

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRICISTA



PROYECTO INTEGRADOR

PANDEO DE PERFILES DE PARED DELGADA

Carrera: Ingeniería Mecánica

Alumno: Miserere, Mauro Andrés

Directores: Ing. Giudici, Alejandro y Dr. Ing. Stuardi, José

Córdoba - 2017

Agradecimientos:

***“A mi familia,
en especial a mis padres
por su apoyo incondicional,
a Yamila,
por apoyarme desde el comienzo,
a mis amigos y compañeros
quienes me acompañaron durante el transcurso de esta carrera,
y a los directores del proyecto,
por el asesoramiento y apoyo brindado durante todo el proyecto
simplemente gracias”***



Contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
2	Marco teórico	3
2.1	Perfiles de pared delgada	3
2.1.1	Conformación	3
2.1.2	Usos	5
2.2	Tipos de pandeo	7
2.2.1	Pandeo global.....	7
2.2.2	Pandeo local.....	9
2.2.3	Pandeo distorsional	10
2.3	Soluciones para predecir la falla	11
2.3.1	Soluciones analíticas	11
2.3.2	Soluciones Numéricas	15
2.3.3	Método de la fuerza directa	20
3	Antecedentes	31
3.1	Introducción.....	31
3.2	Ensayos mecánicos.....	31
3.3	Solución analítica.....	34
3.4	Modelo numérico	35
3.5	Comparación de resultados	37
4	Selección del perfil a analizar.....	39
4.1	Introducción.....	39
4.2	Longitud de las pestañas	41
4.3	Propiedades de la sección.....	44
4.4	Selección de nuevo perfil.....	45
5	Solución analítica.....	49



5.1	Calculo de pandeo local mediante teoría de pandeo de placas	49
6	Simulación mediante elementos finitos	53
6.1	Modelización del perfil	53
6.2	Definición del análisis a realizar	55
6.3	Generación del ensamblaje	55
6.4	Aplicación de cargas y condiciones de borde	56
6.5	Mallado del modelo.....	57
6.6	Simulación y resultados.....	59
7	Cálculo mediante método de la fuerza directa.....	61
7.1	Ingreso de datos en el software	61
7.2	Curva característica de pandeo	63
7.3	Obtención de cargas críticas.....	66
8	Ensayos mecánicos.....	69
8.1	Introducción.....	69
8.1.1	Lugar de trabajo	69
8.1.2	Equipamiento utilizado.....	69
8.2	Diagramación del ensayo	70
8.3	Obtención de los perfiles a ensayar	72
8.4	Ensayo de tracción en muestra.....	73
8.5	Ensayos de pandeo	75
9	Comparación de resultados.....	81
9.1	Comparación con ensayos previos	81
9.2	Comparación de métodos.....	82
10	Conclusiones	83
10.1	Sobre el uso de pestañas.....	83
10.2	Conclusión sobre la efectividad de los métodos aplicados	83
Anexo 1	85



Anexo 2	87
Anexo 3	99



1 Introducción

Las investigaciones en el campo de la estabilidad del equilibrio de componentes estructurales centran sus esfuerzos en comprender los procesos naturales y desarrollar teorías para describir los fenómenos de pandeo de elementos físicos.

Cuando la inestabilidad interviene en el diseño de un componente mecánico, el parámetro más importante es la esbeltez. Cuanto mayor es el valor de la esbeltez menor es la carga crítica que el elemento estructural puede resistir. En consecuencia, se debe elegir una sección que para igual área produzca el mayor valor posible del radio de giro en la dirección de pandeo. Siempre se hace referencia a secciones de pared delgada como una solución eficiente desde el punto de vista estructural. Sin embargo, existen limitaciones porque una vez superado cierto valor máximo de la relación entre el ancho y el espesor de un elemento comprimido que forma parte de la sección resistente, se produce el fenómeno de pandeo local de ese elemento individual. En esos casos las ecuaciones que gobiernan el pandeo global de la viga-columna no son suficientes para resolver el problema. El valor máximo para la relación ancho/espesor depende del tipo de carga, del material, de la forma de la sección y del tipo de apoyos.

En este proyecto se prevé el estudio del fenómeno de pandeo local en vigas de pared delgada, comparando las soluciones analíticas existentes en la bibliografía con el resultado obtenido con modelos numéricos de elementos finitos y mediante ensayos en laboratorio.

La utilización de modelos de simulación permite anticipar la solución problemas concretos y la toma de decisiones respecto del comportamiento estático y dinámico de estructuras. El procedimiento se enmarca dentro de la técnica de *modificación estructural*, por medio de la cual se puede proponer y verificar la eficacia de cambios en el diseño estructural, lo que es muy significativo durante el proceso de optimización.

Para la realización de este proyecto se cuenta con un estudio ya realizado por docentes de la facultad, el cual se ha centrado en perfiles de sección U.

En este proyecto se realizará el estudio a perfiles de sección C, comparándose los resultados con los obtenidos en perfiles U y verificando en qué medida el empleo de estos perfiles mejora el comportamiento estructural.



1.1 Objetivos

El encuadre del proyecto integrador tiene como intención cumplir los objetivos que se plantean a continuación:

- Presentar soluciones analíticas del comportamiento de perfiles de pared delgada.
- Realizar ensayos en laboratorio para obtener las cargas críticas de falla.
- Realizar una modelación numérica y prever el comportamiento utilizando el método de elementos finitos.
- Realizar una hipótesis y comparación de los resultados obtenidos en los pasos anteriores.
- Comparar los resultados obtenidos con los estudios ya realizados sobre perfiles de sección U, para evidenciar las mejoras al utilizar rigidizadores.

2 Marco teórico

A continuación, se detallarán los aspectos teóricos a tener en cuenta para comprender el fenómeno de pandeo de perfiles de pared delgada, las características y conformación de los perfiles, los tipos de pandeo y las distintas formas de predecir su comportamiento de falla.

2.1 Perfiles de pared delgada

Los perfiles a analizar en el proyecto se denominan perfiles de pared delgada, estos tienen la característica de que su espesor es mucho menor a las dimensiones generales de la sección. Como regla se puede considerar de pared delgada a un perfil cuyo espesor sea como máximo 10 veces menor a la longitud del mayor elemento de placa que compone la sección.

Estas características hacen que generalmente al estar sometidos a esfuerzos de compresión o flexión excesivos presenten un modo de falla de pandeo.

En la Figura 2.1 se muestran imágenes de perfiles de pared delgada normalmente utilizados en construcciones civiles y mecánicas:



Figura 2.1
Perfiles de pared delgada

2.1.1 Conformación

Los perfiles que van a ser analizados están contruidos de acero y se obtiene su forma mediante técnicas de conformado en frío, que se describen a continuación:



Materia prima

La materia prima consiste en chapas de acero que para el caso de grandes producciones es recibida en rollos, con los cuales se alimenta a la máquina que posteriormente le dará su forma, como se puede ver en la Figura 2.1.1. (a).



Figura 2.1.1 (a)
Rollo de materia prima

Conformado

Luego del ingreso de la materia prima a la máquina plegadora, se la hace pasar a través de rodillos de conformación, los cuales gradualmente van plegando la chapa en frio hasta llevarla a su forma deseada. En la Figura 2.1.1 (b) puede verse una maquina utilizada para el conformado de perfiles.



Figura 2.1.1 (b)
Rodillos de conformación

2.1.2 Usos

Perfiles de pared delgada son ampliamente utilizados en diversos campos como la industria automotriz, aeronáutica, de construcciones civiles, etc.

Un ejemplo de perfiles de pared delgada utilizados en la industria automotriz son los chasis de pickups y camiones, en donde usualmente se utilizan perfiles con sección U como parte de su estructura, esto puede verse en la Figura 2.1.2 (c).



Figura 2.1.2 (c)
Chasis de pickup



En aeronáutica, las alas de algunos aviones suelen contener largueros conformados por perfiles de pared delgada en forma de U o doble T, como puede verse en la Figura 2.1.2 (d).

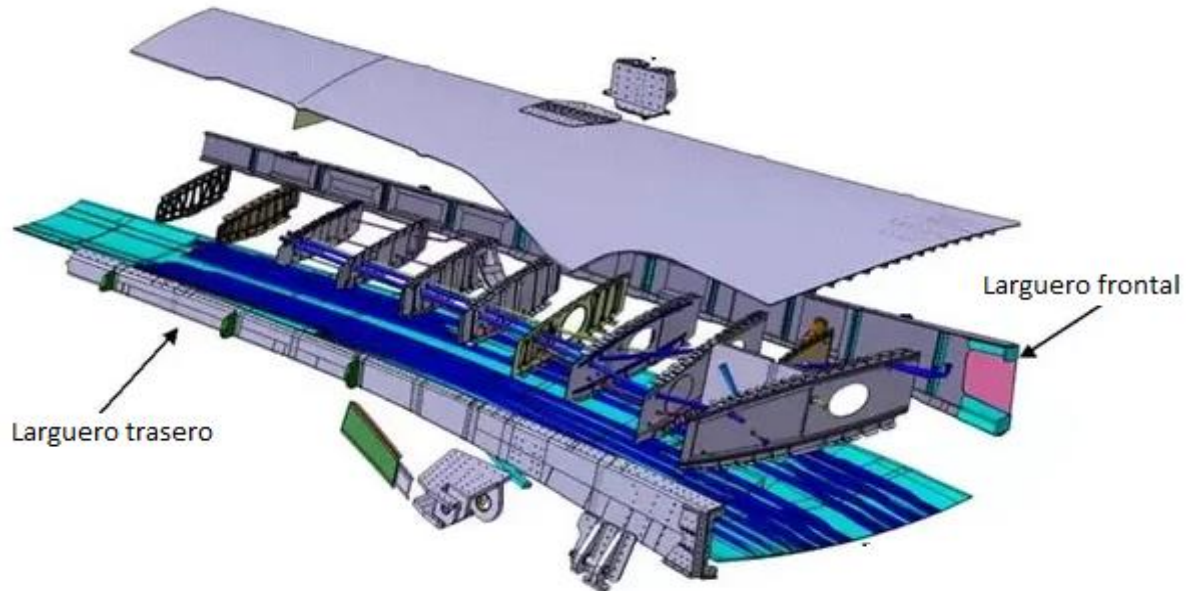


Figura 2.1.2 (d)
Descomposición del ala de una aeronave

En el campo de las construcciones civiles, estos perfiles son utilizados en muchos casos como correas de techos, en donde reciben las cargas de las chapas de cubierta y las transfieren a las vigas principales o secundarias (ver Figura 2.1.2 (e)).



Figura 2.1.2 (e)
Correas con perfiles de pared delgada

2.2 Tipos de pandeo

2.2.1 Pandeo global

El fenómeno de pandeo global puede aparecer en perfiles solicitados a compresión (columnas) y a flexión (vigas).

Cuando se presentan casos de pandeo global, la deformación consiste en una curvatura del perfil la cual abarca toda su longitud como puede observarse en la Figura 2.2.1 (a).

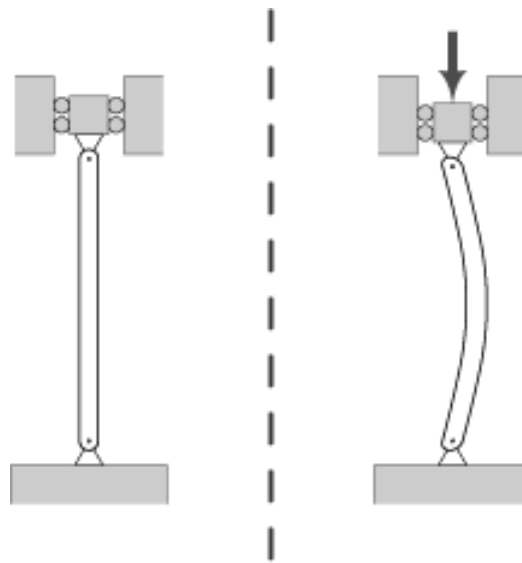


Figura 2.2.1 (a)
Pandeo de columnas

Para el caso de columnas puede presentarse pandeo flexional, pandeo torsional o pandeo flexional-torsional. A continuación, se detalla cada caso.

Pandeo flexional

En este caso la sección del perfil se desplaza sin la presencia de rotación, es decir cada punto que integra la sección se desplazará en línea recta conservando siempre el mismo ángulo con respecto a la sección no deformada. En la figura 2.2.1 (b) se puede ver como la sección se desplaza desde su punto no deformado (negro) hasta su punto deformado (azul) sin la presencia de rotación.

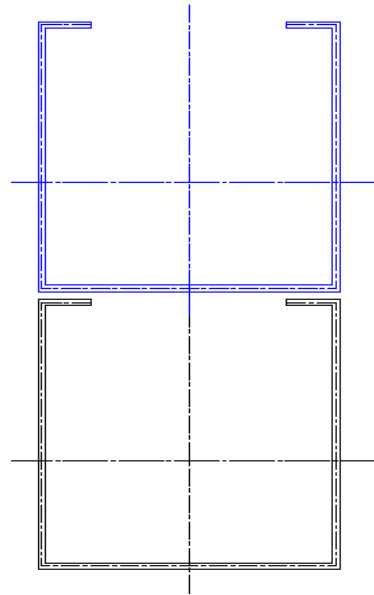


Figura 2.2.1 (b)
Pandeo flexional

Pandeo torsional

Para el caso del pandeo torsional, la sección del perfil rota sobre su propio eje, pero sin presentar desplazamiento, es decir su centro de giro seguirá en la misma posición, como puede observarse en la Figura 2.2.1 (c).

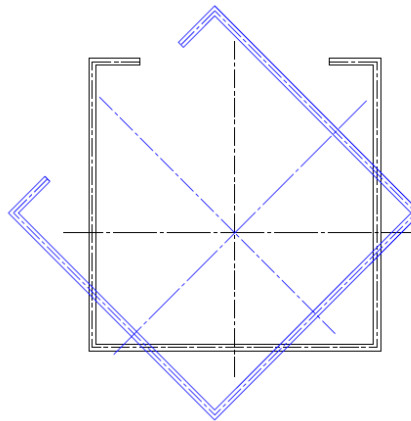


Figura 2.2.1 (c)
Pandeo torsional

Pandeo flexional-torsional

Este caso es una combinación de los dos casos anteriores, es decir la sección del perfil se desplaza y también rota sobre su propio eje como puede verse en la Figura 2.2.1 (d).

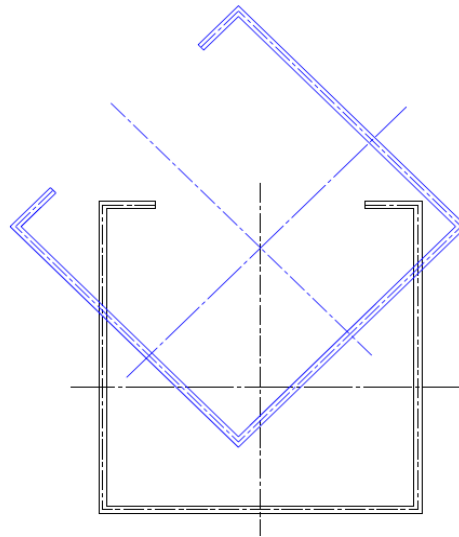


Figura 2.2.1 (d)
Pandeo flexional-torsional

Para el caso de vigas sometidas a flexión, el tipo de pandeo global será el lateral-torsional, el cual es equivalente al flexional-torsional en columnas.

2.2.2 Pandeo local

El pandeo local se da de igual maneras en perfiles sometidos a esfuerzos de compresión y flexión, la característica que tiene este tipo de pandeo es que presentan una significativa distorsión de la sección, pero las líneas de plegado (esquinas) presentan fundamentalmente rotación.

Si se considera a la sección como compuesta por elementos de placas, cada elemento presentara pandeo individual.

En los casos de pandeo local, la longitud de pandeo (también llamada longitud de media onda), es menor o igual a la dimensión del mayor de los elementos solicitados a compresión.

En la Figura 2.2.2 (a) puede observarse una sección de un perfil que presenta pandeo local.

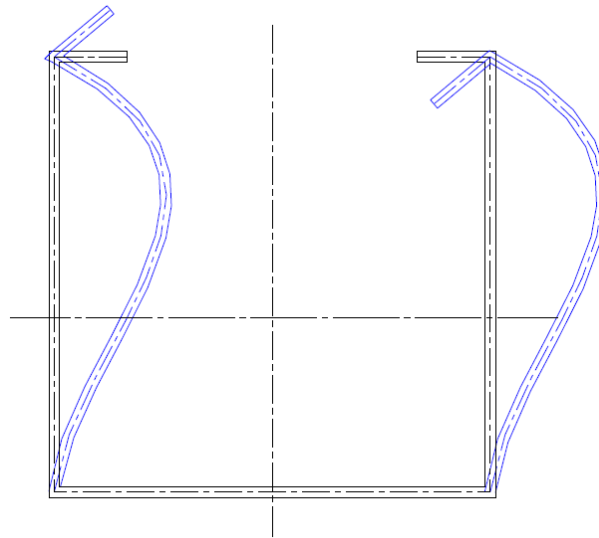


Figura 2.2.2 (a)
Pandeo local

Puede verse como en las esquinas superiores se produce rotación, pero no hay un significativo desplazamiento.

2.2.3 Pandeo distorsional

En el caso de pandeo distorsional, al igual que en el local, también se presenta una significativa distorsión de la sección, pero la diferencia está en que una o más de las líneas de plegado presentan translación y/o rotación.

La longitud de pandeo depende tanto de la carga como de la geometría, pero se encuentra entre la longitud de pandeo local y la de pandeo global.

En la Figura 2.2.3 (a) puede observarse una sección de un perfil que presenta pandeo distorsional.

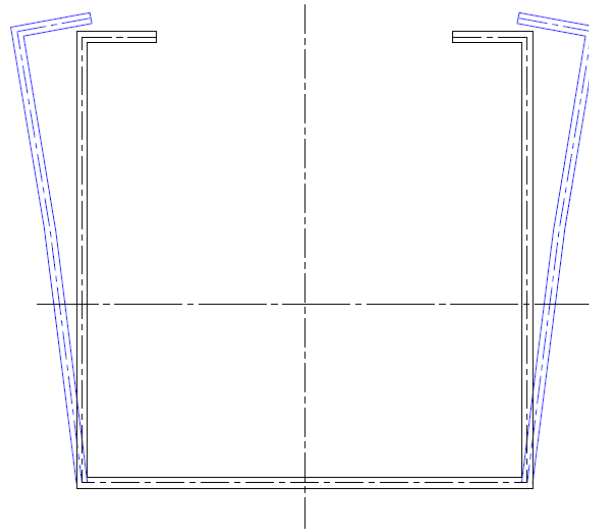


Figura 2.2.3 (a)
Pandeo distorsional

Puede verse como en las esquinas superiores se produce rotación y desplazamiento.

2.3 Soluciones para predecir la falla

En esta sección, se detallarán diferentes soluciones que permiten predecir la carga y el modo de falla de los perfiles solicitados a diferentes tipos de cargas.

2.3.1 Soluciones analíticas

2.3.1.1 Pandeo de Euler

Las soluciones de pandeo de Euler, se utilizan para predecir la carga crítica de pandeo global de columnas sometidas a esfuerzos de compresión constante con distintos tipos de apoyos en sus extremos.

En la Figura 2.3.1.1 se presenta una columna ideal, inicialmente recta, con extremos articulados, donde se indican los parámetros característicos.

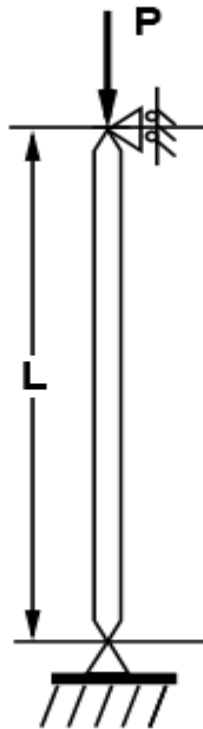


Figura 2.3.1.1
Columna inicialmente recta

La carga crítica de pandeo para una columna articulada en sus extremos será:

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material.

I = Momento de inercia de la sección.

Para el caso de una columna empotrada en su base y libre en el otro extremo, la carga crítica será:

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2}$$

Para una columna empotrada en un extremo y articulada en el otro:

$$P_c = 2,05 \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$



En tanto que para una columna empotrada en ambos extremos será:

$$P_c = 4 \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

2.3.1.2 Pandeo local de elementos compuestos

En el caso de columnas y vigas que están compuestas por placas y solicitadas a esfuerzos de flexión y/o compresión, se considera que las placas que forman la sección están apoyadas unas en otras. Dado que la carga crítica de cada placa depende de las condiciones de apoyo a lo largo de la misma y que el largo de las placas que componen el elemento estructural es mucho mayor que el ancho, la carga crítica resulta independiente del largo de la placa y de las condiciones de apoyo de los extremos cargados.

Debido a esto se puede calcular un límite inferior para la carga crítica del perfil tomando las tensiones críticas de cada elemento que compone al perfil considerándolo a este como placas simplemente apoyadas.

Para el caso de una placa que está sometida a esfuerzos de compresión uniforme (ver Figura 2.3.1.2 (a)), la carga crítica se puede calcular de la siguiente manera:

$$\sigma_{crit} = K \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad del material.

ν : Coeficiente de Poisson.

h : Espesor de la placa.

b : Ancho de la placa.

K : Coeficiente de pandeo local.

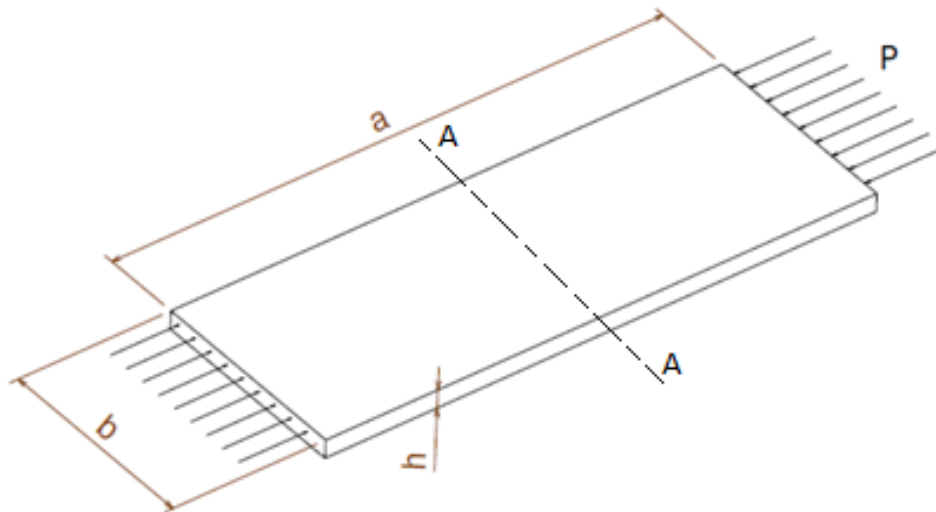


Figura 2.3.1.2 (a)

El coeficiente de pandeo local K depende de las condiciones de borde de los lados largos (no cargados), los valores pueden obtenerse a partir de la tabla 2.3.1.2 (a).

Caso	Tipo de apoyo de los lados largos	Sección A-A	K
1	Dos lados apoyados		4,0
2	Dos lados empotrados		7,0
3	Un lado empotrado y otro apoyado		5,4
4	Un lado empotrado y otro libre		1,3
5	Un lado apoyado y otro libre		0,4

Tabla 2.3.1.2 (a)

Para el caso en que la placa este solicitada a esfuerzos de flexión o flexo-compresión, los coeficientes de pandeo K se obtienen de la tabla 2.3.1.2 (b):



σ_2/σ_1	Caso	1	2	3	4	5	6	7	8
	Borde superior	Empotrado	Empotrado	Apoyado	Apoyado	Empotrado	Libre	Apoyado	Libre
	Borde inferior	Empotrado	Apoyado	Empotrado	Apoyado	Libre	Empotrado	Libre	Apoyado
1		7,0	5,4	5,4	4,0	1,3	1,3	0,42	0,42
0		13,6	11,6	9,8	7,7	5,9	1,6	1,7	0,6
-1		39,6	35,0	28,0	23,8	14,9	2,16	6,8	0,84

Tabla 2.3.1.2 (b)

Para valores intermedios de la relación $x = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ se puede interpolar utilizando las siguientes expresiones:

Caso	σ_1	σ_2	Polinomio de interpolación	X= -1	X= 0	X=+ 1
1	Empotrado	Empotrado	$13,6-13x+9,7x^2 - 3,3x^3$	39,6	13,6	7,0
2	Empotrado	Apoyado	$11,6-12x+8,6x^2 - 2,8x^3$	35,0	11,6	5,4
3	Apoyado	Empotrado	$9,8-9x+6,9x^2 - 2,3x^3$	28,0	9,8	5,4
4	Apoyado	Apoyado	$7,7-7x+6,2x^2 - 2,9x^3$	23,8	7,7	4,0
5	Empotrado	Libre	$5,9-6x+2,2x^2 - 0,8x^3$	14,9	5,9	1,3
6	Libre	Empotrado	$1,6-0,37x+0,13x^2 - 0,06x^3$	2,16	1,6	1,3
7	Apoyado	Libre	$1,7-2,55x+1,91x^2 - 0,64x^3$	6,8	1,7	0,42
8	Libre	Apoyado	$0,57-0,19x+0,06x^2 - 0,02x^3$	0,84	0,57	0,42

Tabla 2.3.1.2 (c)

2.3.2 Soluciones Numéricas

La solución analítica exacta de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los cuerpos deformables está seriamente limitada por la complejidad de los problemas de interés práctico. La geometría del cuerpo, las condiciones de borde o apoyo, los estados de carga y los aspectos relacionados al comportamiento mecánico de los materiales hacen que con frecuencia las soluciones exactas sean inaccesibles. Esta limitación llevó al desarrollo de técnicas o teorías aproximadas destinadas a la resolución de problemas específicos de la mecánica de sólidos. Estas teorías y métodos se fueron desarrollando para cubrir mayor cantidad de casos de interés práctico, pero a pesar de ello subsisten muchos problemas que no pueden ser resueltos con ellas.

La teoría de la elasticidad puede dar origen a sistemas de ecuaciones diferenciales acopladas donde interesa obtener la solución para condiciones de carga, geometría y contorno más o menos arbitrarios con el mayor grado de generalidad posible. Como respuesta



a este problema surgen los métodos de aproximación basados en consideraciones energéticas. Estos métodos son procedimientos analíticos que requieren la utilización de funciones de aproximación que deben cumplir ciertas condiciones de continuidad y además satisfacer las condiciones de borde establecidas. Así es que se transforma el sistema de ecuaciones diferenciales o ecuaciones integrales que gobiernan al fenómeno en un sistema de ecuaciones algebraicas.

Sin embargo, aquí también se presentan problemas en la definición de las funciones de aproximación cuando se trata de estructuras de geometría compleja, o cuando la complejidad reside en las condiciones de apoyo, los estados de carga o una combinación de todos estos factores.

2.3.2.1 Método de los elementos finitos

La imposibilidad de una solución analítica llevó a consideraciones energéticas, las que finalmente también demuestran ser un medio incapaz de resolver problemas de regular complejidad. Es precisamente para suplir estas limitaciones de los procedimientos energéticos que surge el método de los elementos finitos (MEF), que se basa en la subdivisión del dominio en subdominios o elementos de configuración geométrica adecuada para hacer posible su tratamiento individual en forma analítica.

Esta idea fue planteada por McHenry en el año 1943 y propuesta con un enfoque similar al actual por Argyris en 1955. Este último, planteó una formulación matricial de la teoría estructural, comparando los métodos de las fuerzas y desplazamientos, y demostrando que estos métodos podían ser extendidos para considerar cualquier tipo de estructura y no solo aquellas compuestas por vigas o barras.

Paralelamente, M. J. Turner trabajó en la modelización de un ala delta para un análisis aeroelástico, empleando elementos triangulares en la representación de su recubrimiento. Esta fue una de las primeras aplicaciones del método en la resolución de problemas reales de la ingeniería (1953 a 1956). Por otra parte, el término "Elemento Finito" y luego el nombre del método fue empleado por primera vez en 1960 por Clough.

A partir de aquella fecha y coincidiendo con el vertiginoso desarrollo de la computadora, el método de los elementos finitos evolucionó rápidamente hasta alcanzar su actual grado de desarrollo, convirtiéndose en una herramienta insustituible para el análisis no solo estructural sino también de muchas otras ramas de la ingeniería como lo son los fluidos, problemas de transferencia de calor y cálculo de potencial electromagnético, entre otros.



El método de los elementos finitos, es un método de aproximación de problemas de continuos. El continuo se divide en un número finito de partes o elementos, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes. La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos. Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos. El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma. El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo aproximado del cuerpo, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Independientemente de la naturaleza física del problema, el análisis del mismo mediante el MEF sigue los siguientes pasos:

- 1.- Definición del problema y su dominio.
- 2.- Discretización del dominio.
- 3.- Identificación de la(s) variable(s) de estado.
- 4.- Formulación del problema.
- 5.- Establecimiento de los sistemas de referencia.
- 6.- Construcción de las funciones de aproximación de los elementos.
- 7.- Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.
- 8.- Transformación de coordenadas.
- 9.- Ensamble de las ecuaciones de los elementos.
- 10.- Introducción de las condiciones de contorno.
- 11.- Solución del conjunto de ecuaciones simultáneas resultante.
- 12.- Interpretación de los resultados.



2.3.2.2 Implementación computacional del MEF

La implementación computacional de los pasos descritos en la sección anterior se realiza, en forma general, a través de tres unidades básicas: el pre-procesador, el procesador, y el pos- procesador. Las funciones principales de estas unidades son:

- entrada y/o generación de los parámetros del problema
- ensamblaje y resolución del sistema de ecuaciones
- impresión y representación graficas de la solución.

El éxito de cualquier programa computacional de elementos finitos, depende de la eficiencia de cada una de las tres unidades mencionadas. En la Figura 2.3.2(a) se resumen las operaciones que se realizan en dichas unidades.

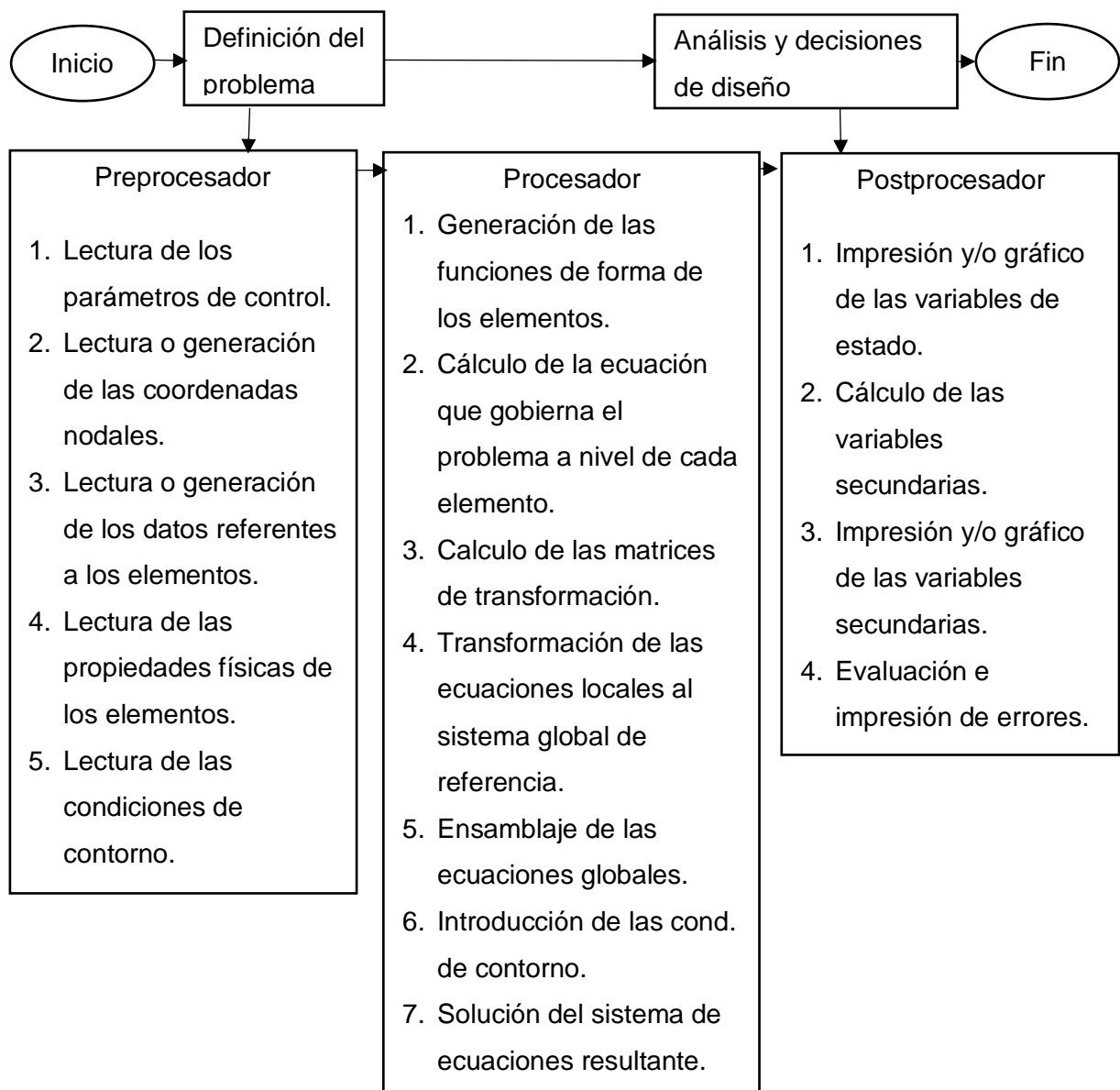


Figura 2.3.2 (a)
Implementación computacional del MEF

En la actualidad existe una gran cantidad de softwares que utilizan el MEF para predecir el comportamiento mecánico, térmico, eléctrico, etc. de diferentes elementos.

Para la realización de este proyecto se utilizará el software ABAQUS de la firma francesa Dassault Systemes. Este software fue especialmente desarrollado para aplicar el MEF y poder simular muchos tipos de comportamientos de diversos materiales.



2.3.3 Método de la fuerza directa

El método de la fuerza directa es un método de diseño de perfiles de acero conformados en frío, adoptado en 2004 como el Apéndice 1 de AISI S100 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, las especificaciones norteamericanas para el diseño de elementos estructurales conformados en frío.

Este método permite calcular la carga de falla por pandeo de perfiles solicitados a esfuerzos de compresión y/o flexión. Puede ser utilizado como alternativa al método de cálculo mediante especificaciones principales que describe la norma.

Las principales ventajas de utilizar el método de la fuerza directa en comparación con el método principal de estas especificaciones son:

- Mayor facilidad de cálculo de secciones complejas y secciones no normalizadas.
- No hay necesidad de realizar cálculos de anchos efectivos.
- No se requieren métodos iterativos.
- Incentiva a la optimización de secciones.
- Enfoca los esfuerzos en la determinación del correcto comportamiento de pandeo en lugar de enfocarlo en el cálculo de anchos efectivos.

2.3.3.1 Metodología de la Especificación

El método de la fuerza directa permite calcular el momento nominal de pandeo M_n (si los esfuerzos son de flexión) o la carga crítica de pandeo P_n (si se trata de esfuerzos de compresión), los cuales son los esfuerzos que se deben aplicar al perfil para que este quede sometido a la tensión crítica de pandeo.

En el método se diferencian los tres modos posibles de pandeo y se obtienen sus momentos nominales correspondientes:

- Pandeo global: M_{ne} o P_{ne}
- Pandeo local: M_{nl} o P_{nl}
- Pandeo distorsional: M_{nd} o P_{nd}

Pandeo global

a) Esfuerzos de compresión: La carga nominal para los casos de pandeo flexional, torsional o flexo-torsional, se calcula de la siguiente manera:



$$\text{Para: } \lambda_c < 1,5, \quad P_{ne} = (0,658\lambda_c^2) P_y$$

$$\text{Para: } \lambda_c > 1,5, \quad P_{ne} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) P_y$$

$$\text{Siendo } \lambda_c = \text{Factor de esbeltez de pandeo global} = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cre}}}$$

Donde P_{cre} es la carga crítica de pandeo global, esta se obtiene de la curva característica de pandeo, la cual será detallada posteriormente.

b) Esfuerzos de flexión: El momento nominal para los casos de pandeo lateral torsional, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Para: } M_{cre} < 0,56 M_y, \quad M_{ne} = M_{cre}$$

$$\text{Para: } 2,78 M_y \geq M_{cre} \geq 0,56 M_y, \quad M_{ne} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10M_y}{36M_{cre}}\right)$$

$$\text{Para: } M_{cre} \geq 2,78M_y, \quad M_{ne} = M_y$$

Donde M_{cre} es el momento crítico de pandeo global, este se obtiene de la curva característica de pandeo, la cual será detallada posteriormente.

Pandeo local

a) Esfuerzos de compresión: La carga nominal para los casos de pandeo local sometidos a esfuerzos de compresión se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Para: } \lambda_l \leq 0,776, \quad P_{nl} = P_{ne}$$

$$\text{Para: } \lambda_l > 0,776, \quad P_{nl} = \left(1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}}\right)^{0,4}\right) \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}}\right)^{0,4} P_{ne}$$

$$\text{Siendo } \lambda_l = \text{Factor de esbeltez de pandeo local} = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}}$$

Donde P_{crl} es la carga crítica de pandeo local, esta se obtiene de la curva característica de pandeo, la cual será detallada posteriormente.

b) Esfuerzos de flexión: El momento nominal para los casos de pandeo local sometidos a esfuerzos de flexión se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Para: } \lambda_l \leq 0,776, \quad M_{nl} = M_{ne}$$



$$\text{Para: } \lambda_l > 0,776, \quad M_{nl} = \left(1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0,4}\right) \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0,4} M_{ne}$$

$$\text{Siendo: } \lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}}$$

Donde M_{crl} = momento crítico de pandeo local, este se obtiene de la curva característica de pandeo, la cual será detallada posteriormente.

Pandeo distorsional

a) Esfuerzos de compresión: La carga nominal para los casos de pandeo distorsional sometidos a esfuerzos de compresión se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Para: } \lambda_d \leq 0,561, \quad P_{nd} = P_y$$

$$\text{Para: } \lambda_d > 0,561, \quad P_{nd} = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6}\right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6} P_y$$

$$\text{Siendo } \lambda_d = \text{Factor de esbeltez de pandeo distorsional} = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}}$$

Donde P_{crd} = carga crítica de pandeo distorsional, esta se obtiene de la curva característica de pandeo, la cual será detallada posteriormente.

b) Esfuerzos de flexión: El momento nominal para los casos de pandeo distorsional sometidos a esfuerzos de flexión se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Para: } \lambda_d \leq 0,673, \quad M_{nd} = M_y$$

$$\text{Para: } \lambda_d > 0,673, \quad M_{nd} = \left(1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0,5}\right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0,5} M_y$$

$$\text{Siendo: } \lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}}$$

Donde M_{crd} = momento crítico de pandeo distorsional, este se obtiene de la curva característica de pandeo, la cual será detallada posteriormente.



Se considerará como la carga crítica de falla P_{cr} y/o el momento crítico de falla M_{cr} a aquella que sea la menor entre las tres obtenidas de acuerdo con los tres modos posibles de pandeo (global, local o distorsional):

$$P_{cr} = \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$$

$$M_{cr} = \min(M_{ne}, M_{nl}, M_{nd})$$

Para la obtención de las cargas críticas P_{cr} y/o los momentos críticos M_{cr} de diferentes tipos de secciones es posible utilizar softwares que aplican el método descrito y utilizan el método de bandas finitas, el cual se describirá en el punto siguiente.

2.3.3.2 Método de bandas finitas

Muchas estructuras poseen propiedades geométricas constantes a lo largo de una dirección, como son: laminas, placas o perfiles, en los que la sección transversal de dichas estructuras no varía en dirección longitudinal; y si las propiedades mecánicas del material son también constantes en dicha dirección, se puede simplificar el análisis utilizando el método de bandas finitas en lugar de utilizar el método de elementos finitos.

En problemas con formas geométricas regulares y condiciones de contorno simples se pueden utilizar métodos alternativos como el de bandas finitas, el cual reduce el costo computacional.

Este método considera una estructura laminar que está conformada por laminas planas unidas entre sí a través de sus lados y que no existe un movimiento independiente de cada una de las láminas, es decir, que existe una compatibilidad de desplazamiento entre los miembros integrantes. Cada una de estas láminas se comporta como una superposición de dos caracterizaciones independientes, la respuesta membranar a cargas en el plano de la lámina y la flexional que considera las cargas normales a su plano. Estas laminas son denominadas bandas finitas.

En la respuesta membranar, las láminas están sometidas a esfuerzos normales y tangenciales en su plano medio, cuya distribución es uniforme en el espesor de la lámina porque se considera que dicho espesor es muy pequeño en comparación con las dimensiones de la lámina; y se considera además que existe un comportamiento lineal de la carga con respecto al desplazamiento

Por otra parte, se considera que las placas o bandas, responden a la hipótesis de Kirchhoff o a la hipótesis de Reissner-Mindlin, es decir:

- Se considera la hipótesis que establece que cualquier segmento de recta normal al plano medio de la placa permanece recto, mientras se desprecia la presión que pudieran ejercer los planos paralelos a este plano medio según la teoría de Kirchhoff, como se muestra en la Figura 2.3.3.2 (a).

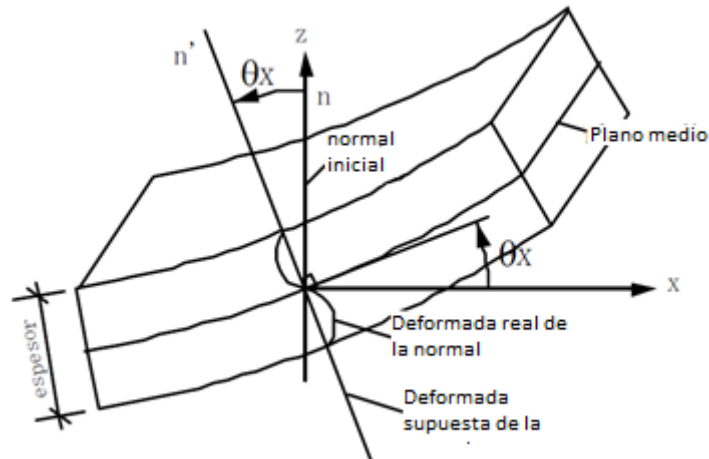


Figura 2.3.3.2 (a)
Teoría de Kirchhoff

- Los puntos que antes de la deformación estaban contenidos en una recta normal al plano medio de la placa, permanecen al deformarse sobre una misma recta, sin que esta tenga que ser necesariamente ortogonal a la deformada según la teoría de Reissner-Mindlin, como se muestra en la siguiente Figura 2.3.3.2 (b).

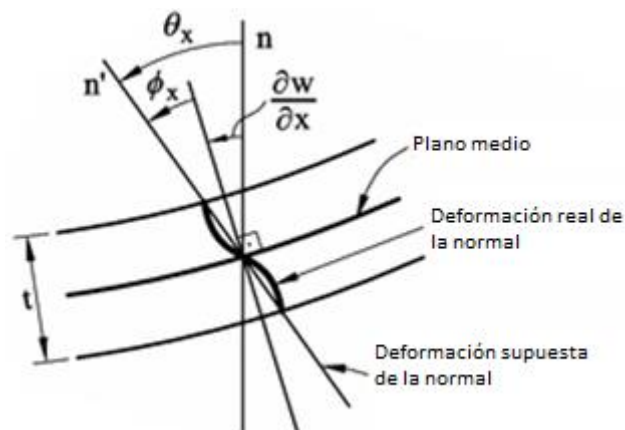


Figura 2.3.3.2 (b)
Teoría de Reissner-Mindlin

Existen varios softwares que utilizan el método de las bandas finitas para la obtención de las cargas y momentos críticos, como son:



- CUFSM (Cold Uniform Formed Steel Members):
Desarrollado en la universidad John Hopkins en Baltimore E.E.U.U.
Disponible gratuitamente en la dirección de internet:
(<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>)
- CFS (Cold Formed Steel):
Desarrollado en la universidad de Missouri E.E.U.U.
Disponible gratuitamente en la dirección de internet:
(<https://www.rsgsoftware.com/?products>)
- THIN.WALL:
Desarrollado en la universidad de Sydney Australia
Disponible comercialmente en la dirección de internet:
(<http://sydney.edu.au/engineering/civil/research/case/software/index.shtml#thin-wall>)

El software que se utilizará en este Proyecto Integrador es CUFSM el cual se presenta en el siguiente punto.

CUFSM (Cold Uniform Formed Steel Members)

El Instituto Americano del Hierro y Acero (sus siglas en ingles AISI) ha promocionado investigaciones que, en parte, han llevado al desarrollo del software disponible gratuitamente CUFSM, el cual emplea el método de las bandas finitas para la determinación del pandeo elástico de cualquier sección transversal de acero conformado en frío.

Este software fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad John Hopkins en Baltimore EEUU, el cual está disponible gratuitamente en la página web de la Universidad (www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm).

A continuación, se presenta el procedimiento para determinar la carga y momentos críticos utilizando el software CUFSM 4.

a) Propiedades del material

En este paso es necesario introducir los valores del módulo de elasticidad longitudinal, transversal y coeficiente de Poisson (ver Figura 2.3.2.2 (c)).



mat#	Ex	Ey	vx	vy	Gxy
100	29500.00	29500.00	0.30	0.30	11346.15

Figura 2.3.3.2 (c)
Ingreso de propiedades del material

b) Nodos

Se introducen las coordenadas de los nodos del perfil en estudio y sus grados de libertad de translación y rotación (ver Figura 2.3.2.2 (d)).

node#	x	z	xdof	zdof	ydof	qdof	stress
1	5.0000	1.0000	1	1	1	1	33.333
2	5.0000	0.0000	1	1	1	1	50.000
3	2.5000	0.0000	1	1	1	1	50.000
4	0.0000	0.0000	1	1	1	1	50.000
5	0.0000	3.0000	1	1	1	1	16.667
6	0.0000	6.0000	1	1	1	1	-16.667
7	0.0000	9.0000	1	1	1	1	-50.000
8	2.5000	9.0000	1	1	1	1	-50.000
9	5.0000	9.0000	1	1	1	1	-50.000
10	5.0000	8.0000	1	1	1	1	-33.333

Figura 2.3.3.2 (d)
Definición de nodos

El valor "stress" es calculado automáticamente una vez aplicada la carga. Esto representa el valor de tensión al cual está sometido cada nodo.

c) Elementos

Son los elementos que configuran la sección del perfil, los cuales van desde un nodo a otro. Se debe introducir los dos nodos que unen al elemento, el espesor y el material (ver Figura 2.3.2.2 (e)).



Elements				
elem#	nodei	nodej	thickness	mat#
1	1	2	0.100000	100
2	2	3	0.100000	100
3	3	4	0.100000	100
4	4	5	0.100000	100
5	5	6	0.100000	100
6	6	7	0.100000	100
7	7	8	0.100000	100
8	8	9	0.100000	100
9	9	10	0.100000	100

Figura 2.3.3.2 (e)
Definición de elementos

d) Croquis de la sección

A partir de los datos introducidos el software genera un croquis de la sección a analizar (ver Figura 2.3.2.2 (f)).

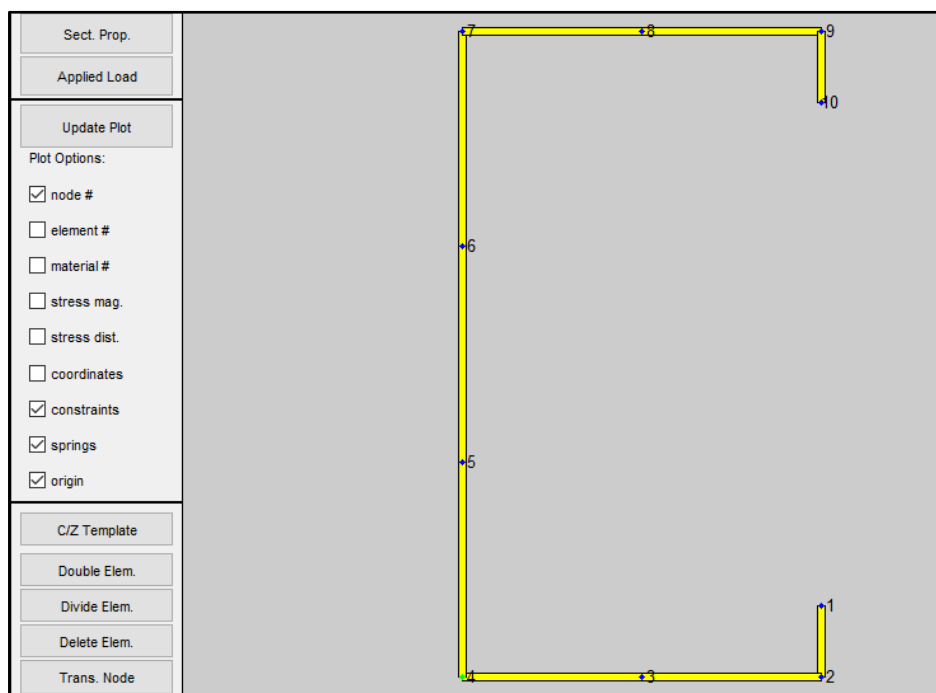


Figura 2.3.3.2 (f)
Croquis de la sección

e) Carga aplicada

Aquí se debe introducir el valor de la tensión de fluencia del material y debe seleccionarse si se trata de una carga axial, un momento flector o una combinación de ambos.



El valor calculado es la carga o momento mínimo que se debe aplicar para que algún elemento de la sección quede sometido a una tensión de fluencia (ver Figura 2.3.2.2 (g)).

Generate P and M based on max (yield) stress =

Calculate P, M and B

P =

Mxx =

Mzz =

M11 =

M22 =

B =

Figura 2.3.3.2 (g)
Introducción de la carga de fluencia

f) Resultado

Una vez ingresado los datos, el software los procesa y presenta como resultado la **Curva Característica de Pandeo** (ver Figura 2.3.2.2 (h)).

Esta curva proporciona en el eje de las abscisas la longitud de pandeo y en las ordenadas informa un factor de carga, el cual, al ser multiplicado por la carga o momento de fluencia, nos dará como resultado la carga o momento crítico de pandeo.

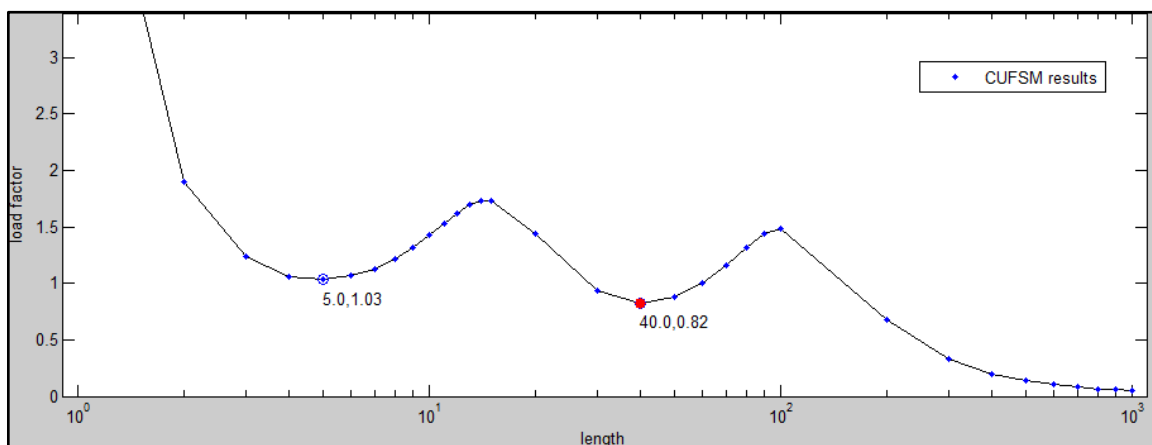


Figura 2.3.3.2 (h)
Curva característica de pandeo

El software además presenta la posibilidad de obtener una curva en la cual se diferencian los modos de pandeo para cada longitud, tal cual puede verse en la Figura 2.3.2.2 (i).

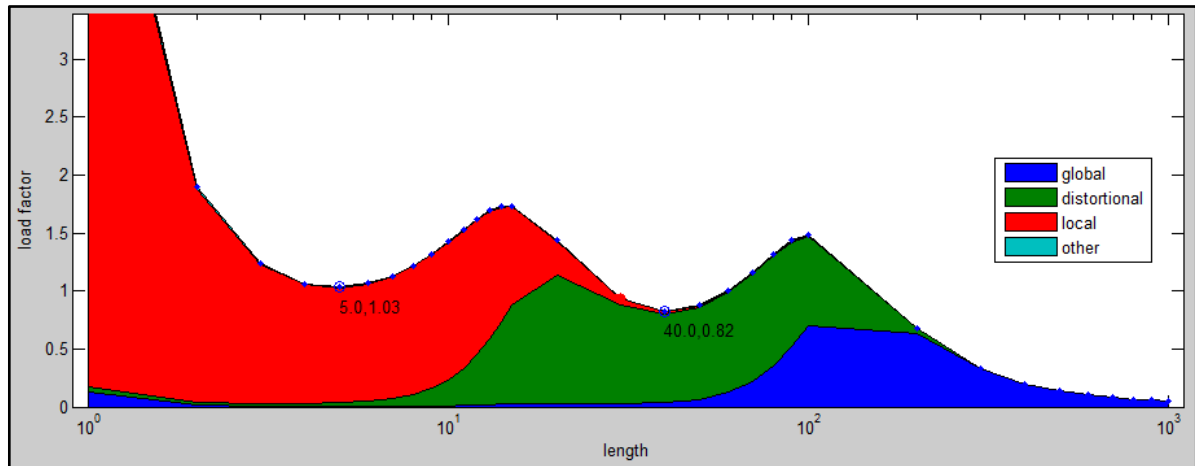


Figura 2.3.3.2 (i)
Curva con diferentes modos de pandeo

Para cada punto ubicado en la curva, el software también puede mostrar una representación de la sección deformada, como puede observarse en la Figura 2.3.2.2 (j)).

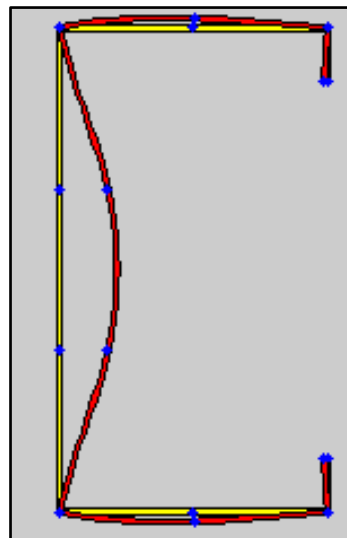


Figura 2.3.3.2 (j)
Deformada de la sección

Los puntos de interés sobre la curva característica son los mínimos, estos indican el nivel más bajo de carga al cual un modo particular de pandeo ocurre. El mínimo que ocurre a una menor longitud de pandeo está asociado con el modo de pandeo local. El segundo mínimo que se observa corresponde a un modo de pandeo distorsional, ya que este se



caracteriza por tener una longitud de pandeo intermedia. Y finalmente, para las longitudes de pandeo mayor, se da el modo de pandeo global, el cual no posee un mínimo ya que cuanto mayor sea la longitud de la sección que recibe esfuerzos, menor será el factor de carga correspondiente al pandeo global; se trata de la típica curva de Euler.



3 Antecedentes

En este capítulo, se presenta un estudio realizado por docentes-investigadores del Departamento de Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales destinado al estudio de pandeo de perfiles de pared delgada.

3.1 Introducción

El estudio fue realizado por los ingenieros Guillermo D. Chiappero, Alejandro J. Giudici, Carlos F. Estrada y José E. Stuardi, docentes del Departamento de Estructuras, con el propósito de complementar los conceptos desarrollados en las clases teórico-prácticas referidas al pandeo de estructuras mecánicas, el cual es un tema que se desarrolla durante el cursado de la materia Cálculo Estructural II para las carreras de Ing. Mecánica, Mecánica-Eléctricista y Aeronáutica.

En este trabajo se propuso una metodología destinada a enseñar el fenómeno de falla por pandeo local de componentes mecánicos de paredes delgadas que soportan cargas de flexo-compresión. Para ello, se planteó un problema típico de un perfil de pared delgada, que falla por pandeo local, A modo de ejemplo en este trabajo se estudió el caso de una viga en U susceptible de fallar por pandeo local de sus alas y se comparó la solución analítica existente en la bibliografía con el resultado obtenidos con un modelo numérico de elementos finitos. Esos resultados se contrastaron con el ensayo experimental de probetas de tamaño real en laboratorio con la presencia de alumnos.

3.2 Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos se realizaron sobre tres vigas de acero de material: IRAM IAS U 500-231 de sección U de 700 mm de largo cuyas dimensiones se indican en la Figura 3.2 (a), donde b es la base del perfil (alma), h es la altura (ala) y t es el espesor uniforme del perfil. Los datos de material son: tensión de fluencia $\sigma_f = 315\text{MPa}$, módulo elástico $E = 206000\text{MPa}$ y módulo de Poisson $\nu = 0,3$.

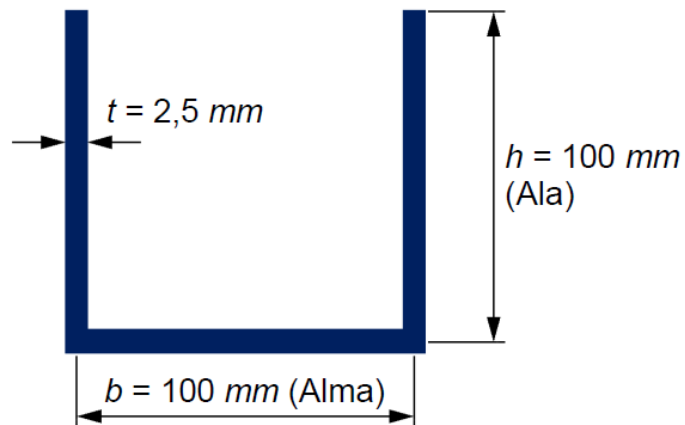


Figura 3.2 (a)
Croquis de la sección a analizar

Las vigas se sometieron a un ensayo de flexión según el esquema de la Figura 3.2 (b), donde P es la carga indirectamente aplicada mediante dos cargas $P/2$ distanciadas 300 mm. La viga tiene 700 mm de largo, pero la distancia entre los apoyos es $L = 600$ mm.

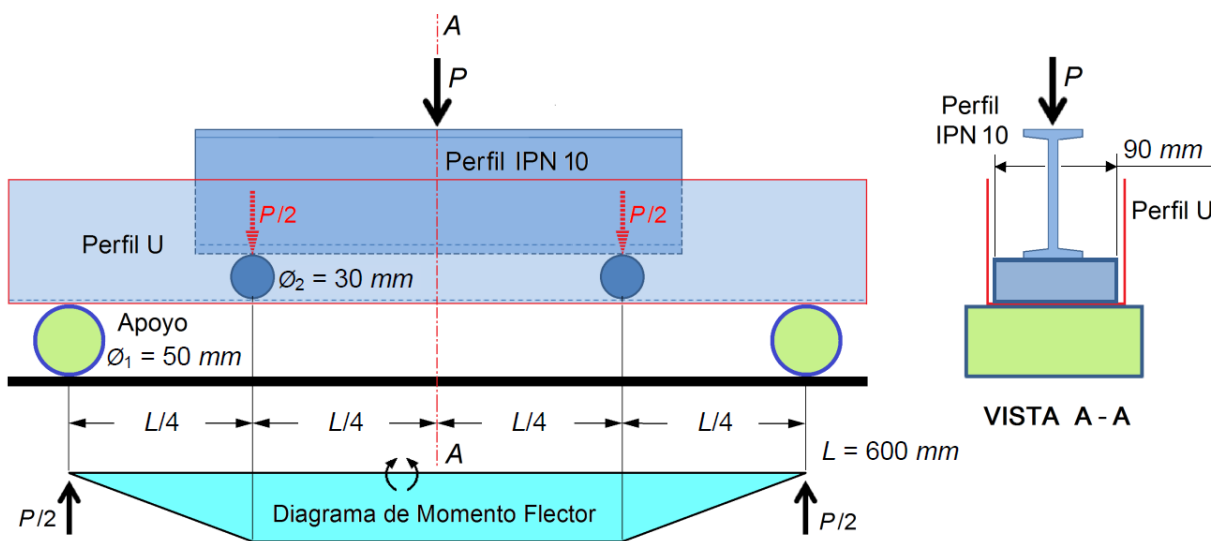


Figura 3.2 (b)
Esquema del ensayo

El dispositivo se montó en una máquina de ensayos universal hidráulica, del Departamento de Estructuras de la FCEFYN. Se aplicó una carga P a un perfil doble T IPN10. Ese perfil transfirió la carga a los rodillos de diámetro 30 mm adosados a él, lo que permitió aplicar simétricamente las cargas $P/2$ al espécimen en ensayo, garantizando la presencia de un momento flector M_f de valor constante como único esfuerzo actuante en la zona central (de longitud 300 mm entre rodillos), dado por la siguiente ecuación:

$$M_f = \frac{P L}{2 \cdot 4} = 0.075P \text{ [Nm]}$$

La carga vertical P se aplicó en forma gradual y creciente hasta llegar al valor P_{crit} que provocó la falla por pandeo de las alas. En la Figura 3.2 (c), se puede observar la deformación progresiva de una de las vigas al ir incrementando la carga, hasta llegar al colapso de la viga cuando $P = P_{\text{crit}}$.



Figura 3.2 (c)
Deformación progresiva de las alas

Se ensayaron tres probetas de tamaño real. En el ensayo 1 las alas del perfil se deformaron una hacia afuera y la otra adentro, mientras que en los ensayos 2 y 3, las dos alas se deformaron hacia afuera como puede observarse en la Figura 3.2 (d).



Figura 3.2 (d)
Perfiles deformados luego de los ensayos

Las cargas críticas de los ensayos se indican en la siguiente tabla:

Número de ensayo	1	2	3
P_{crit} [N]	27760	32520	32590

Al analizar los resultados de los ensayos se observa una diferencia del orden del 15 % entre los valores extremos. Tanto las diferencias entre los resultados de los ensayos como también entre los modos de pandeo, se deben fundamentalmente a las imperfecciones constructivas de los perfiles ensayados.

3.3 Solución analítica

Para analizar el problema de estabilidad del equilibrio del componente mecánico en estudio, se recurrió a las teorías vigentes de pandeo de placas. El estudio del pandeo local se realizó considerando que (ver Figura 3.3(a)):

- El alma ubicada en la parte inferior está traccionada, por lo cual no presenta problemas de inestabilidad.
- Las alas están sometidas a esfuerzos de flexo-compresión de modo que existe la posibilidad del pandeo local.

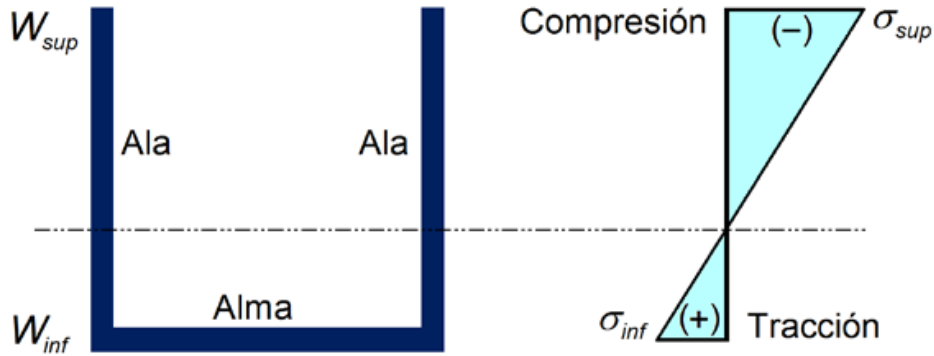


Figura 3.3 (a)
Distribución de tensiones en el perfil

Relacionando las tensiones existentes en la parte superior e inferior de la sección del perfil, las posibles condiciones de borde (apoyados o empotrados) entre las placas; tensión crítica de pandeo del perfil se encuentra:

$$79,5 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{cr} \leq 212,6 \text{ [MPa]}$$

Como la tensión crítica resultó menor que la tensión de fluencia del material, se llegó a la conclusión de que la falla se produciría por pandeo local de las alas.

Resumiendo, el análisis analítico dio como resultado el siguiente rango para la carga crítica:

$$13250 \text{ [N]} \leq P_{cr} \leq 35430 \text{ [N]}$$

3.4 Modelo numérico

Para el análisis numérico del componente mecánico ensayado, se utilizó el método de los elementos finitos empleando un software comercial. Se modeló la viga de 700 mm de largo y de sección U, cuyas dimensiones se indicaron anteriormente.

Se consideró al material como elástico y se calculó la carga crítica de pandeo P_{cr} mediante el uso del módulo de pandeo del software.

En la figura 3.4 (a), se presenta la malla utilizada para modelar un cuarto de la viga, a fin de aprovechar la doble simetría existente:

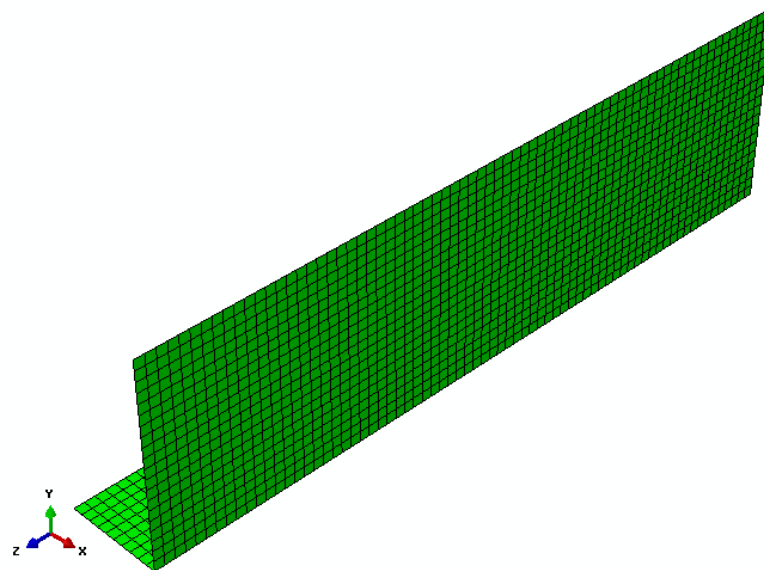


Figura 3.4 (a)
Perfil simulado mallado

A continuación, se muestra el primer modo de pandeo obtenido (amplificado x 3,6) y se reporta el valor de la carga crítica asociada de 7770 [N].

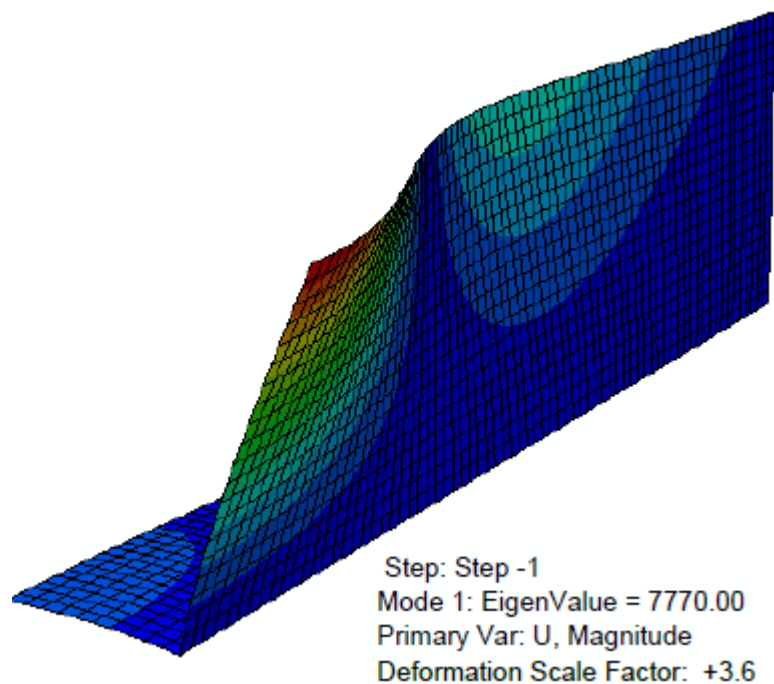


Figura 3.4 (b)
Resultados obtenidos por el software

Este valor corresponde a un 25% del valor total, por lo tanto, la carga crítica obtenida fue:



$$P_{cr} = 4 * 7770[N] = 31080 [N]$$

3.5 Comparación de resultados

En la siguiente tabla se indican los resultados obtenidos en los ensayos, soluciones analíticas y simulación numérica:

Metodología	Ensayos			Modelo numérico	Solución analítica
	1	2	3		
$P_{cr} [N]$	27760	32520	32590	31080	entre 13250 y 35430

Puede observarse la cercanía de la solución obtenida mediante la simulación numérica y los ensayos realizados. Para el caso de la solución analítica se puede concluir que suponer borde inferior apoyado es demasiado conservativo, por el contrario al suponer borde inferior empotrado, la solución obtenida es algo mayor que los valores obtenidos en los ensayos, pero presenta mayor cercanía.



4 Selección del perfil a analizar

4.1 Introducción

Como continuación de los estudios realizados previamente, se decidió plantear una mejora al perfil estudiado.

Para esta mejora se proyecta un perfil que posea una mayor resistencia al pandeo, y de esta manera pueda resistir mayores esfuerzos aplicados.

Al observar las posibles soluciones, se puede concluir que la resistencia al pandeo localizado de un elemento que compone la sección de un perfil, aumenta si sus bordes se encuentran unidos a otros elementos de la sección; por esto se analizaron varias alternativas:

Perfil C:

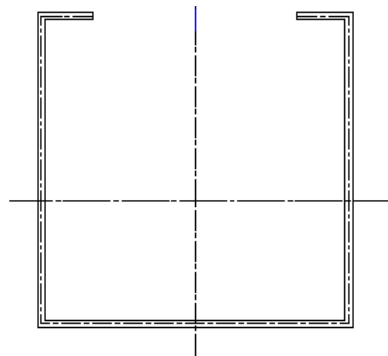


Figura 4.1 (a)
Perfil C

Perfil omega:

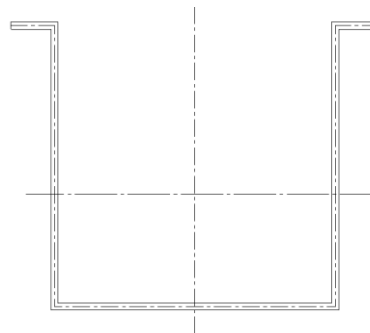


Figura 4.1 (b)
Perfil omega



Perfil con rigidizadores esféricos:

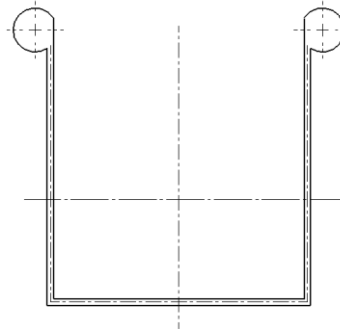


Figura 4.1 (c)
Perfil con rigidizadores esféricos

Se decidió analizar un perfil de tipo C, debido a su simplicidad de construcción.

El objetivo de las pestañas es modificar las condiciones de apoyo de los elementos de placa que se encuentren adyacentes a ellas. Como resultado de esta modificación en las condiciones de apoyo, se produce un incremento de la capacidad de carga de la sección completa.

Para que el análisis sea comparativo, se decidió utilizar un perfil con las mismas dimensiones que el estudiado anteriormente, obteniéndose así la siguiente sección:

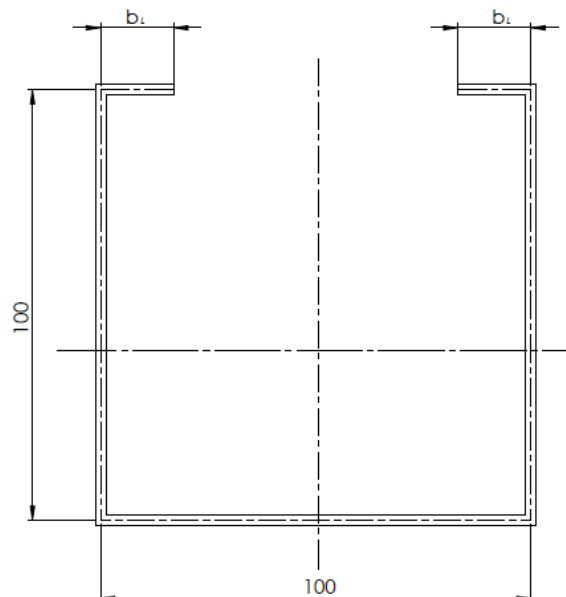


Figura 4.1 (d)
Perfil a analizar

4.2 Longitud de las pestañas

Al plantear el perfil a analizar surge un interrogante: ¿Cuál debe ser la longitud de las pestañas? Estas deben lo suficientemente largas como para aportar resistencia al perfil, pero no demasiado largas ya que se estaría adicionando demasiado material innecesariamente e incluso podrían llegar a actuar desfavorablemente disminuyendo la resistencia.

Este problema fue estudiado en 1939 por Dwigth F. Windenburg, físico y docente estadounidense que realizó diversos estudios sobre el comportamiento de estructuras, entre ellos el de la estabilidad elástica de rigidizadores en diferentes tipos de perfiles, llegando al siguiente criterio de diseño:

$$2,73 \left(\frac{I_L}{b_f * t^3} \right) - \frac{A_L}{b_f * t} \geq 5$$

Donde:

I_L = momento de inercia de la pestaña, respecto a línea media del elemento adyacente.

A_L = área de la pestaña.

b_f = ancho del elemento adyacente.

t = espesor de la chapa.

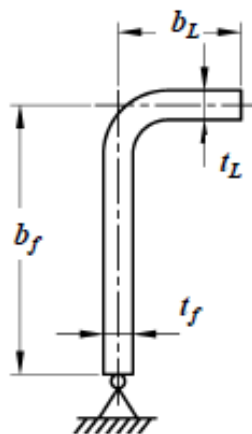


Figura 4.2 (a)
Esquema de la pestaña



Observando la Figura 4.2 (a) se tiene $A_L = b_L * t_L$ y $I_L = t_L \frac{b_L^3}{3}$, entonces si se sustituyen estas igualdades en la ecuación de Windenburg, se puede llegar a:

$$0,910 \left(\frac{b_L}{t_L} \right)^3 - \left(\frac{b_L}{t_L} \right) \geq 5 \left(\frac{b_f}{t_f} \right)$$

Para determinar b_L y t_L , normalmente se debería cumplir que la tensión de pandeo en la pestaña sea mayor o igual a la tensión de pandeo del elemento de placa adyacente, o bien:

$$0,379E \left(\frac{t_L}{b_L} \right)^2 \geq 3,615 \left(\frac{t_f}{b_f} \right)^2$$

Esta expresión se obtiene aplicando la ecuación de tensión crítica de pandeo de placas utilizando valores del coeficiente K correspondientes a la situación de cada elemento en la sección (pestañas: apoyado-libre, alas: apoyado-apoyado). A partir de dicha expresión se puede despejar:

$$\frac{b_L}{t_L} \leq 0,324 \frac{b_f}{t_f}$$

A partir de estas ecuaciones, se llega a las siguientes expresiones de diseño:

$$\left(\frac{b_L}{t_L} \right)_{min} = \left[\frac{5 \left(\frac{b_f}{t_f} \right) + \left(\frac{b_L}{t_L} \right)}{0,910} \right]^{1/3} \quad 4.2 (a)$$

$$\left(\frac{b_L}{t_L} \right)_{max} = 0,324 \frac{b_f}{t_f} \quad 4.2 (b)$$

Graficando estas dos ecuaciones puede observarse una zona de trabajo, que se presenta en la Figura 4.2 (b):

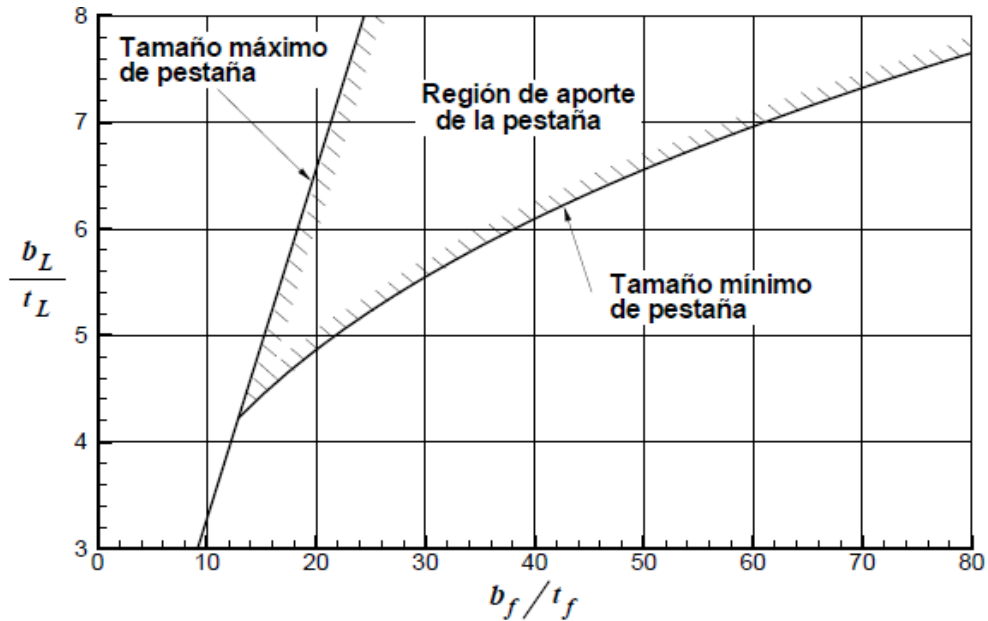


Figura 4.2 (b)
Región de aporte de la pestaña

La solución de $\left(\frac{b_L}{t_L}\right)_{min}$ es del tipo iterativa, por lo que se generó una planilla de cálculo utilizando los siguientes valores conocidos:

$$b_f = 100 \text{ mm}$$

$$t_f = 2,5 \text{ mm}$$

Por simplicidad constructiva, se decidió utilizar una pestaña con el mismo espesor que el resto del perfil:

$$t_l = 2,5 \text{ mm}$$

Se planteó un valor inicial de longitud de pestaña de:

$$b_L = 10 \text{ mm}$$

De esta manera, se partió con un valor inicial:

$$\left(\frac{b_L}{t_L}\right)_{min} = 4$$

Ingresando este valor en la ecuación 4.2 (a) y realizando iteraciones, se pudo observar como el valor convergió rápidamente a:

$$\left(\frac{b_L}{t_L}\right)_{min} = 6,095$$



Por esto se puede concluir que el valor de $\frac{b_L}{t_L}$ no debe ser menor a 6,095.

Para calcular el tamaño máximo de pestaña, se utiliza la ecuación 4.2. (b), obteniéndose el siguiente resultado:

$$\left(\frac{b_L}{t_L}\right)_{max} = 0,324 \frac{b_f}{t_f} = 0,324 \frac{100mm}{2,5mm} = 12,96$$

Reemplazando el valor de espesor de pestaña, en ambas expresiones se obtienen los siguientes resultados:

$$15,23mm \leq b_L \leq 32,4mm$$

Se decidió utilizar un valor cercano al mínimo para facilitar los ensayos, este valor es de 17mm, por lo que el perfil queda conformado por la sección que se observa en la Figura 4.2 (c):

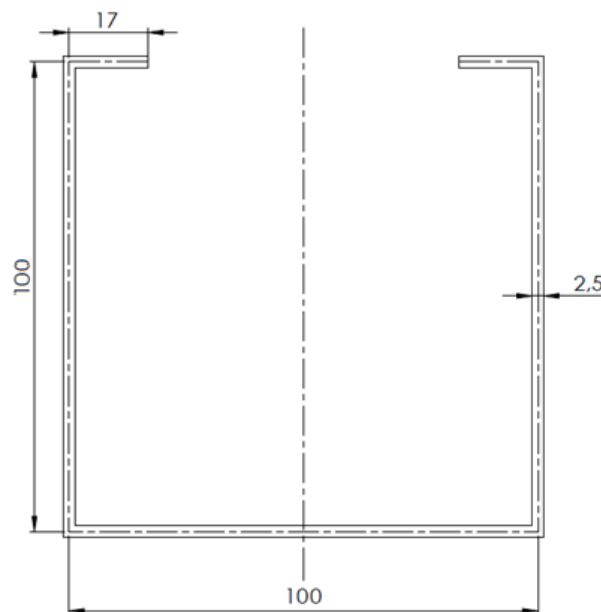


Figura 4.2 (c)
Dimensiones del perfil a analizar

4.3 Propiedades de la sección

A continuación, se indican las propiedades mecánicas de la sección a analizar:

La longitud del perfil es de 1000 mm y se desprecian los radios en las aristas debido al plegado.



Área total: $A = 835 \text{ [mm}^2\text{]}$

Posición del centro de gravedad:

X_{cg} (medida horizontal) = 50 [mm]

Y_{cg} (medida vertical) = 40,12 [mm]

Momentos de inercia: $I_{xx} = 1172655 \text{ [mm}^4\text{]}$; $I_{zz} = 1606772 \text{ [mm}^4\text{]}$

Momento resistente de la parte superior: $W_{sup} = 19583,33 \text{ [mm}^3\text{]}$

Momento resistente de la parte inferior: $W_{inf} = 29228,85 \text{ [mm}^3\text{]}$

Tensión de fluencia del material (según ensayo realizado, detallado en **Anexo 1**):

$$\sigma_f = 320 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Por lo tanto, el momento flector necesario para que el material entre en fluencia en su parte superior será:

$$M_y = \sigma_f * W_{sup} = 320 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * 19583,33 \text{ [mm}^3\text{]} = 6266666 \text{ N.mm}$$

Al realizar el cálculo de falla por pandeo de este perfil y ensayos de comprobación (lo cual se detalla en el **Anexo 2**) se llegó a la conclusión de que el perfil no presenta falla por pandeo, antes falla por fluencia. En vista a esta situación se evalúa una nueva sección para el perfil.

4.4 Selección de nuevo perfil

El perfil seleccionado tiene las mismas dimensiones, pero con la mitad de su espesor es decir 1,25mm. Según las ecuaciones que rigen los dos modos de falla se puede estimar que, si bien la carga de falla por fluencia decrecerá, también decrecería, pero en mayor medida su resistencia al pandeo.

En la Figura 4.4 (a) puede verse el croquis del nuevo perfil propuesto:

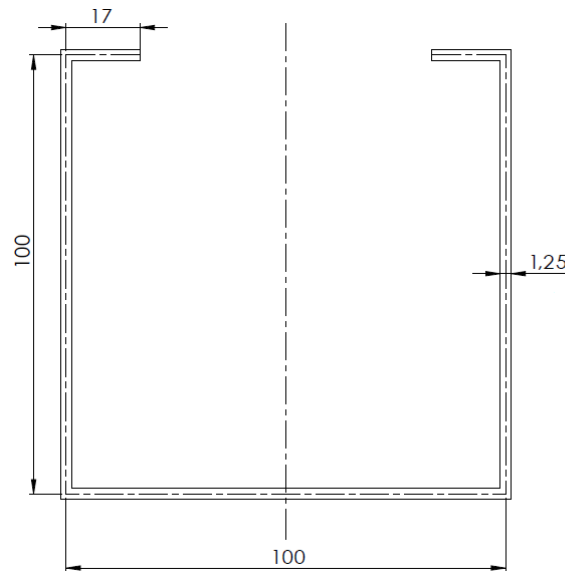


Figura 4.4 (a)
Dimensiones del nuevo perfil a analizar

Este perfil posee las siguientes propiedades:

La longitud del perfil es de 1000 mm y se desprecian los radios en las aristas debido al plegado.

Área total: $A = 417,5 \text{ [mm}^2\text{]}$

Posición del centro de gravedad:

X_{cg} (medida horizontal) = 50 [mm]

Y_{cg} (medida vertical) = 40,12 [mm]

Momentos de inercia: $I_{xx} = 586327 \text{ [mm}^4\text{]}$; $I_{zz} = 803385 \text{ [mm}^4\text{]}$

Momento resistente de la parte superior: $W_{sup} = 9791,67 \text{ [mm}^3\text{]}$

Momento resistente de la parte inferior: $W_{inf} = 14614,43 \text{ [mm}^3\text{]}$

Tensión de fluencia del material (según ensayo de tracción realizado, detallado en **Sección 8.4**):

$$\sigma_f = 370 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$



Entonces, el momento flector necesario para que el material entre en fluencia en su parte superior será:

$$M_y = F_y * W_{sup} = 370 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] * 9791,67 [\text{mm}^3] = \mathbf{3622918 \text{ N.mm}}$$

En los siguientes capítulos se proseguirá con el estudio del comportamiento de pandeo de este nuevo perfil. Se realizarán predicciones del momento flector de falla por pandeo utilizando métodos analíticos, método de la fuerza directa y simulaciones mediante elementos finitos. Luego se realizarán ensayos de flexión y se registrarán las cargas críticas de falla.

5 Solución analítica

En este capítulo se presenta el comportamiento del perfil solicitado a esfuerzos de flexión mediante el uso de soluciones analíticas.

Debido a las solicitaciones a las que está sometido el perfil, se utiliza la teoría de pandeo de placas para obtener la tensión crítica de pandeo local.

5.1 Calculo de pandeo local mediante teoría de pandeo de placas

Para el cálculo de pandeo local, se divide a la sección en elementos rectangulares individuales como se muestra en la Figura 5.1 (a); y se utilizan las ecuaciones de tensión crítica de pandeo de placas considerando a estas como apoyadas en sus bordes si este está unido a otro elemento de la sección o libre si no lo está.

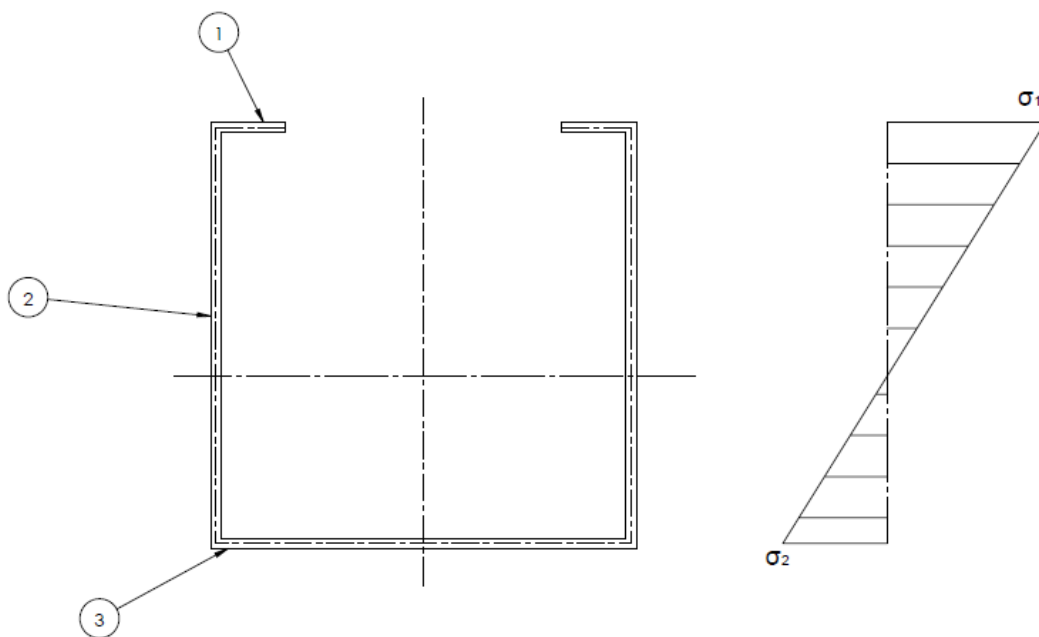


Figura 5.1 (a)
División de la sección en elementos rectangulares



Para cada elemento se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material.

ν = Coeficiente de Poisson.

t = Espesor de la placa.

b = Ancho de la placa.

K = Coeficiente de pandeo local.

El coeficiente de pandeo local depende de las condiciones de borde de los elementos, para obtener ese valor se utiliza la Tabla 2.3.1.2 (c).

Caso	σ_1	σ_2	Polinomio de interpolación	X= -1	X= 0	X=+ 1
1	Empotrado	Empotrado	$13,6-13x+9,7x^2 - 3,3x^3$	39,6	13,6	7,0
2	Empotrado	Apoyado	$11,6-12x+8,6x^2 - 2,8x^3$	35,0	11,6	5,4
3	Apoyado	Empotrado	$9,8-9x+6,9x^2 - 2,3x^3$	28,0	9,8	5,4
4	Apoyado	Apoyado	$7,7-7x+6,2x^2 - 2,9x^3$	23,8	7,7	4,0
5	Empotrado	Libre	$5,9-6x+2,2x^2 - 0,8x^3$	14,9	5,9	1,3
6	Libre	Empotrado	$1,6-0,37x+0,13x^2 - 0,06x^3$	2,16	1,6	1,3
7	Apoyado	Libre	$1,7-2,55x+1,91x^2 - 0,64x^3$	6,8	1,7	0,42
8	Libre	Apoyado	$0,57-0,19x+0,06x^2 - 0,02x^3$	0,84	0,57	0,42

Tabla 2.3.1.2 (c)

Placa 1:

La placa 1 está sometida a una tensión constante, es decir $X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$ y posee uno de sus bordes apoyados a la placa 2 y el otro libre, por lo que el coeficiente de pandeo K será igual a 0,42



La tensión crítica de pandeo será:

$$\sigma_1 = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_1}{b_1}\right)^2 = 0,42 * \frac{\pi^2 * 210000 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{12(1-0,3^2)} * \left(\frac{1,25mm}{17mm}\right)^2$$

$$\sigma_1 = 431 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

Placa 2:

La placa 2 está sometida a una tensión variable, en su parte superior es σ_1 y en su parte inferior es σ_2 , y posee ambos bordes apoyados.

La relación de tensiones X será igual a:

$$X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{M_f / W_{inf}}{M_f / W_{sup}} = \frac{W_{sup}}{W_{inf}} = \frac{19583,33 [mm^3]}{-29228,85 [mm^3]} = -0,67$$

Se utiliza el polinomio de interpolación del caso 4 de la tabla (apoyado – apoyado):

$$K_2 = 7,7 - 7X + 6,2X^2 - 2,9X^3 = 7,7 - 7 * 0,67 + 6,2 * 0,67^2 - 2,9 * 0,67^3$$

$$K_2 = 16,04$$

La tensión crítica de pandeo será:

$$\sigma_2 = k_2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_2}{b_2}\right)^2 = 16,04 * \frac{\pi^2 * 210000 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{12(1-0,3^2)} * \left(\frac{1,25mm}{100mm}\right)^2$$

$$\sigma_2 = 476 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

Placa 3:

La placa 3 esta únicamente sometida a esfuerzos de tracción, por lo que no ocurrirá el fenómeno de pandeo local en ella.



Conclusión:

Las tensiones críticas de pandeo de la placa 1 y de la placa 2 son mayores a la tensión de fluencia del material ($370 \text{ [N/mm}^2\text.]}$), por lo que se concluye que **en principio no ocurrirá el fenómeno de pandeo local** en el perfil analizado.



6 Simulación mediante elementos finitos

En este capítulo se describe el proceso llevado a cabo para simular el comportamiento que presentaría el perfil en estudio al estar sometido a cargas de pandeo.

6.1 Modelización del perfil

Para realizar la modelización del perfil estudiado, se utiliza la herramienta de extrusión, de esta manera se obtiene un perfil de pared delgada (shell), se le asigna un material con las propiedades del acero y una sección con espesor 1,25 como puede verse en las Figuras 6.1 (a), 6.1 (b) y 6.1 (c).

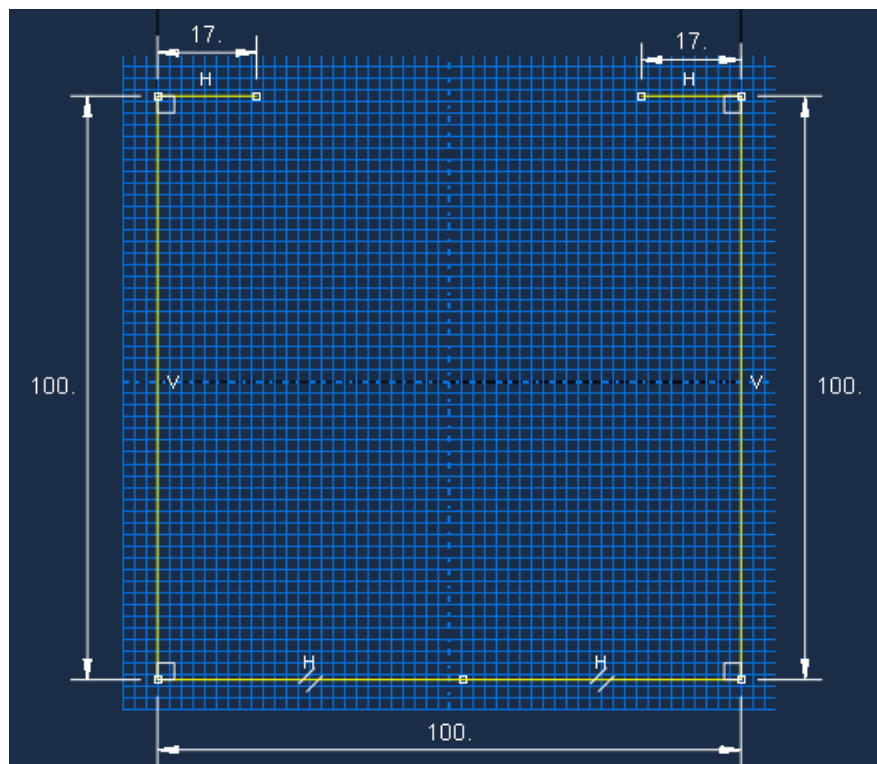


Figura 6.1 (a)
Croquizado del perfil

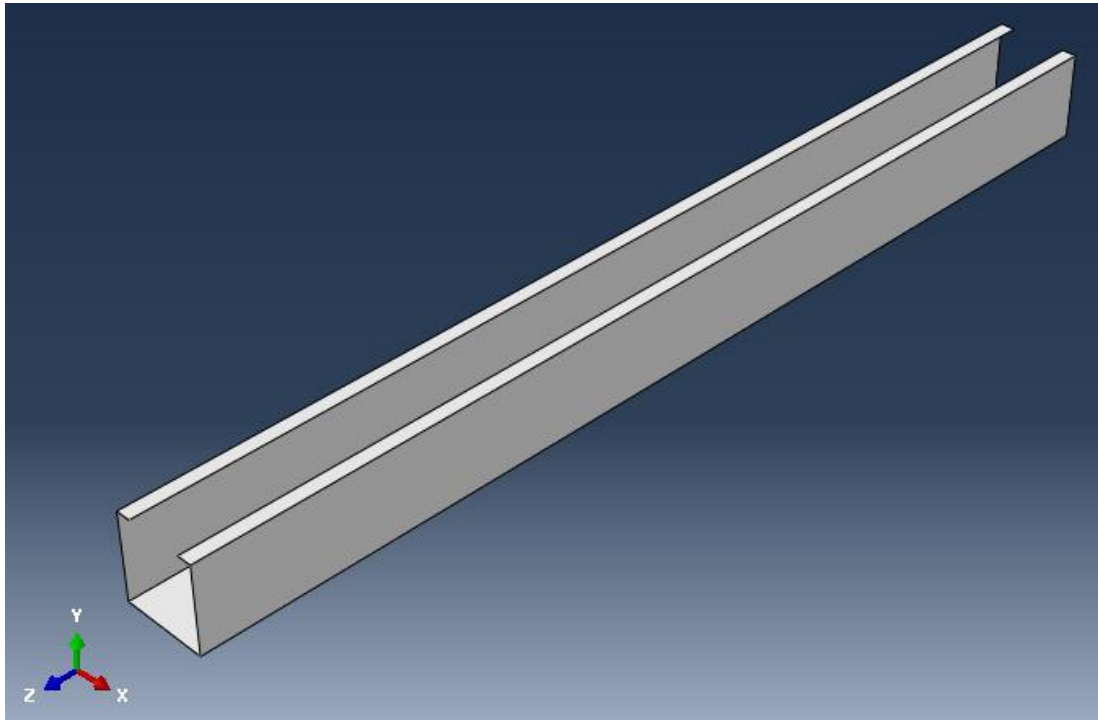


Figura 6.1 (b)
Generación del perfil extruido

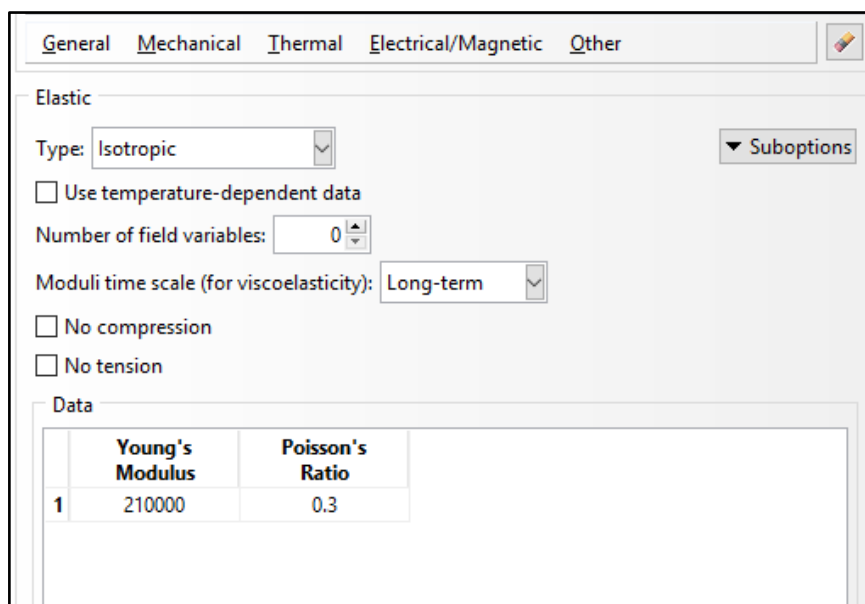


Figura 6.1 (c)
Ingreso de propiedades del material

Además, se modelan rodillos sólidos correspondientes a los apoyos y los que aplican la carga, con el fin de simular los que serán utilizados en los ensayos mecánicos.

6.2 Definición del análisis a realizar

En este paso se busca generar y definir los distintos estados de carga y las variables asociadas a los mismos que se incluirán en los resultados. Cada estado de carga se denomina “paso” (Step).

Por defecto, cada modelo cuenta con el paso inicial. Las distintas opciones que nos presenta el software se clasifican según el procedimiento, General o de Perturbación lineal.

Dentro de los estados generales, las opciones que se presentan son varias, por ejemplo, se puede configurar un análisis estático general, dinámico, de transferencia de calor, geostático, etc. Dentro de las opciones de perturbación lineal los análisis son, entre otros, de frecuencia o de perturbación lineal estática.

Dentro del procedimiento de “Perturbación lineal”, se encuentra la opción “Buckle”, la cual ejecuta un análisis de pandeo lineal. Este es el procedimiento utilizado para realizar la simulación (ver Figura 6.2(a)).

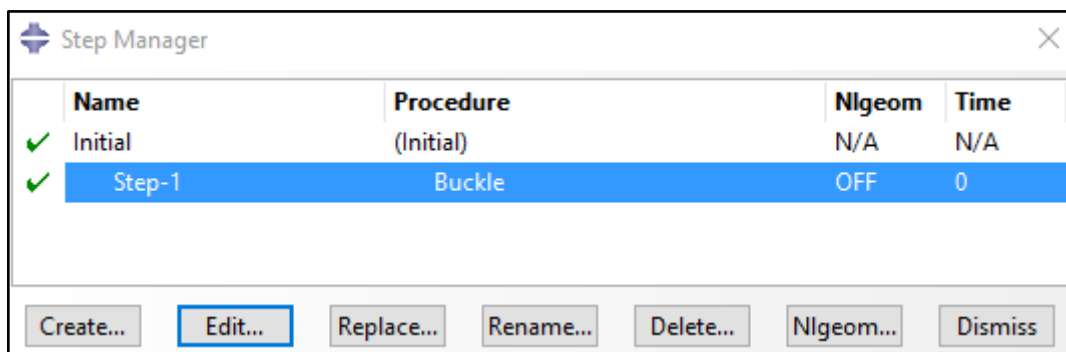


Figura 6.2 (a)
Definición del “step”

6.3 Generación del ensamblaje

Una vez definido el tipo de análisis a realizar, se genera el ensamblaje de los elementos intervinientes: el perfil y los rodillos. Estos últimos, se ubican en las posiciones donde se proyecta que estarán situados los rodillos de apoyo y de aplicación de carga cuando se realicen los ensayos. El ensamblaje completo puede observarse en la Figura 6.3 (a).

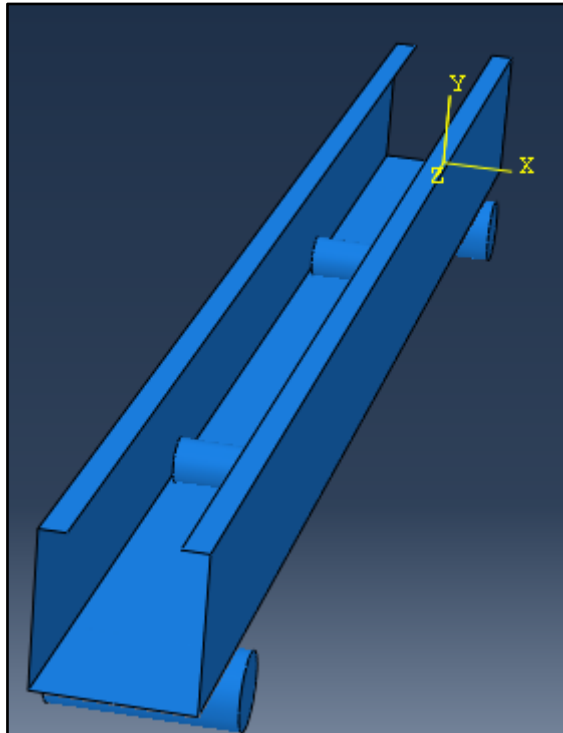


Figura 6.3 (a)
Ensamblaje del perfil y los rodillos

6.4 Aplicación de cargas y condiciones de borde

En esta etapa, se aplican las cargas y las condiciones de bordes a los elementos. Se restringe el desplazamiento y rotación en todas las direcciones de los rodillos inferiores, mientras que a los superiores solo se les permite el desplazamiento en dirección Y (ver Figura 6.3 (a)).

La carga es aplicada sobre los rodillos superiores en forma de fuerzas concentradas en sus extremos superiores.

En la Figura 6.4 (a) pueden observarse las restricciones y cargas aplicadas en los rodillos:

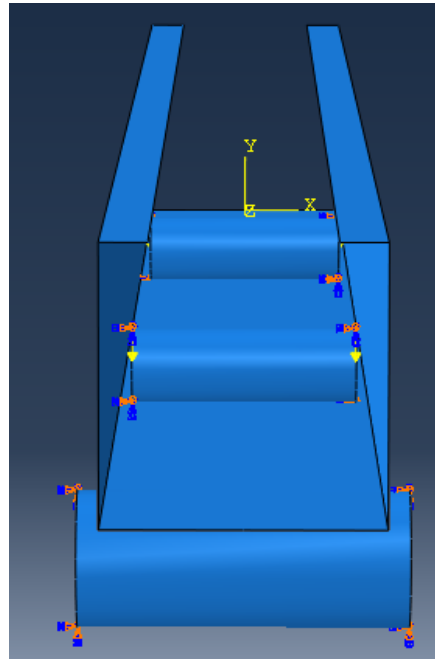


Figura 6.4 (a)
Aplicación de cargas y condiciones de borde

6.5 Mallado del modelo

Es de suma importancia definir el tamaño de cada elemento, así como la selección del tipo de elemento que se adaptará mejor a los requerimientos del análisis que deseamos realizar. A estos fines, el software provee diferentes herramientas que permiten definir de manera integral el mallado de la parte en estudio.

El primer paso consiste en definir el tipo de elemento que vamos a utilizar. Para esto, el software nos da una diversidad de opciones las cuales se muestran en la Figura 6.5 (a):

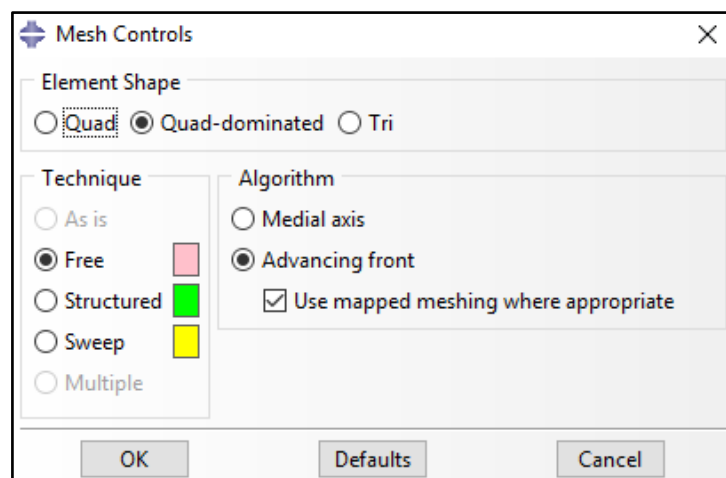


Figura 6.5 (a)
Definición del tipo de elementos de mallado



En este caso, se utiliza para el perfil el elemento denominado S4R. Este es un elemento de la familia de los elementos del tipo cáscara, con cuatro nodos.

Definido el tipo de elemento, se debe definir la densidad de mallado, se puede definir por tamaño o por cantidad de elementos.

Para el caso de los rodillos se utiliza un mallado con elementos que tienen un tamaño aproximado de 10 mm. La densidad del mallado de los rodillos no es de suma importancia ya que estos solo cumplen la función de transmitir las cargas y no son relevantes en este trabajo sus deformaciones y tensiones.

La densidad de mallado del perfil fue definida mediante un estudio que se encuentra detallado en el **Anexo 3**, a partir de este estudio se pudo definir que al utilizar un mallado con elementos de tamaño igual o menor a 10 mm los resultados serían satisfactorios.

El resultado de la aplicación de las características específicas definidas para el caso en estudio puede verse en la Figura 6.5 (b) donde se presenta un mallado con elementos de tamaño igual a 5 mm.

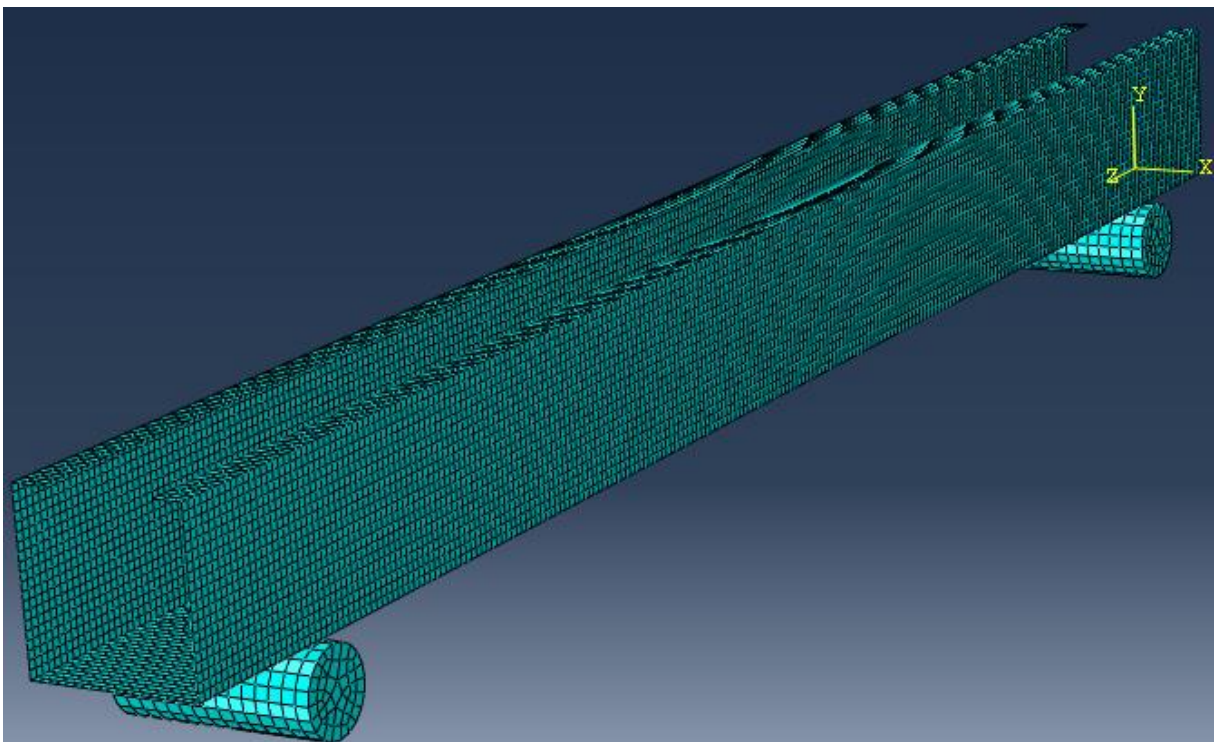


Figura 6.5 (b)
Perfil mallado con elementos de 5mm

6.6 Simulación y resultados

Finalmente se realiza la simulación y se obtiene como resultado una representación del perfil deformado y la carga de falla por pandeo.

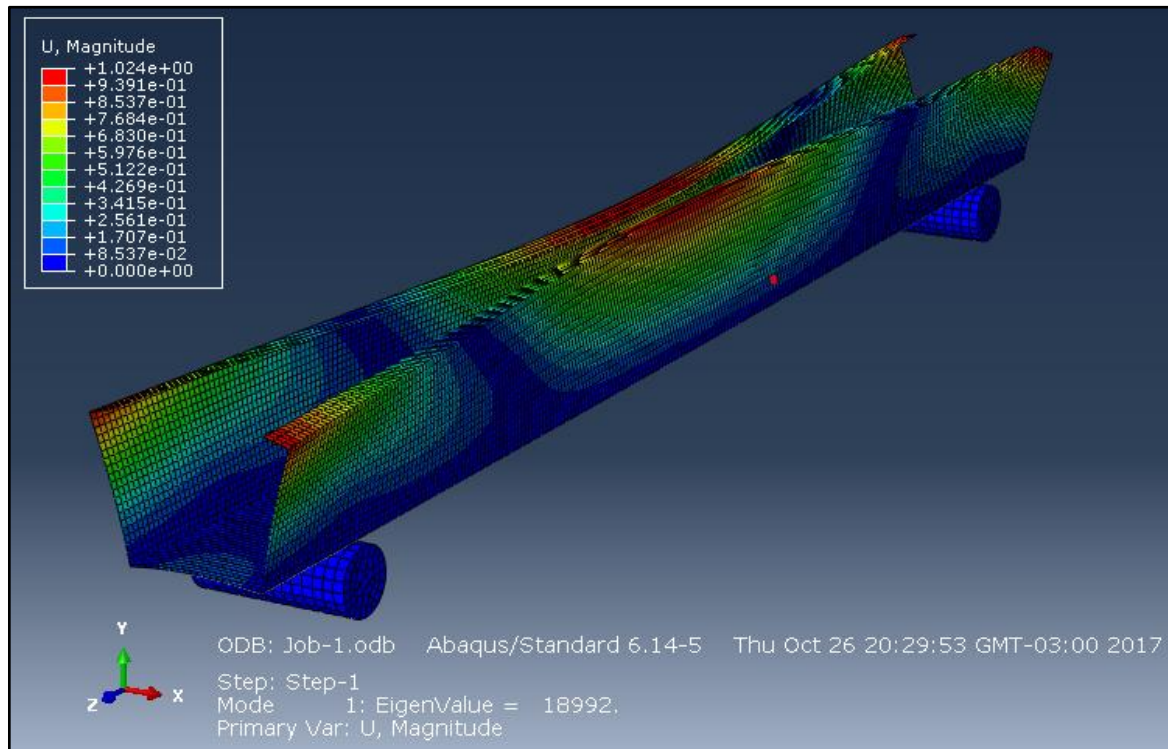


Figura 6.6 (a)
Resultados de la simulación

Puede observarse que el perfil presenta una deformación hacia adentro y que la carga de falla obtenida es de 18992 N.

El momento flector que produce esta carga crítica se puede calcular a partir del esquema del ensayo previsto (ver Figura 6.6 (b)).

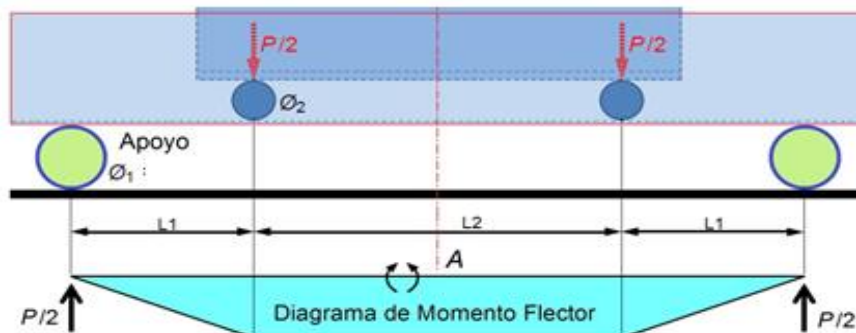


Figura 6.6 (b)
Esquema del ensayo a realizar



Donde:

$$L_1 = 150\text{mm}$$

$$L_2 = 480\text{mm}$$

$$M_{cr} = \frac{p_{cr}}{2} L_1 = \frac{18992\text{N}}{2} 150\text{mm} = \mathbf{1424400 [Nmm]}$$



7 Cálculo mediante método de la fuerza directa

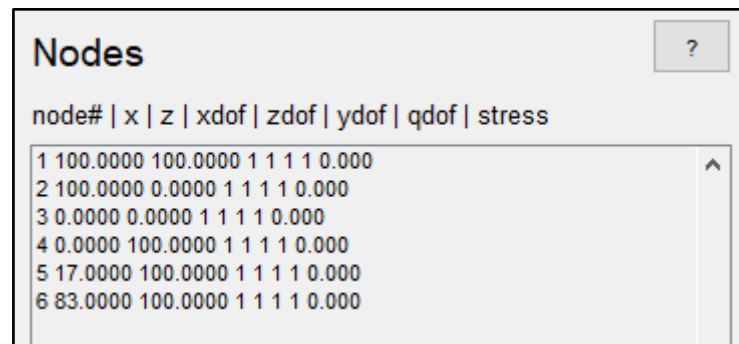
En este capítulo se realiza la predicción del comportamiento del perfil utilizando el método de la fuerza directa, el cual es detallado en la **Sección 2.3.3**.

Para llegar al resultado final, se utiliza el software **CUFSM4**, así como las ecuaciones propias del método.

7.1 Ingreso de datos en el software

A continuación, se muestran todos los datos ingresados en el software para poder simular el perfil a analizar:

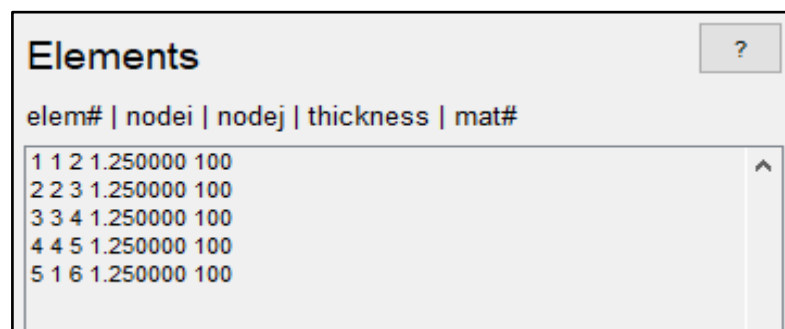
Nodos con su correspondiente valor de tensión:



node#	x	z	xdof	zdof	ydof	qdof	stress
1	100.0000	100.0000	1	1	1	1	0.000
2	100.0000	0.0000	1	1	1	1	0.000
3	0.0000	0.0000	1	1	1	1	0.000
4	0.0000	100.0000	1	1	1	1	0.000
5	17.0000	100.0000	1	1	1	1	0.000
6	83.0000	100.0000	1	1	1	1	0.000

Figura 7.1 (a)
Ingreso de nodos en el software

Elementos, sus espesores y material:



elem#	nodei	nodej	thickness	mat#
1	1	2	1.250000	100
2	2	3	1.250000	100
3	3	4	1.250000	100
4	4	5	1.250000	100
5	5	6	1.250000	100

Figura 7.1 (b)
Ingreso de elementos en el software



Propiedades del material:

mat#	Ex	Ey	vx	vy	Gxy
100	210000.00	210000.00	0.30	0.30	81000.00

Figura 7.1 (c)
Ingreso de propiedades del material en el software

Carga aplicada en base a la tensión de fluencia (370 N/mm^2):

Generate P and M based on max (yield) stress = 370

Calculate P, M and B

P = 154475

Mxx = 3622916.6667

Mzz = 5945055.1667

M11 = 5945055.1667

M22 = 3622916.6667

B = 0

Submit Stress to input Close (don't Submit) ?

Figura 7.1 (d)
Ingreso de tensión de fluencia en el software

Se selecciona la casilla que corresponde a Mxx, ya que se analiza el pandeo producido solo por un momento flector aplicado. Puede observarse como al ingresar el valor de tensión de fluencia, el software indica el valor del momento flector para el cual se llegaría a la tensión de fluencia en el perfil.

En función de los datos ingresados, el software grafica el croquis del perfil:

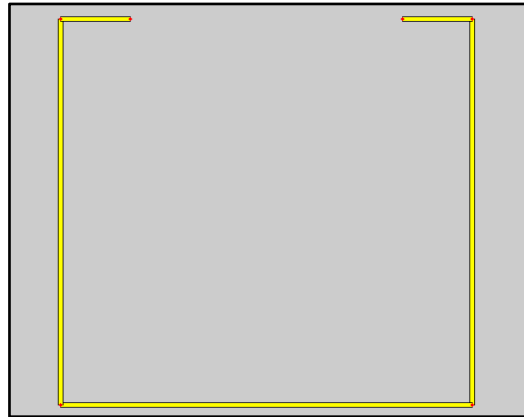


Figura 7.1 (e)
Croquis del perfil

7.2 Curva característica de pandeo

Una vez ingresado los datos, se procede a realizar el análisis, obteniéndose así la curva característica de pandeo y la influencia de cada modo en función de la longitud de pandeo:

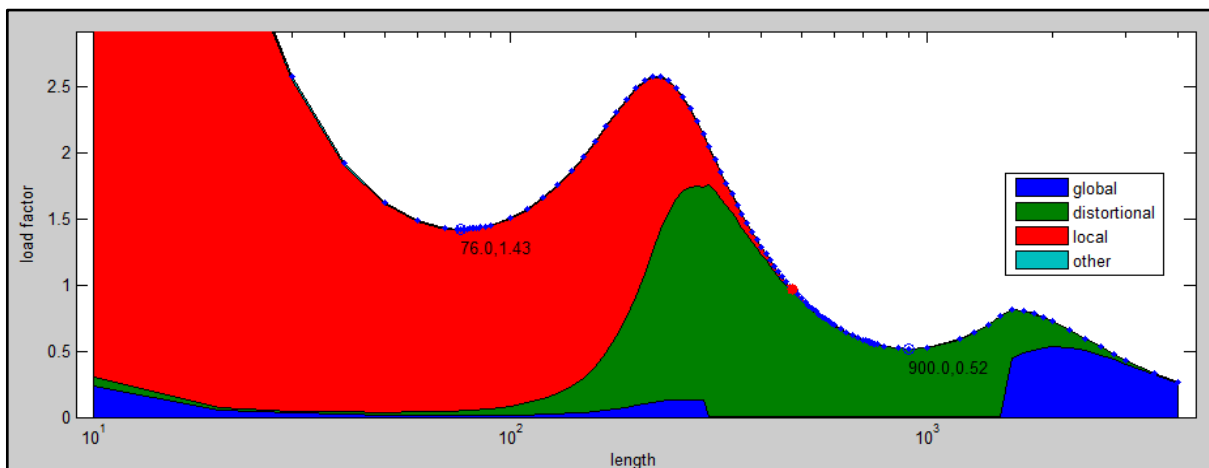


Figura 7.2 (a)
Curva característica de pandeo

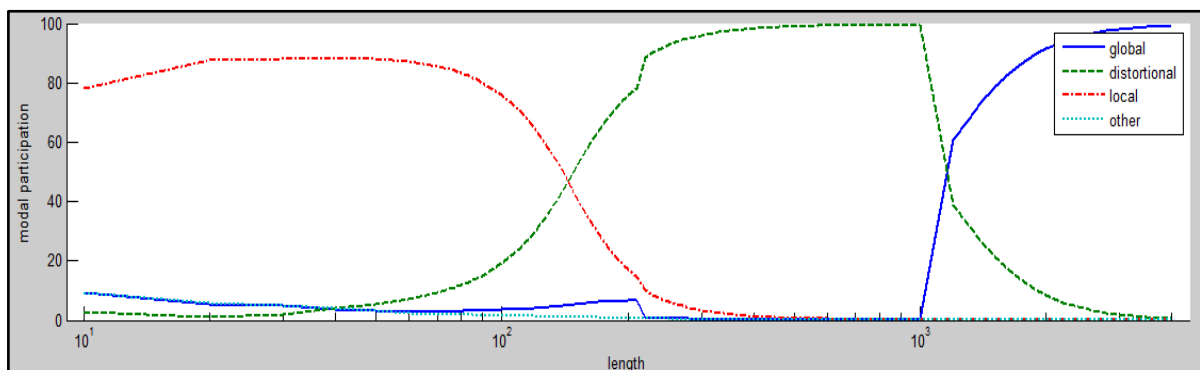


Figura 7.2 (b)
Porcentaje de influencia de cada modo de pandeo

Interpretación de los resultados:

Puede observarse que la curva obtenida presenta 2 mínimos, uno de ellos presenta un modo de pandeo casi exclusivamente local y el otro totalmente distorsional.

Se analizarán los 3 modos de pandeo por separado:

Pandeo local:

Para el caso de pandeo local puede observarse un mínimo, el cual ocurre a una longitud de pandeo de 76 mm y su factor de carga correspondiente será de 1,43 (ver Figura 7.2 (a)).

La sección del perfil deformado por pandeo local obtenido tiene la siguiente forma:

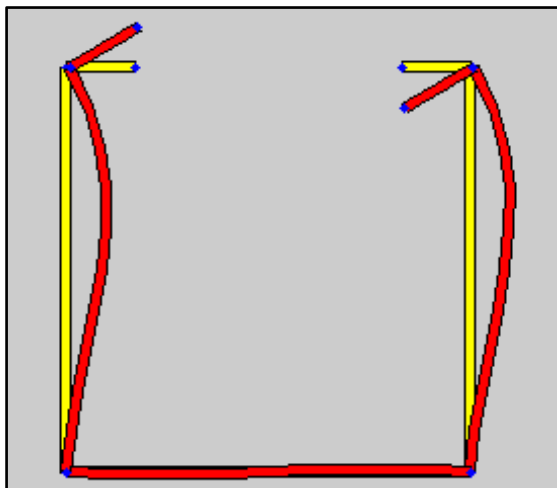


Figura 7.2 (c)
Deformación por pandeo local en 2D

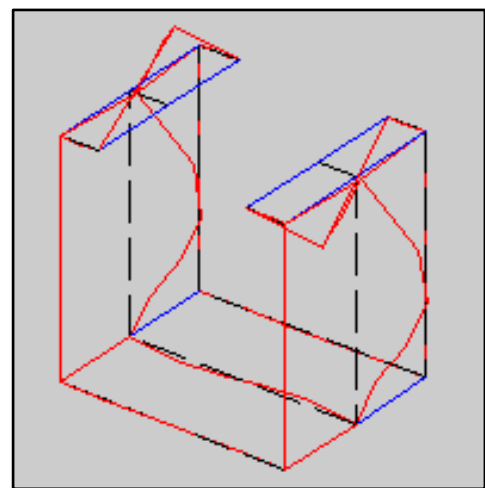


Figura 7.2 (d)
Deformación por pandeo local en 3D

Pandeo distorsional:

Para el caso de pandeo distorsional puede observarse un mínimo, el cual ocurre a una longitud de pandeo de 900 mm y su factor de carga correspondiente será de 0,52 (ver Figura 7.2 (a)).

La sección del perfil deformado por pandeo distorsional tiene la siguiente forma:

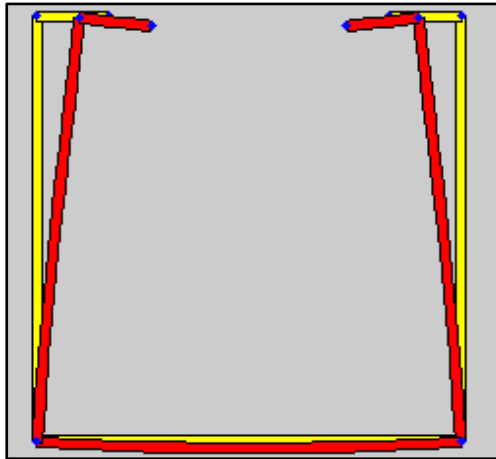


Figura 7.2 (e)
Deformación por pandeo distorsional en 2D

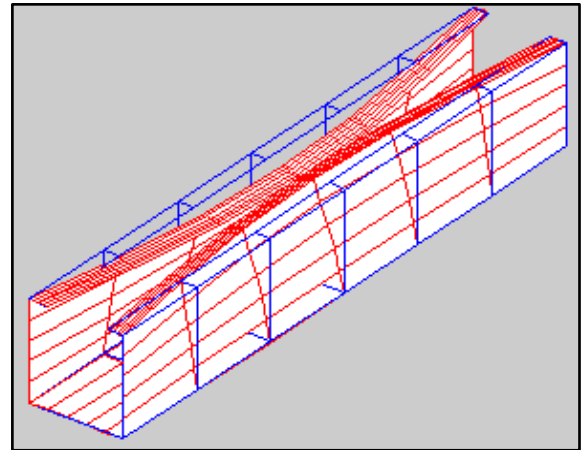


Figura 7.2 (f)
Deformación por pandeo distorsional en 3D

Pandeo global:

Para el caso de pandeo global, puede observarse en la curva que este ocurrirá con mayor intensidad para valores de longitud muy altos, sin embargo, puede aislarse la curva de pandeo global (Figura 7.2 (g)) y obtenerse el factor de carga correspondiente para el caso de una longitud de 480 mm (Distancia entre rodillos), el cual es 17,8.

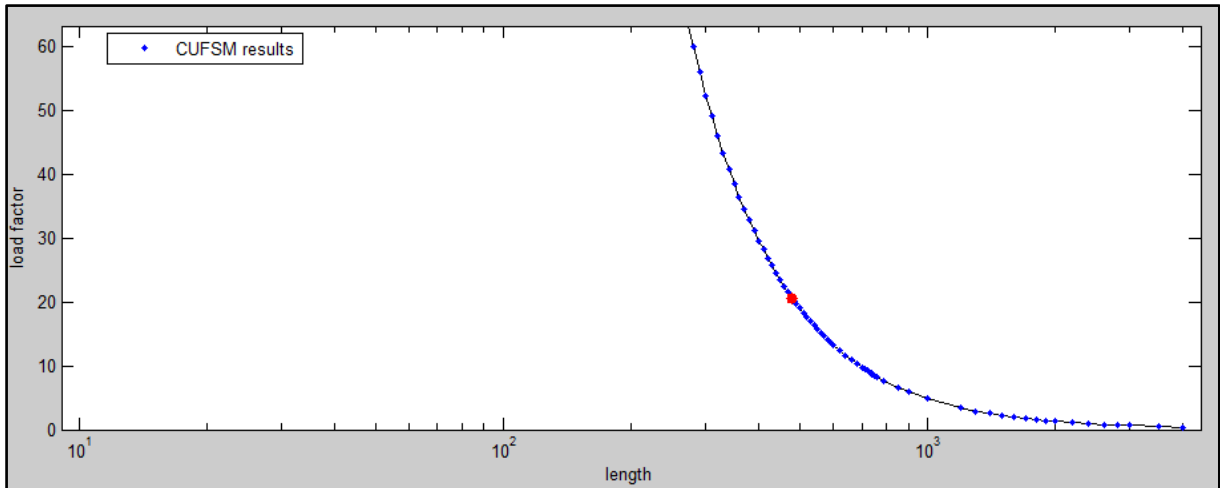


Figura 7.2 (g)
Curva característica de pandeo global

La sección del perfil deformado por pandeo global obtenida tiene la siguiente forma:

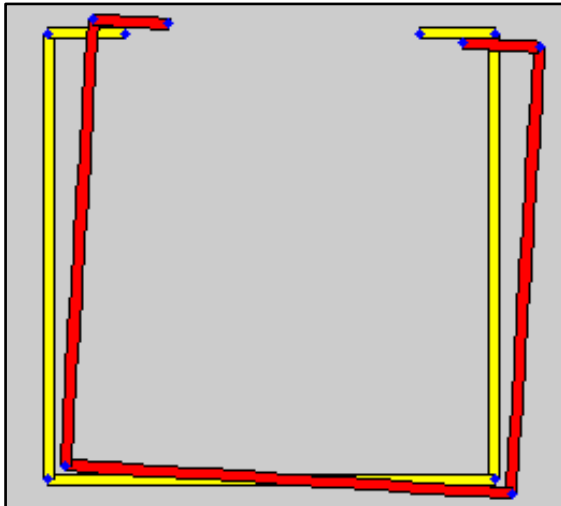


Figura 7.2 (h)
Deformación por pandeo global en 2D

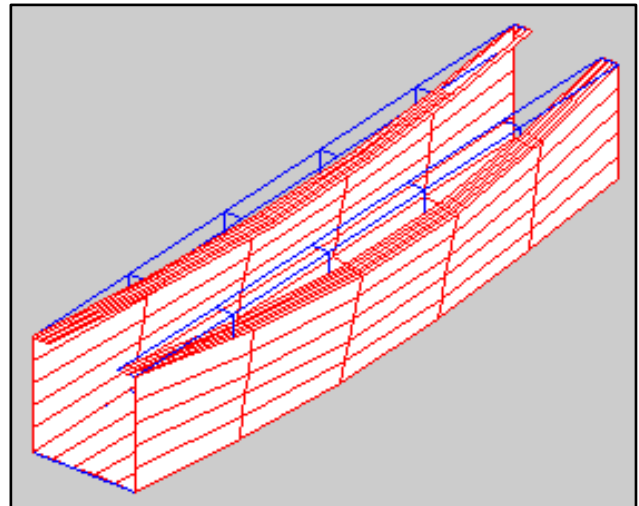


Figura 7.2 (i)
Deformación por pandeo global en 3D

7.3 Obtención de cargas críticas

Una vez obtenidos los factores de carga correspondientes a cada tipo de pandeo, se obtienen los momentos nominales de pandeo utilizando las ecuaciones presentadas en la **sección 2.3.3.1**

Pandeo global

$$M_{cre} = 17,8M_y$$

Entonces:

$$M_{cre} \geq 2,78M_y$$

$$M_{ne} = M_y = 3622918 \text{ Nmm}$$

Pandeo local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} = \sqrt{\frac{M_y}{1.43M_y}} = \sqrt{\frac{1}{1.43}} = 0,836$$

Entonces:

$$\lambda_l \geq 0,776$$



$$M_{nl} = \left(1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0,4}\right) \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0,4} M_{ne} = \left(1 - 0,15 \left(\frac{1,43M_y}{M_y}\right)^{0,4}\right) \left(\frac{1,43M_y}{M_y}\right)^{0,4} M_y$$

$$M_{nl} = (1 - 0,15(1,43)^{0,4})(1,43)^{0,4} 3622918 \text{ Nmm}$$

$$M_{nl} = 3456693 \text{ Nmm}$$

Pandeo distorsional

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} = \sqrt{\frac{M_y}{0,52M_y}} = \sqrt{\frac{1}{0,52}} = 1,38$$

Entonces:

$$\lambda_d > 0,673$$

$$M_{nd} = \left(1 - 0,22 \left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0,5}\right) \left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0,5} M_y = \left(1 - 0,22 \left(\frac{0,52 M_y}{M_y}\right)^{0,5}\right) \left(\frac{0,52 M_y}{M_y}\right)^{0,5} M_y$$

$$M_{nd} = (1 - 0,22 * (0,52)^{0,5}) * (0,52)^{0,5} * 3622918 \text{ Nmm}$$

$$M_{nd} = 2198065 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \min(M_{nd}, M_{nl}, M_{ne}) = M_{nd} = 2198065 \text{ Nmm}$$

Por lo tanto, se concluye que, según el método de la fuerza directa, el perfil presentará falla por pandeo distorsional al estar sometido a un momento flector de **2198065 Nmm**.



8 Ensayos mecánicos

8.1 Introducción

En este capítulo se detalla el procedimiento realizado para llevar a cabo los ensayos mecánicos a perfiles conformados cuya sección tiene las dimensiones que se muestran en la Figura 4.4 (a).

8.1.1 Lugar de trabajo

Los ensayos realizados se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la U.N.C., ubicado en Av. Vélez Sarsfield 1611 de la ciudad de Córdoba Capital.

Entre sus actividades principales se destacan la investigación, el desarrollo, la docencia, la capacitación, la prestación de servicios y las actividades de extensión en la industria de la construcción.

En este laboratorio se llevan a cabo investigaciones y estudios en el marco de los estudios de grado y posgrado desarrollados en las carreras de la FCEFyN. Se prestan además servicios de ensayos y asesoramiento técnico a la industria de la construcción en general y a entidades públicas.

8.1.2 Equipamiento utilizado

Para realizar los ensayos se contó con una prensa marca IBERTEST Serie UBM [5] de origen español, la cual tiene una capacidad máxima de 20 toneladas, en su parte superior se pueden realizar esfuerzos de compresión y cuenta con un puente removible el cual permite transformar la fuerza de compresión en un momento flector; en su parte inferior cuenta con mordazas destinadas a realizar esfuerzos de tracción en barras de sección circular y en probetas de sección prismática.

En las siguientes figuras se pueden observar los elementos que realizan los esfuerzos (Figura 8.1.2 (a)), y los elementos de control y maniobras (Figura 8.1.2(b)):



Figura 8.1.2 (a)
Elementos que realizan esfuerzos



Figura 8.1.2 (b)
Elementos de control y maniobras

8.2 Diagramación del ensayo

Con la finalidad de obtener un momento flector constante, se apoyó el perfil sobre dos rodillos de 50 mm de diámetro. La carga se transmite mediante un perfil IPN 10, en el cual se construyó un dispositivo con el fin de sujetar 2 rodillos de diámetro 30 mm.

El esquema de la disposición del ensayo puede observarse en la Figura 8.2 (a):

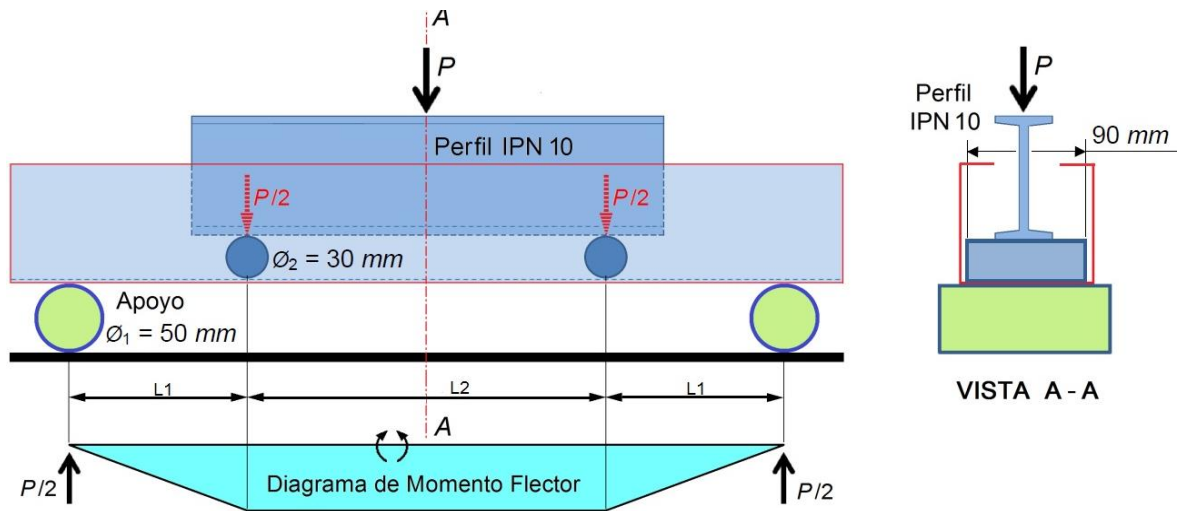


Figura 8.2 (a)
Esquema de la disposición del ensayo

Donde:

$$L_1 = 150\text{ mm}$$

$$L_2 = 480\text{ mm}$$

$$M_f = \frac{P}{2} L_1$$

En las Figuras 8.2 (b) y 8.2 (c), puede observarse el perfil IPN 10 utilizado, con el dispositivo para sujetar los rodillos de 30mm de diámetro:



Figura 8.2 (b)
Perfil IPN 10 con dispositivos de sujeción de rodillos



Figura 8.2 (c)
Perfil IPN 10 con dispositivos de sujeción de rodillos

8.3 Obtención de los perfiles a ensayar

Los perfiles a ensayar estaban compuestos por chapas de acero al carbono laminadas en caliente de uso comercial, conformadas según especificaciones de la norma IRAM IAS U500-23, las cuales fueron provistas por la empresa siderúrgica Ternium Siderar. En la Tabla 8.3 (a) se detalla la composición química del material utilizado:

C	Mn	P	S	Si	At
0,0571	0,2558	0,014	0,0092	0,0305	0,0359

Tabla 8.3 (a)
Composición química del material

Una vez adquiridas las chapas, fueron enviadas a un fabricante local quien utilizando maquinas plegadoras conformó los perfiles según las dimensiones solicitadas. Se conformaron tres perfiles iguales, uno de los cuales puede verse en las Figuras 8.3 (b) y 8.3 (c):

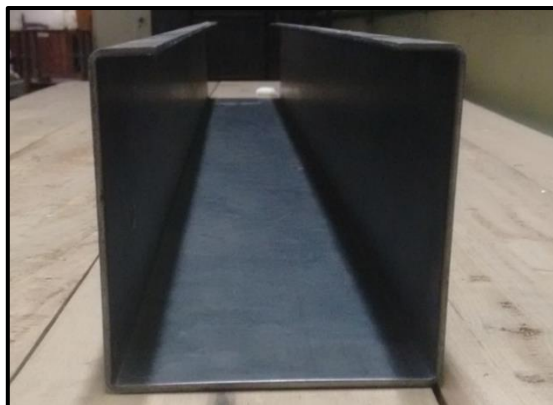


Figura 8.3 (b)
Perfil a ensayar



Figura 8.3 (c)
Perfil a ensayar

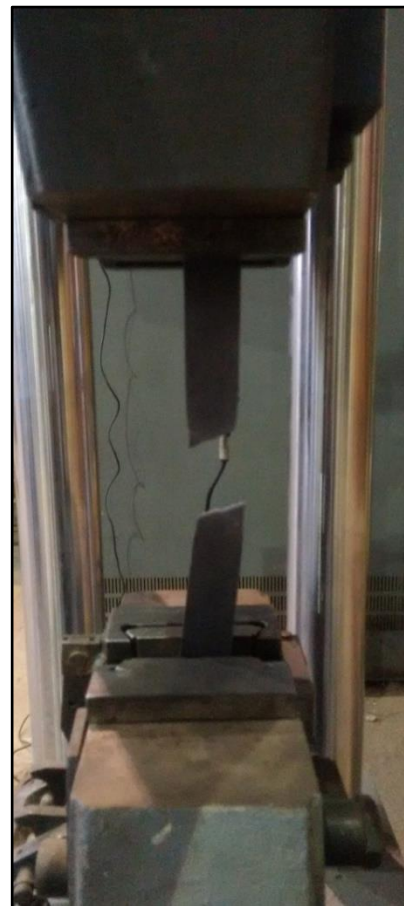
8.4 Ensayo de tracción en muestra

Con la finalidad de conocer la tensión de fluencia del material con el que fueron conformados los perfiles, se le solicito al proveedor que entregue junto con estos, una muestra del material (de dimensiones 30mm x 1.25mm x 300mm), para poder realizarle un ensayo de tracción y así obtener el valor buscado.

Se recopilaron los datos de carga y deformación hasta la rotura del perfil, la cual puede observarse en las Figuras 8.4 (a) y (b).



(a)

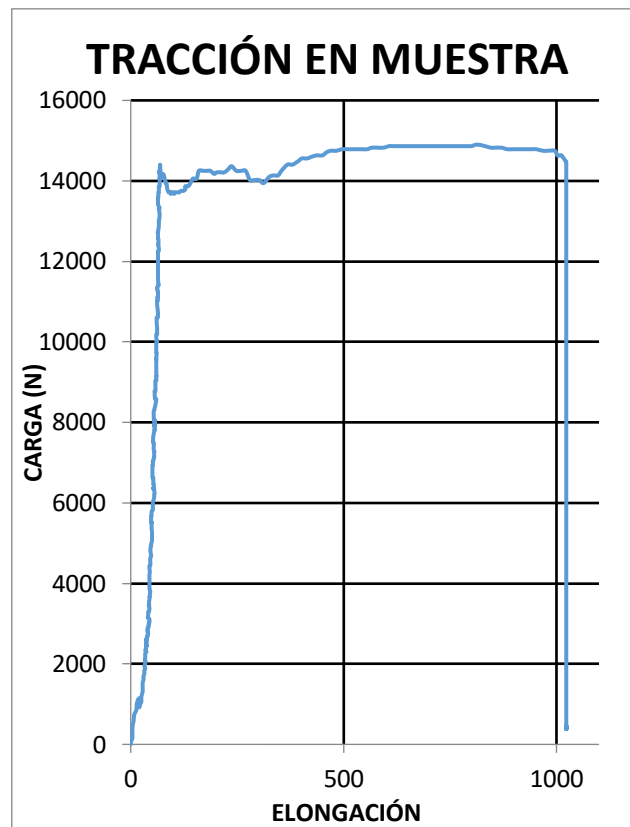


(b)

Figuras 8.4 (a) y (b)
Ensayo de tracción en muestra



En el siguiente gráfico pueden observarse los valores de carga - elongación correspondientes al ensayo de tracción:



Sección [mm ²]	37,5
Carga máxima [N]	14901,5
Resist. a la tracción [N/mm ²]	397,4
Carga de fluencia [N]	13943,7
Tensión de fluencia [N/mm ²]	371,8

Figura 8.4 (c)
Gráfico y datos del ensayo de tracción en muestra

Del gráfico puede obtenerse el valor de tensión de fluencia:

$$\sigma_f \approx 370 \text{ N/mm}^2$$

Y el valor de la tensión de rotura o resistencia a la tracción:

$$\sigma_f \approx 400 \text{ N/mm}^2$$



8.5 Ensayos de pandeo

Para comenzar con el primer ensayo se colocó el perfil IPN 10 con los rodillos dentro del perfil y luego se colocó al perfil sobre los rodillos de apoyo como puede observarse en las siguientes figuras:

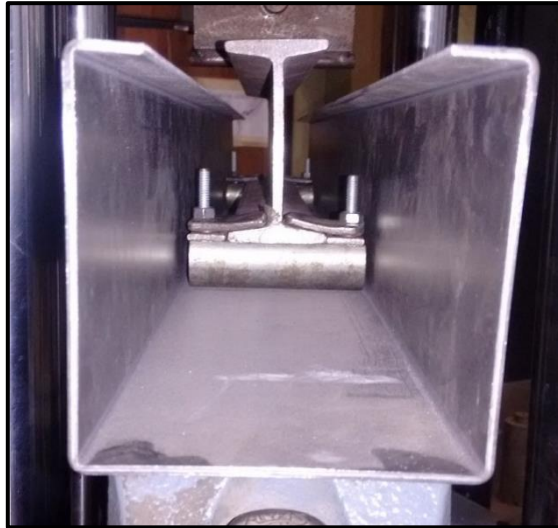


Figura 8.5 (a)
Posición del perfil IPN dentro del perfil a ensayar

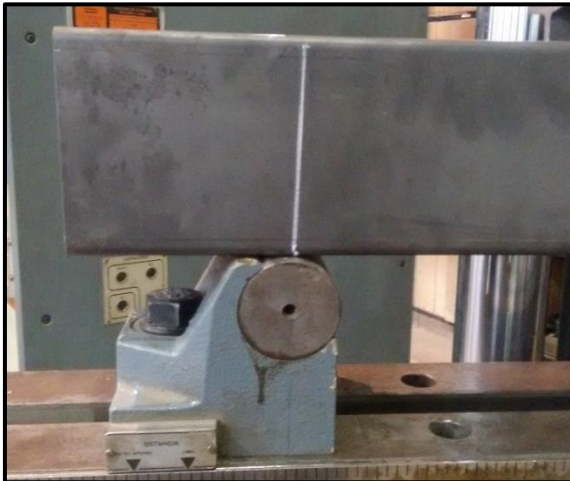


Figura 8.5 (b)
Perfil a ensayar sobre rodillos



Figura 8.5 (c)
Perfil a ensayar sobre rodillos



Figura 8.5 (d)
Disposición del ensayo

Luego se procedió a aplicar la carga progresivamente, realizando detenciones para observar las deformaciones. Alrededor de los 15000N presentaba una notable deformación en el centro del perfil hacia adentro como puede verse en la Figura 8.5 (e):



Figura 8.5 (e)
Perfil con deformación elástica en el centro

Al alcanzar una carga de 23000 N aproximadamente, el perfil falló por completo presentando grandes deformaciones y dejando de soportar la carga, por lo que esta cayó drásticamente.



En las Figuras 8.5 (f) y 8.5 (g), puede observarse el perfil completamente deformado luego de ocurrida la falla:



Figura 8.5 (f)
Perfil deformado plásticamente luego del ensayo



Figura 8.5 (g)
Perfil deformado plásticamente después del ensayo

Puede observarse que las alas del perfil pandearon hacia adentro.

En un extremo la sección se abrió por completo debido que, al fallar, la prensa continuó aplicando carga provocando este efecto.

Siguiendo el mismo procedimiento, se ensayaron otros dos perfiles. Estos presentaron cargas de falla y deformaciones muy similares a la descrita anteriormente.

En las Figuras 8.5 (h), 8.5 (i), y 8.5 (j) se pueden ver estos perfiles deformados luego de los ensayos:



Figura 8.5 (h)
Perfil 2 después del ensayo



Figura 8.5 (i)
Perfil 3 Después del ensayo



Figura 8.5 (j)
Perfil 2 Después del ensayo

Los tres ensayos permitieron generar los siguientes gráficos:

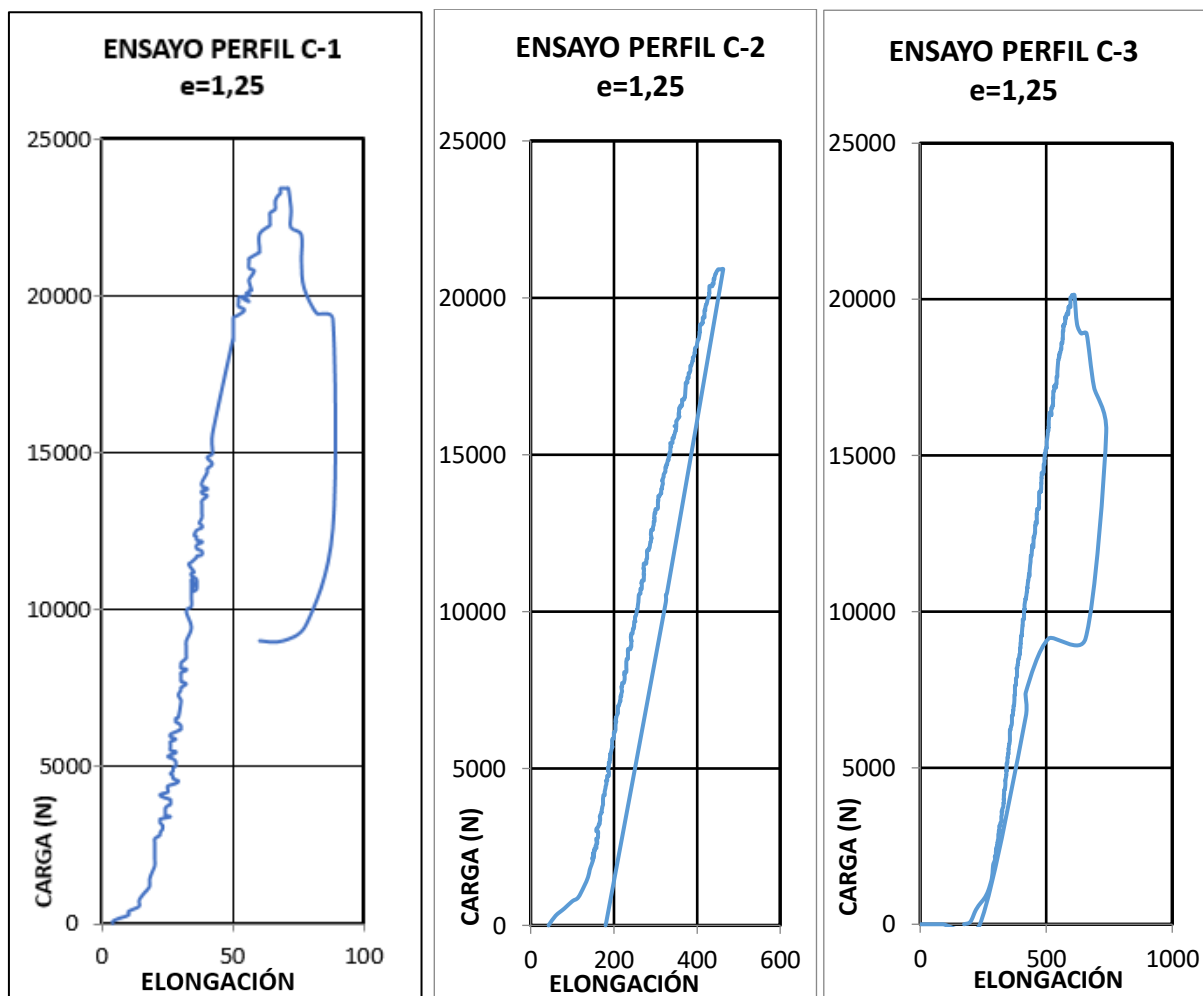


Figura 8.5 (k)
Gráficos Carga – Deformación de los ensayos

Los valores de carga máxima obtenidos en los tres ensayos se indican en la siguiente tabla:

Ensayo N°	1	2	3	Promedio
Carga de falla [N]	22981	20903	20139	21344
Momento de falla [Nmm]	1723575	1567725	1510425	1600830

Tabla 8.5 (a)

Como puede verse, los tres ensayos presentaron una carga de falla muy cercana.



9 Comparación de resultados

9.1 Comparación con ensayos previos

En la Tabla 9.1 (a) se resume los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el trabajo precedente con los perfiles de sección U (con espesor de 2,50 mm) y los obtenidos de los ensayos los perfiles de sección C con espesor de 1,25 mm.

Ensayo N°	1	2	3	Promedio
Perfil U	27763 [N]	32516 [N]	32595[N]	30958 [N]
Perfil C	22981 [N]	20903 [N]	20139 [N]	21344 [N]

Tabla 9.1 (a)

Se puede observar que al reducir el espesor a la mitad y utilizar pestañas de 17mm, la carga máxima promedio de los perfiles disminuye un 31% mientras que la cantidad de material utilizado para conformar el perfil con pestañas disminuye un 45%.

Se destaca que ambos perfiles fallaron por pandeo.

En la Tabla 9.1 (b) se resumen los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el trabajo precedente con los perfiles de sección U y los obtenidos de los ensayos los perfiles de sección C con espesor de 2,50 mm (ver Anexo 2).

Ensayo N°	1	2	3	Promedio
Perfil U	27763 [N]	32516 [N]	32595[N]	30958 [N]
Perfil C	78360 [N]	79556 [N]	81095 [N]	79670 [N]

Tabla 9.1 (b)

Puede observarse que al utilizar pestañas de 17mm, la carga máxima de los perfiles aumento un 157% mientras que la cantidad de material utilizado para conformar el perfil con pestañas aumento solo un 11%.

Es importante destacar que los modos de falla de los perfiles son distintos; el perfil U falla por pandeo, mientras que el perfil C falla por fluencia.



9.2 Comparación de métodos

En la Tabla 9.2 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con el perfil C de 1,25 mm, con cada método desarrollado en el presente Proyecto Integrador.

Metodología	Ensayos mecánicos	Método de elementos finitos	Método de la fuerza directa	Falla por fluencia
Carga máxima de falla [N]	21344	18992	29307	48305
Momento máximo de falla [Nmm]	1600830	1424400	2198065	3622918

Tabla 9.2 (a)

Se puede observar que tanto las cargas críticas como los momentos de falla obtenidos en los diferentes métodos numéricos como en los ensayos están muy alejados de los valores correspondientes a los de falla por fluencia teórico, por lo que se puede afirmar que el modo de falla del perfil en estudio es el pandeo. Además, en las deformadas que predicen los métodos numéricos y las de los ensayos se puede observar que el modo de falla es pandeo distorsional. Es importante destacar que las soluciones analíticas presentadas no predicen la falla por pandeo local para el caso en estudio (Capítulo 5).

Al comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos, se puede observar que el valor de falla obtenido al aplicar el método de elementos finitos es el más cercano al obtenido durante los ensayos (12% menor), mientras que el obtenido aplicando el método de la fuerza directa se encuentra más alejado al de los ensayos (37% mayor). En ambos casos el modo de deformación obtenido (pandeo distorsional), coincide con los que presentaron los perfiles ensayados.



10 Conclusiones

En las conclusiones de los estudios realizados sobre los perfiles de pared delgada se deben diferenciar dos aspectos principales, uno es el aumento de resistencia al utilizar pestañas y el otro es la efectividad de los métodos utilizados para predecir la falla.

10.1 Sobre el uso de pestañas

En la sección 9.1 se evidenció como al utilizar pestañas de 17mm, la resistencia promedio de los perfiles aumentó un 157% mientras que la cantidad de material utilizado para conformar el perfil con pestañas aumento solo un 11%, considerando perfiles con espesores iguales (2,50 mm).

Esto representa una enorme ventaja ya que, si bien agregar pestañas supone un proceso más durante la conformación de los perfiles, lo que resultaría en mayores costos de producción, este costo se compensa con el enorme ahorro en material al compararlo con la utilización de perfiles sin pestañas.

Además del aspecto económico, si se requiere utilizar perfiles que resistan cargas de flexión y/o compresión, al utilizar perfiles con pestañas se reduciría también el peso de la estructura debido a la menor cantidad de material necesario para lograr la misma resistencia.

A partir de estos resultados, se pudo observar como el utilizar pestañas que sirvan como apoyo de otros elementos que conforman un perfil, es una solución a problemas en los cuales se produce pandeo en el perfil.

10.2 Conclusión sobre la efectividad de los métodos aplicados

Al comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos, se observa que el valor de falla obtenido al aplicar el método de elementos finitos es el más cercano al obtenido durante los ensayos (12% menor), mientras que el obtenido aplicando el método de la fuerza directa se encuentra más alejado al de los ensayos (37% mayor).

Se estima que la diferencia entre los valores de ensayo y las simulaciones numéricas proviene de diferencias constructivas entre los perfiles ensayados y el perfil modelado teórico, entre otras: diferencias en los espesores y en las dimensiones generales de perfil y la



presencia de radios de empalme. Estas diferencias pueden resultar en aumento o disminución de la resistencia al pandeo de los perfiles ensayados en comparación con el modelado numérico.

El método analítico de pandeo local de placas no es aplicable al caso estudiado, ya que los valores de tensiones críticas obtenidas están por encima de la tensión de fluencia del material. Por este motivo no es posible realizar una comparación entre el método analítico y los ensayos realizados.

El método de la fuerza directa dio como resultado valores más alejados a los obtenidos con el método de los elementos finitos y con los ensayos. Esto puede deberse a que el software no tiene la posibilidad de simular las condiciones de apoyo que se aplicaron en los ensayos (rodillos).

Si se compara la efectividad de los distintos métodos numéricos, puede observarse que, el método de elementos finitos es el que provee valores más cercanos a los obtenidos en los ensayos.

Se puede observar la semejanza entre los modelos deformados que se obtienen con ambos métodos numéricos y los perfiles deformados luego de alcanzar las cargas de falla durante los ensayos. El modo de pandeo obtenido (pandeo distorsional), tanto en el método de los elementos finitos como en el método de la fuerza directa, coincide con el que presentaron los perfiles ensayados. Esto es importante, ya que en muchas aplicaciones prácticas no solo se necesita conocer el valor para el cual se producirá la falla, sino también conocer la manera en que se deformarán los perfiles solicitados.



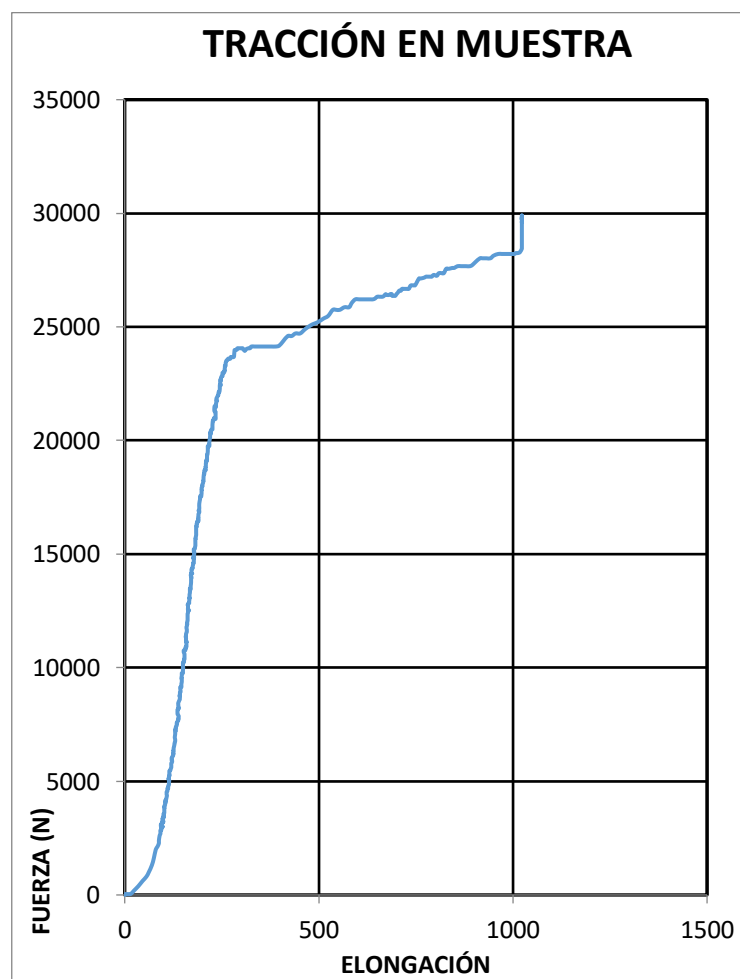
Anexo 1

Ensayo de tracción en muestra de perfil de espesor de 2,5 mm

Con la finalidad de conocer la tensión de fluencia del material con el que fueron conformados los perfiles, se le solicitó al proveedor que entregue junto con estos, una muestra del material (de dimensiones 30mm x 2.5mm x 300mm), para poder realizarle un ensayo de tracción y así obtener el valor buscado.

Se realizaron los ensayos utilizando el mismo procedimiento y equipamiento detallado en la **sección 8.4**.

En el siguiente gráfico pueden observarse los valores de tensión vs deformación correspondientes al ensayo:





Sección [mm ²]	75
Carga máxima [N]	29901
Resist. a la tracción [N/mm ²]	398,7
Carga de fluencia [N]	23790,5
Tensión de fluencia [N/mm ²]	317,2

Del gráfico puede obtenerse el valor de tensión de fluencia:

$$\sigma_f \approx 320 \text{ N/mm}^2$$

Y el valor de la tensión de rotura o resistencia a la tracción:

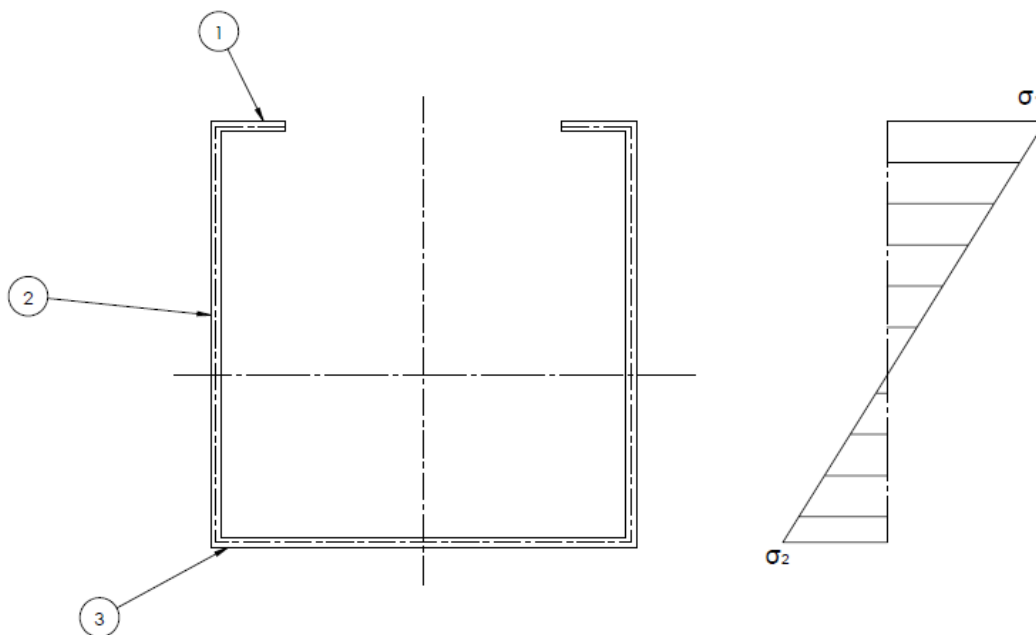
$$\sigma_f \approx 400 \text{ N/mm}^2$$

Anexo 2

Obtención de momentos de falla de perfil $e=2,5\text{mm}$

Solución analítica

Se dividió a la sección en elementos rectangulares individuales y se utilizaron las ecuaciones de tensión crítica de pandeo de placas considerando a estas como apoyadas en sus bordes si este está unido a otro elemento de la sección o libre si no lo está.



Para cada elemento se utilizó la ecuación de pandeo de placas:

$$\sigma = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

El valor de k, se obtuvo de la tabla 2.3.1.2 (c).



Caso	σ_1	σ_2	Polinomio de interpolación	X= -1	X= 0	X=+ 1
1	Empotrado	Empotrado	$13,6-13x+9,7x^2 - 3,3x^3$	39,6	13,6	7,0
2	Empotrado	Apoyado	$11,6-12x+8,6x^2 - 2,8x^3$	35,0	11,6	5,4
3	Apoyado	Empotrado	$9,8-9x+6,9x^2 - 2,3x^3$	28,0	9,8	5,4
4	Apoyado	Apoyado	$7,7-7x+6,2x^2 - 2,9x^3$	23,8	7,7	4,0
5	Empotrado	Libre	$5,9-6x+2,2x^2 - 0,8x^3$	14,9	5,9	1,3
6	Libre	Empotrado	$1,6-0,37x+0,13x^2 - 0,06x^3$	2,16	1,6	1,3
7	Apoyado	Libre	$1,7-2,55x+1,91x^2 - 0,64x^3$	6,8	1,7	0,42
8	Libre	Apoyado	$0,57-0,19x+0,06x^2 - 0,02x^3$	0,84	0,57	0,42

Tabla 2.3.1.2 (c)

Placa 1:

La placa 1 está sometida a una tensión constante, es decir $X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$ y posee uno de sus bordes apoyados a la placa 2 y el otro libre, por lo que el coeficiente de pandeo K es igual a 0,42

La tensión crítica de pandeo es:

$$\sigma_1 = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_1}{b_1}\right)^2 = 0,42 * \frac{\pi^2 * 210000 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{12(1 - 0,3^2)} * \left(\frac{2,5mm}{17mm}\right)^2$$

$$\sigma_1 = 1724 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

Placa 2:

La placa 2 está sometida a una tensión variable, en su parte superior es σ_1 y en su parte inferior es σ_2 , y posee ambos bordes apoyados.

La relación de tensiones X será igual a:

$$X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{M_f / W_{inf}}{M_f / W_{sup}} = \frac{W_{sup}}{W_{inf}} = \frac{19583,33 [mm^3]}{-29228,85 [mm^3]} = -0,67$$

Se utiliza el polinomio de interpolación del caso 4 de la tabla (apoyado – apoyado):



$$K_2 = 7,7 - 7X + 6,2X^2 - 2,9X^3 = 7,7 - 7 * 0,67 + 6,2 * 0,67^2 - 2,9 * 0,67^3$$

$$K_2 = 16,04$$

La tensión crítica de pandeo es:

$$\sigma_2 = k_2 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_2}{b_2} \right)^2 = 16,04 * \frac{\pi^2 * 210000 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}{12(1 - 0,3^2)} * \left(\frac{2,5mm}{100mm} \right)^2$$

$$\sigma_1 = 1903 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Placa 3:

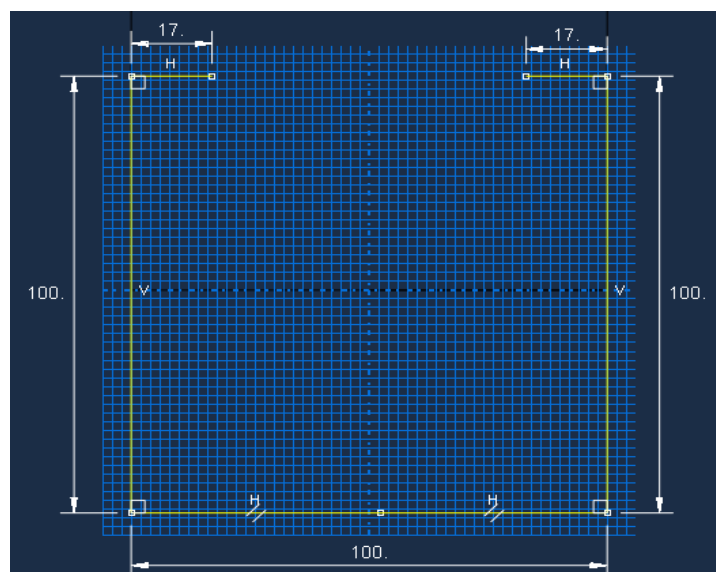
La placa 3 esta únicamente sometida a esfuerzos de tracción, por lo que no ocurrirá el fenómeno de pandeo local en ella.

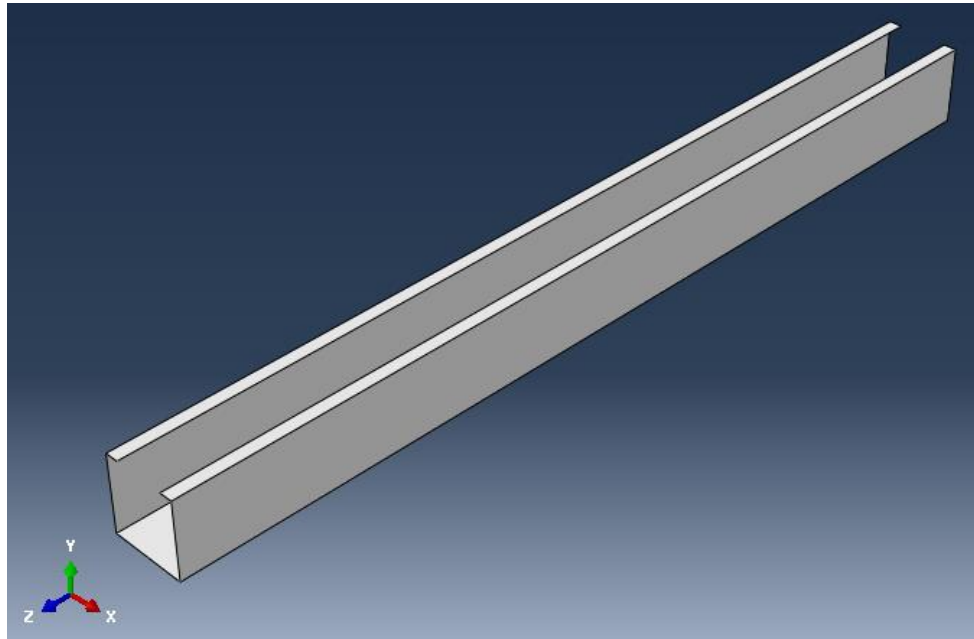
Conclusión:

Las tensiones críticas de pandeo de las placas 1 y 2 son mucho mayores a la tensión de fluencia del material ($320 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$), por lo que se concluye que **no ocurrirá el fenómeno de pandeo local en el perfil analizado.**

Simulación mediante elementos finitos

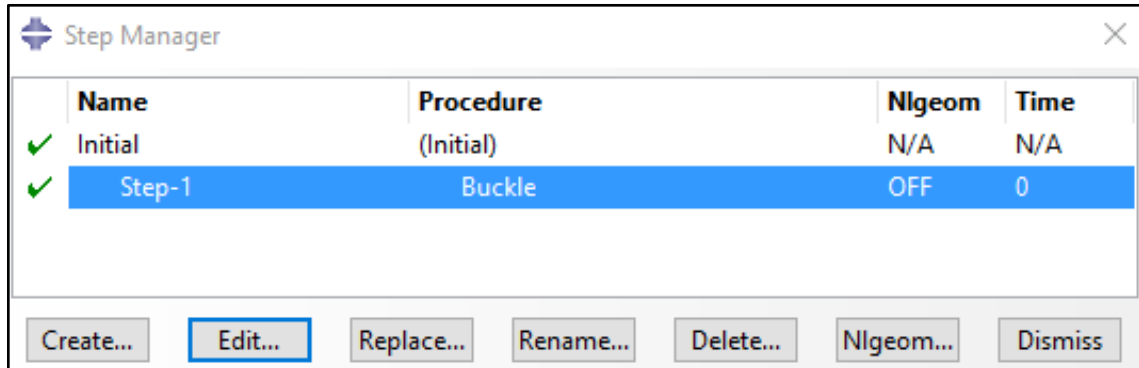
Para realizar la modelización del perfil estudiado, se utiliza la herramienta de extrusión, de esta manera se obtiene un perfil de pared delgada (shell), se le asigna un material con las propiedades del acero y una sección con espesor 2,5 mm.



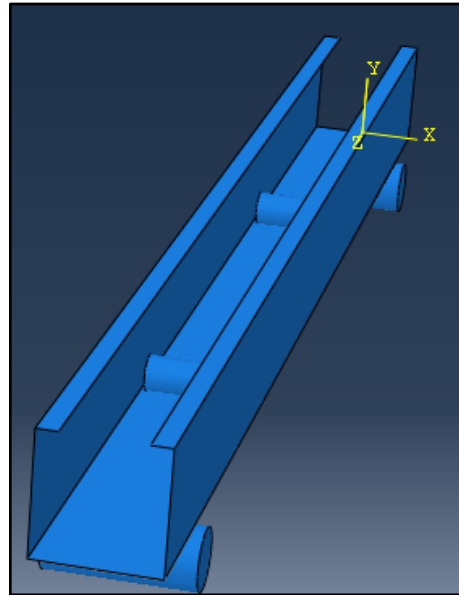


Además, se modelan rodillos sólidos con el fin de simular los que serán utilizados en los ensayos mecánicos.

Se realiza un análisis de perturbación lineal estática utilizando la opción Buckle:

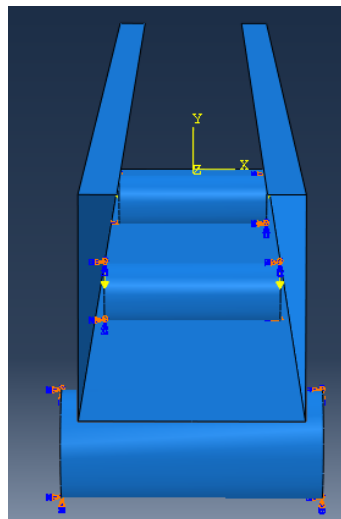


Luego se genera un ensamblaje utilizando todos los elementos intervinientes (perfil y rodillos). Estos se ubican en las posiciones donde estarán situados los rodillos de apoyo y de aplicación de carga al realizarse los ensayos.



En la etapa siguiente, se aplican las cargas y las condiciones de bordes a los elementos. Se restringe el desplazamiento y rotación en todas las direcciones de los rodillos inferiores, mientras que a los superiores solo se les permite el desplazamiento en dirección Y.

La carga es aplicada sobre los rodillos superiores en forma de fuerzas concentradas en sus extremos.



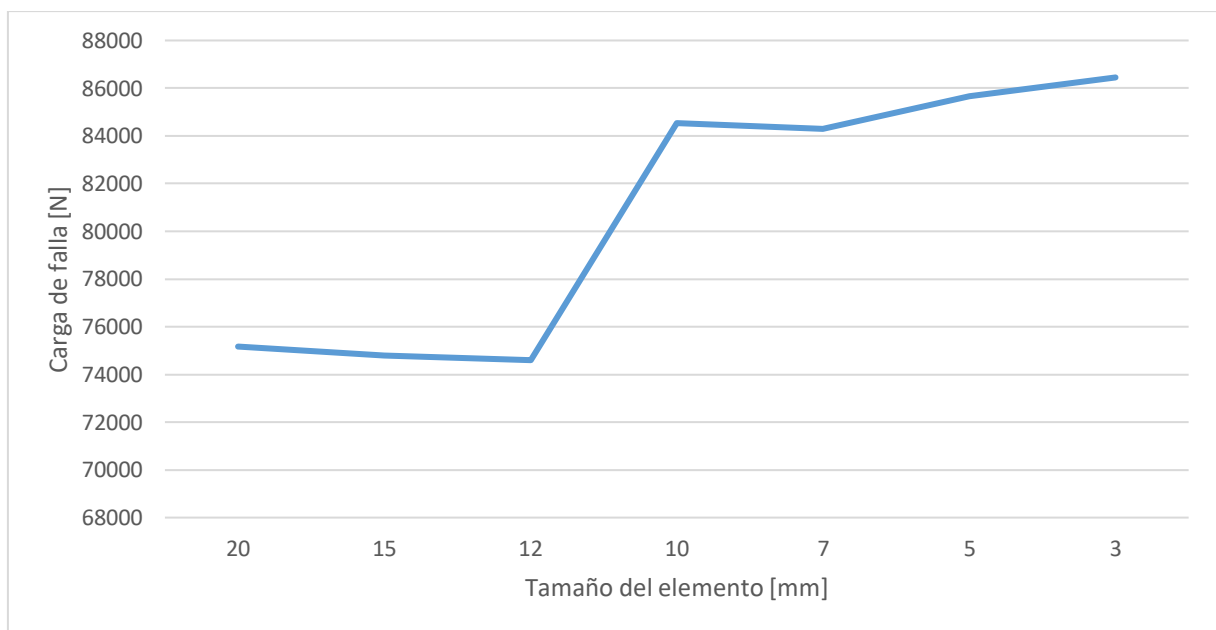
La siguiente etapa consiste en realizar el mallado del perfil. Para ello se utiliza el elemento S4R.

Para definir la densidad del mallado, se realizó un análisis de convergencia que arrojó los siguientes resultados:

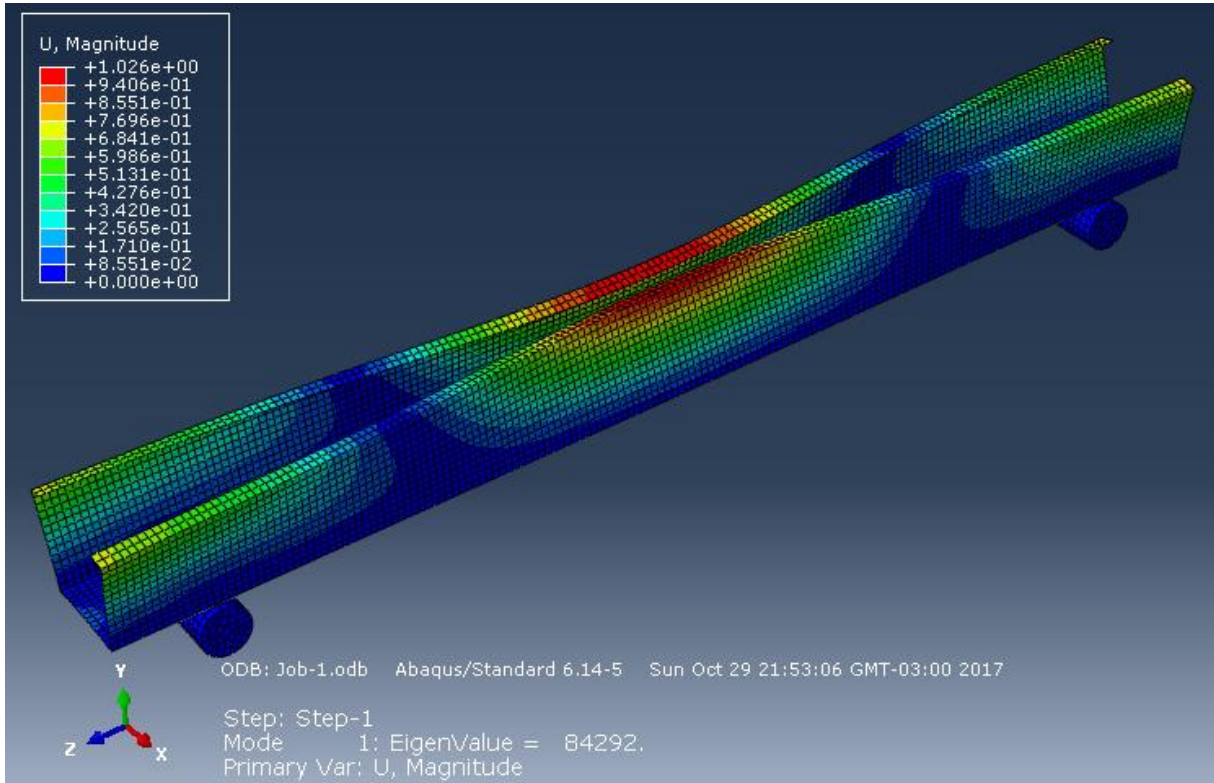


Tamaño del elemento	Carga de rotura [N]
20	75180
15	74799
12	74599
10	84528
7	84292
5	85663
3	86450

Estos resultados se muestran en el siguiente gráfico, donde puede observarse que al disminuir el tamaño de los elementos hasta un valor de 10 mm los valores de carga de falla tienden a estabilizarse en un valor de 85000N.



Los resultados obtenidos para un mallado con elementos de 7mm pueden verse en la siguiente imagen:



Puede observarse que el perfil presenta una deformación hacia adentro y que la carga de falla obtenida es de 84292 N.

El valor de momento que produce esta carga se obtiene del esquema del ensayo que será realizado:

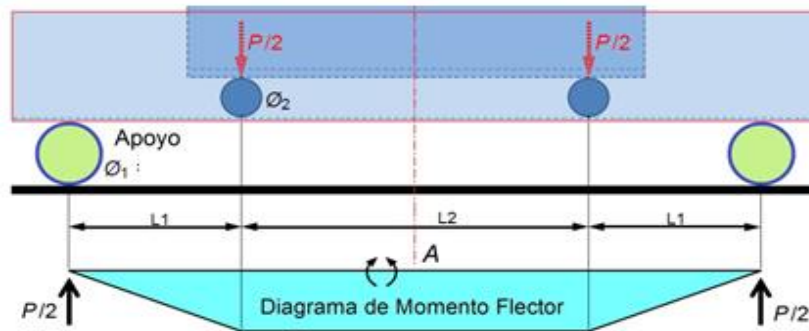


Figura 6.6 (b)
Esquema del ensayo a realizar

$$L_1 = 150\text{mm}$$

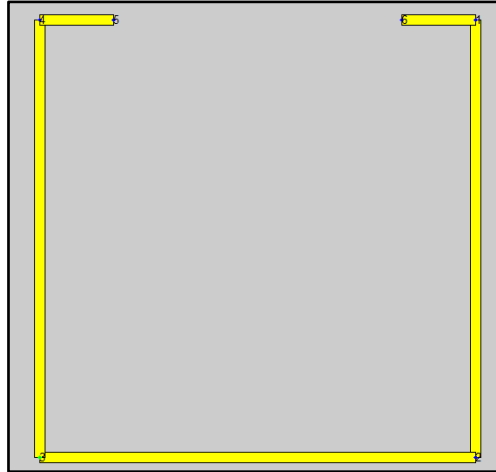
$$L_2 = 480\text{mm}$$

$$M_{cr} = \frac{p_{cr}}{2} L_1 = \frac{84291\text{N}}{2} 150\text{mm} = 6321900 \text{ [Nmm]}$$



Método de la fuerza directa

Para comenzar con la aplicación del método, se ingresan en el software CUFSM4 todos los datos necesarios para poder generar el croquis de la sección que se muestra a continuación:



Luego se ingresa el valor de la tensión de fluencia del material (320 N/mm^2) obteniéndose los siguientes valores:

Generate P and M based on max (yield) stress =

P =

Mxx =

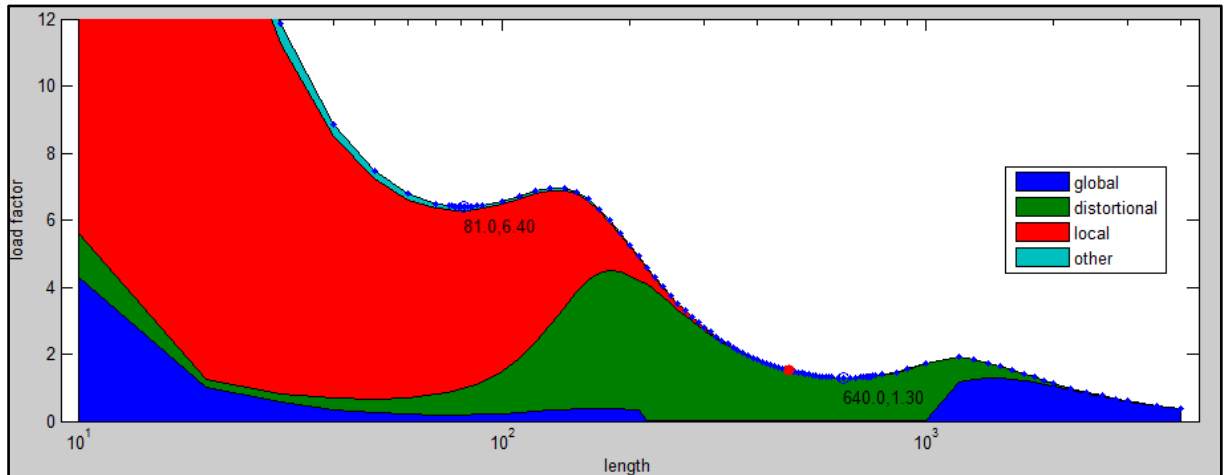
Mzz =

M11 =

M22 =

B =

En función de estos valores se obtiene la siguiente curva característica de pandeo:

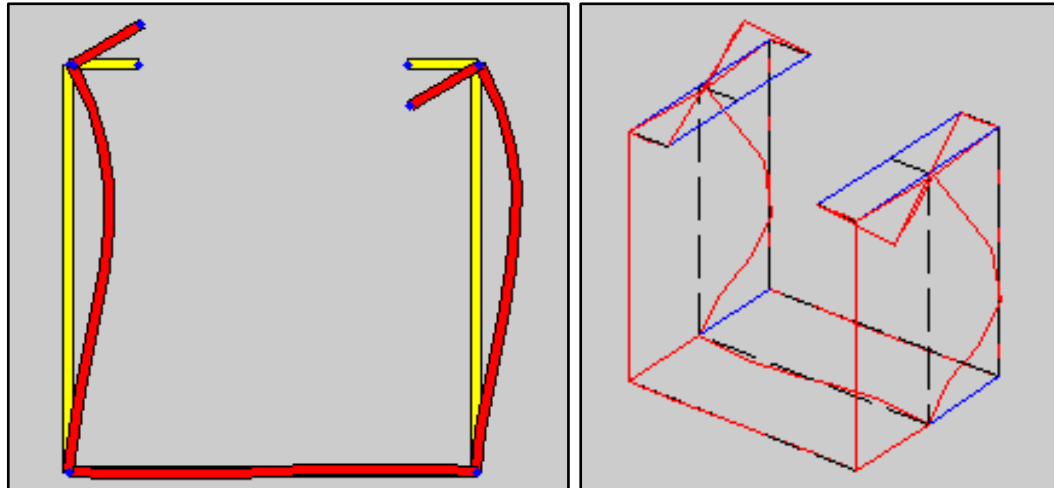


Se analizarán los 3 modos de pandeo por separado:

Pandeo local:

Para el caso de pandeo local puede observarse un mínimo en la curvatura, el cual ocurre a una longitud de pandeo de 81 mm y su factor de carga correspondiente será de 6,4.

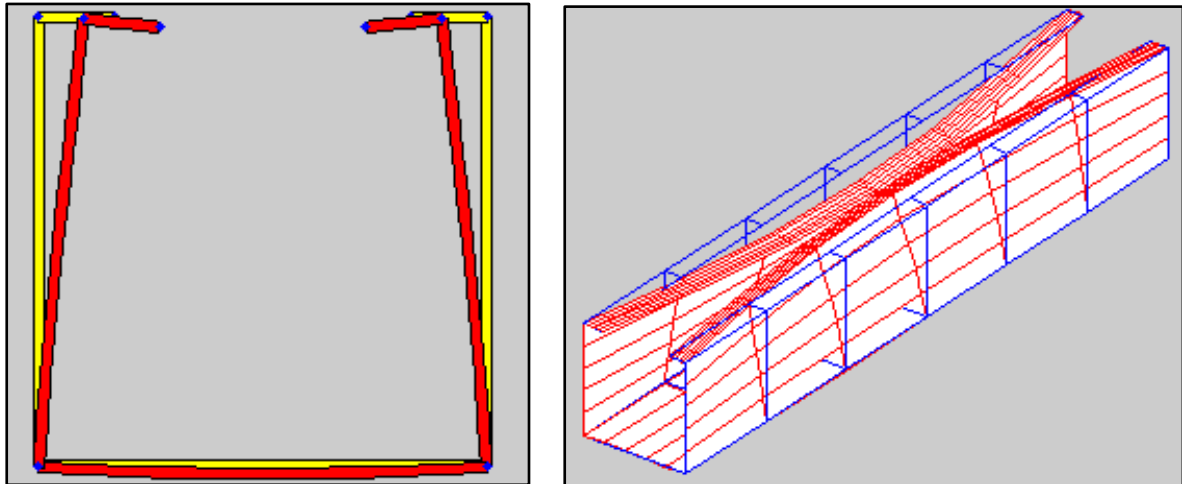
La sección del perfil deformado por pandeo local obtenido tiene la siguiente forma:



Pandeo distorsional:

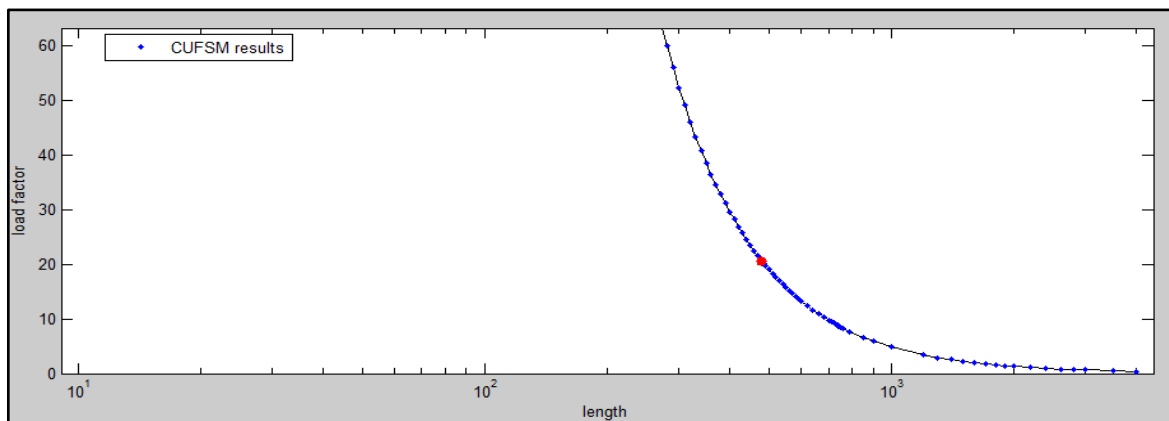
Para el caso de pandeo distorsional puede observarse un mínimo en la curvatura, el cual ocurre a una longitud de pandeo de 640 mm y su factor de carga correspondiente será de 1,3.

La sección del perfil deformado por pandeo distorsional obtenido tiene la siguiente forma:

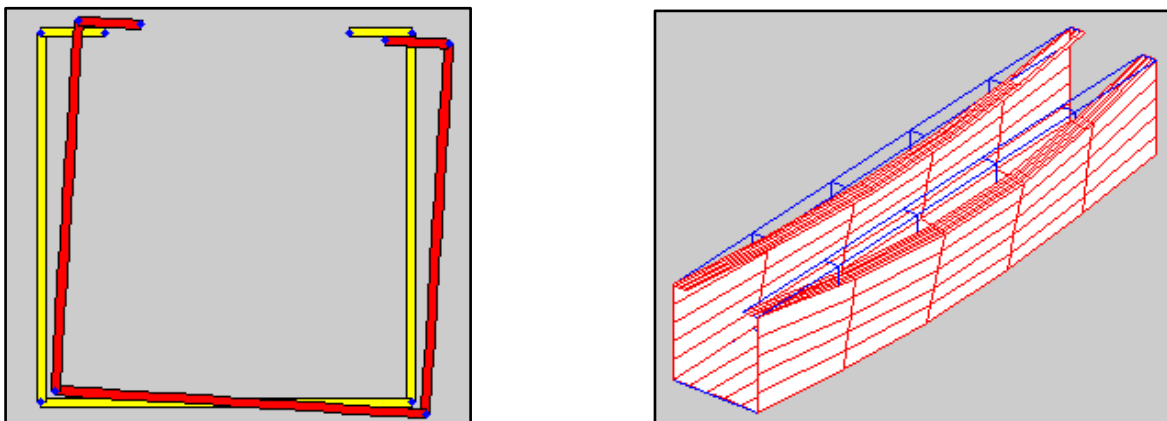


Pandeo global:

Aislando la curva de pandeo global se obtiene el factor de carga correspondiente para el caso de una longitud de 480 mm (Distancia entre rodillos), el cual es 21.



La sección del perfil deformado por pandeo global obtenida tiene la siguiente forma:





Obtención de cargas críticas:

Los valores obtenidos para cada caso son:

M_y	Factor de carga global	Factor de carga local	Factor de carga distorsional
6266666	21,00	6,40	1,30

M_{ne}	M_{nl}	M_{nd}	M_n
6266666	9017431	5352832	5352832

Ensayos mecánicos

Se ensayaron tres perfiles utilizando el mismo procedimiento y equipamiento que se describe en el **Capítulo 8**.

Los valores de carga máxima obtenidos en los tres ensayos se indican en la siguiente tabla:

Ensayo N°	1	2	3	Promedio
Carga de falla [N]	78360	79556	81095	79670
Momento de falla [Nmm]	5877000	5966700	6082125	5975250

Comparación de resultados

Con todos los cálculos y simulaciones se procede a realizar una comparación de los resultados obtenidos con cada método.

Estos resultados se resumen en la siguiente tabla:

Metodología	Ensayos mecánicos	Método de elementos finitos	Método de la fuerza directa	Falla por fluencia
Carga máxima de falla [N]	79670	84292	71371	83555
Momento máximo de falla [Nmm]	5975250	6321900	5352832	6266666



Puede observarse que el momento de falla por fluencia es muy cercano al valor de falla promedio que se obtuvo durante los ensayos. Entonces se concluye que el perfil no presenta falla por pandeo y que su falla es fluencia. Por este motivo se decidió continuar los análisis con diferentes perfiles.



Anexo 3

Estudio de convergencia de mallado

Con el fin de determinar cuál es el mallado óptimo para realizar el estudio computacional de los perfiles, se llevó a cabo una secuencia de simulaciones con distintas densidades de mallado y se relevaron las cargas de falla para cada una de ellas.

Se presenta la siguiente tabla donde pueden observarse las cargas críticas de falla para los diferentes tamaños de elemento:

Tamaño del elemento [mm]	Carga de rotura [N]
20	16628
15	16500
12	16432
10	18708
7	18641
5	18992
3	19203

A partir de estos datos se elaboró el siguiente gráfico donde puede observarse la convergencia hacia un valor de carga de falla de 18900 N para elementos con un tamaño menor o igual a 10mm

