la (Figure 3). Por ejemplo, CTA-1 en donde [C], se trata de un ensayo a compresión, [T] se trata de una sección de perfil tubular, [A], se refiere a la dimensión del perfil, en este caso sería de 50x100x2mm, guion medio un separado donde finalmente, [#], se trata del número de especímen pudieron variar entre 1 a 3.

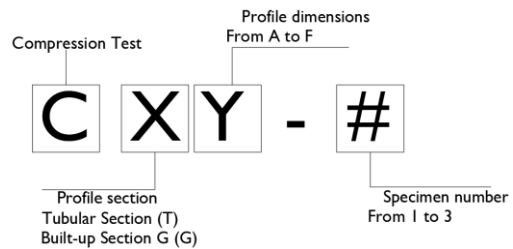


Figure 3. Label rule of the specimen
Source: Authors

Marcado de grillas

En el ensayo de compresión realizado tanto las secciones tubulares como armada en 2G se aplicó una cuadrícula de referencia con celdas de 2 cm x 2 cm sobre la superficie pintada del espécimen. Este patrón permitió observar y las deformaciones durante la aplicación de carga, facilitando la identificación de posibles inestabilidades.

Para las secciones tubulares, se realizó un marcado de rombos en la línea de soldadura de costura continua, que es desarrollada por la fábrica, como se muestra en la (Figure 4) permitiendo identificar posibles fallos en la unión durante el ensayo a compresión. Su análisis facilita la detección de defectos como fisuras, separaciones o concentraciones de esfuerzo,

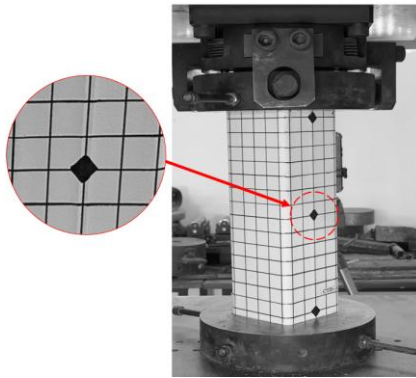


Figure 4. Grid and diamond marking on the seam weld
Source: Authors

Condiciones de suelda

Las secciones en G individuales se unieron mediante suelda en los extremos y en la parte central una longitud de cordón de 50mm. La separación entre cordones de suelda es de 75 mm, siendo así la separación entre eje a eje de cordón de soldadura de 150mm.

Banco de pruebas.

Las muestras fueron ensayadas en la máquina de ensayos en el banco de pruebas de la marca Shimadzu 2000x (Figure 5). Esta condición simula un soporte rígido para los extremos de los miembros estructurales. La sección en contacto directo no permite rotación en sus extremos durante el ensayo a compresión.

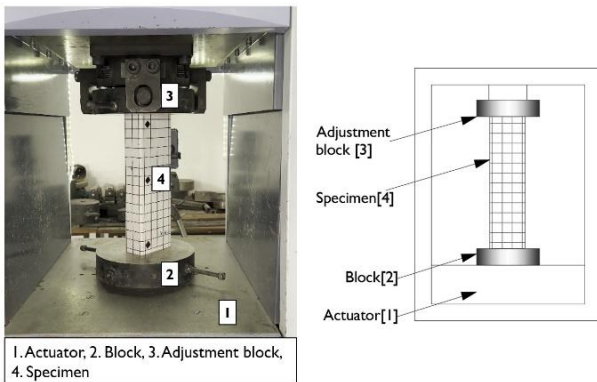


Figure 5. Test setup
Source: Authors

Dimensiones nominales

Las dimensiones nominales de las secciones los elementos se muestran en la (Table 1).

Table 1. Nominal dimensions of sections

Nominal dimensions of sections.						
Type		Geometric Properties				
-	#	Width (A)	Depth (B)	-	ThickNess (t)	
C	T	A	50	100	-	2
		B	50	100	-	3
		C	100	100	-	2
		D	100	100	-	3
Type		Flange (A)	Depth (B)	Edge stiffener (C)	ThickNess (t)	
C	G	A	50	100	15	2
		B	50	100	15	3
		C	50	125	15	2
		D	50	125	15	3
		E	50	150	15	2
		F	50	150	15	3

All dimensions are in (mm)

Source: Authors

Medición de Imperfecciones

Las imperfecciones geométricas iniciales derivadas del proceso de fabricación generan variaciones en el comportamiento a pandeo de las columnas de acero conformado en frío. En la producción nacional de elementos metálicos, se observaron discrepancias con respecto a los valores nominales especificados en los catálogos.

En la fabricación de elementos estructurales de acero conformados en frío, la NTE 1623 [19] establece tolerancias precisas para garantizar calidad y precisión dimensional. Para espesores de 2 mm y 3 mm, se permiten variaciones de $\pm 0,13$ mm y $\pm 0,18$ mm, respectivamente. En cuanto a las dimensiones estructurales, los elementos con almas de 50 mm, 100 mm y 125 mm tienen una tolerancia de $\pm 1,5$ mm, mientras que, para 150 mm, esta se amplía a ± 2 mm. El ancho de ala, en elementos con espesores de hasta 5 mm, cuenta con una tolerancia de $\pm 1,5$ mm, asegurando compatibilidad y desempeño óptimo en aplicaciones estructurales e industriales. Esto supera la recomendación del INEN del 6% en tolerancia de fabricación [18].

Para obtener datos precisos, se tomaron mediciones reales de los especímenes utilizando un calibrador electrónico (pie de rey digital), permitiendo registrar dimensiones con una precisión de dos decimales. Asegurando una caracterización más exacta de las secciones como se muestra en (Table 2). Estas dimensiones están dentro del rango establecido de tolerancias

Table 2. Measured dimensions of specimens

Measured dimensions of specimen's box section					Measured dimensions of specimens Built-up 2G					
Type	#	(A)	(B)	(t)	Type	#	(A)	(B)	(C)	(t)
CTA	1	50,55	100,11	2,12	CGA	1	99,35	99,5	14,91	2,1
	2	50,62	100,33	2,22		2	98,92	99,43	14,93	2,1
	3	50,33	100,35	2,07		3	99,08	99,9	15,01	2,1
CTB	1	50,17	100,2	3,1	CGB	1	98,85	99,75	14,90	3,29
	2	50,37	100,13	3,09		2	99,34	99,58	14,95	3,21
	3	50,17	100,16	3,19		3	99,18	100,51	14,91	3,22
CTC	1	99,33	99,07	2,16	CGC	1	99,98	125,32	15,02	2,16
	2	99,3	99,46	2,16		2	98,53	124,99	14,89	2,25
	3	99,76	99,47	2,16		3	99,17	124,5	14,97	2,24
CTD	1	99,66	99,61	3,17	CGD	1	101,5	125,81	14,98	3,18
	2	99,62	99,98	3,21		2	102,2	125,1	15,04	3,2
	3	99,71	99,79	3,2		3	101,8	125,02	14,84	3,04
Box section	Built-up 2G	CGE	1	99,44	149,58	14,95	2,13			
			2	99,83	148,96	14,89	2,15			
			3	98,72	149,57	15,01	2,13			
CGF	1	98,81	150,9	14,93	3,17					
	2	98,28	150,85	15,02	3,13					

All dimensions are in (mm)

Source: Authors

Normativa

La información que se presenta a continuación es un resumen basado en diversas normativas para el análisis a compresión [16], [15], [1] y [17].

Sección Tubular

De acuerdo con la con la NSR-10 [14], la resistencia axial nominal se calculará mediante la siguiente Equation (1):

$$P_n = A_e \cdot F_n \quad (1)$$

Donde A_e es el área efectiva calculada, F_n se puede calcular mediante la Equation (2), y la Equation (3), cumpliendo con las condicionantes

de λ_c .

Para $\lambda_c \leq 1.5$ (modo de pandeo inelástico).

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) \cdot F_y \quad (2)$$

Para $\lambda_c > 1.5$ (modo de pandeo elástico)

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] \cdot F_y \quad (3)$$

Donde λ_c , se obtiene por la Equation (4):

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (4)$$

Donde F_e es el menor de los esfuerzos críticos elásticos por pandeo flexional, torsional y flexo-torsional aplicables dado por la Equation (5)

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r} \right)^2} \quad (5)$$

Donde L es la longitud del espécimen, K es el coeficiente se toma como 1 (condición de empotramiento) en cálculos teóricos porque se asume una carga axialmente aplicada y uniformemente distribuida, sin efectos de pandeo ni excentricidades significativas. Esta suposición es válida bajo condiciones ideales, donde los extremos de la probeta están perfectamente alineados y restringidos lateralmente, eliminando factores de inestabilidad estructural [20].

Se deberá encontrar la longitud rigidizada con relación a la longitud total del ala o del alma (**brig**), empezando con la determinación de la Equation (6)

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right)}{\lambda} \quad (6)$$

Donde λ se determina mediante la Equation (7)

$$\lambda = \sqrt{\frac{F_n}{F_{cr}}} \quad (7)$$

Si $\lambda \leq 0.673$, **brig**, va a ser igual a w; si $\lambda > 0.673$, **brig** equivale a $w \cdot \rho$

Para la determinación de F_{cr} , se implementará la aplicación de la Equation (8)

$$F_{cr} = K \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (8)$$

Donde, E es el Módulo de Elasticidad, μ es el coeficiente de fricción que según [15], se establece en 0.3 para el diseño de conexiones en secciones tubulares y tipo cajón sometidas a compresión. Este valor

garantiza una adecuada transferencia de cargas y contribuye a la estabilidad estructural

Sección Compuesta

Se realiza el cálculo con las ecuaciones de la resistencia axial nominal con las ecuaciones Equation (1), Equation (2), Equation (3), Equation (4). Además, se deberá considerar que el valor F_e es el menor de los esfuerzos críticos elásticos por pandeo flexional, torsional y flexo-torsional determinados por la Equation (9) y la ecuación Equation (11)

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{KL}{r} \right)_m^2} \quad (9)$$

Donde r es radio de giro de la sección transversal completa no reducida con respecto al eje de pandeo.

La Especificación AISI S100 [14], establece que, para estimar la resistencia última de miembros a compresión compuesto por dos secciones en contacto, es necesario utilizar un coeficiente de esbeltez ajustado $(KL/r)_m$. Este coeficiente corrige la esbeltez tradicional considerando la influencia de las fuerzas cortantes entre los elementos individuales de la sección.

Su determinación se realiza mediante la

$$\left(\frac{KL}{r} \right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r} \right)_0^2 + \left(\frac{a}{ri} \right)^2} \quad (10)$$

Donde $(KL/r)_m$ es la esbeltez general de toda la sección alrededor del eje de la sección compuesta, a es la separación entre soldaduras y ri es el radio mínimo de giro del área completa sin reducir la sección transversal de una forma individual en un miembro compuesto

Para la determinación del menor de esfuerzos críticos elásticos por pandeo flexional, torsional y flexo-torsional tenemos que comparar con la también con la Equation (11)

$$F_e = \frac{\sigma_t \cdot \sigma_{ex}}{\sigma_t + \sigma_{ex}} \quad (11)$$

Donde σ_t es el esfuerzo crítico asociado con la tensión de fluencia del material y σ_{ex} es esfuerzo crítico de pandeo elástico

Resultados y discusión

Se determinaron las propiedades geométricas de cada perfil y, posteriormente, se calculó la resistencia nominal utilizando las normativas descritas en Materiales y Métodos. Para los ensayos experimentales, se realizó una preparación previa de la prensa y se llevaron a cabo las pruebas de carga axial en los especímenes, tanto tubulares como de sección armada 2G. A partir de los datos obtenidos, se generaron las curvas de carga-desplazamiento para cada espécimen, permitiendo analizar su comportamiento estructural.

Cálculos teóricos y datos experimentales

La (Table 3) presenta los resultados obtenidos para las secciones tubulares y compuestas con 2G, comparando las cargas máximas teóricas y experimentales, junto con el coeficiente de variación (CV) y las diferencias en porcentaje entre ambos valores, entre lo teórico como experimental. El CV muestra que tan amplio es un rango de

datos obtenidos, siendo proporcional entre mayor rango, mayor CV [21]. Esto puede deberse a las condiciones específicas de los ensayos, como las variaciones en la rigidez de los materiales y las propiedades mecánicas. Estos resultados resaltan la necesidad de ajustar los modelos analíticos para obtener respuestas mecánicas reales netamente en rango elástico.

Table 3. Comparison of Theoretical and Experimental Results

Type	Theoretical Calculation (kN)	Experimental results		Difference (%)
		(kN)	Coefficient of Variation (%)	
CTA	140,20	155,65	9,0	12
CTB	204,05	311,08	0,3	52
CTC	205,94	192,08	3,5	7
CTD	280,48	374,91	1,4	34
CGA	257,76	211,99	3,4	18
CGB	404,00	425,18	0,1	5
CGC	265,18	214,79	2,5	19
CGD	442,97	384,56	1,7	13
CGE	269,80	237,47	1,9	12
CGF	459,49	401,37	3,2	13

Source: Authors

Curvas de carga y de desplazamiento

Secciones tubulares

Para el análisis del grupo de elementos CTA, representado en la (Figure 6(a)), se determinó que la carga máxima promedio alcanzó los 155,65 kN. Las curvas obtenidas muestran un comportamiento elástico inicial seguido de una caída abrupta tras la carga máxima, con una leve recuperación en el espécimen CTA-1. Además, la carga máxima experimental superó la carga analítica con el coeficiente de seguridad $\phi P_n = 119,17$ kN, lo que indica que el diseño teórico del perfil es conservador, con una variación del 12%. En la (Figure 6(b)), se observa que el tipo de falla en los tres especímenes fue por aplastamiento, lo que ocasionó un pandeo local. Para CTA-1, este ocurrió entre los 2 cm y 8 cm desde la parte superior, mientras que en CTA-2 y CTA-3 se presentó en la parte inferior en el mismo rango de 1 a 7 cm.

En el grupo de elementos CTB, mostrado en la (Figure 7(a)), la carga máxima promedio fue de 311,08 kN, con un comportamiento elástico inicial y una posterior caída brusca. Se evidenció que la carga máxima superó la carga analítica con el coeficiente de seguridad $\phi P_n = 173,45$ kN, lo que refleja un diseño teórico altamente conservador, con una variación del 79%. En la, se identificó que la falla predominante fue el aplastamiento con pandeo local. Para CTB-1 y CTB-3, el pandeo ocurrió en la parte superior entre 0 cm y 5 cm, mientras que en CTB-2 se produjo en la parte inferior entre 3 cm y 9 cm.

Para los elementos CTC, cuya representación gráfica se encuentra en la (Figure 8(a)), la carga máxima promedio registrada fue de 192,08 kN, con un comportamiento elástico inicial seguido de una caída pronunciada. Se observó que la carga máxima superó la carga analítica con $\phi P_n = 175,05$ kN, indicando un diseño conservador con

un margen del 10%. (Figure 8(b)), muestra que el modo de falla en los tres especímenes fue por aplastamiento, generando un pandeo local. Para los elementos CTC-1 y CTC-3, la falla se produjo entre los 7 cm y 15 cm, mientras que para CTC-2 ocurrió entre los 11 cm y 19 cm, todos medidos desde la base.

En el grupo de elementos CTD, representado en la (Figure 9(a)), la carga máxima promedio fue de 374,91 kN, evidenciando un comportamiento elástico inicial y una caída abrupta, señalando una falla súbita. La carga máxima superó la carga analítica con $\phi P_n = 238,41$ kN, lo que indica un diseño altamente conservador con una variación del 57%. En la (Figure 9(b)), se identificó que la falla en los tres especímenes fue por aplastamiento, lo que provocó un pandeo local. Para el perfil CTD-1, la falla se localizó entre los 6 cm y 14 cm desde la parte superior, mientras que en CTD-2 ocurrió entre los 7 cm y 11 cm, y en CTD-3 entre los 0 cm y 7 cm, ambos medidos desde la parte inferior.

Discusión y evaluación de ensayos en elementos tubulares

El análisis de elementos tubulares sometidos a carga axial muestra que el espesor influye directamente en la capacidad estructural. Los elementos más gruesos, CTB y CTD presentan márgenes de seguridad del 79% y 57% respecto a la carga analítica ϕP_n , evidenciando un diseño conservador. En contraste, los elementos más delgados, CTA y CTC muestran diferencias menores (12% y 10%), indicando un mejor balance entre resistencia y optimización del material.

Además, la estabilidad depende del espesor, la longitud de pandeo y la distribución de tensiones: los elementos gruesos presentan pandeo local, mientras que los delgados experimentan mayores longitudes de pandeo, afectando la rigidez global.

Secciones armadas 2G.

Para el análisis del grupo de elementos CGA que se muestra en la (Figure 10(a)), se determina que la carga máxima promedio es de 211,99 kN. Estas curvas evidencian un comportamiento elástico inicial seguido de una caída abrupta tras alcanzar la carga máxima. Además, la carga máxima se encuentra por debajo de la carga analítica con coeficiente de seguridad ($\phi P_n = 219,10$ kN), lo que indica un diseño kN teórico poco conservador con una variación del 3%. En la (Figure 10(b)), se observa que la falla de los tres especímenes ocurre por aplastamiento, generando pandeo local. En CGA-1 y CGA-2, la falla se da entre los 7 cm y 15 cm, mientras que en CGA-3 ocurre entre los 3 cm y 11 cm, todos medidos desde la parte inferior de los especímenes.

Para el grupo de elementos CGB, la (Figure 11(a)) muestra que la carga máxima promedio es de 425,18 kN, con un comportamiento similar al caso anterior. En este caso, la carga máxima supera la carga analítica con coeficiente de seguridad ($\phi P_n = 344,25$ kN), lo que refleja un diseño altamente conservador con una variación del 24%. En la (Figure 11(b)), se evidencia que la falla en los tres especímenes se produce por aplastamiento con pandeo local. En CGB-1 y CGB-2, el fallo se presenta entre los 9 cm y 19 cm, mientras que en CGB-3 ocurre entre los 9 cm y 21 cm, todos medidos desde la parte inferior de los especímenes.

El análisis del grupo de elementos CGC, (Figure 12(a)) muestra que la carga máxima promedio es de 214,79 kN, con un comportamiento elástico inicial y una caída abrupta tras la carga máxima. La carga máxima está por debajo de la carga analítica con coeficiente de seguridad ($\phi P_n = 225,40$ kN), lo que indica un diseño poco conservador con una variación del 5%. En la (Figure 12(b)), se observa

que la falla ocurre por aplastamiento con pandeo local. En CGC-1 y CGC-2, el fallo se presenta entre los 5 cm y 19 cm desde la parte inferior, mientras que en CGC-3 ocurre entre los 7 cm y 19 cm, medidos desde la parte superior.

Para el grupo de elementos CGD, la (Figure 13(a)) muestra que la carga máxima promedio es de 384,56 kN. Esta carga es superior a la carga analítica con coeficiente de seguridad ($\phi P_n = 376,52$ kN), lo que sugiere un diseño mínimamente conservador con una variación del 2%. En la (Figure 13(b)), se evidencia que la falla en los tres especímenes ocurre por aplastamiento con pandeo local. En CGD-1, CGD-2 y CGD-3, el fallo se presenta entre los 0 cm y 15 cm, medidos desde la parte superior de los especímenes.

El grupo de elementos CGE presenta una carga máxima promedio de 237,47 kN, (Figure 14(a)) La carga máxima está por encima de la carga analítica con coeficiente de seguridad ($\phi P_n = 229,33$ kN), lo que indica un diseño mínimamente conservador con una variación del 4%. En la (Figure 14(b)), se observa que la falla se produce por aplastamiento con pandeo local. En CGE-1, se registra un aplastamiento puro con aumento de sección entre 7 cm y 21 cm, y pandeo local entre 0 cm y 10 cm. En CGE-2, el fallo ocurre entre los 1 cm y 17 cm desde la parte inferior, mientras que en CGE-3 se da entre los 0 cm y 11 cm desde la parte superior

Para el grupo de elementos CGF, la carga máxima promedio es de 401,37 kN. Esta carga es superior a la carga analítica con coeficiente de seguridad ($\phi P_n = 390,56$ kN), (Figure 15(a)) indica un diseño mínimamente conservador con una variación del 3%. En la figura (Figure 15(b)), se observa que la falla ocurre por aplastamiento con pandeo local. En CGF-1 y CGF-3, el fallo se presenta entre los 9 cm y 19 cm desde la parte inferior, mientras que en CGF-2 ocurre entre los 3 cm y 15 cm desde la parte superior.

Discusión y evaluación de ensayos en elementos 2G

El comportamiento de los elementos compuestos CGA, CGB, CGC, CGD, CGE y CGF bajo carga axial muestra diferencias significativas en su seguridad y eficiencia estructural. Los elementos CGA (211,99 kN) y CGC (214,79 kN) alcanzan cargas máximas ligeramente inferiores a las analíticas ϕP_n (219,10 kN y 225,40 kN), con variaciones del 3% y 5%, lo que sugiere un diseño ajustado con menor margen de seguridad. En contraste, el perfil CGB (425,18 kN) supera en un 24% su carga analítica (344,25 kN), evidenciando un diseño altamente conservador. Por otro lado, los elementos CGD (384,56 kN), CGE (237,47 kN) y CGF (401,37 kN) presentan cargas máximas apenas superiores a sus valores analíticos (variaciones del 2%, 4% y 3%, respectivamente), lo que indica un equilibrio entre resistencia y eficiencia del material.

Contraste de resultados entre secciones similares, CTC/CGA

Los elementos soldados tipo cajón presentan una mayor capacidad de carga que los tubos estructurales como se muestra en la (Figure 16(a)), superando los 200 kN antes de la falla. Los elementos CTC alcanzaron una carga máxima promedio de 192,08 kN, superando la carga analítica en un 10%, con falla por aplastamiento y pandeo local entre 7-19 cm desde la base. En cambio, los elementos CGA lograron 211,99 kN, pero con un diseño menos conservador (3% respecto a la carga analítica).

Contraste de resultados entre secciones similares, CTD/CGB

El incremento del espesor a 3 mm mejoró significativamente la capacidad de carga de ambos sistemas, (Figure 16(b)). Los tubos estructurales (CTD) alcanzaron una carga máxima promedio de 374,91 kN, superando la carga analítica en un 57%, con falla por aplastamiento y pandeo local entre 0-13 cm. Por otro lado, los elementos soldados tipo cajón (CGB) lograron 425,18 kN, con un margen del 24% sobre la carga analítica y fallas similares entre 10-22 cm desde la base.

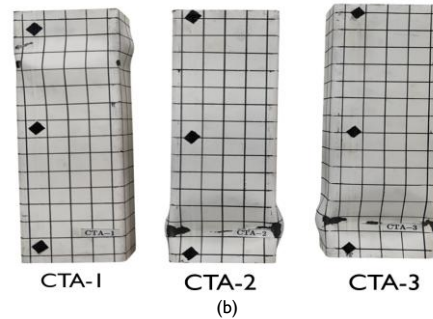
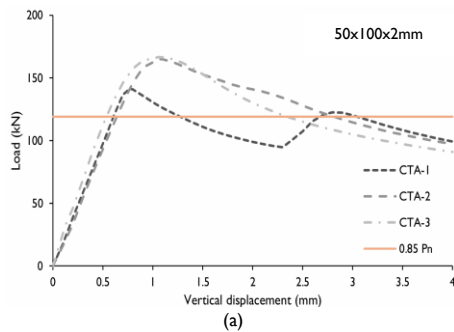


Figure 6.

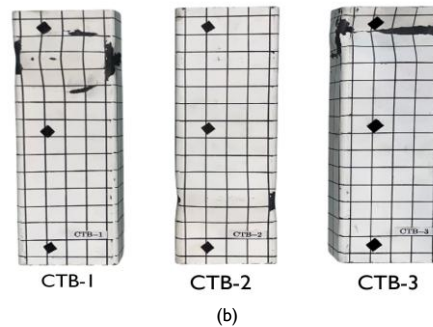
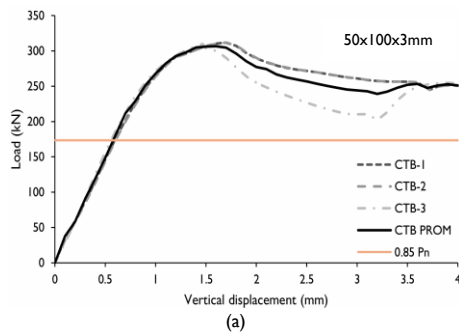


Figure 7.

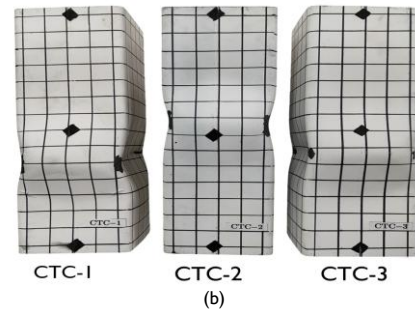
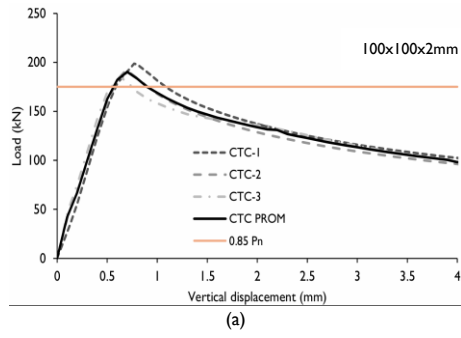


Figure 8.

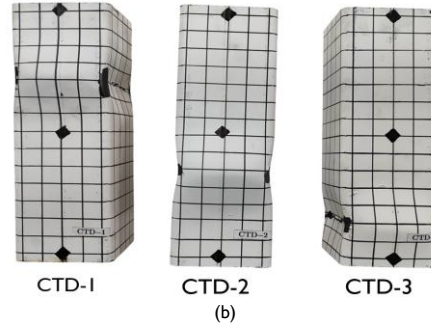
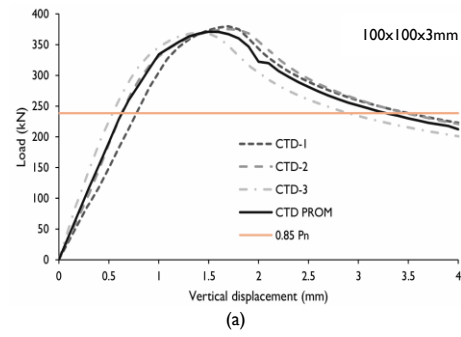


Figure 9.

Figures 6 to 9 present the load-displacement response and the corresponding post-test visual analysis of the box-section specimens. (a) Load vs. vertical displacement curves illustrate the mechanical response and structural performance of the tested specimens. (b) Post-test visual inspection reveals the deformation patterns and failure mechanisms observed after testing.

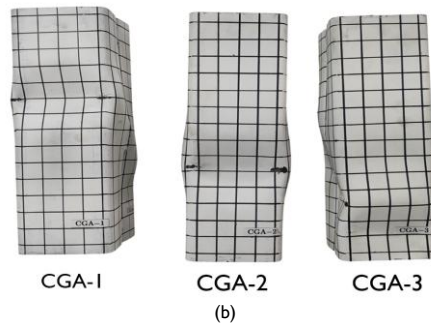
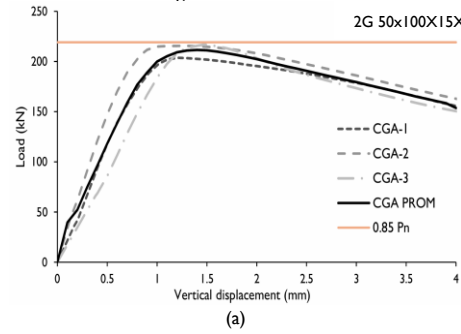


Figure 10.

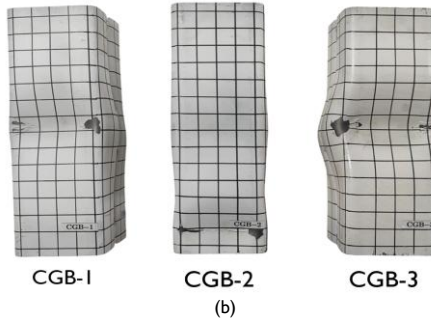
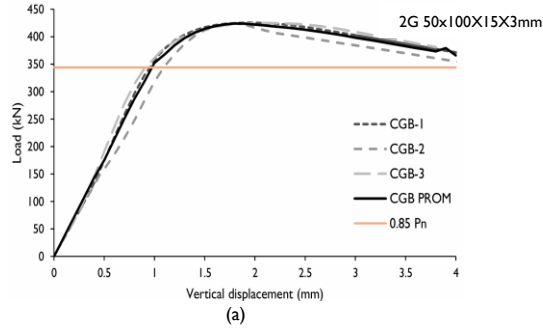


Figure 11.

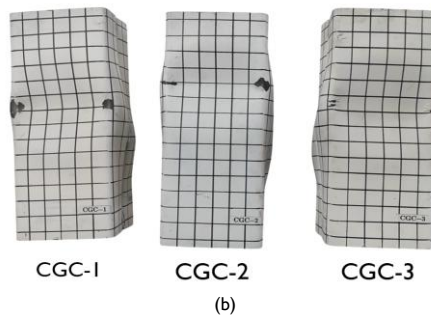
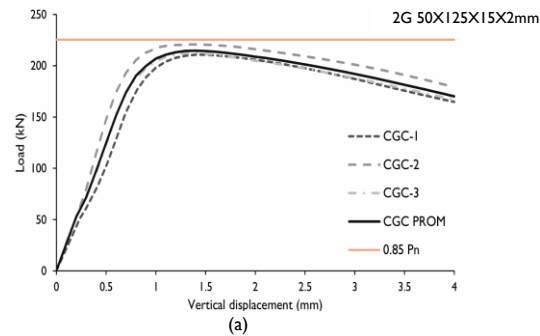


Figure 12.

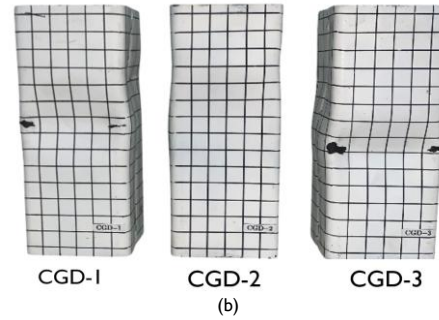
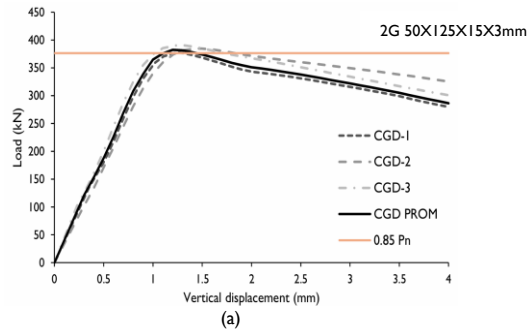


Figure 13.

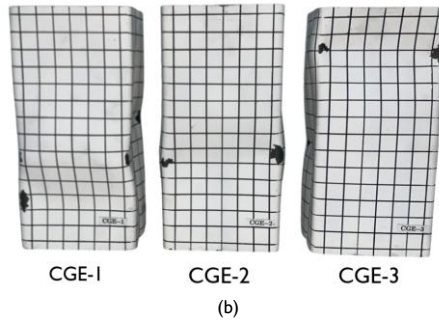
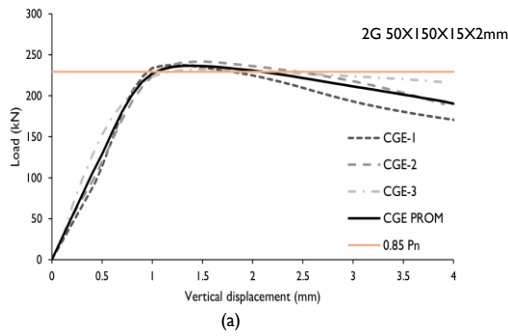


Figure 14.

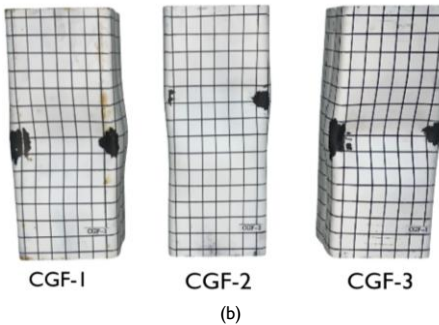
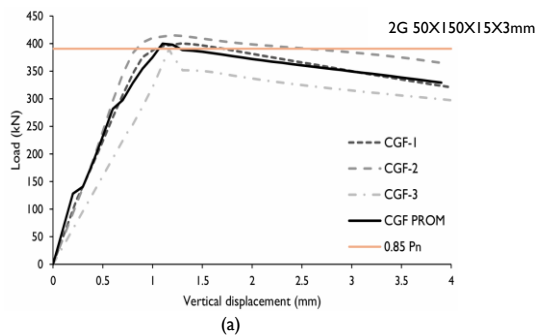


Figure 15.

Figures 10 to 15 illustrate the load-displacement response and the corresponding post-test visual analysis of the built-up column specimens with 2G. (a) Load vs. vertical displacement curves depict the mechanical response and structural performance of the tested specimens. (b) Post-test visual inspection highlights the deformation patterns and failure mechanisms observed after testing.

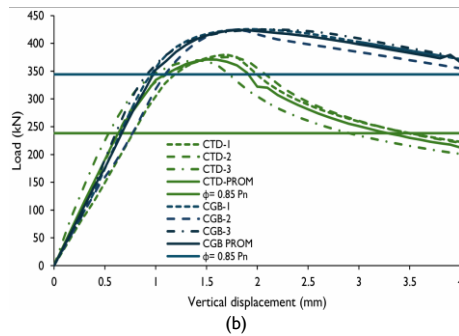
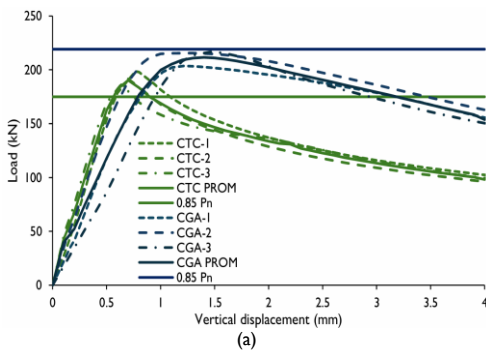


Figure 16 Comparison of Results Between Specimens of the same dimension. (a) Comparison between the tubular section CTC (100x100x2mm) and the built-up section 2G CGA(50x100x15x2mm) & (b) Comparison between the tubular section CTD (100x100x3mm) and the built-up section 2G CGB (50x100x15x3mm).

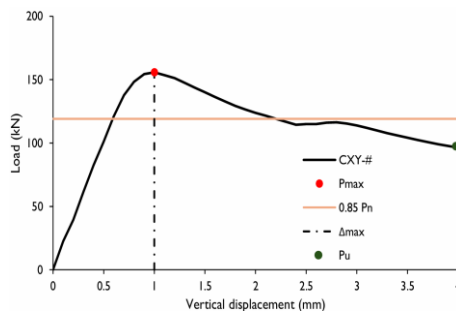
En la (Table 4) se presentan los resultados experimentales, incluyendo las cargas máximas P_{max} , los desplazamientos máximos Δ_{max} , las cargas P_u y las energías correspondientes a cada una de las gráficas obtenidas. Es importante señalar que no se incluye el desplazamiento último Δ_{ultimo} , ya que este fue de 4 mm en todos los casos. Esta constancia se debe a que los datos subsiguientes muestran una tendencia uniforme de decrecimiento, sin variaciones significativas

que justifiquen extender el análisis más allá de dicho punto. Además, que se cumple con la recomendación de ATC-24 [22] de analizar hasta el 20 % de degradación posterior a la carga máxima.

La grafica complementaria de la parte inferior de la (Table 4) muestra un ejemplo para la interpretación visual en las gráficas de lo que es cada expresión.

Table 4. Load-deformation relationship of the specimens tested in compression (P_{max}/Δ_{max} and P_u/Δ_u)

Type	P_{max} (kN)		Δ_{max} (mm)		P_u (kN)		Energy (J)	
	Individual	Average	Individual	Average	Individual	Average	Individual	Average
CTA-1	141,26	155,65	0,77	1,00	99,30	96,38	418,61	456,05
CTA-2	165,07		1,06		97,16		476,18	
CTA-3	166,63		1,06		91,03		467,60	
CTB-1	311,68	311,08	1,69	1,06	249,71	251,14	999,22	946,23
CTB-2	311,68		1,70		249,91		990,08	
CTB-3	309,88		1,47		253,81		924,61	
CTC-1	198,67	192,08	0,77	0,7	101,34	98,21	529,73	509,11
CTC-2	192,31		0,69		95,20		506,62	
CTC-3	185,27		0,63		98,08		518,18	
CTD-1	379,78	374,91	1,70	1,05	222,45	212,42	1046,32	1054,87
CTD-2	375,41		1,72		217,07		1110,89	
CTD-3	369,54		1,50		197,73		1064,61	
CGA-1	203,65	211,99	1,22	1,4	150,40	153,67	700,25	680,30
CGA-2	215,48		1,26		162,06		725,06	
CGA-3	216,74		1,47		148,56		662,53	
CGB-1	425,67	425,18	1,96	1,8	370,62	366,08	1402,22	1378,36
CGB-2	424,81		1,80		354,03		1334,23	
CGB-3	425,07		2,12		373,60		1419,42	
CGC-1	210,91	214,79	1,45	1,4	164,74	170,25	686,46	713,96
CGC-2	220,88		1,37		179,21		750,62	
CGC-3	212,58		1,34		166,81		706,04	
CGD-1	377,74	384,56	1,25	1,5	279,83	286,48	1176,85	1202,58
CGD-2	384,78		1,46		325,42		1246,33	
CGD-3	391,16		1,26		299,77		1260,69	
CGE-1	237,79	237,47	1,25	1,4	170,11	190,35	748,99	782,83
CGE-2	241,92		1,46		185,69		794,50	
CGE-3	232,70		1,62		215,25		820,67	
CGF-1	400,07	401,37	1,29	1,1	320,62	326,67	1312,14	1303,62
CGF-2	414,81		1,19		362,14		1410,63	
CGF-3	389,47		1,16		297,25		1141,41	



Source: Author

Análisis de ϕ para secciones armadas.

El análisis realizado para (Figure, 17(a)(b)(c)), los elementos armados con soldadura 2G, utilizando un coeficiente de reducción de capacidad $0.85P_n$, mostró un porcentaje de variación desfavorable para la mayoría de los elementos, excepto para el perfil CGB. Estas variaciones desfavorables oscilaron entre un 2% y un 5%, lo cual, desde un punto de vista estructural, se considera un valor bajo por seguridad. No obstante, con el objetivo de mejorar la confiabilidad del diseño, se procedió a un recálculo del coeficiente ϕ , reduciendo en un 20% el valor de la carga máxima promedio obtenido experimentalmente. Esto en base a que los coeficientes ϕ oscilan en este rango para compresión. Posteriormente, se calculó el coeficiente ϕP_n para cada perfil y se obtuvo el valor promedio, resultando en $0.71P_n$. Este ajuste permitió incrementar el porcentaje de

confiabilidad, situándolo ahora en un rango del 15% al 24% con CV del 15% entre los datos.

También se realizó el análisis sin considerar el valor de CGB, obteniendo una dispersión del 5% entre los datos, lo que llevó a la adopción de un coeficiente de $0.68 P_n$. Este valor mostró una mayor confiabilidad, con variaciones entre un 20% y un 30%. En este contexto, la [23] establece un coeficiente de reducción de resistencia de $0.65P_n$ para sus miembros armados controlados en tracción, considerando la variabilidad en el comportamiento del concreto y el refuerzo bajo cargas de compresión, esto en muros esbeltos a compresión, similar a lo que se tiene a las alas y almas en estos elementos CFS. Esta reducción garantiza un diseño seguro y conservador en elementos sometidos a esfuerzos axiales, alineándose con los valores obtenidos experimentalmente en este estudio.

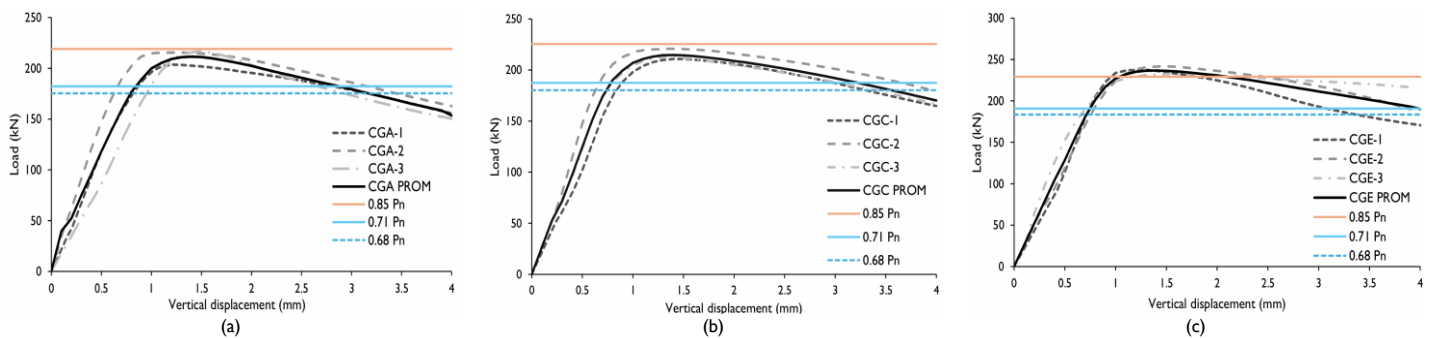


Figure.17 Analysis of ϕ for built-up sections 2G

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El análisis realizado evidenció diferencias significativas entre los valores experimentales y los obtenidos mediante el coeficiente de seguridad $0.85 P_n$ en elementos tubulares de 2 mm y 3 mm de espesor. Para los elementos de 2 mm, las variaciones oscilaron entre un 10% y un 32%, mientras que, en los de 3 mm, los valores fluctuaron entre un 57% y un 79%. A pesar de estas discrepancias, los elementos tubulares presentaron un comportamiento estructural estable, dentro de rangos aceptables de confiabilidad, lo que no llevaría a recomendar ningún cambio a su ϕ .

Después de realizar los procesos matemáticos y encontrar los valores de ϕ 0,71 y 0,68, comparando con la recomendación del ACI 318 que protege los elementos delgados a compresión con un coeficiente de 0,65; con esta filosofía de diseño y protección de elementos no compactos, el valor de 0,68 que se propone estaría alineado con esta filosofía para los perfiles que se comercializan en Ecuador. Cabe recalcar que es importante realizar más investigaciones variando la longitud del espécimen, tipo de conexión como soldadura o peros, tipología de anclaje como rígido o articulado, para conocer qué factores ϕ se recomendaría en función de todos los parámetros mencionados. Pero en primera instancia para columnas cortas con adecuada distancia de soldadura a conexión recomendamos modificar el ϕ por 0,68 a compresión, esto para seguridad estructural.

En todos los elementos analizados se identificaron fallas por pandeo local, predominantemente asociadas a aplastamiento, sin evidencia de daños en las uniones soldadas. En particular, las secciones tipo cajón conformadas por dos elementos G no presentaron fallas relacionadas con defectos en el cordón o la distribución de la soldadura, lo que sugiere una adecuada ejecución de las uniones.

Es interesante el modo de falla de todos los especímenes, donde por caras paralelas y frontales presentaban el mismo fenómeno, por ejemplo, las caras tipo A se deforman hacia la parte interna del elemento, mientras que las caras tipo B se deforman hacia afuera, en ningún espécimen se generó una deformación de todas las caras hacia el mismo lugar. Tampoco existe una tendencia de que el lado menos compacto siempre se deforme hacia un específico lugar. Lo que si se visualiza es esta compensación de deformación y material.

Cabe destacar que los resultados y conclusiones obtenidos corresponden a columnas de 300 mm de longitud, delimitando el alcance del estudio y orientando las recomendaciones hacia este tipo específico de elemento estructural.

Recomendaciones

Para futuros estudios, se recomienda ampliar el análisis a elementos tubulares con espesores entre 4 mm y 6 mm, con el propósito de evaluar su comportamiento estructural y determinar la tendencia en la variación del coeficiente de reducción de capacidad (ϕP_n). Esto cobra relevancia debido a la alta confiabilidad obtenida en los elementos de 3 mm, donde las variaciones superaron el 50% en comparación con los valores calculados, lo que sugiere un posible sobredimensionamiento. Un análisis más amplio permitiría establecer

un coeficiente óptimo que garantice la seguridad estructural sin incurrir en sobreestimaciones.

Para las secciones armadas mediante soldadura, se recomienda considerar un ajuste en el coeficiente de reducción de capacidad, dado que los resultados indicaron que una reducción de 0.85 a 0.68 P_n , pero esto puede cambiar al analizar columnas intermedias y esbeltas.

Aunque no se identificaron fallas en los cordones ni en la distribución de las soldaduras, se sugiere evaluar configuraciones alternativas en las uniones soldadas de los elementos tipo cajón conformados por dos elementos G. Esto permitiría determinar si modificaciones en la disposición de las uniones pueden influir en su desempeño estructural y optimizar su eficiencia en aplicaciones prácticas.

Referencias

- [1] P. Naspud, "Estimación del efecto de los esfuerzos residuales en la capacidad portante de perfiles de acero en lámina delgada conformados en frío," 2021.
- [2] El Universo, "Al menos tres muertos y 29 heridos por la caída del techo en un centro comercial en Trujillo, Perú | Internacional." Accessed: Feb. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/noticias/internacional/al-menos-tres-muertos-y-29-heridos-por-la-caida-del-techo-en-un-centro-comercial-en-trujillo-peru-nota/>
- [3] I. Komara, E. Wahyuni, and P. Suprobo, "A study on cold-formed steel frame connection: a review," 2017. doi: 10.12962/j20882033.v28i3.3223.
- [4] S. T. Vy and M. Mahendran, "Compression tests of fixed ended CFS members with improved connectors," *Compression Tests of Fixed Ended CFS Members with Improved Connectors*, Oct. 2020.
- [5] F. J. Meza, J. Becque, and I. Hajirasouliha, "Experimental study of cold-formed steel built-up columns," *Thin-Walled Structures*, vol. 149, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2019.106291.
- [6] S. Divya, M. Kathiresan, K. Priya, R. Sanchana, R. Vidhya, and U. G. Scholar, "Experimental and analytical investigation of cold formed steel lipped channel section column," 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107494>.
- [7] K. Thiyagu, P. Kanaka, and R. Elanchezhian, "Behaviour of cold formed built - up steel compression member," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 8, no. 4, pp. 8409–8413, Nov. 2019, doi: 10.35940/ijrte.D9216.118419.
- [8] X. Yao *et al.*, "Experiment and design of cold-formed steel equal-leg lipped angle under axial compression," *Results in Engineering*, vol. 23, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102716.
- [9] M. Mohan, A. Ramachandran, M. Amran, and A. Borovkov, "Determination of buckling behavior of web-stiffened cold-formed steel built-up column under axial compression," *Materials*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15092968>.
- [10] H. Krishnan, "Buckling behaviour of cold formed steel closed compound columns using channel, zed and angle sections," Sathyabama, Chennai, 2023. doi: DOI:10.1016/j.tws.2004.05.002.
- [11] M. T. Chen and B. Young, "Material properties and structural behavior of cold-formed steel elliptical hollow section stub columns," *Thin-Walled Structures*, no. 134, pp. 111–126, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2018.07.055.
- [12] W. Reyes and A. Guzmán, "Evaluation of the slenderness ratio in built-up cold-formed box sections," *J Constr Steel Res*, vol. 67, no. 6, pp. 929–935, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.02.003.
- [13] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), "Norma ecuatoriana de la construcción (NEC 2015)," 2015.
- [14] American Iron and Steel Institute (AISI), "AISI S100-2024: North american specification for the design of cold-formed steel structural members," 2024.
- [15] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), "Norma sismo resistente NSR-10 capítulo F," 2010.
- [16] ASTM International, "ASTM A36/A36M – 97: Standard specification for carbon structural steel," 1997.
- [17] IPAC S.A., "Perfiles - IPAC S.A." Accessed: Feb. 25, 2025. [Online]. Available: https://ipac-acero.com/?page_id=880
- [18] ACESCO, "Manual de perfiles," 2016. Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://acesco.com.ec/wp-content/uploads/2019/01/perfiles-c-y-z-grado-50-manual-tecnico.pdf>
- [19] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Norma técnica ecuatoriana INEN, tolerancias en acero," 2012.
- [20] A. T. Carolina Camargo Guzmán, K. T. Lorena Hernández Guerrero, Y. T. Velandia Velandia, O. T. David Ricardo Estrada, K. T. Paola Montes Palencia, and R. T. José Guerra Fuquenes, "Ensayo de pandeo (Buckling test)," 2019.
- [21] X. Nieto-Cárdenas, C. Takeuchi, J. Carrillo, and C. Cobos, "Performance of non-structural masonry retrofitted with welded wire mesh and steel fibers under axial compression load," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Sep. 2023. doi: 10.1063/5.0170782.
- [22] O. Vitelmo *et al.*, "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures."
- [23] American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary," 2019.



AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Luis Enrique Bernal Rodríguez portador de la cédula de ciudadanía N° **0302828561**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, **26 de marzo del 2025**

F:

Luis Enrique Bernal Rodríguez

C.I. 0302828561



AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas portador de la cédula de ciudadanía N° **0350004693**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, **26 de marzo del 2025**

F: 
.....

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas

C.I. 0350004693

Azogues, 26 de marzo del 2025

Asunto: Embargo Temporal del Proyecto de Titulación

Señor,

Dr. Santiago Moscoso Bernal, PhD.,

Decano de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria Y Construcción

Cuenca.

De mi consideración:

Señor Decano, Luis Enrique Bernal Rodríguez como autor del Proyecto de Titulación **“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN”** y Ing. Pilar Roxana Naspud Uruchima, MSc como director de la misma, solicitamos a usted y por su digno intermedio a Biblioteca y al responsable del repositorio institucional, el EMBARGO TEMPORAL del mismo, por un lapso de 24 meses, con la finalidad de evaluar su contenido con fines de: evaluación de artículo científico para publicación en revista Ingeniería e Investigación, indexada y arbitrada; contener información reservada que será utilizada con fines de publicación. Entiendo que luego de vencido este período automáticamente la obra será puesta a disposición del público bajo las normas de gestión de la Universidad.

Por la atención que sepa dar al presente, nos suscribimos de usted muy agradecidos.

Atentamente,



CI: 0302828561

Luis Enrique Bernal Rodríguez



CI: 0302537261

Ing. Pilar Roxana Naspud Uruchima, MSc

C.C.: Biblioteca.



Azogues, 26 de marzo del 2025

Asunto: Embargo Temporal del Proyecto de Titulación

Señor,

Dr. Santiago Moscoso Bernal, PhD.,

Decano de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria Y Construcción

Cuenca.

De mi consideración:

Señor Decano, Jorge Emanuel Villavicencio Salinas como autor del Proyecto de Titulación **“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA CONFORMADOS EN FRÍO (CFS) A COMPRESIÓN”** y Ing. Pilar Roxana Naspud Uruchima, MSc como director de la misma, solicitamos a usted y por su digno intermedio a Biblioteca y al responsable del repositorio institucional, el EMBARGO TEMPORAL del mismo, por un lapso de 24 meses, con la finalidad de evaluar su contenido con fines de: evaluación de artículo científico para publicación en revista Ingeniería e Investigación, indexada y arbitrada; contener información reservada que será utilizada con fines de publicación. Entiendo que luego de vencido este período automáticamente la obra será puesta a disposición del público bajo las normas de gestión de la Universidad.

Por la atención que sepa dar al presente, nos suscribimos de usted muy agradecidos.

Atentamente,

CI: 0350004693

Jorge Emanuel Villavicencio Salinas

CI: 0302537261

Ing. Pilar Roxana Naspud Uruchima, MSc

C.C.: Biblioteca.

Declaratoria de Embargo Temporal de Obra

La **Universidad Católica de Cuenca**, declara que la presente obra no se encuentra temporalmente en nuestro repositorio por precautelar intereses temporales de su autor titular, razón por la cuál pesa sobre esta un período de embargo de publicación de obra por el lapso de 24 meses, contados a partir del 26 de marzo de 2025; la misma estará disponible en este mismo enlace a partir del 26 de marzo de 2027, si tienen algún interés particular puede contactar con el Ing. Fausto David Quevedo Pesántez, Mgs.



Lcda. Melissa Tenecela Cárdenas
BIBLIOTECARIA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Universidad
Católica
de Cuenca
SEDE AZOGUES
BIBLIOTECA