

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE COLUMNAS CORTAS EN LÁMINA DELGADA REFORZADAS CON BARRAS

Verónica Nieto Pérez

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2024

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE COLUMNAS CORTAS EN LÁMINA DELGADA REFORZADAS CON BARRAS

Verónica Nieto Pérez

Trabajo dirigido

Director

M.Sc. Javier Urbano Tole

Línea de Investigación:

Diseño Mecánico

Grupo de Investigación:

Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica (DSIM)

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C., Colombia

2024

*“En la vida, nada debe ser temido; solo debe ser
comprendido.”*

Marie Curie

Agradecimientos

A mis padres, por siempre estar y por todos sus esfuerzos. A mi hermano por mostrarme el amor más puro.

Al Ing. Javier Urbano, por compartir todos sus conocimientos, por su paciencia y comprensión en todos estos años.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por todas las enseñanzas, aprendizajes y relaciones que formé en todo este proceso.

Resumen

En la industria de estructuras de acero conformadas en frío, se ha llegado implementar y/o adicionar elementos que favorecen el comportamiento de estas bajo cargas a compresión, sin embargo no se encuentra un amplio registro de estudios que analicen el impacto de los refuerzos en estos. En este trabajo, se presentará un análisis teórico y experimental sobre el comportamiento de la carga crítica soportada en perfiles en lámina de acero delgada tipo canal al estar reforzados por medio de barras de acero de diferentes diámetros. Con el fin de determinar el verdadero efecto de los refuerzos en los perfiles y validar la fundamentación teórica usada. Los resultados de las cargas críticas teóricas se comparan con los valores obtenidos por medio del plan de ensayos ejecutado y así determinar la efectividad de los refuerzos.

Palabras clave: CFS; Perfiles en Lámina delgada a compresión; Reforzamiento con barras; Columnas cortas de lámina delgada; Steel thin-wall; Steel bar reinforcement; Short Column Design; Cold-Formed; Lámina delgada, carga crítica, refuerzo.

Contenido

	Pág.
Contenido	XI
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Metodología	2
1.3. Alcance	2
Capítulo 2. Estado del arte	5
2.1. Consulta bibliográfica.....	6
2.2. Descripción general del estado del arte relacionado.....	6
2.2.1. Estudios teóricos.....	7
2.2.2. Estudios experimentales	8
Capítulo 3. Marco teórico	10
3.1. Perfiles y Elementos del perfil	10
3.1.1. Material	10
3.1.1.1. Lámina delgada y acero de bajo carbono	10
3.1.2. Geometría.....	10
3.1.1.2. Perfil tipo canal	11
3.2. Diseño de perfiles – Método de anchos efectivos	11
3.2.1. Estimación de la carga.....	12
3.3. Diseño teórico de perfiles reforzados con barras.....	13
3.3.1. Refuerzo	13
3.3.1.1. Material	13
3.3.1.1.1 Acero AISI 1018.....	13
3.3.1.2. Geometría	13
3.3.1.3. Método de sujeción	14
3.3.1.3.1 Soldadura de punto	14
3.3.1.3.2 Longitud crítica	15
3.4. Parámetros de ensayo	15
3.4.1. Refuerzo	16
3.4.2. Punto de aplicación de la carga.....	16

Capítulo 4. Análisis teórico.....	18
4.1. Diseño de perfiles	18
4.2. Estimación de carga crítica	18
4.2.1. Método ASD.....	19
4.2.2. Propiedades geométricas	19
4.2.2.1. Cálculo de longitudes reales	19
4.2.2.2. Cálculo de centroide para perfil con y sin refuerzo.....	20
4.2.2.3. Cálculo del momento de inercia.....	21
4.2.2.4. Cálculo del radio de giro	21
4.2.3. Cálculo esfuerzo elástico de pandeo	22
4.2.3.1. Módulo de elasticidad del material	22
4.2.3.2. Factor de longitud efectiva	22
4.2.4. Cálculo factor de esbeltez de la columna y esfuerzo nominal de pandeo.....	23
4.2.5. Cálculo del área efectiva	23
4.2.5.1. Ancho efectivo	23
4.2.6. Cálculo de la carga crítica nominal para cada elemento	24
Capítulo 5. Análisis experimental.....	26
5.1. Caracterización del material.....	26
5.2. Plan de ensayos	27
5.3. Fabricación de perfiles.....	28
5.4. Ensayos de laboratorio.....	29
5.4.1. Parámetros de ensayo.....	29
5.5. Ejecución del plan de ensayos.....	30
5.5.1. Perfil sin refuerzo.....	30
5.5.2. Perfil con refuerzo.....	32
5.5.2.1. Perfil con refuerzo de 3,18 mm.....	32
5.5.2.1.1. Perfil con refuerzo de 3,18 mm y longitud crítica L/8	32
5.5.2.1.2. Perfil con refuerzo de 3,18 mm y longitud crítica L/4	34
5.5.2.1.3. Perfil con refuerzo de 3,18 mm y longitud crítica L/2	36
5.5.2.2. Perfil con refuerzo de 4,75 mm.....	38
5.5.2.2.1. Perfil con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica L/8	38
5.5.2.2.2. Perfil con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica L/4	40
5.5.2.2.3. Perfil con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica L/2	42
5.5.2.3. Perfil con refuerzo de 6,35 mm.....	44
5.5.2.3.1. Perfil con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica L/8	44
5.5.2.3.2. Perfil con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica L/4	46
5.5.2.3.3. Perfil con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica L/8	47
5.6. Discusión y análisis	48
5.7. Comparación de resultados	51
Capítulo 6. Conclusiones.....	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ruta de trabajo definida.....	2
Figura 2. Delimitación de alcance del proyecto.....	3
Figura 3. Estructura y ubicación de la investigación [1].....	5
Figura 4. Perfiles soldados en prueba a compresión y longitudes de soldadura [8].....	8
Figura 5. Perfiles reforzados con polímero para morteros [10].	9
Figura 6. Perfiles reforzados con polímero reforzado con fibra de carbono [11].	9
Figura 7. Tipos de perfiles [12]	11
Figura 8. Elementos de perfil tipo canal con labios hacia dentro.	11
Figura 9. Procedimiento para el cálculo de la carga crítica, adaptado de [1].	13
Figura 10. Perfil con refuerzo y nuevos elementos de análisis.....	14
Figura 11. Esquema de proceso de soldadura de punto y sus variables [14].....	15
Figura 12. Longitud crítica de puntos de soldadura [1].	15
Figura 13. Tipos de apoyo para columnas y factor de longitud efectiva [15].	16
Figura 14. Tipos de pandeo [16].....	17
Figura 15. Esquema de ubicación del centroide en el perfil sin refuerzo.....	20
Figura 16. Esquema de ubicación del centroide en el perfil con refuerzo.....	21
Figura 17. Factores de longitud efectiva para columnas [17].....	22
Figura 18. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta [1]	24
Figura 19. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta (continuación) [1].	24
Figura 20. Dimensiones de probeta para ensayo a tensión de acero..	26
Figura 21. Curvas experimentales de esfuerzo-deformación.....	27
Figura 22. Perfiles con diámetros de refuerzos.....	28
Figura 23. Ubicaciones de unión entre refuerzo y perfil de acuerdo con la longitud crítica definida.....	28
Figura 24. Fallas por soldadura en el proceso de adhesión de refuerzos.....	29
Figura 25. Pandeo local en labios y aleta	30
Figura 26. Pandeo local en el alma	30
Figura 27. Separación del punto de falla al punto medio del perfil	31
Figura 28. Perfil con barra de refuerzo de 3.18 mm.	32

Figura 29. Imperfecciones provocadas por proceso de adhesión de refuerzo y pandeo local en los labios.....	33
Figura 30. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.....	34
Figura 31. Pandeo local en aletas y labios.....	35
Figura 32. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.....	36
Figura 33. Pandeo local en el labio.....	37
Figura 34. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.....	37
Figura 35. Perfil con barra de refuerzo de 4,75 mm.....	38
Figura 36. Pandeo local en labios (A) e imperfecciones en el refuerzo (B).....	39
Figura 37. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.....	39
Figura 38. Pandeo local en el labio (B) y en la aleta (A)..	40
Figura 39. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.....	41
Figura 40. Pandeo local en el labio y aleta.....	42
Figura 41. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.....	43
Figura 42. Perfil con barra de refuerzo de 6,35 mm.....	44
Figura 43. Pandeo local en labio y aleta (A) e imperfecciones en el refuerzo (B).....	45
Figura 44. Desprendimiento del refuerzo de diámetro 6,35 mm.....	45
Figura 45. Pandeo local en los labios (A) y aleta (B)..	46
Figura 46. Pandeo local en el labio.....	48
Figura 47. Curvas de carga vs longitud crítica para refuerzo de 3,18 mm.....	48
Figura 48. Curvas de carga vs longitud crítica para refuerzo de 4,75 mm.....	49
Figura 49. Curvas de carga vs longitud crítica para refuerzo de 6,35 mm.....	50
Figura 50. Curvas de relación espesor/diámetro vs % aumento de carga.....	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Palabras relacionadas con la búsqueda.....	6
Tabla 2. Estudios teóricos y experimentales relacionados.....	7
Tabla 3. Criterios de diseño de perfiles tipo canal por la norma AISI S100-16. [13].....	12
Tabla 4. Dimensiones del perfil en C.....	18
Tabla 5. Dimensiones y variables del refuerzo.....	19
Tabla 6. Valores de propiedades obtenidas en curva σ vs ϵ	27
Tabla 7. Plan de ensayos.....	28
Tabla 8. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles sin refuerzo.....	30
Tabla 9. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 3.18 mm y longitud crítica de L/8.....	32
Tabla 10. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 3.18 mm y longitud crítica de L/4.....	34
Tabla 11. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 3.18 mm y longitud crítica de L/2.....	36
Tabla 12. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 4.75 mm y longitud crítica de L/8.....	38
Tabla 13. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 4.75 mm y longitud crítica de L/4.....	40
Tabla 14. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 4.75 mm y longitud crítica de L/2.....	42
Tabla 15. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 6.35 mm y longitud crítica de L/8.....	44
Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 6.35 mm y longitud crítica de L/4.....	46
Tabla 17. Resultados obtenidos en los ensayos con refuerzo de 6.35 mm y longitud crítica de L/2.....	47

Introducción

El presente trabajo da a conocer el estudio teórico-experimental de estructuras tipo perfil fabricadas en lámina delgada y sometidas a cargas compresión aplicadas en su centroide. En diferentes sectores industriales, se tienen estructuras para bodegaje y almacenamiento que se conocen como estanterías y estas se encuentran sometidas a altas cargas.

Sin embargo, se desconoce el efecto que tienen al sobrepasar las cargas críticas para las que fueron diseñadas. De la misma forma, se desconoce el comportamiento al estar reforzados con barras de acero en sus elementos rigidizadores. En este estudio se busca identificar y comprender el efecto de las cargas, al igual que el tipo de pandeo presentado.

Para este trabajo se planteó una metodología experimental. En el capítulo 2, se da una primera revisión del estado del arte para identificar todas las variables posibles y posteriormente elegir con cuales se trabajará dentro del plan de ensayos. En el capítulo 3, se presentarán los fundamentos teóricos necesarios para el estudio y la descripción de los parámetros de ensayo. En el capítulo 4, se describe el proceso de cálculo de la carga crítica para cada variación de cada espécimen. Por último, en el capítulo 5, se analizarán los resultados experimentales obtenidos y se compararán con los resultados teóricos esperados, para finalmente concluir.

1.1. Objetivos

Principal

- Identificar experimentalmente el efecto en la resistencia a la compresión del refuerzo con barras en perfiles cortos de lámina delgada

Secundarios

- Definir la geometría, el material de los perfiles y el material de refuerzo, que permitan reforzar los perfiles, y los procesos mediante los cuales se pueden fijar los refuerzos.
- Plantear y ejecutar el plan experimental para evidenciar el efecto estudiado.
- Comparar y relacionar los resultados obtenidos con resultados teóricos.

1.2. Metodología

Este trabajo dirigido se aborda mediante una metodología tipo experimental, dentro de la que se deben tener en cuenta las diferentes etapas en las que se desarrollará el estudio, al igual que el efecto de las variables en la carga soportada por los perfiles. En la *Figura 1*, se puede observar la ruta de trabajo definida para el estudio.

Problemática: Se busca identificar el comportamiento de elementos tipo columna corta reforzados con barras circulares adheridos por medio de soldadura, al estar sometidos a cargas a compresión en su centroide.

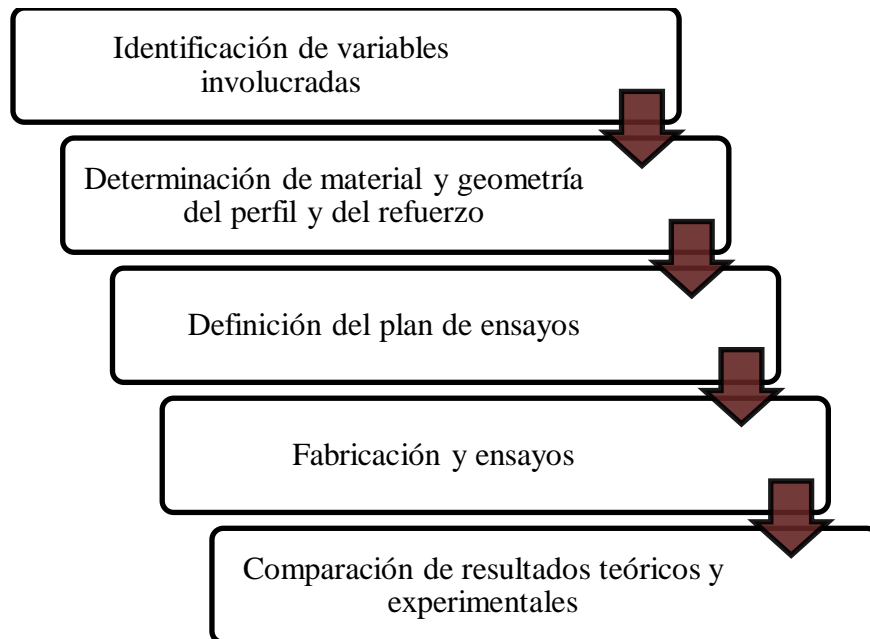


Figura 1. Ruta de trabajo definida.

1.3. Alcance

Dado que el análisis de estructuras en acero tiene diferentes líneas de estudio teóricas y experimentales, se hace necesario establecer los límites que se presentarán dentro del mismo. Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se establecen las variables a delimitar que se pueden observar en la *Figura 2*. Dentro de estas se encuentran límites de diseño y parámetros de ensayo, que trascienden al estudio teórico, dado que estas influyen directamente en el cálculo de la carga máxima a soportar.

- **Geometría:** Se establece solo un tipo de geometría al igual que una altura fija.
- **Espesor:** Se trabajará con lámina delgada, es decir un espesor menor a 3 mm.

- **Tipo de ensayo:** Este tipo de estructuras se pueden someter a diferentes tipos de ensayo como de tensión o compresión, sin embargo, este estudio se limitará a ensayos a compresión.
- **Tipo de apoyo:** En los ensayos, se realizará un tipo de apoyo fijo-fijo en cada extremo del perfil.
- **Refuerzo:** La selección del refuerzo se da con tres parámetros esenciales, como son: material, geometría y el método de sujeción al perfil.

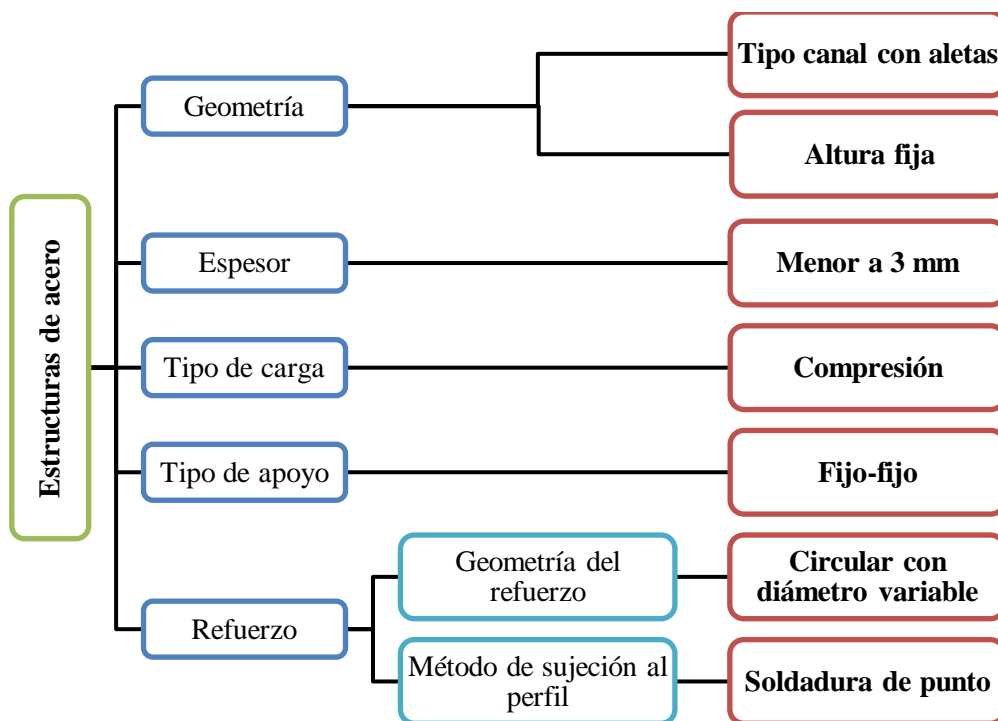


Figura 2. Delimitación de alcance del proyecto.

Capítulo 2. Estado del arte

Dentro de esta sección, se ubica y contextualiza al lector, en cómo se encuentra situado actualmente el proyecto a realizar dentro de la rama investigativa. Igualmente se presentan las bases teóricas usadas dentro del estudio. El tema principal del estudio son elementos tipo columna corta fabricadas en lámina delgada, las cuales se someten a distintos tipos de cargas a lo largo de su vida útil. Dentro de las estructuras, se encuentran los perfiles abiertos, estos pueden presentar variaciones geométricas o inclusive, dada su aplicación en estanterías, se permiten agujeros. Sin embargo, se ha indagado poco en las formas de reforzar los dobles de lámina. En la *Figura 3*, se presenta un breve resumen de la ubicación de la investigación.

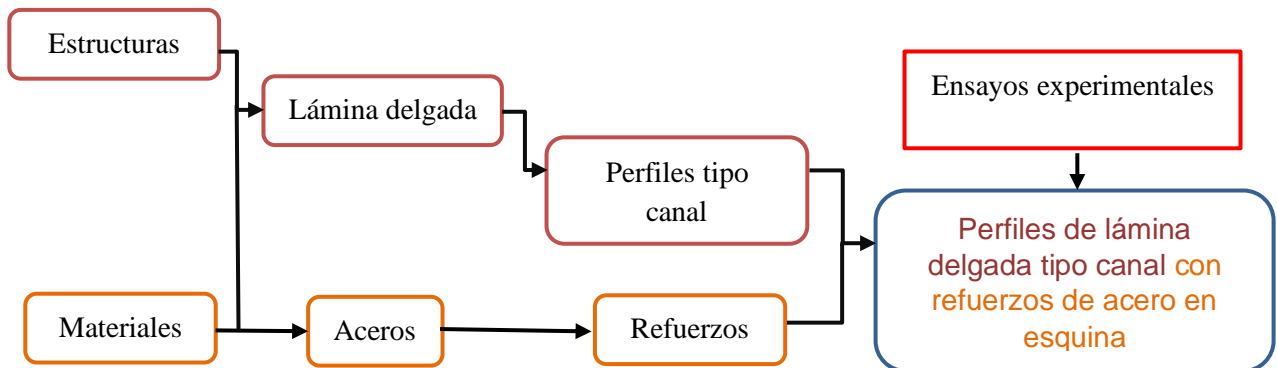


Figura 3. Estructura y ubicación de la investigación. Tomada de [1] y adaptada por el autor

El reforzamiento de perfiles se puede relacionar directamente con la necesidad creciente de aumentar la resistencia de carga de los perfiles. Con esto, se pueden establecer los criterios de búsqueda para realizar la estructuración del estado del arte: Perfiles de lámina delgada de acero, sometidos a compresión, secciones C, con o sin refuerzo.

2.1. Consulta bibliográfica

Con lo anteriormente presentado, se realizó la revisión de las diferentes fuentes bibliográficas, las cuales coinciden con el alcance de la investigación, se presentan algunas de los estudios encontrados, al igual que palabras claves al momento de realizar la debida revisión.

Revistas y libros:

- “Cold Formed Steel Design” por Wei-Wen Yu
- Journal of structural engineering
- Engineering structures
- Thin-walled structures
- Steel construction
- Latin American Journal of Solids & Structures

Tabla 1. Palabras relacionadas con la búsqueda.

Español	Inglés
Diseño de lámina conformada en frío	Cold formed Steel design
Secciones de canal	Channel sections
Capacidad portante	Load carrying capacity
Lámina delgada	Thin sheet
Carga a compresión	Compression load
Comportamiento post-pandeo	Post- buckling behaviour
Pandeo local	Local buckling
Ancho efectivo	Effective width
Elementos rigidizadores	Stiffeners
Columnas cortas	Stub columns

Para complementar, a continuación, se presentará un listado de las diferentes instituciones que han profundizado en el tema a investigar:

- Universitat politècnica de Catalunya
- University of Baltimore
- University of São Paulo, Brazil
- Technical University of Lisbon
- Universidade Nova de Lisboa
- University of Macau, China
- The Hong Kong Polytechnic University
- The University of Sheffield
- Universidad Nacional de Colombia

2.2. Descripción general del estado del arte relacionado

El uso de estructuras de acero ha sido implementado y estudiado en todo lo que refiere a obras civiles, dada la importancia que estos representan dentro de la industria y la seguridad que han garantizado, a pesar del paso del tiempo y los diferentes fenómenos a los que se encuentran expuestos. Por ello, dentro de este capítulo se realizó una revisión del estado del arte para la cual se presentó un enfoque en estudios teóricos y los métodos de cálculo usados, al igual que estudios experimentales y sus metodologías de ensayos.

A pesar de que existe una amplia bibliografía en todo lo que refiere a estudios teóricos, los artículos e investigaciones encontradas, se enfocaron en estructuras de acero con geometrías comunes dentro de la industria estructural y relacionadas con lo que se tratará en este estudio. Igualmente, dentro de la consulta realizada a estudios experimentales, se encontraron algunas investigaciones relacionadas con el reforzamiento de los perfiles con materiales poliméricos, sin embargo, no aplicado solamente en las esquinas sino en toda la superficie de los elementos. En la Tabla 2, se encuentra más detalles sobre todos los estudios encontrados con relación al enfoque de este estudio.

Tabla 2. Estudios teóricos y experimentales relacionados.

Tipo de análisis	Tipo de perfil	
	Sin refuerzo	Con refuerzo
Estudios Teóricos	2012, Cao Hung Pham, Gregory J. Hancock [2]	2008, R. Landolfo, O. Mammana (similar) [6]
	2020, Krishanu Roy, Hieng Ho Lau [3]	2015, Baofeng Zheng, Xia Hua. (similar) [7]
	2021, Zhiyuan Fang, Krishanu Roy [4]	2018, Urbano Tole, J. A. [1]
	2021, Mithum Peiris, Mahen Mahendran [5]	
Estudios Experimentales	2009, Jessica Whittle, Chris Ramseyer [8]	2019, El-Sayed, K. M., Debaiky, A. S., Khalil, N. N., & El-Shenawy, I. M. [10]
	2017, Dobrić, J., Buđevac, D., Marković, Z., & Gluhović, N. [9]	2018, Amoush, E. A., & Ghanem, M. A. [11]

2.2.1 Estudios teóricos

Como se puede observar en la Tabla 2, existen estudios mediante los cuales se ha analizado el comportamiento de perfiles metálicos bajo cargas, ya sea a compresión o a tensión [2], en donde se muestra el efecto de la tensión cortante en el perfil, todo esto de manera teórica y simulada, llegando a condiciones de pandeo local para perfiles tipo C en los labios. En este caso, se usa como método de diseño, el **método de tiras finitas** el cual relaciona las dimensiones geométricas del perfil con el esfuerzo elástico de pandeo, este varía dependiendo del coeficiente de pandeo que cambia con la condición de borde de cada elemento dentro del perfil.

Por otra parte, dentro de la revisión de estudios teóricos, se presentan casos en los que se evalúan perfiles con elementos adicionales, tales como conexiones [3], siendo estos, conexiones de perfiles de la misma geometría tipo C, por medio de bridas. En este estudio, se realiza un acercamiento de diseño, por medio del **método de fuerza directa**, en el cual se realiza un análisis de pandeo en las

secciones transversales, sin tener en cuenta las longitudes efectivas de los elementos, por lo que se considera un método conservador al calcular las cargas críticas a soportar. En otros estudios, se usó el **método de anchos efectivos** [4], el cual se usa para evaluar la carga de estructuras que están sujetas a efectos de pandeo local, ya sea por condiciones o modificaciones geométricas.

Para perfiles reforzados, se encontraron estudios para perfiles soldados en H [6,7], en el cálculo teórico de los mismos, se realizaron cálculos de por medio de *Eurocode (EN 1993-1-4:2006)* y *American code (SEI/ASCE 8-02)*, dentro de los cuales se tienen como principios de diseño el **método de estados límites (LRFD)**, en el cual se aplican factores de carga y resistencia para obtener las cargas de diseño y el **método de resistencia permitida (ASD)**, en el que se aplican factores de seguridad para obtener las cargas admisibles.

Dentro de la revisión se encuentran los diferentes métodos teóricos y de simulación para el cálculo de la carga crítica, en los cuales se observan modificaciones geométricas y/o del material de los perfiles, sin embargo, el posicionamiento de la carga es una variable en común en todos los estudios, la cual es coincidente con el centroide del perfil.

2.2.1 Estudios experimentales

Para los casos experimentales, se encontraron ensayos para perfiles sin ninguna modificación, obteniendo resultados de la carga crítica de cada uno de estos, sin embargo, existen investigaciones en las cuales se estudia el comportamiento bajo cargas de compresión de los perfiles conectados por medio de soldadura, por ejemplo, se analiza el coeficiente de esbeltez y como este varía con el cambio de las condiciones geométricas, tales como las uniones de perfil o la longitud del perfil, cambios que terminan representando un valor altamente significativo en el aumento de la esbeltez del perfil [8]. Es importante tener en cuenta el proceso de fabricación de los perfiles, dado que, en el caso del tipo de perfil mostrado en la *Figura 4*, se soldó en 3 puntos diferentes.

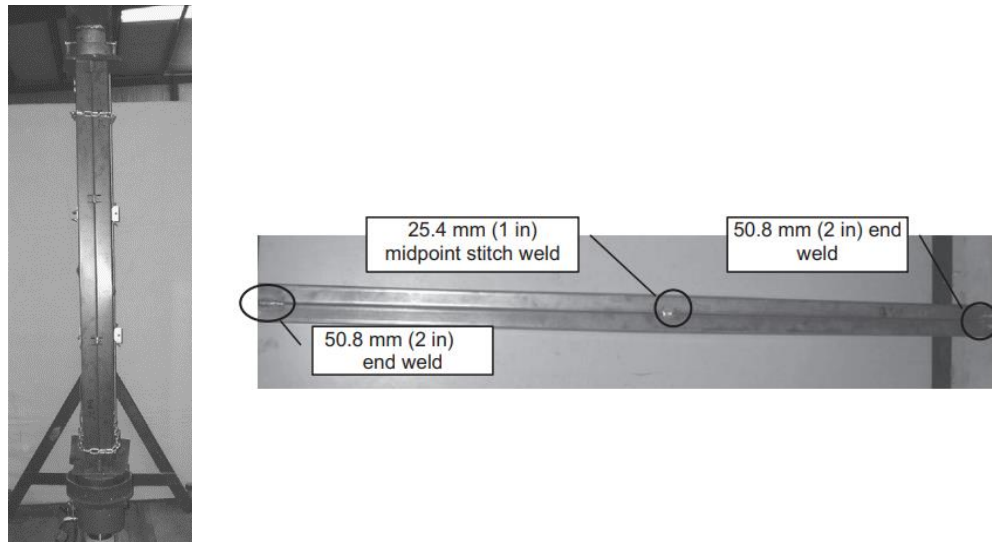


Figura 4. Perfiles soldados en prueba a compresión y longitudes de soldadura. [8]

A pesar de que las investigaciones suelen guiarse hacia elementos de análisis tipo columnas largas, existen estudios sobre columnas cortas [9], en los que se evalúa de manera más exhaustiva la deformación que presenta cada elemento del perfil de acero con geometría tipo C, sin labios. Al realizar el análisis, se encontraron resultados referentes al pandeo local en las aletas.

Para perfiles reforzados hay variedad de estudios en los cuales se analiza el comportamiento de las estructuras, al realizar la revisión se encontraron ensayos para perfiles reforzados con polímeros [10], en los cuales, al ser estructuras huecas cuadradas, se rellenó el vacío de estos con polímero para rellenar morteros y así aumentar su resistencia en ensayos a compresión. En la *Figura 5*, se puede observar el pandeo en los extremos de los elementos reforzados, luego de los ensayos a compresión. Igualmente, en otros estudios [11] se observan perfiles reforzados con polímero reforzado con fibra de carbono, dentro de los cuales se probaron especímenes reforzados en toda su longitud o como se muestra en la *Figura 6*, de manera discontinua sobre la superficie.



Figura 5. Perfiles reforzados con polímero para morteros. [10]

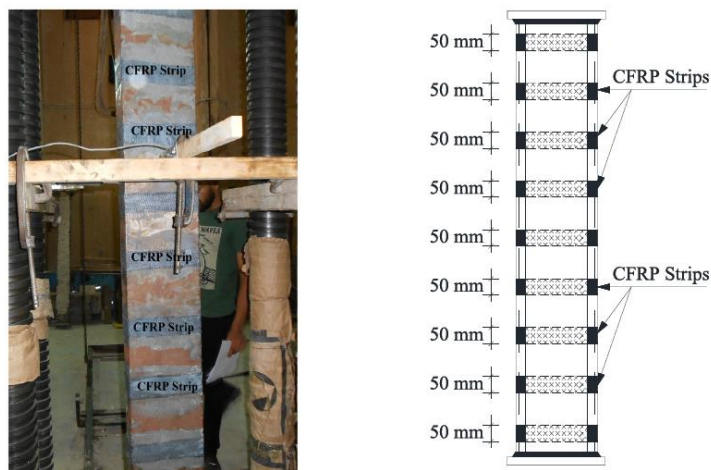


Figura 6. Perfiles reforzados con polímero reforzado con fibra de carbono. [11]

Capítulo 3. Marco Teórico

En esta sección se presentan las variables para tener en cuenta dentro del estudio a realizar, tanto aquellas relacionadas con los elementos a ensayar, siendo estas estructuras tipo columna corta con y sin refuerzo, al igual que los parámetros del ensayo y las delimitaciones que se plantean dentro del mismo, como lo son el tipo y la ubicación de la carga a aplicar.

3.1. Perfiles y Elementos del perfil

Dado el alcance del estudio, se deben tener en cuenta las diferentes variables que se llegan a involucrar, tales como el material, la geometría y el proceso de fabricación de los perfiles. Por ello, se debe tener muy presente el impacto de cada una de estas variables y cómo actúan conjuntamente dentro del plan de ensayos.

3.1.1. Material

Desde los objetivos se ha tenido claridad de que la finalidad de este estudio va guiada, por el comportamiento de estructuras de acero, sin embargo, es importante delimitar el tipo de acero que se usó para poder estimar y/o determinar mejor su desempeño bajo las condiciones de ensayo especificadas.

3.1.1.1. Lámina delgada y acero de bajo carbono

La lámina delgada se define como una pieza plana y delgada de material metálico, la cual se caracteriza por tener un espesor muy pequeño en comparación con su longitud y ancho. El espesor máximo que puede presentarse en lámina delgada es de 3 mm, siendo este una variable considerable en las diferentes aplicaciones que se pueden tener, tales como estructuras livianas o para complementar elementos estructurales de altas cargas. Uno de los métodos para poder obtener lámina delgada es el proceso de laminado.

El laminado es un proceso de conformado, en el cual el material metálico se introduce entre rodillos para reducir su espesor. En el caso del laminado en frío, se realiza a temperatura ambiente, permitiendo la recristalización del material, que es un proceso que se obtiene mediante el recocido del material, para permitir que los granos deformados, se sustituyen por un nuevo conjunto de granos que no presentan cambio de fase posterior a la deformación en frío. Con este proceso de conformado, se aumenta la resistencia y la dureza del acero.

3.1.2. Geometría

Dentro de la industria estructural se tiene un amplio panorama en lo que refiere a perfiles. Las diferentes geometrías se presentan para las diferentes aplicaciones, en las cuales se debe tener en cuenta que distribución de la carga se está buscando y la longitud del elemento, en cuanto al factor de diseño. En la *Figura 7*, se pueden observar las diferentes geometrías.

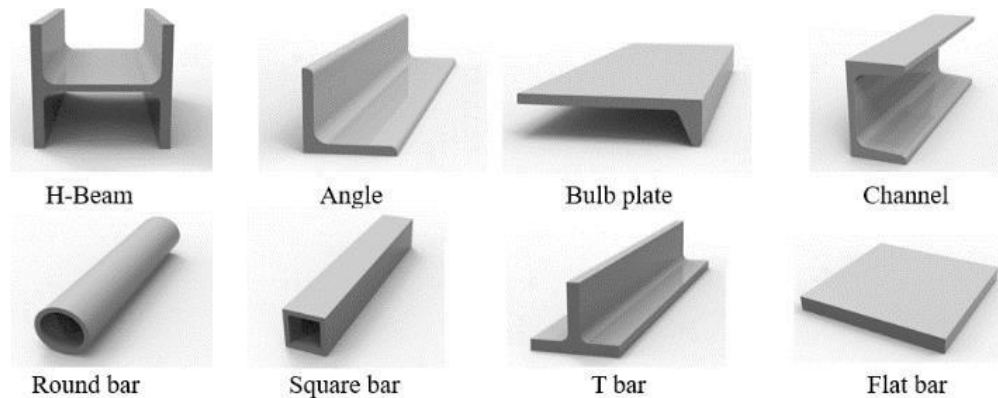


Figura 7. Tipos de perfiles. [12]

3.1.2.1. Perfil tipo canal

También conocidos como perfil tipo C. Tienen una geometría sencilla, por lo tanto, al ser un perfil abierto es versátil a que se puedan realizar modificaciones dentro de su geometría, tales como la inclusión de nuevos elementos. En la *Figura 8*, se observa la distribución de los elementos del perfil.

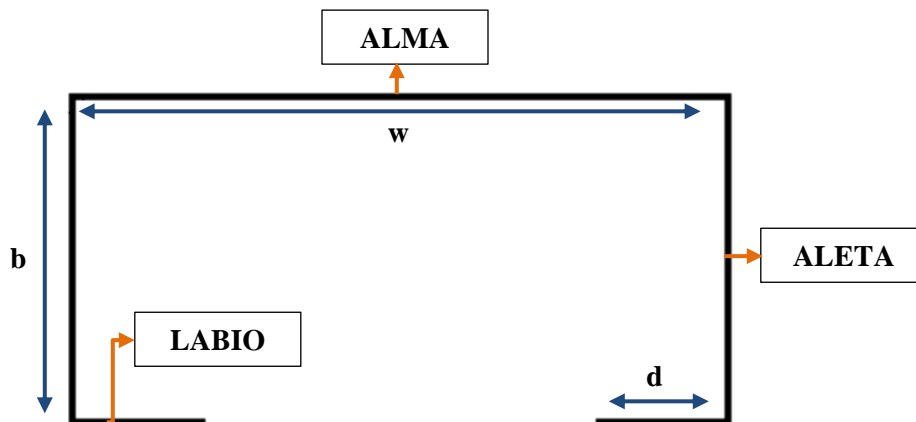


Figura 8. Elementos de perfil tipo canal con labios hacia dentro.

El tipo de perfil que se analizará en este estudio es el perfil tipo canal con labios hacia dentro. La adición de estos elementos altera el comportamiento bajo carga de las aletas, dado que ahora se analiza como un elemento completamente rigidizado y este debería soportar mayor carga, aumentando la carga crítica del perfil completo.

3.2. Diseño de perfiles – Método de anchos efectivos

Para lograr determinar las dimensiones de cada elemento del perfil, se deben tener en cuenta las relaciones geométricas estipuladas por el estándar AISI S100-16. Dentro de este estándar, se tienen

dos métodos de validación sobre las dimensiones del perfil, en este estudio se usará el método del ancho efectivo, con el cual se podrá determinar la longitud efectiva de cada elemento, que es la porción del elemento que en realidad contribuye a resistir las cargas aplicadas. Para el análisis de cada elemento se debe tener en cuenta el espesor del material, al igual que los momentos de inercia de cada uno. En la Tabla 3, se presentan los criterios geométricos de diseño para los perfiles.

Tabla 3. Criterios de diseño de perfiles tipo canal por la norma AISI S100-16. [13]

Criterio	Variables	Método de ancho efectivo
Elemento rigidizador a compresión	w/t	≤ 500
Elemento con borde rigidizado a compresión	b/t	≤ 90
Elemento no rigidizado a compresión	d/t	≤ 60
Radio de curvatura interno	R/t	≤ 10
Relación longitud aleta/labio	d_0/b_0	$\leq 0,7$

t = Espesor de los elementos

R = Radio de curvatura

d_0 = Longitud real de aleta

b_0 = Longitud real del labio

En la *Figura 8* se pueden observar la distribución de las dimensiones dentro de cada elemento. Si el perfil cumple con estos parámetros iniciales de diseño, el comportamiento del perfil bajo carga a compresión se puede determinar bajo diferentes métodos de diseño, escogiendo el que mejor se adapte al caso de estudio.

Sin embargo, las especificaciones de la norma no son suficiente para poder lograr un diseño geométrico inicial, dado que se debe tener una referencia comercial de los perfiles dentro de la industria, no obstante, las dimensiones que se presentan son mucho más grandes que los perfiles que se analizarán dentro de este estudio, por lo cual, con respecto a las dimensiones comerciales, se toman los valores geométricos más pequeños y se realizan relaciones entre los elementos, las cuales se despejan con respecto a una dimensión especificada, la cual suele ser la longitud del alma al ser el elemento de más largo.

3.2.1. Estimación de la carga

Al tener definido el material, la geometría y el método de diseño que se usa para la estimación de la carga, se debe plantear un paso a paso en el que se incluyan los factores esenciales dentro de la resistencia a la carga del perfil. Se tomó el procedimiento especificado por el autor [16]. En la *Figura 9*, se presenta un diagrama de flujo que resume todo el proceso para tener la resistencia a compresión.

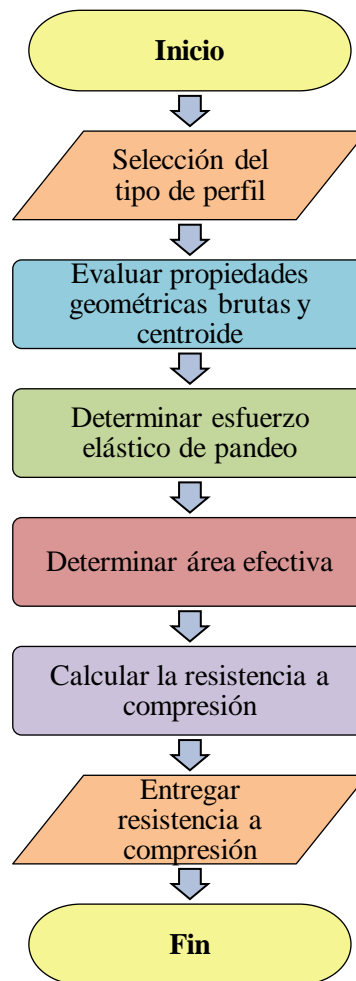


Figura 9. Procedimiento para el cálculo de la carga crítica, adaptado de [1]

3.3. Diseño teórico de perfiles reforzados con barras

3.3.1. Refuerzo

El objetivo principal de este estudio es determinar el efecto que tendrá el refuerzo dentro de los perfiles, sin embargo, para la selección de este se deben tener en cuenta aspectos que afectan directamente a los ensayos, tales como el material, la geometría y los métodos de sujeción que pueden soportar.

3.3.1.1 Material

3.3.1.1.1 Acero AISI 1018

Al igual que con el material de los perfiles, se debe buscar un material, el cual presente buena soldabilidad para que se pueda sujetar al perfil. El material dentro de sus propiedades mecánicas debe tener un esfuerzo de fluencia del material mayor al esfuerzo de fluencia del perfil sin ningún tipo de

refuerzo, esto para garantizar que soportará más de la carga previa aplicada. Para este estudio, se necesita un acero que presente buena soldabilidad para la sujeción de los perfiles a la lámina, por ello, se opta por un acero AISI 1018, el cual es un acero bajo en carbono, teniendo como composición química niveles de carbono cercanos al 0.18%. Por otra parte, al estar realizando un plan de ensayos tan amplio, se esperan poder realizar la mayor cantidad de ensayos, por ello se busca un acero con precios comerciales.

3.3.1.2. Geometría

Teniendo como referencia la geometría inicial del perfil, se debe definir la geometría del refuerzo. Hay varios parámetros que deben tenerse en cuenta, el primero siendo la ubicación que tendrá el refuerzo dentro de los perfiles. Estos, se ubicarán en el doblado realizado entre el alma del perfil y la aleta. Por el proceso de fabricación empleado en los perfiles, se presenta un radio de curvatura, el cual permite que un elemento de geometría circular se adapte mejor y presente más superficie de contacto entre el perfil y el refuerzo. Inicialmente, se escoge una geometría circular, sin embargo, se debe tener en cuenta que el análisis del perfil varía al presentar los refuerzos, puesto que estos se evalúan como elementos adicionales dentro de la geometría del perfil.

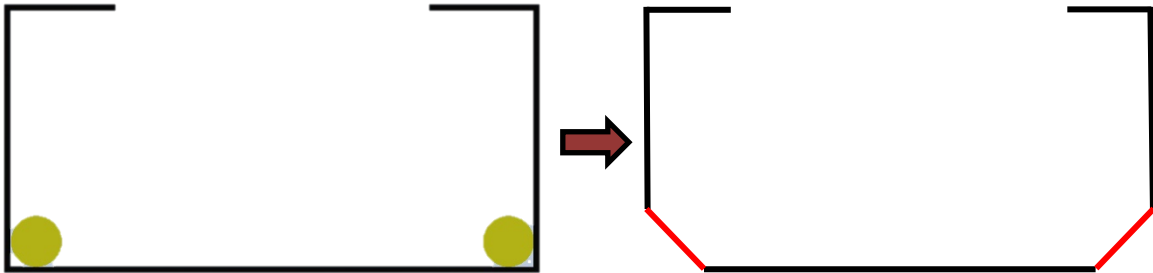


Figura 10. Perfil con refuerzo y nuevos elementos de análisis.

El refuerzo se analizará como un elemento tipo columna, el cual estará por toda la longitud del perfil. Al tener definida el tipo de geometría, se debe tener en cuenta el diámetro del refuerzo, los cuales varían con respecto a las referencias comerciales y a la relación que este presenta con el espesor del perfil.

3.3.1.3. Método de sujeción

Existen diferentes métodos para la sujeción de aceros, sin embargo, en este estudio se está buscando uno que no deforme la lámina delgada excesivamente, dado que se está buscando evaluar su comportamiento sumándole el de un elemento adicional. Por esto, el método que mejor se llega a adaptar a lo que se busca, lo cual es una adhesión sin pérdida de propiedades del material de la lámina, es la soldadura.

3.3.1.3.1. Soldadura de punto

Con aceros de bajo carbono, la soldadura es el método ideal para la adhesión entre perfil y refuerzos, no obstante, uno de los factores principales de este estudio, es la lámina delgada, esto representa un

problema con los espesores pequeños, puesto que métodos como la soldadura con electrodos o cordones de soldadura completos, quedan descartados dado que deformarían el material del perfil o se formarían concentradores de esfuerzos, los cuales afectarían el alcance del estudio. Dadas estas condiciones, se opta por la soldadura de punto, la cual resulta ser muy efectiva para espesores de lámina delgada y para tener puntos de sujeción discretos. En la *Figura 11*, se puede detallar el proceso de soldadura de punto.

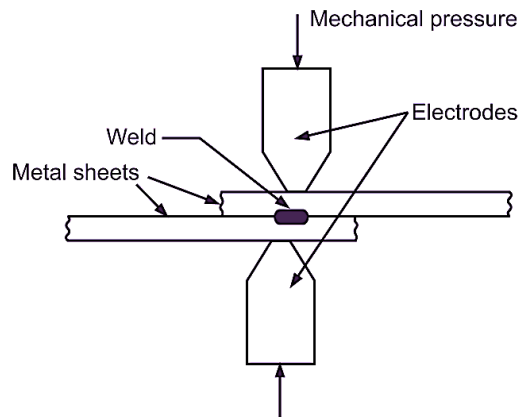


Figura 11. Esquema de proceso de soldadura de punto y sus variables. [14]

Es importante resaltar, que la soldadura de punto suele usarse para unir láminas con láminas, dentro de este estudio, se analizará el proceso al adherir barras a lámina por este proceso y las restricciones que se tienen.

3.3.1.3.2 Longitud crítica

Como se especificó con anterioridad, la soldadura de punto es el método de sujeción para las barras de acero, no obstante, se debe determinar la longitud cada cuanto se aplicará un punto de soldadura, siendo esto la longitud crítica. En la *Figura 12*, se muestra una ilustración sobre lo que es la longitud crítica.

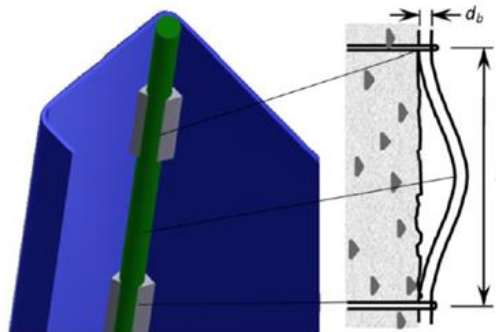


Figura 12. Longitud crítica de puntos de soldadura. [1]

3.4. Parámetros de ensayo

Con los elementos de ensayo completamente definidos, se debe continuar con los parámetros para tener en cuenta dentro de la realización de los ensayos. Se realizarán ensayos a compresión en la

máquina universal de ensayos, se debe tener en cuenta los puntos de apoyo para el perfil, la velocidad de avance y el punto de aplicación de la carga en el ensayo.

3.4.1. Tipo de apoyo

Dentro del estudio de columnas se tienen dos tipos de apoyo: fijo o articulado. Dependiendo del campo de aplicación, se pueden presentar combinaciones entre estos. En este estudio, se analizará el tipo de apoyo fijo-fijo, el cual, dentro de la literatura se plantea que resistirá mayor carga que aquellas con apoyos articulados. También, dentro el estudio de columnas, se tiene la longitud efectiva, que se define como la distancia entre puntos de inflexión luego de la aplicación de la carga, dependiendo del tipo de apoyo, se asigna un factor de longitud efectiva, K . En la *Figura 13*, se observa los parámetros para determinar el tipo de apoyo de las columnas.

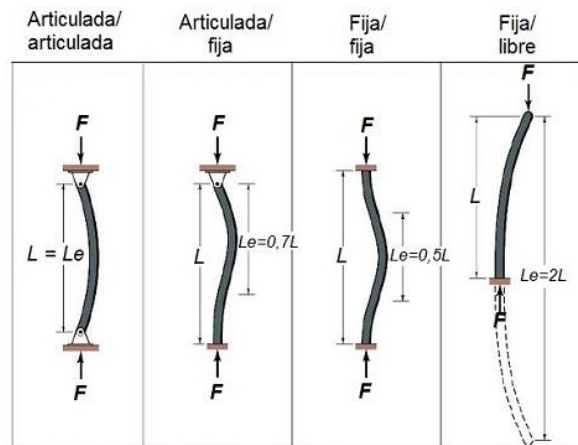


Figura 13. Tipos de apoyo para columnas y factor de longitud efectiva. [15]

3.4.2. Punto de aplicación de la carga

Teniendo en cuenta los tipos de apoyo, el posicionamiento de la carga es fundamental para el análisis de los perfiles bajo carga. Existen diferentes tipos de pandeo como se muestra en la *Figura 14*, tales como pandeo flexional, torsional o flexo-torsional. El pandeo flexional tiene dos componentes, el pandeo local y el pandeo global. Como su mismo nombre lo indica, el pandeo local hace referencia a la inestabilidad en un elemento específico del perfil y en el caso del pandeo global es a lo largo de todo el perfil.

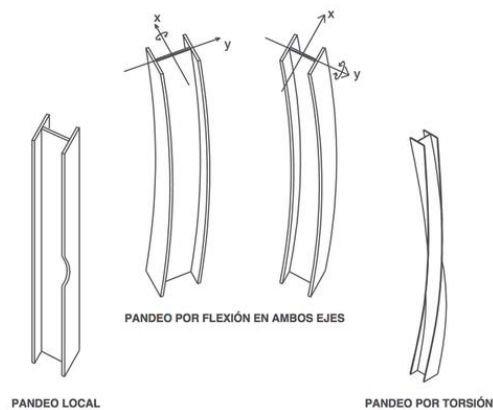


Figura 14. Tipos de pandeo. [16]

El punto de aplicación de la carga es el que define que tipo de pandeo se presentará al aplicar la carga. Si el punto de aplicación de la carga coincide con el centroide del perfil, se espera pandeo flexional dado que no se presenta desviación en ningún eje, sin embargo, cuando la carga no se encuentra alineada con el centroide, el perfil se pandeará por torsión. Para este estudio, solamente se analizará el perfil con carga aplicada en el centroide del perfil, es decir que se espera pandeo local o global.

Capítulo 4. Análisis teórico

4.1. Diseño de perfiles

Los primeros parámetros definidos para los ensayos, se centra en las dimensiones de los elementos que componen el perfil, estos se mantendrán como una constante a lo largo de todo el plan de ensayos, puesto que el objetivo principal, es encontrar el efecto de los refuerzos dentro del mismo. De acuerdo con el alcance se utilizará un perfil tipo C que corresponde a un perfil tipo canal con labios hacia adentro, en la Tabla 4 se presentan las dimensiones de los parámetros indicados. Igualmente, el material de los perfiles será el mismo y por ende, las propiedades mecánicas se mantendrán. Por último, se tendrá un tipo de apoyo fijo-fijo, punto de carga alineado con el centroide de los perfiles y velocidad del ensayo constante, a lo largo de toda la experimentación.

Como se observa en la Tabla 5, las dos variables principales de este ensayo se presentan en referencia con el refuerzo, en su geometría y puntos de sujeción. Dentro del plan experimental se variará el diámetro de las barras de acero y la longitud crítica en la que se soldará el refuerzo al perfil.

Tabla 4. Dimensiones del perfil en C.



 <p>Perfil C con labios y sin refuerzo.</p>	Geometría	Dimensiones [mm]
	Longitud del alma	50
	Longitud de aleta	25
	Longitud de labio	10,3
	Espesor	0,55
	Altura del perfil	300

Tabla 5. Dimensiones y variables del refuerzo.

 Refuerzo de barra de acero	Geometría	Dimensiones [mm]
	Longitud barra	300
	Diámetros	3,18
		4,75
		6,35
	Longitud crítica	150
		75
		37,5

4.2. Estimación de carga crítica

Para el diseño de elementos estructurales se presentan diferentes métodos dependiendo de las normativas por las que se rigen en cada sitio. En este estudio se usará uno de los métodos de diseño especificados por la AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes) en las cuales se presenta un método de diseño elástico (ASD) y uno plástico (LFRD).

4.2.1. Método ASD

En este, se debe estimar las cargas de trabajo o servicio, es decir las cargas que la estructura tiene que soportar, para luego diseñar los elementos estructurales con base en ciertos esfuerzos permisibles. Se conoce como método elástico, dado que se supone un comportamiento elástico del material, es decir con los esfuerzos admisibles de manera que estos no excedan a la resistencia requerida cuando a la estructura se encuentra cargada.

4.2.2. Propiedades geométricas

4.2.2.1. Cálculo de longitudes reales

Con las longitudes iniciales, se debe tener en cuenta, que luego del proceso de doblado, esta longitud se disminuye dado el radio del doblado, el cual, para facilidad del estudio se asumirá como el mismo espesor y al sumarlo con el espesor, se obtendrá la longitud de arco para la zona de doblado. El cálculo de la longitud real se determina con la siguiente ecuación.

$$x = L \cdot N(R + t) \quad (1)$$

Siendo L la longitud total del elemento, N el número de dobleces realizados dentro del mismo, R el radio de curvatura y t el espesor de lámina. Al tener las longitudes reales de cada elemento, se calculan las áreas de cada uno al multiplicarse con el espesor. Para continuar, se debe calcular el centroide del perfil, principalmente para hallar el esfuerzo elástico de pandeo, sin embargo, para cumplir con el parámetro de ensayo que refiere al punto de aplicación de la carga, es importante conocer sus coordenadas de ubicación.

4.2.2.2. Cálculo de centroide para perfil con y sin refuerzo

Para calcular el centroide del perfil, se deben en cuenta, el número de elementos que se tiene dentro del mismo. Al tratarse de un perfil sin refuerzo, se plantea una distribución como la que se muestra en la Figura x, en esta, se puede observar las diferentes áreas (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5) de cada elemento, las cuales se calculan multiplicando la longitud real con el espesor de lámina. Igualmente, para la ubicación del centroide se posiciona la geometría del perfil en un plano de referencia como el de la Figura 15.

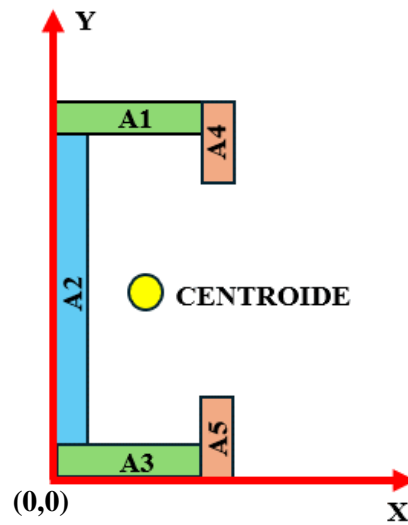


Figura 15. Esquema de ubicación del centroide en el perfil sin refuerzo

Como se puede observar en la Figura 15, la distancia del centroide total a cada elemento varía dependiendo de su ubicación, por ello, lo primero que se debe hacer es calcular el centroide de cada uno, para luego llegar al centroide de la estructura completa. Para la identificación del centroide de cada elemento, se debe tener en cuenta que será calculada de acuerdo con el marco de referencia, empezando desde el punto $(0,0)$, igualmente se debe tener presente el espesor de la lámina al momento de calcularlo. Cuando se tienen los centroides de todos los elementos del perfil, se procede al cálculo del centroide total con la siguiente ecuación.

$$(x_{total}, y_{total}) = \left(\frac{((A_1 \times x_1) + (A_2 \times x_2) + (A_3 \times x_3) \dots)}{A_{total}} \right), \left(\frac{((A_1 \times y_1) + (A_2 \times y_2) + (A_3 \times y_3) \dots)}{A_{total}} \right) \quad (2)$$

Donde (x_i, y_i) hace referencia al centroide de cada elemento y el A_{total} al área total de toda la geometría del perfil. Con este cálculo se logra obtener el centroide total de todo el perfil sin refuerzo.

Para el cálculo del centroide de los perfiles reforzados, se plantea la misma división en elementos que para los no reforzados, sin embargo, en estos se agregaran más elementos, los cuales reducen el área de los demás elementos y varían el centroide de la estructura completa. En la *Figura 16*, se observa la configuración de los perfiles reforzados. No obstante, el análisis teórico, se realizará con 3 diámetros diferentes, por lo que el centroide variará de acuerdo con el valor proporcionado.

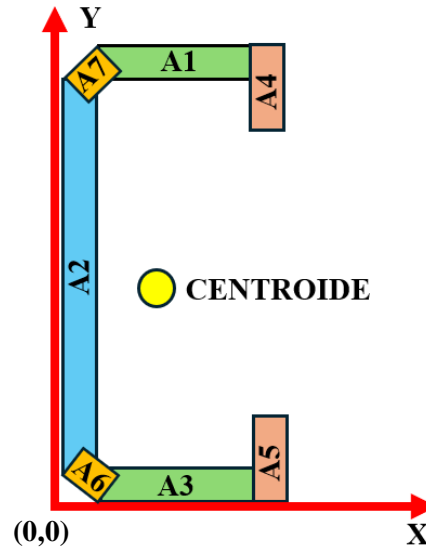


Figura 16. Esquema de ubicación del centroide en el perfil con refuerzo

4.2.2.3. Cálculo del momento de inercia

Al igual que con el cálculo del centroide, el momento de inercia, se debe calcular por cada uno de los elementos, para luego al sumar, obtener el valor de la geometría completa. Para el cálculo del momento de inercia en las dos direcciones, se usan la siguiente ecuación.

$$I_{xx} = \left(\frac{t \times (L^3)}{12} \right) + (A(x_{total} - x_x)^2) \quad (3)$$

$$I_{yy} = \left(\frac{t \times (L^3)}{12} \right) + (A(y_{total} - y_x)^2) \quad (4)$$

Donde (x_{total}, y_{total}) es el valor del centroide de toda la geometría, (x_x, y_x) es el centroide de cada elemento y A_x es el área de cada elemento.

4.2.2.4. Cálculo del radio de giro

El radio de giro es una medida que indica cómo está distribuida el área de una sección transversal alrededor de su centro. Es útil en el diseño y análisis de columnas, ya que se relaciona con la capacidad de la columna para resistir pandeo. Una columna con un mayor radio de giro tiene una mayor capacidad para resistir el pandeo bajo cargas de compresión. Se puede calcular por medio de la siguiente ecuación.

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{xx}}{x_{total}}} \quad (5)$$

(6)

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{yy}}{y_{total}}}$$

4.2.3. Cálculo de esfuerzo elástico de pandeo

El esfuerzo elástico de pandeo representa el punto crítico en el cual la columna cambiará de un estado de carga estable a uno inestable, resultando en una falla por pandeo si la carga se incrementa más allá de este punto. Para calcular el esfuerzo elástico de pandeo de una columna, se deben conocer algunas propiedades mecánicas del material, condiciones geométricas de la estructura y parámetros de ensayos.

4.2.3.1. Módulo de elasticidad del material

Esta propiedad mecánica relaciona el esfuerzo, que es la fuerza por unidad de área, con la deformación unitaria que es el cambio relativo en la longitud. Este indica cuanto se deforma un material bajo una carga aplicada antes de que se deforme permanentemente. En el caso de los aceros, los módulos de elasticidad se aproximan a valores entre 200 y 220 GPa, esto indica alta rigidez y baja tasa de deformación al estar sometidos a cargas. Para efectos de este estudio, se tomará un valor promedio entre el rango anteriormente mencionado (210 GPa), dado que el módulo de elasticidad de los aceros es relativamente constante y no varía mucho con diferentes tipos de acero o con diferentes tratamientos térmicos y mecánicos, lo que proporciona una previsibilidad y fiabilidad en el diseño.

4.2.3.2. Factor de longitud efectiva

El factor de longitud efectiva tiene en cuenta cómo los extremos de una columna están apoyados, lo cual influye en su tendencia en el pandeo. Las condiciones de los extremos determinan la longitud efectiva de la columna, que se puede definir como la parte de la columna que se encuentra “libre” para pandearse al estar sometida a cargas. En la *Figura 17*, se observa la variación del factor con respecto al tipo de apoyo de las columnas.

La forma de pandeo se indica en línea de puntos	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados de proyecto para condiciones reales	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Condiciones de vínculo						

Figura 17. Factores de longitud efectiva para columnas [17]

Al tratarse de ensayos de tipo de apoyo fijo-fijo, se usará un factor de $K=0,65$ el cual se recomienda para realizar cálculos de condiciones reales.

Al determinar las variables necesarias, se procede a calcular el esfuerzo elástico de pandeo, el cual se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (7)$$

Donde E hace referencia al módulo elástico del material, K al factor de longitud efectiva, L a la altura de toda la estructura y r al radio de giro.

4.2.4. Cálculo factor de esbeltez de la columna y esfuerzo nominal de pandeo

Este factor se calcula para evaluar que tan propensa está una columna para fallar por pandeo bajo una carga de compresión. Este factor relaciona la longitud de la columna con su rigidez y su capacidad para resistir pandeo. Para este caso, se usa la siguiente ecuación para calcularlo.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (8)$$

Donde F_e es el esfuerzo elástico de pandeo y F_y es el límite de elasticidad del material, el cual se determina con las curvas de esfuerzo-deformación, siendo este el punto en el cual la curva deja de ser lineal e inicia la deformación plástica. Estas curvas se obtienen mediante ensayos de tensión a probetas que se fabrican de acuerdo con la norma ASTM E8. Al tener el factor de esbeltez, se calcula el esfuerzo nominal de pandeo con la siguiente ecuación.

$$F_n = (0,658\lambda_c^2) F_y \quad (9)$$

4.2.5. Cálculo del área efectiva

El área efectiva de una estructura se define como la porción de la sección transversal de un elemento estructural que contribuye a la resistencia y estabilidad de este. Para el cálculo, se deben tener en cuenta diferentes variables.

4.2.5.1. Ancho efectivo

Para el cálculo del ancho efectivo, se deben tener en cuenta las restricciones laterales del elemento y la distribución de la carga de este, por ello, se debe evaluar cada uno de los elementos por separado, para poder determinar el coeficiente de pandeo de cada uno, para poder calcularlo, primero se debe verificar si el elemento está rigidizado o no. Si este no tiene elementos rigidizadores, el valor del coeficiente de pandeo $k = 0,43$ y si está rigidizado con un elemento tipo aleta, se debe calcular con lo indicado en la *Figura 18 y 19* en la cual y x, la cual especifica todas las variables.

Parámetro	Nombre	Ecuación en NSR-10
w	Ancho nominal del elemento	
$b=w$; si $w/t \leq 0.328S$	Ancho efectivo si no se necesita labio	F.4.2.4-1
$b_1=(b/2)R_I$; si $w/t > 0.328S$ $b_2=b-b_1$	Ancho efectivo si se necesita labio	F.4.2.4-4 F.4.2.4-5
$S = 1.28*(E/f)^{0.5}$		F.4.2.4-7
$I_a = 399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right]$	Momento de Inercia adecuado del rigidizador de tal forma que cada elemento componente se comporte como un elemento rigidizado.	F.4.2.4-8
$R_I = I_s/I_a$	Relación de Inercias	F.4.2.4-9

Figura 18. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta, tomada de [1]

Parámetro	Nombre	Ecuación en NSR-10
$I_s = (d^3 t \sin^2 \theta) / 12$	Momento de Inercia de la sección completa del rigidizador alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser rigidizado.	F.4.2.4-10
d_s	Ancho efectivo reducido del utilizado en el cálculo de todas las propiedades de la sección efectiva	
d'_s	Ancho efectivo del rigidizador	
$\rho = (1 - 0.22/\lambda) / \lambda$	Factor de reducción local	F.4.2.2-3
$\lambda = (f / F_{cr})^{0.5}$	Factor de esbeltez	F.4.2.2-4
$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$	Esfuerzo crítico; $k=0.43$	F.4.2.2-5
$k = 3.57(R_I)^n + 0.43 \leq 4$, si $D/w \leq 0.25$ $k = \left(4.82 - \frac{5D}{w} \right) (R_I)^n + 0.43 \leq 4$, si, $0.25 < D/w < 0.80$	Coefficiente de pandeo de placa $n = \left(0.582 - \frac{w/t}{4S} \right) \geq \frac{1}{3}$	Tabla F.4.2.4-1 (F.4.2.4-11)
$f = F_n$	Esfuerzo de compresión	F.4.3.4.1

Figura 19. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta, tomada de [1] (continuación)

Al obtener el valor del coeficiente de pandeo para cada elemento, se continua con el cálculo del factor de esbeltez corregido, el cual relaciona lo presentado en la sección 4.3.3, pero ahora para cada elemento de la estructura, este se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$\lambda = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} \quad (13)$$

Con el factor de esbeltez corregido se continua con el cálculo del factor de reducción, este se utiliza para reducir la capacidad teórica de una columna para reflejar mejor las condiciones reales de carga y las imperfecciones geométricas. Se calcula con la siguiente ecuación.

$$\rho = \left(1 - 0,22/\lambda \right) / \lambda \quad (14)$$

Por último y al tener todos los datos necesarios, se calcula el ancho efectivo para cada elemento el cual resulta funcional al momento de identificar en que sección del elemento se presenta la mayor resistencia a la carga. Se obtiene por medio de la siguiente ecuación.

$$w_e = \rho \times w \quad (15)$$

Para finalizar se calcula el área efectiva restándole al área total del elemento, el ancho real del elemento menos el ancho efectivo y multiplicado por el espesor de lámina.

4.2.6. Cálculo de la carga crítica nominal para cada elemento

Para obtener la carga crítica nominal, se toma el área crítica que resultó para cada elemento y se multiplica por el esfuerzo nominal de pandeo calculado anteriormente. Esta carga, es con la cual se compararán los resultados experimentales.

Capítulo 5. Análisis experimental

En este capítulo se presentará todo el proceso y los resultados de los ensayos realizados a los diferentes especímenes, al igual que las dificultades presentadas en el proceso de fabricación y adhesión de los refuerzos a los perfiles. Por último, se compararán los resultados teóricos con los obtenidos de manera experimental y con estos se planteará la discusión sobre los mismos.

5.1. Caracterización del material

Para poder realizar el análisis de carga nominal de los perfiles, se deben tener en cuenta las propiedades del material, tales como su esfuerzo en el límite elástico y su módulo de elasticidad, por lo cual, se decidió realizar la caracterización del material. Teniendo en cuenta el espesor del material, este se toma como tipo lámina dentro de la norma ASTM-E8 y con esto, se determinan las dimensiones en milímetros de la probeta a ensayar para encontrar la curva esfuerzo-deformación y mediante esta, determinar las propiedades necesarias. En la *Figura 20*, se pueden observar las dimensiones de las probetas ensayadas.

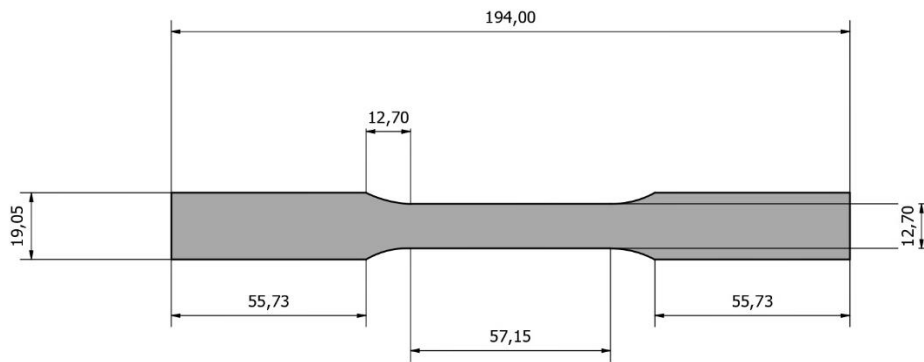


Figura 20. Dimensiones de probeta para ensayo a tensión de acero.

Se realizaron los ensayos a tensión del material con dos probetas, en los cuales se presentaron los datos necesarios para las gráficas de esfuerzo-deformación, con las que se obtienen los valores de los esfuerzos en el límite elástico.

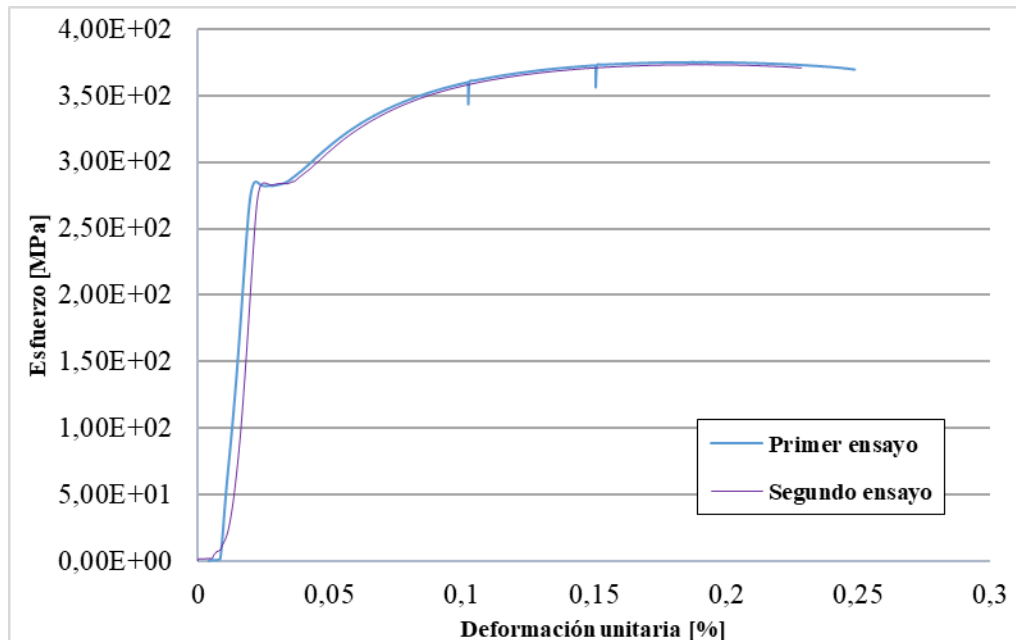


Figura 21. Curvas experimentales de esfuerzo-deformación.

Por medio de esta información, se llegan a obtener las propiedades mecánicas necesitadas para el estudio de los perfiles. En la Tabla 6, se presentan los valores de las propiedades mecánicas del material.

Tabla 6. Valores de propiedades obtenidas en curva σ vs ϵ

Propiedad	Promedio de valores obtenidos en ensayos
Esfuerzo de fluencia [MPa]	284,85
Esfuerzo último [MPa]	374,1
Módulo de Young [GPa]	239,6

Los valores obtenidos son acordes a lo esperado para aceros de bajo carbono. Con estos valores se procede al cálculo de la carga crítica de cada perfil con sus modificaciones.

5.2. Plan de ensayos

Con el análisis experimental, se diseñó un plan de ensayos, en el cual, inicialmente se planteó la realización de 3 ensayos por especímenes, para poder observar el impacto que tienen los refuerzos sobre el perfil, al igual que el poder calcular la desviación estándar dentro de los datos obtenidos. En la Tabla 7 se muestra el plan de ensayos definido.

Tabla 7. Plan de ensayos

Longitud crítica	Diámetro de refuerzo				
		0	3,18	4,75	6,35
	0	3	NA	NA	NA
	L/2	NA	3	3	3
	L/4	NA	3	3	3
	L/8	NA	3	3	3

Igualmente, en las *Figura 22* y *Figura 23*, se pueden observar las variaciones en los perfiles, dentro del plan de ensayos.




\emptyset	Refuerzo
3,18	
4,75	
6,35	

Figura 22. Perfiles con diámetros de refuerzos

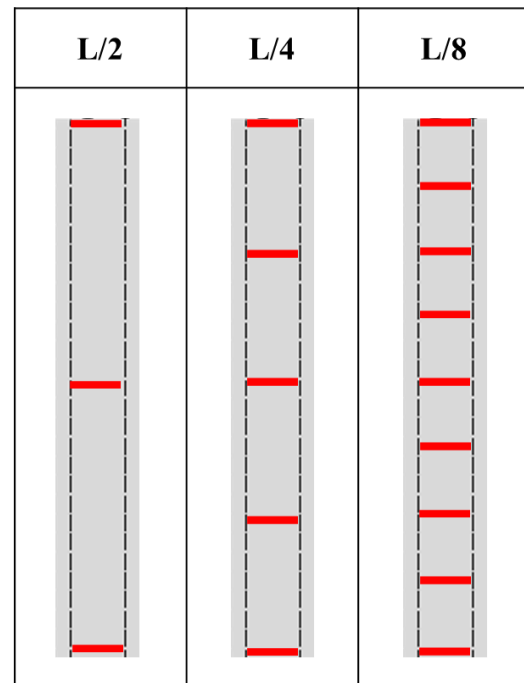


Figura 23. Ubicaciones de unión entre refuerzo y perfil de acuerdo con la longitud crítica definida

5.3. Fabricación de perfiles

En el momento de la fabricación de los perfiles, se deben tener en cuenta las restricciones y variaciones que pueden tener las propiedades mecánicas del material. El proceso de doblado de lámina, las zonas del doblado pueden presentar calentamiento local lo que puede llegar a afectar las propiedades del material tales como la resistencia a la carga a compresión. Igualmente, este proceso puede generar esfuerzos residuales lo que llega a afectar su resistencia a la fatiga y su comportamiento bajo cargas.

El método de adhesión de refuerzos por medio de soldadura de punto, presentan inconvenientes dado que, se trabaja con lámina delgada y este procedimiento resulta ser un método invasivo con el material, lo que termina en deformaciones o desgaste del material, lo que afecta su comportamiento en los ensayos a compresión. En la *Figura 24*, se puede observar algunas de las fallas producidas en este proceso.



Figura 24. Fallas por soldadura en el proceso de adhesión de refuerzos.

5.4. Ensayos de laboratorio

Los resultados experimentales se obtuvieron mediante ensayos realizados en una máquina universal de 1000 kN de capacidad a la cual se le adaptaron mordazas en las cuales los perfiles quedarán ajustados y no presentarán ningún movimiento al aplicarse la carga.

5.4.1. Parámetros de ensayo

Para el montaje y para los ensayos, se deben tener en cuenta las variables generales, tales como la velocidad de ensayo, la cual, de acuerdo con la norma ASTM E9, la cual brinda las especificaciones para ensayos a compresión en metales, en esta no se da un valor exacto, pero se da un rango entre aceptable de entre 0,025 y 0,25 mm/min. La velocidad debe encontrarse dentro de esos valores y de igual forma, debe ser constante a lo largo de todo el ensayo. Para este plan de ensayos, se tomó una velocidad **de 0.2 mm/min.**

Igualmente, se debía asegurar que el punto de aplicación de la carga coincidiese con el centroide los perfiles y a su vez con el punto central de la mordaza, por ello, se demarcaron los puntos centrales de la mordaza de sujeción de los perfiles y también de las mordazas de la máquina universal de ensayos. También es importante recalcar que, al realizar el ajuste de los perfiles en las mordazas, estos no debían quedar muy ajustados, dado que, esto generaría sobrefuerzos en el material, generando deformaciones previas a los ensayos.

Es importante tener en cuenta el punto de toma del dato de capacidad máxima. Con el transcurso del ensayo, la carga aumenta hasta que llega a un punto en el cual la carga empieza a disminuir. Ese valor máximo alcanzado antes de la primera falla es el registrado como carga crítica.

5.5. Ejecución del plan de ensayos

5.5.1. Perfil sin refuerzo

Se realizaron 3 ensayos para perfiles sin refuerzos, en los cuales se encontraron los resultados mostrados en la Tabla 8. Con estos resultados, se realiza la comparación con el valor obtenido teóricamente que fue de **11099,7 N**.

Tabla 8. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles sin refuerzo.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
1	10791
2	11403
3	11483
Promedio	11225,6
Desv. Estándar	378,5

Se observa un aumento del 1,13% en el promedio de los ensayos experimentales con respecto al valor teórico. Al ser una variación mínima, se logra determinar que lo obtenido dentro de los ensayos tiene relación con lo estudiado teóricamente. No obstante, se debe estudiar el motivo de las variaciones las cuales pueden llegar a presentarse por condiciones del material, el cual, en el proceso de doblado, puede presentar mínimas deformaciones que afecten la resistencia de este.

Al tener los valores experimentales, también se debe dar un análisis visual a los perfiles, los cuales dado el tipo de ensayo y su geometría pueden llegar a presentar el tipo de fallas que se observan en la *Figura 25* y *Figura 26*.



Figura 25. Pandeo local en labios y aleta



Figura 26. Pandeo local en el alma.

Como se puede observar en las *Figura 25* y *Figura 26*, se presentó pandeo local en los labios y al aumentar la carga se produjo el pandeo local en el alma y aleta del perfil.

Es importante resaltar que, al inicio de la aplicación de la carga, el primer elemento en pandearse, son los labios, dado que estos, solo tienen uno de sus extremos rigidizados y otro libre, por lo que la distribución de las cargas se mostrará primero en los elementos no rigidizados. Cuando se aumenta más la carga, tanto el alma, como las aletas, comienzan a presentar pandeo local, en el cual como se observar en la *Figura 26* se genera una hendidura completa hacía dentro en la zona del alma y hacia afuera en las aletas.

Para efectos del análisis de los perfiles ensayados, se debe también tener en cuenta el punto de falla, como se puede observar en la *Figura 27*, la mayor parte de las fallas en estas pruebas se dieron en la parte superior de los perfiles, alejados del centro del perfil, esto se pudo dar ya sea o por un sobreajuste al extremo superior del perfil o una descentralización de la carga.

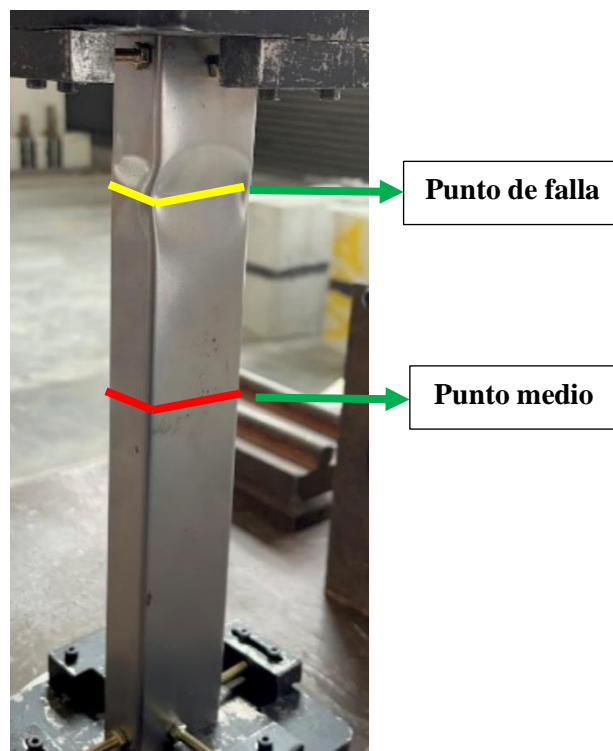


Figura 27. Separación del punto de falla al punto medio del perfil

5.5.2. Perfil con refuerzo

5.5.2.1. Perfil con refuerzo de 3,18 mm

Al igual que para los perfiles sin refuerzo, para los reforzados con barra de metal de 3,18 mm, se realizaron 3 ensayos por cada longitud crítica. En la *Figura 28*, se puede observar la adhesión del refuerzo de este diámetro al perfil.



Figura 28. Perfil con barra de refuerzo de 3.18 mm

5.5.2.1.1. Perfil con refuerzo de 3,18 mm y longitud crítica de L/8

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados con barra de acero de 3,18 mm con longitud crítica de L/8, en los cuales, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 9, los cuales se comparan con el resultado teórico.

Tabla 9. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 3.18 mm y longitud crítica de L/8.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
Valor teórico	13590,32
1	12560,3
2	14826,9
3	13004,1
Promedio	13463,8
Desv. Estándar	1201,2

De acuerdo con los datos en la Tabla 9, se muestra la carga soportada aumentó en un 22%, solo con la adhesión de los refuerzos de 3,18 mm al perfil e igualmente muestra que existe una mayor desviación estándar que con los resultados obtenidos en los perfiles sin refuerzo. Sin embargo, al analizar la variación entre el valor promedio de los ensayos experimentales y el valor teórico obtenido, se evidencia que existe una disminución entre estos tan solo del 1%.

En la *Figura 29* se muestran los tipos de fallas presentadas, como lo son los agujeros (A) provocados por la exposición a los electrodos. También se logran visibilizar zonas con ondulaciones o deformaciones locales antes de realizar los ensayos.

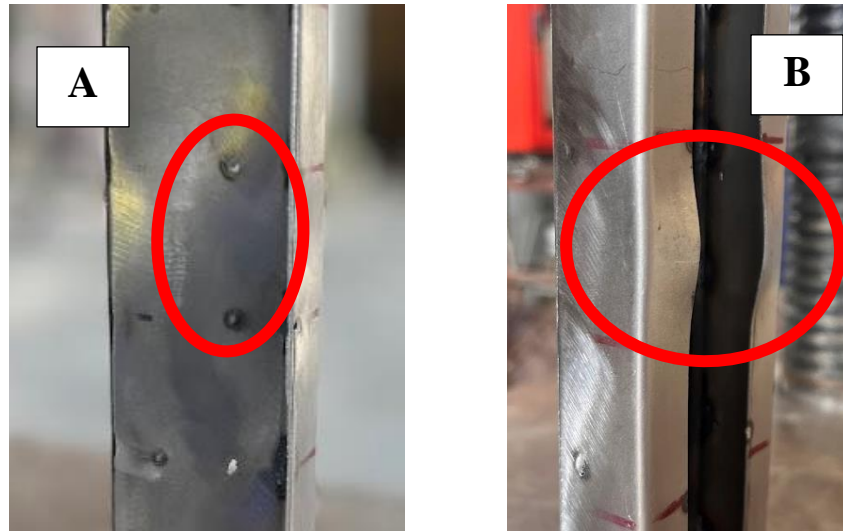


Figura 29. Imperfecciones provocadas por proceso de adhesión de refuerzo y pandeo local en los labios

Igualmente, y como se muestra en la *Figura 29*, el pandeo inicia de manera local en los labios del perfil (B). No obstante, y a diferencia de los perfiles sin refuerzos, los perfiles no se deforman totalmente, es decir, no se llega a identificar visualmente pandeo distorsional. Uno de los motivos por el cual esto pudo suceder es que la distribución de la carga se haya centrado en los refuerzos haciendo que estos soportasen la carga. El punto de pandeo de los labios se dio en la parte inferior del perfil como se muestra en la *Figura 30*. A diferencia que, con los perfiles sin refuerzo, se presentó más cerca al punto central del perfil.

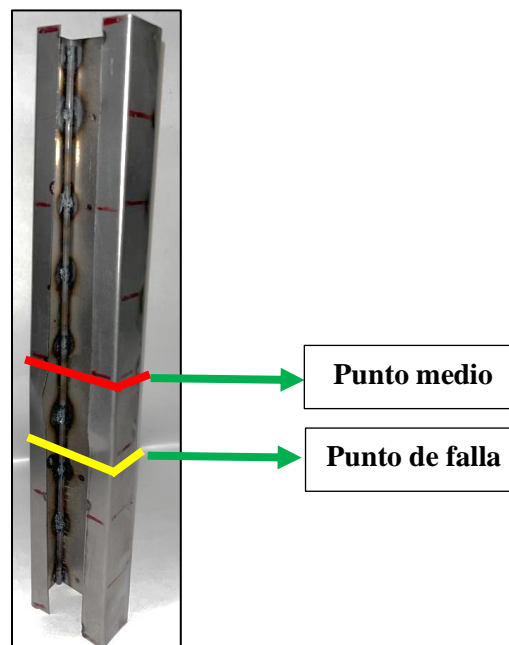


Figura 30. Separación del punto de falla al punto medio del perfil

5.5.2.1.2. Perfil con refuerzo de 3,18 mm y longitud crítica de L/4

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados con barra de acero de 3,18 mm con longitud crítica de $L/4$, en los cuales, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 10, los cuales se comparan con el resultado teórico.

Tabla 10. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 3.18 mm y longitud crítica de $L/4$.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
Valor teórico	12193,04
1	11066,4
2	14047,1
3	10177,1
Promedio	11763,5
Desv. Estándar	2027,02

Los datos en la Tabla 10, muestra que, en comparación con los perfiles sin reforzar, los refuerzos de 3.18 mm incrementaron la carga soportada en un 9%. Igualmente, existe una mayor desviación estándar que con los resultados obtenidos en los perfiles sin refuerzo. Al realizar el análisis del valor promedio y el valor teórico, se observa un aumento del 21%. Esto pudo darse gracias a variaciones en las condiciones del ensayo. Como se puede observar por medio de la desviación estándar, uno de los ensayos presentó alejado de los otros dos ensayos realizados, la descentralización de la carga puede ser uno de los motivos por los cuales el perfil soportó más carga que los demás.

Como ya se comentó, el método de adhesión resultó en daños sobre el material del perfil y no es posible determinar que tanto se afectaron las propiedades. Las probetas con mayor longitud crítica presentan menos daños en el material dado que no son necesarios tantos puntos de soldadura. De igual manera, en la *Figura 31*, se observa el pandeo local que se dio en los labios y el pandeo local en las aletas.

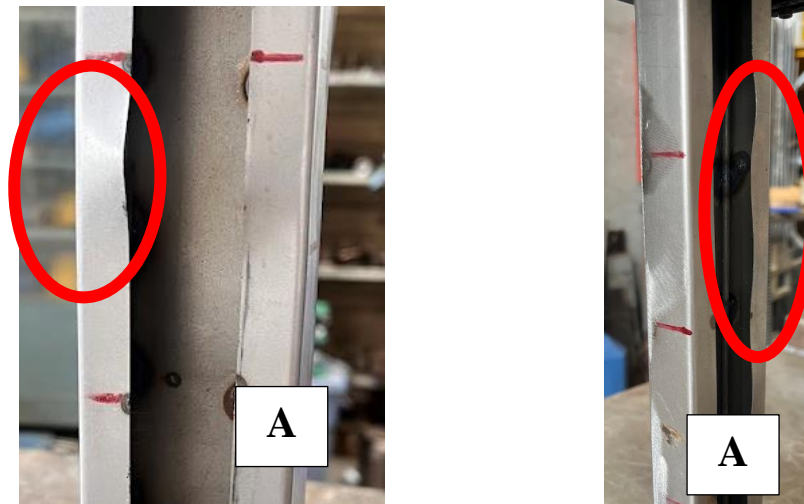


Figura 31. Pandeo local en labios.

Igualmente, y como se muestra en la *Figura 31*, el pandeo inicia de manera local en los labios del perfil (A). No obstante, en estos ensayos si se logra identificar visualmente una apertura que puede llegar a afectar a las aletas, sin embargo, no llega a ser notorio en comparación con la deformación ocurrida en los labios. Al igual que con los perfiles reforzados cada $L/8$, la separación del punto central al punto de falla sigue siendo más cercano que los perfiles sin reforzar. También en la *Figura 32*, se puede ver como existe un punto de falla muy cerca del centro del perfil, esto puede deberse a que, en el caso de la longitud crítica de $L/4$, existe un punto de soldadura, exactamente en la mitad, haciendo que esto debilite esa zona.

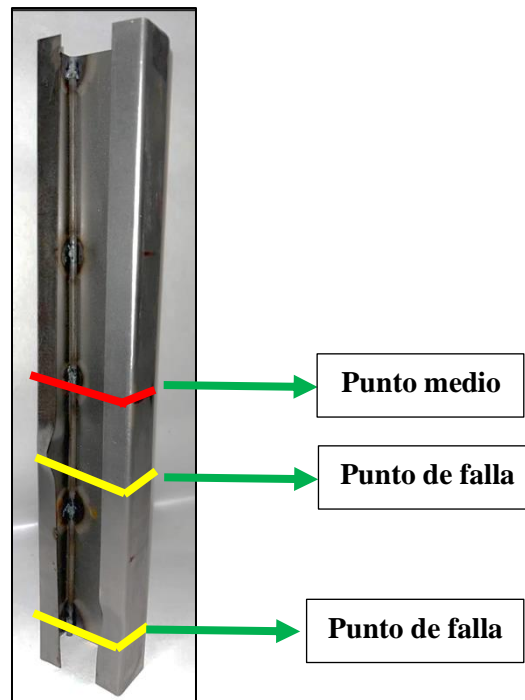


Figura 32. Separación del punto de falla al punto medio del perfil

5.5.2.1.3. Perfil con refuerzo de 3,18 mm y longitud crítica de L/2

Se llevaron a cabo tres ensayos con perfiles reforzados con barra de acero de 3,18 mm con longitud crítica de L/2, cuyos resultados están documentados en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 3.18 mm y longitud crítica de L/2.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
Valor teórico	11843,7
1	12692,4
2	12968,2
3	12973,4
Promedio	12878
Desv. Estándar	160,8

Los datos en la Tabla 11, muestra que existe un aumento del 6% con la adhesión del refuerzo y a su vez una menor desviación estándar que con los resultados obtenidos en los perfiles sin refuerzo. Al realizar el análisis del valor experimental promedio y el valor teórico, se observa un aumento del 8%. Esto pudo darse gracias a variaciones en las condiciones del ensayo. Sin embargo, se tiene la menor desviación estándar entre los perfiles reforzados analizados y los perfiles sin reforzar, lo que indica que se mantiene un comportamiento similar en la resistencia a la carga. El tipo de pandeo presentado fue local en los labios, sin embargo, se puede observar en la *Figura 33*, como la aleta comienza a presentar pandeo local luego de que las deformaciones en los labios se vuelvan más pronunciadas.



Figura 33. Pandeo local en el labio y aleta.

En el caso de los perfiles con longitud crítica de $L/2$, visualmente se puede determinar que el punto de falla está mucho más cerca del punto medio. En este caso, solo se tienen 3 puntos de soldadura siendo uno de estos en el medio del perfil, por lo que, esta zona sería uno de los puntos de mayor concentración de esfuerzos y ser la zona con mayor tendencia a pandearse. En la *Figura 34*, se puede observar la separación entre estos dos puntos.

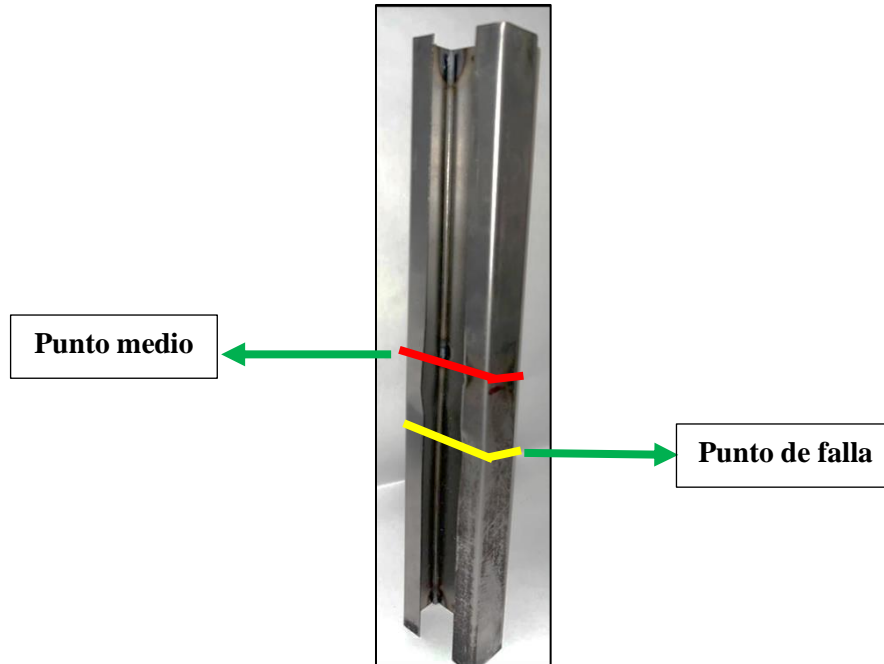


Figura 34. Separación del punto de falla al punto medio del perfil.

5.5.2.2. Perfil con refuerzo de 4,75 mm

Al igual que para los perfiles sin refuerzo, para los reforzados con barra de metal de 4,75 mm, se realizaron 3 ensayos por cada longitud crítica. En la *Figura 35*, se puede observar la adhesión del refuerzo de este diámetro al perfil.

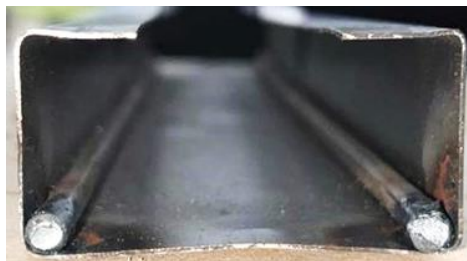


Figura 35. Perfil con barra de refuerzo de 4,75 mm

5.5.2.2.1. Perfil con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica de $L/8$

Se llevaron a cabo tres ensayos con los perfiles reforzados, cuyos resultados se detallan en la Tabla 12. Estos resultados deben ser comparados con el valor teórico calculado de $15,884.03 N$. Gracias a la incorporación de refuerzos de 4.75 mm, la carga soportada aumentó en un 43% en relación con los perfiles sin reforzar..

Tabla 12. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica de L/8.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
1	14012,2
2	14480,7
3	15143,6
Promedio	14545,5
Desv. Estándar	568,5

En los datos de la Tabla 12, se observa una menor desviación entre los datos que la registrada en los perfiles sin refuerzo. No obstante, se presenta una disminución del 9% entre el valor teórico y el promedio de los resultados experimentales, esto pudo presentarse dadas las deformaciones que pueden llegar a presentar los perfiles por el proceso de adhesión de los perfiles.

El material al estar expuesto a un proceso de soldadura presenta fallas dentro del mismo. Esto se puede observar en el aumento del porcentaje de variación de la carga para perfiles que tienen una longitud crítica de adhesión de L/8, en el caso del diámetro de 4,75 mm, aumenta dado que, al tratar con lámina delgada y tener que adherir una barra de metal, se necesita mayor exposición a la soldadura, lo que deteriora y deforma el material de mayor manera, por ello puede llegar a disminuir la carga a soportar, con respecto a lo calculado teóricamente.

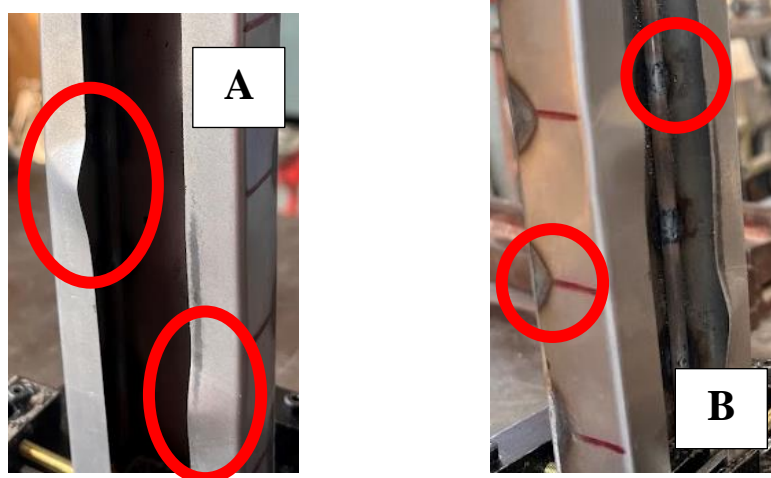


Figura 36. Pandeo local en labios (A) e imperfecciones en el refuerzo (B).

Como se puede observar en la *Figura 36*, se observa que solo existe pandeo local en los labios del perfil. Como ya se mencionó anteriormente, este es el elemento con mayor tendencia al pandeo, dado que son los únicos que no se encuentran completamente rigidizados. Igualmente, se mantiene la tendencia del pandeo local en todos los especímenes reforzados. En la *Figura 37*, se observa la separación que hay entre el punto medio y el punto de falla más notorio, el cual es cercano, sin embargo, no tanto como en longitudes críticas mayores.

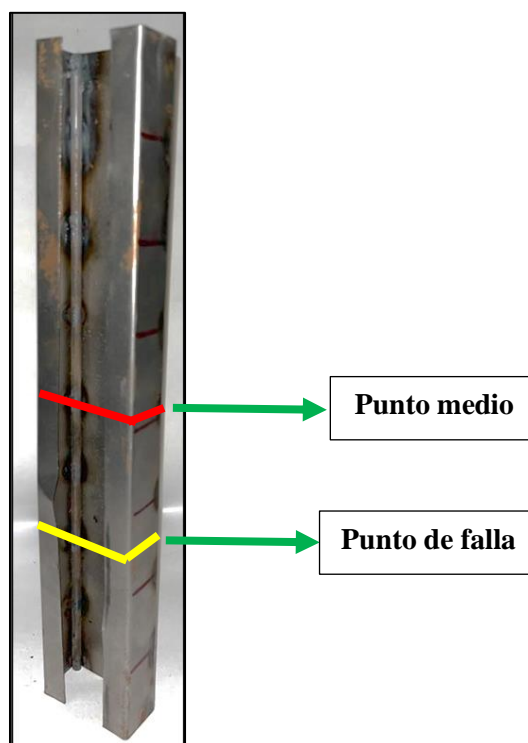


Figura 37. Separación del punto de falla al punto medio del perfil

5.5.2.2.2. Perfil con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica de L/4

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados con barras de 4,75 mm con longitud crítica de L/4 en los cuales, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 13,

Tabla 13. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica de L/4.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
Valor teórico	12766,5
1	11919,15
2	12435,3
3	12758,8
Promedio	12371,1
Desv. Estándar	423,5

Con los datos de la Tabla 13, se observa que los refuerzos representan un aumento del 15% con la adhesión de refuerzo, también al analizar los datos experimentales se encuentra una variación del 3% entre el valor teórico y el promedio de los resultados experimentales, siendo este una disminución

sobre el valor calculado, esto pudo presentarse dadas las deformaciones previas en el proceso de soldadura de las barras, haciendo que el material pierda resistencia.

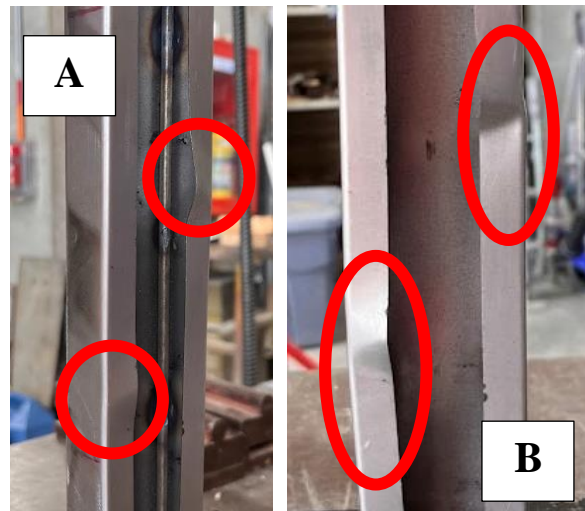


Figura 38. Pandeo local en el labio (A) y en la aleta (B).

En la *Figura 38* se puede observar el tipo de pandeo en los puntos de falla. Al inicio de aplicación de la carga, se presenta pandeo local en los labios (A) al ser los elementos con menos elementos rigidizadores, al continuar con el ensayo, se puede observar pandeo local en la zona de falla inferior en las aletas (B). También en la *Figura 39*, se observan la separación entre los puntos de falla más pronunciadas y el punto medio, estas se encuentran más cercanas al punto medio, sin embargo, el punto de falla superior es cercano a uno de los puntos en los cuales se aplicó el punto de soldadura, lo que pudo significar pérdida de resistencia en esa zona.

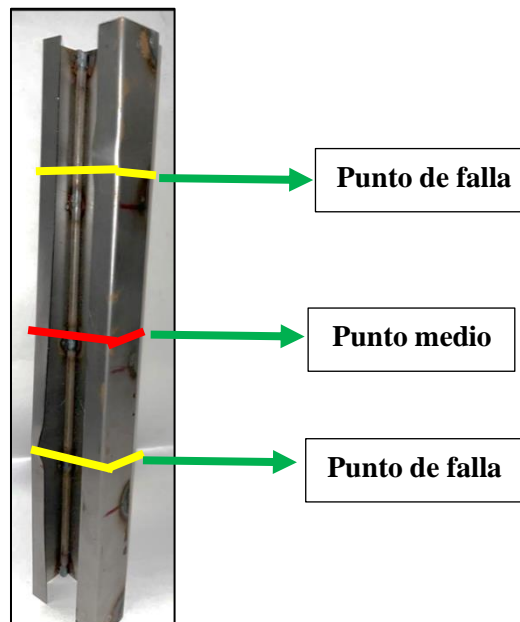


Figura 39. Separación del punto de falla al punto medio del perfil

5.5.2.2.3. Perfil con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica de L/2

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados en los cuales con barra de acero de 4,75 mm y L/2 de longitud crítica, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 4,75 mm y longitud crítica de L/2.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
Valor teórico	11987,08
1	12412,2
2	12440,4
3	13043,9
Promedio	12632,2
Desv. Estándar	356,8

Los datos en la Tabla 14, se evidencia que se produjo un aumento del 8% en la carga soportada, e igualmente muestra que, existe una menor desviación estándar que con los resultados obtenidos en los perfiles sin refuerzo. Al realizar el análisis del valor experimental promedio y el valor teórico, se observa un aumento del 5%. Esto pudo darse gracias a variaciones en las condiciones del ensayo. Sin embargo, se tiene la menor desviación estándar entre los perfiles reforzados analizados y los perfiles sin reforzar, lo que indica que se mantiene un comportamiento similar en la resistencia a la carga.

Al realizar los ensayos se pudo determinar que los perfiles reforzados con mayor longitud crítica fueron los que menos daños en el material presentaron, por lo tanto, no presentaron deformaciones ni fallas previas al ensayo. El tipo de pandeo presentado fue local en los labios, no obstante, con el paso del ensayo, se presentó pandeo local en las aletas, así como pandeo distorsional en todo el perfil, esto se visualiza por el posicionamiento del labio y aleta como se puede observar en la *Figura 40*.

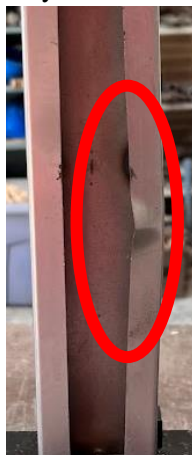


Figura 40. Pandeo local en el labio, aleta y pandeo distorsional.

En el caso de los perfiles con longitud crítica de $L/2$, visualmente se puede determinar que el punto de falla está mucho más cerca del punto medio. En este caso, solo se tienen 3 puntos de soldadura siendo uno de estos en el medio del perfil, por lo que, esta zona sería uno de los puntos de mayor concentración de esfuerzos y ser la zona con mayor tendencia a pandearse. En la *Figura 41*, se puede observar la separación que existe entre estas dos zonas.

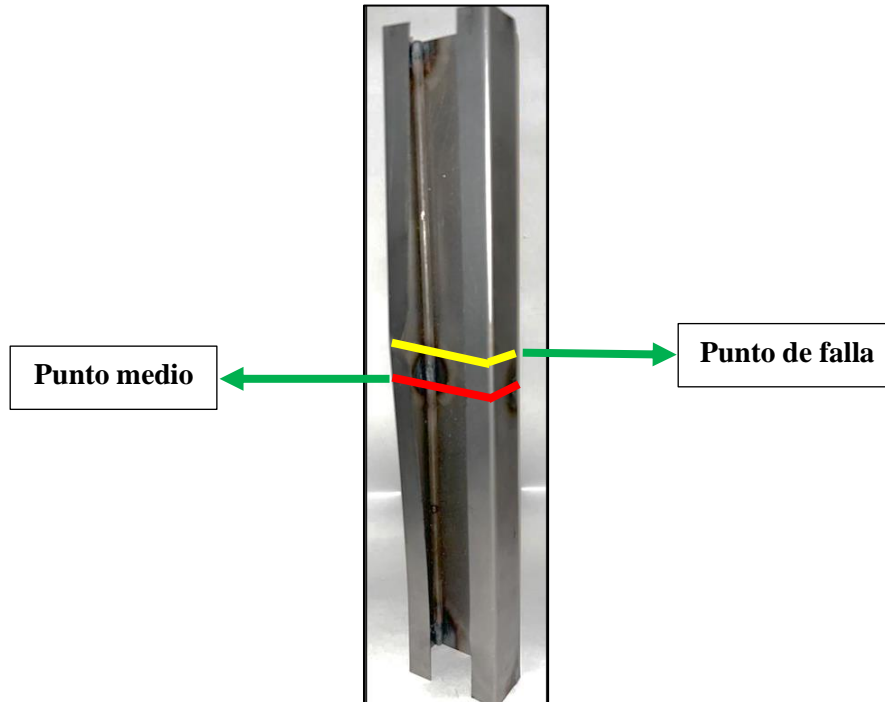


Figura 41. Separación del punto de falla al punto medio del perfil

5.5.2.3. Perfil con refuerzo de 6,35 mm

Al igual que para los perfiles sin refuerzo, para los reforzados con barra de metal de 6,35 mm, se realizaron 3 ensayos por cada longitud crítica. En la *Figura 42*, se puede observar la adhesión del refuerzo de este diámetro al perfil.



Figura 42. Perfil con barra de refuerzo de 6,35 mm

5.5.2.3.1. Perfil con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica de $L/8$

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados en los cuales, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 15, los cuales se deben comparar con el resultado teórico, el cual de acuerdo con los cálculos arrojó un valor de **19156 N**, que, de acuerdo con el resultado obtenido para perfiles

sin reforzar, se presentó un aumento del 72% en la carga soportada, al adherir el refuerzo de 6,35 mm al perfil.

Tabla 15. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica de $L/8$.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
1	12762,8
2	12392,3
3	13961,5
Promedio	13038,9
Desv. Estándar	820,2

En los datos de la Tabla 15, se observa que el promedio de los resultados experimentales es menor que el calculado teóricamente en un 46%. De igual forma, la desviación entre los datos obtenidos representa una distribución uniforme entre las cargas límite de los perfiles con el refuerzo de mayor diámetro de refuerzo. No obstante, los refuerzos impactaron en el tipo de pandeo producido, dado que, en 2 de los 3 ensayos, el pandeo local en los labios se visualizó casi al final de la aplicación de la carga y no se denotaba un pandeo muy pronunciado, en la *Figura 43*, se puede observar el pandeo local y las imperfecciones producidas por la soldadura como los agujeros y las zonas afectadas por el calor en los puntos de sujeción del refuerzo.

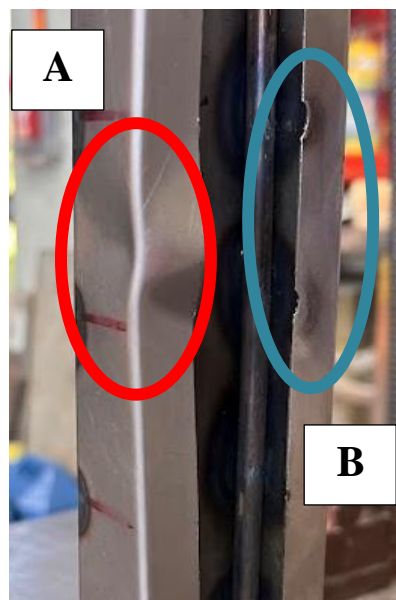


Figura 43. Pandeo local en labio y aleta (A) e imperfecciones en el refuerzo (B)

Una de las principales causas que pudo hacer que el perfil no soportará la carga crítica soportada es la soldadura aplicada, en este caso, al tratarse de la menor longitud crítica existía mayor cercanía entre los puntos de aplicación y a su vez, se trabajó con el diámetro mayor y esto implica mayor exposición con el electrodo y a su vez mayor pérdida de propiedades mecánicas del material. Dentro de esta parte del plan de ensayos, se presentaron complicaciones al momento de realizar las primeras pruebas, dado que, al tratarse de la unión de lámina delgada con una barra de acero maciza, en los primeros intentos, como se muestra en la *Figura 44*, el refuerzo se desprendía de la lámina.



Figura 44. Pandeo local en labios e imperfecciones en el refuerzo.

5.5.2.3.2. Perfil con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica de L/4

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados en los cuales, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 16, los cuales se deben comparar con el resultado teórico, el cual de acuerdo con los cálculos arrojó un valor de **13584,5 N**, que, de acuerdo con el resultado obtenido para perfiles sin reforzar, se aumentó en un 22% la carga soportada, solo con la adhesión de los refuerzos de 6,35 mm al perfil.

Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica de L/4.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
1	14443,6
2	14677,6
3	15033,7
Promedio	14855,7
Desv. estándar	297,1

Al analizar los datos experimentales se encuentra una variación del 9% entre el valor teórico y el promedio de los resultados experimentales, presentándose un aumento sobre el valor calculado, esto pudo darse ya sea gracias a que se usó un método conservador al momento de calcular la carga y al momento de realizar los ensayos, puede que los puntos de sujeción de la soldadura tomaran más superficie sujetando el refuerzo de mejor forma.



Figura 45. Pandeo local en los labios (A) y aleta (B).

En la *Figura 45*, se observa pandeo local los labios del perfil, como ya se venía presentando en anteriores ensayos. Sin embargo, a diferencia que con el de longitud crítica de $L/8$, el refuerzo no se desprendió de la lámina, lo que beneficio el análisis con respecto a los resultados obtenidos teóricamente.

5.5.2.3.3. Perfil con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica de $L/2$

Se realizaron 3 ensayos con los perfiles reforzados en los cuales, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 17, estos se deben comparar con el resultado teórico, el cual de acuerdo con los cálculos arrojó un valor de **12191,6 N**, lo que representa un aumento de 9% sobre la carga soportada por el perfil.

Tabla 17. Resultados obtenidos en los ensayos de perfiles con refuerzo de 6,35 mm y longitud crítica de $L/2$.

No. de ensayo	Carga soportada [N]
1	13979,2
2	13491,3
3	11834,7
Promedio	13101,7
Desv. Estándar	1124,1

Con los datos de la Tabla 17, se puede determinar que el valor promedio de los resultados experimentales superó en un 8% lo obtenido teóricamente y como se ha resaltado esto puede deberse

a que se usó un método conservador al momento de calcular la carga y al momento de realizar los ensayos, puede que los puntos de sujeción de la soldadura tomaran más superficie sujetando el refuerzo de mejor forma, de igual manera, en estos ensayos se tuvo la mayor longitud crítica, es decir no se deformó en gran manera el material.

Al realizar los ensayos se pudo determinar que los perfiles reforzados con mayor longitud crítica fueron los que menos daños en el material presentaron, por lo tanto, no presentaron deformaciones ni fallas previas al ensayo. El tipo de pandeo presentado fue local en los labios, como se puede observar en la *Figura 46*.



Figura 46. Pandeo local en el labio.

5.6. Discusión y análisis

Al tener definidos todos los resultados del plan de ensayos, al igual que las variaciones que pudieron darse al igual que las causas de estos, se procede al análisis de resultados. En la *Figura 47*, se encuentra un diagrama en el cual se muestran los resultados teóricos, experimentales de los perfiles reforzados con barras de 3,18 mm.

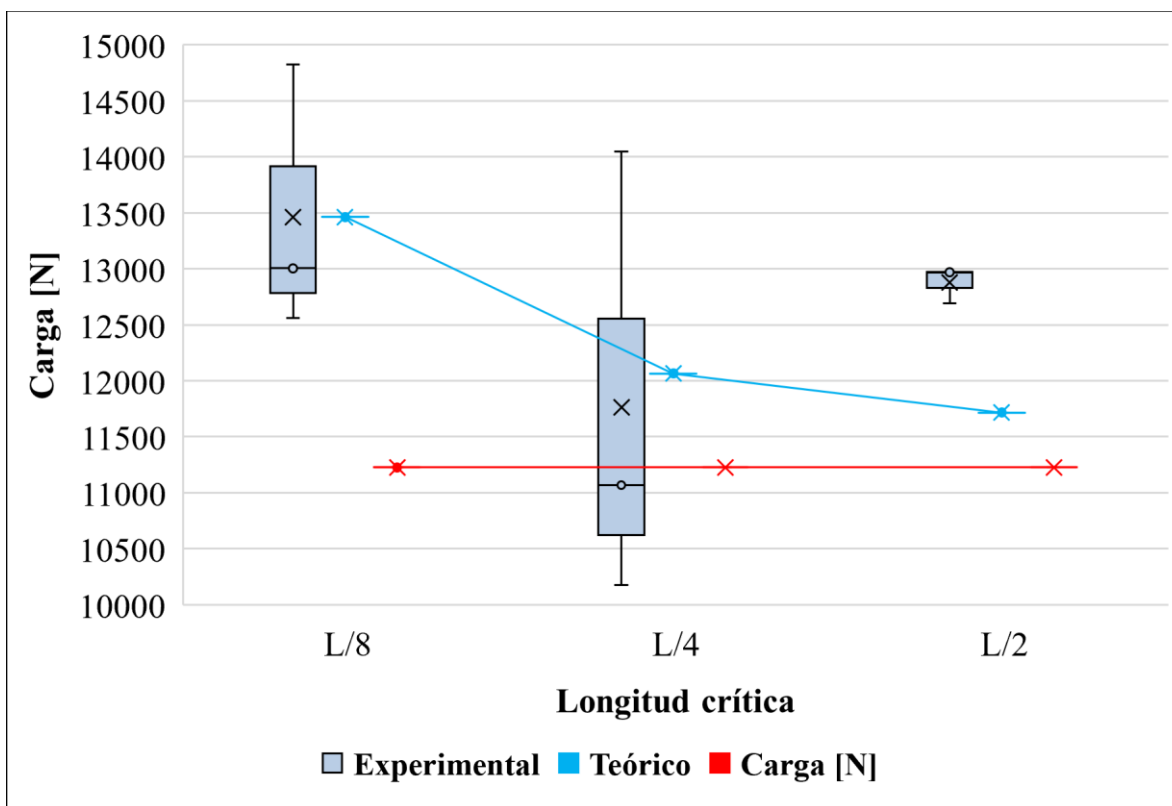


Figura 47. Curvas de carga vs longitud crítica para refuerzo de 3,18 mm

Como se observa en la Figura 47, con los datos teóricos obtenidos, a medida que aumenta la longitud crítica, disminuye la carga soportada, sin embargo, los resultados experimentales proyectan que con la longitud crítica de L/2, se tendrá mayor resistencia a la carga, sin embargo, el promedio de datos obtenidos en esta longitud, no supera a lo obtenido en L/8, lo cual, reafirma que, a mayor cantidad de puntos de sujeción, mayor será la carga que este puede soportar.

No obstante, al analizar los datos obtenidos para la longitud crítica de L/4, se observa una mayor dispersión entre los datos experimentales obtenidos, esto, como se comentó en la sección anterior pudo darse por procedimientos imprecisos al momento de realizar los ensayos o porque algunas de las probetas ya se encontraban desgastadas y/o deformadas. Al igual que con la longitud crítica de L/2, el promedio de los valores obtenidos resulta siendo menor que el promedio de L/8. En lo que refiere específicamente a L/8, se observa que la desviación entre sus datos no es muy grande e igualmente, su promedio de datos experimentales es muy cercano a lo obtenido teóricamente.

Por último, también se puede observar, que los promedios de cada uno de los especímenes de ensayos superan el valor de carga soportada de los perfiles sin refuerzos, mostrando que los refuerzos representan un aumento en la carga crítica.

En la *Figura 48*, se encuentra un diagrama en el cual se muestran los resultados teóricos, experimentales de los perfiles reforzados con barras de 4,75 mm.

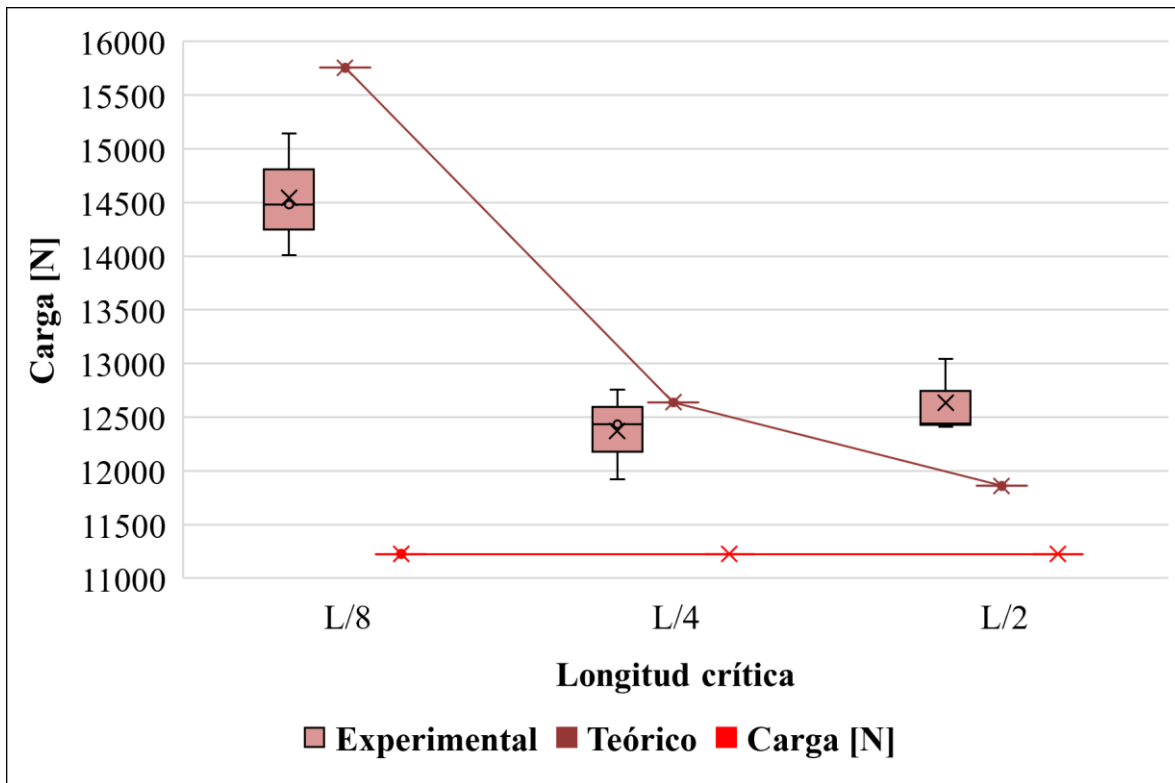


Figura 48. Curvas de carga vs longitud crítica para refuerzo de 4,75 mm

En la Figura x, se muestran los resultados teóricos, los cuales, al igual que con el diámetro menor, disminuye la carga soportada a medida que aumenta la longitud crítica, disminuye la carga soportada por la estructura. En este caso, todos los valores obtenidos de manera experimental superan al valor obtenido para perfiles sin refuerzo, lo cual representa un buen indicador del aporte que realizan las barras de acero.

Al igual que con el diámetro anterior, los valores experimentales de la longitud crítica de L/2, supera lo esperado por la parte teórica e inclusive, el valor promedio, supera el valor promedio de L/4, sin embargo, la diferencia entre estos no es mucha, inclusive, el valor promedio experimental de L/4, está por debajo de lo esperado teóricamente. Esto pudo presentarse por daños y fallas previas en la fabricación y adhesión de los perfiles reforzados. De la misma manera, estos valores son mucho menores que los obtenidos en L/8 lo cual, reafirma que, a mayor cantidad de puntos de sujeción, mayor será la carga que este puede soportar, en el caso de un diámetro de 4,75 mm.

Por último, también se puede observar, que los promedios de cada uno de los especímenes de ensayos superan el valor de carga soportada de los perfiles sin refuerzos, mostrando que los refuerzos representan un aumento en la carga crítica.

En la *Figura 49*, se encuentra un diagrama en el cual se muestran los resultados teóricos, experimentales de los perfiles reforzados con barras de 6,35 mm.

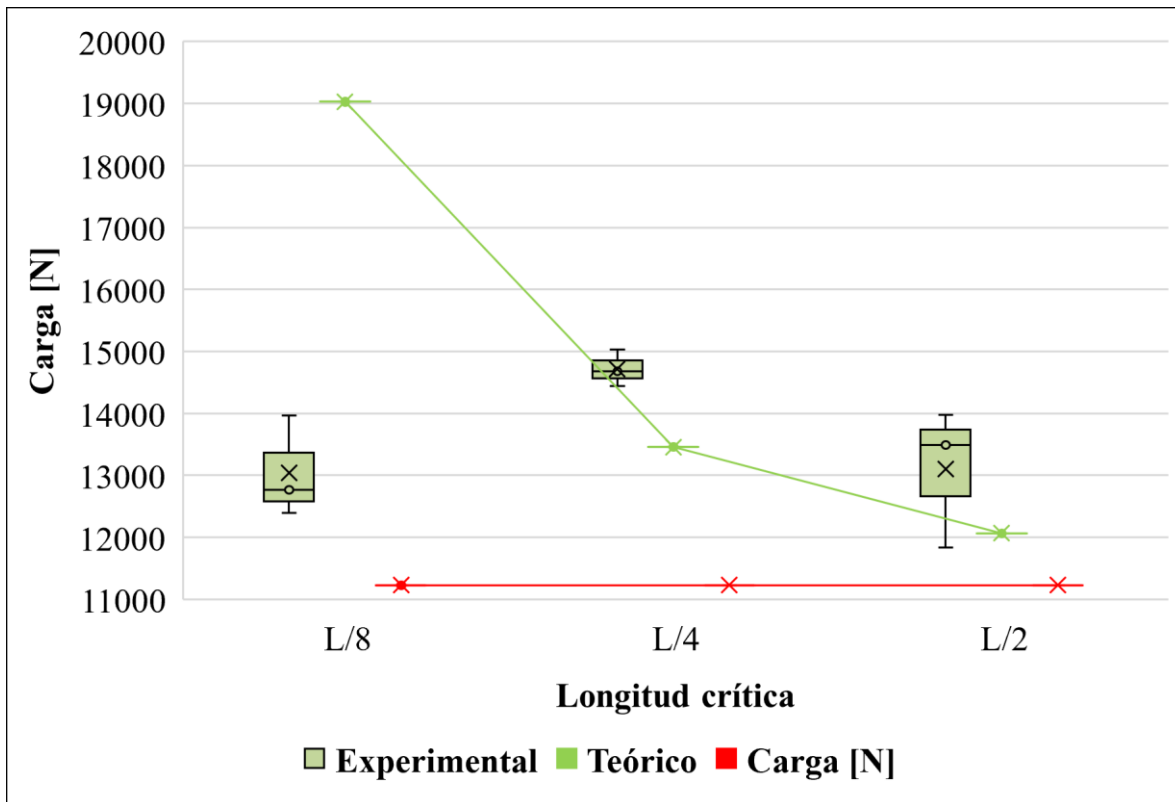


Figura 49. Curvas de carga vs longitud crítica para refuerzo de 6,35 mm

En la Figura x, en lo que refiere a los resultados teóricos, representa la tendencia de todos los perfiles reforzados con diámetros menores, que a medida que disminuye la longitud crítica, disminuye la carga soportada. A diferencia de los resultados anteriores, con L/2 y L/4, se presenta la tendencia calculada teóricamente, en la cual L/4, resistirá mayor carga que L/2. Sin embargo, ambas longitudes, superan a L/8, el cual debería ser el espécimen con mayor resistencia a la carga.

Con el diámetro mayor y L/8, no se llegaron a las cargas esperadas, esto dado que fueron los perfiles con mayores daños en el proceso de adhesión de refuerzos. En los ensayos, se presentaron variaciones no esperadas, tales como el desprendimiento del refuerzo en los puntos intermedios, impidiendo así que el refuerzo actuara en cada una de las longitudes críticas, sino que presentaba un comportamiento como un refuerzo adherido en solo 2 puntos de sujeción. Esto se ve reflejado en los resultados experimentales.

De igual manera, todos los resultados obtenidos con este diámetro fueron mayores a los obtenidos de los perfiles sin reforzar.

5.7. Comparación de resultados

Con los datos obtenidos experimentalmente se realiza la comparación entre estos, para poder determinar en qué punto se presentan los valores con mayor relación al comportamiento esperado en el plan de ensayos y en el estudio en general. En la Figura 50, se encuentra la comparación de las diferentes variables.

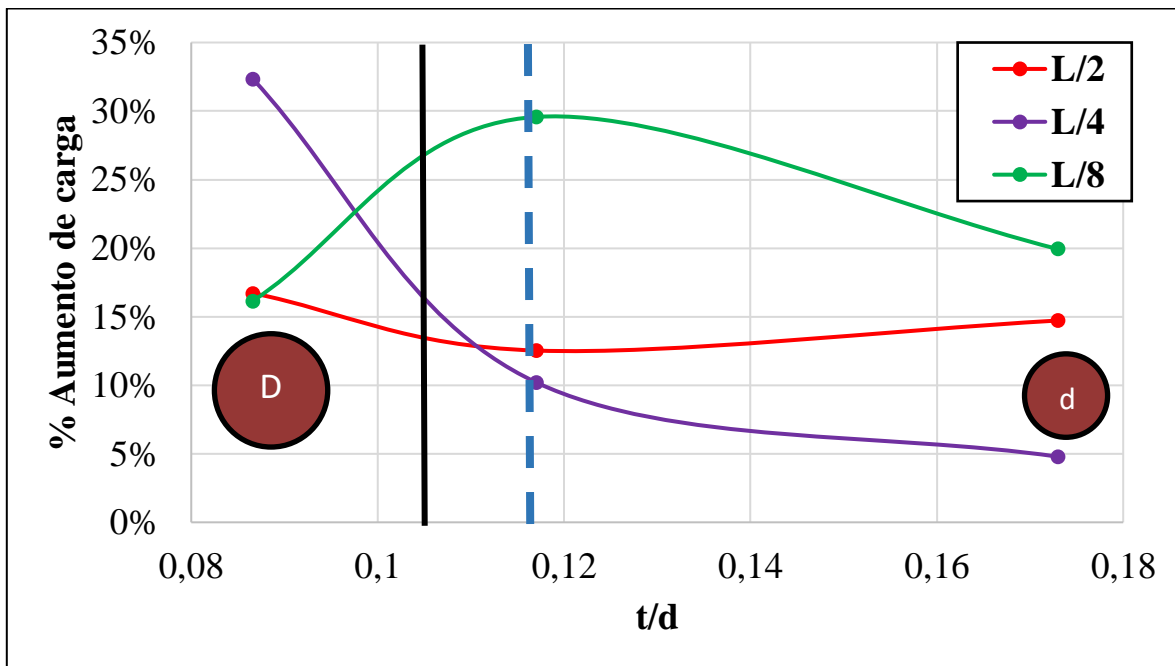


Figura 50. Curvas de relación espesor/diámetro vs % aumento de carga.

Como se puede observar en la gráfica, si se mantiene un espesor de lámina constante y se varía el diámetro del refuerzo, como es el caso de este estudio. Cuando se tiene un diámetro pequeño, se puede ver como el mayor aumento de carga se da con una longitud crítica de L/8, seguido por L/2 y finalizando con L/4. Sin embargo, a medida que se aumenta el diámetro, el aumento de la carga de L/8 al igual que el de L/4, mientras que el de L/2 disminuye. Las curvas cumplen con lo esperado cuando se tiene una relación de espesor-diámetro de entre 0,1 y 0,11 aproximadamente, en ese punto L/8 presenta el mayor porcentaje de aumento de carga, seguido por L/4 y luego L/2.

Cuando el diámetro se vuelve aún más grande, L/8 decae y L/4 se convierte en la longitud crítica adecuada para diámetros grandes y espesores delgados, dado que, a pesar de que el proceso de adhesión es invasivo, con los puntos de sujeción especificados para L/4, son suficientes para que soporte mayores aplicaciones de carga sin fallar.

Capítulo 6. Conclusiones

- Con el método de anchos efectivos, se realizó el diseño de la geometría de los perfiles al igual que la estimación de la carga para los reforzados y no reforzados. Este método de cálculo se considera conservador, dado que se trabajó con factores de reducción en el cálculo del área efectiva, esto resulta en valores de diseño más bajos comparados con el uso del ancho total nominal. Esto también por los criterios de pandeo que se asumen dentro de estos métodos, los cuales asumen condiciones más desfavorables para asegurar que el diseño sea seguro bajo diversas condiciones de carga y fabricación.
- El plan experimental fue acertado, sin embargo, dadas las condiciones del ensayo y el método de sujeción, se requirieron más probetas. Los ensayos fallidos, se dieron en los perfiles con el diámetro mayor (6,35 mm), en estos, el refuerzo se desprendió durante el ensayo haciendo que la carga soportada no fuera la esperada. Otro de los fallos en los ensayos, fue la descentralización de la carga, dado que, con el proceso de fabricación, los perfiles presentaban deformaciones previas, resultaba complejo la ubicación de los centroides dentro de las mordazas.
- Aunque el comportamiento por cada diámetro no fue el esperado, se superó la carga soportada por los perfiles sin reforzar, lo que representa que los refuerzos cumplen con lo que se esperaba en lo que refiere al aumento de carga.
- Los refuerzos en los perfiles tipo columna corta de lámina delgada logran aumentar la resistencia a cargas a compresión entre un **5% y 35%**.
- Existe una relación mínima de aproximadamente **0,117**, mediante la cual se relacionan el espesor de la lámina y el diámetro del refuerzo. Sino se tiene en cuenta este límite, el uso del refuerzo puede ser nulo dentro de la resistencia a la carga.
- El método de adhesión del refuerzo al perfil resulta favorecedor para longitudes críticas mayores, es decir, menos puntos de apoyo, esto debido a las deformaciones que presenta la lámina al tener un espesor tan delgado.
- Como se esperaba, todas las fallas de los perfiles comienzan en los labios de los perfiles, dado que es el elemento que menos rigidizadores posee, se da pandeo local en estos a lo largo de todo el plan de ensayos.

- A medida que la longitud crítica se hace más grande, el punto de falla se hace más lejano al punto de sujeción, en el caso de las longitudes críticas más pequeñas, los puntos de falla se encuentran cercanos a los puntos de adhesión, pudiendo este ser uno de los motivos por el cual el perfil no soporta lo que se espera.

Recomendaciones y trabajos futuros

- Los ensayos realizados se hicieron en columnas cortas, sin embargo, al tratar con columnas largas, se pueden llegar a obtener resultados favorables para refuerzos de diámetros más grandes
- El tipo de apoyo durante todo el ensayo fue fijo, obteniendo resultados solo de pandeo local o global, sin embargo, no se tiene registro de que sucedería al tener perfiles reforzados bajo apoyo articulado, teniendo pandeo torsional.
- Igualmente, también se puede estudiar, el pandeo flexo-torsional, se puede presentar al no estar centrada el punto de carga con el centroide del perfil.
- La soldadura de punto, a pesar de ser un método poco invasivo, en el caso de lámina delgada, termina afectando y dañando el material. Se pueden investigar y buscar nuevas maneras de sujeción que vayan de relacionados con los costos de fabricación.

Bibliografía

- [1] Urbano Tole, J. A. (2018). *Estimación de la capacidad portante de perfiles de lámina delgada reforzados con barras de acero solicitados a compresión de uso en estanterías* (Tesis de maestría).
- [2] Pham, C. H., & Hancock, G. J. (2012). Direct strength design of cold-formed C-sections for shear and combined actions. *Journal of Structural Engineering*, 138(6), 759-768.
- [3] Roy, K., Lau, H. H., Ting, T. C. H., Chen, B., & Lim, J. B. (2020). Flexural capacity of gapped built-up cold-formed steel channel sections including web stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106154.
- [4] Fang, Z., Roy, K., Chi, Y., Chen, B., & Lim, J. B. (2021, December). Finite element analysis and proposed design rules for cold-formed stainless-steel channels with web holes under end-one-flange loading. In *Structures* (Vol. 34, pp. 2876-2899). Elsevier.
- [5] Peiris, M., & Mahendran, M. (2021). Behaviour of cold-formed steel lipped channel sections subject to eccentric axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106808.
- [6] Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F., Di Lorenzo, G., & Guerrieri, M. R. (2008). Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations. *Thin-Walled Structures*, 46(7-9), 781-791.
- [7] Zheng, B., Hua, X., & Shu, G. (2015). Tests of cold-formed and welded stainless steel beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 111, 1-10.
- [8] Whittle, J., & Ramseyer, C. (2009). Buckling capacities of axially loaded cold-formed, built-up C-channels. *Thin-Walled Structures*, 47(2), 190-201.
- [9] Dobrić, J., Buđevac, D., Marković, Z., & Gluhović, N. (2017). Behaviour of stainless-steel press-braked channel sections under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 236-253.
- [10] El-Sayed, K. M., Debaiky, A. S., Khalil, N. N., & El-Shenawy, I. M. (2019). Improving buckling resistance of hollow structural steel columns strengthened with polymer-mortar. *Thin-Walled Structures*, 137, 515-526.
- [11] Amoush, E. A., & Ghanem, M. A. (2018). Axially loaded capacity of alternatively strengthened cold-formed channel columns with CFRP. *Journal of constructional steel research*, 140, 139-152.
- [12] Zhao, Xijun & Chung, Yunchan. (2019). Development of a Robotic Structural Steel Cutting System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 538. 012042. 10.1088/1757-899X/538/1/012042.

- [13] American Iron and Steel Institute. (2016). North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI S100-16). American Iron and Steel Institute.
- [14] Skill-Lync. (s/f). Week 2: BiW fixture basics challenge. Skill-Lync. de <https://skill-lync.com/student-projects/week-2-biw-fixture-basics-challenge-195>
- [15] Taqiyyan, A., Slamet, A., & Giyanto, G. (2022, December). ANALISA BUCKLING TERHADAP RANGKA ROTARY TABLE MENGGUNAKAN METODE FINITE ELEMENT METHODE. In Prosiding Seminar Nasional NCIET (Vol. 3, No. 1, pp. 85-94).
- [16] Hasheela, P.F. (2014). Behaviour of single laced columns versus double laced columns.
- [17] Torsión, S. C. Y. (s/f). APLICACIÓN CIRSOC 301-EL. Edu.ar., http://www1.frm.utn.edu.ar/metalias/Ciclo%202009/Guias%20de%20Estudio/CMM_Flexion_EC_09.pdf