



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**CAPACIDAD A FLEXIÓN DE LOS PERFILES DOBLADOS EN
FRÍO UTILIZADOS EN EL ECUADOR
(Tablas de Ayuda Para Diseño)**

AUTOR (A):

Baque Jiménez, Quelin Marisol

**Trabajo de Graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Hernández Barredo, Jaime

Guayaquil, Ecuador

2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **QUELIN MARISOL BAQUE JIMÉNEZ**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de INGENIERO CIVIL.

TUTOR:

Ing. Jaime Hernández Barredo

DIRECTORA DE LA CARRERA:

Ing. Stefany Alcívar

Guayaquil, a los 18 del mes de Marzo del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Quelin Marisol Baque Jiménez**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Capacidad A Flexión De Los Perfiles Doblados En Frío Utilizados En El Ecuador (Tablas De Ayuda Para Diseño)** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 18 del mes de Marzo del año 2015

AUTOR (A)

Quelin Marisol Baque Jiménez



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, Quelin Marisol Baque Jiménez

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Capacidad A Flexión De Los Perfiles Doblados En Frío Utilizados En El Ecuador (Tablas De Ayuda Para Diseño)**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 18 del mes de Marzo del año 2015

AUTOR(A):

Quelin Marisol Baque Jiménez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser la luz que guía mi camino, dándome fortaleza y perseverancia durante todos los días.

A mi familia, a mis amigos que estuvieron apoyándome en los momentos más duros, sobre todo doy gracias al apoyo incondicional que me dio mi mamá quien fue testigo de la dedicación y esfuerzo que tuve para lograr mi objetivo.

A mi tutor por brindar su paciencia, profesionalismo y orientación hasta la culminación del presente trabajo.

Q. Marisol Baque Jiménez

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos quienes son el motor de mi vida.

Q. Marisol Baque Jiménez



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

**Ing. Jaime Hernández Barredo
TUTOR**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE GRÁFICAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIV
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
MARCO TEÓRICO	4
2.1 SECCIONES DE PERFILES DE ACERO DOBLADOS EN FRÍO	4
2.2 NORMAS DE CALIDAD PARA PERFILES DOBLADOS EN FRÍO	5
2.3 PROCESO DE DOBLADO DE LOS PERFILES	6
2.3.1 Doblado con Máquinas Perfiladoras	6
2.3.2 Doblado de perfiles con Plegadoras	8
2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS Y VARIABLES	9
2.4.1 Ala	9
2.4.2 Alma	9
2.4.3 Labios o Pestaña	10
2.4.4 Elementos con Alas a Compresión con bordes Rígidos o Parcialmente Rígidos	10
2.4.5 Elementos con Alas a Compresión No Rígidas	13
2.4.6 Elementos a Compresión con Múltiples Rigidizadores	13
2.4.7 Ancho plano, w	14
2.4.8 Dimensiones efectivas de los perfiles	14
2.4.9	16
Secciones simétricas con respecto a un punto.-	16
2.4.10 Secciones simétricas simples	16
2.4.11 Secciones con doble simetría	17
2.4.12 Coeficiente de Pandeo	17
2.5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS SECCIONES DE LOS PERFILES DOBLADOS EN FRÍO	19
2.5.1 Constante de Torsión o Alabeo, C_w	19
2.5.2 Constante Torsional de St. Venant, J	21
2.6 LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES DIMENSIONALES	24

2.6.1 RELACIÓN ANCHO PLANO-ESPESOR, w_t	24
2.6.2 RELACIÓN MÁXIMA ALTURA DEL ALMA - ESPESOR, h_t	25
2.6.3 ANCHO EFECTIVO PARA ELEMENTOS A COMPRESIÓN, b	26
2.6.4 PERALTE DE ALMAS Y OTROS ELEMENTOS RÍGIDOS BAJO GRADIENTE DE ESFUERZOS.....	28
2.6.5 PERALTE EFECTIVO DEL BORDE RIGIDIZADO DE ELEMENTOS A COMPRESIÓN UNIFORME CON LABIO SIMPLE, d_s	31
CAPÍTULO III.....	34
METODOLOGÍA DE DISEÑO A FLEXIÓN PARA PERFILES DOBLADOS EN FRÍO	34
3.1 MÉTODO DE DISEÑO POR FACTOR DE CARGA Y RESISTENCIA (LRFD)	34
3.1.1 RESISTENCIA NOMINAL, R_n	35
3.1.2 FACTORES DE COMBINACIONES DE CARGAS	35
3.1.3 FACTOR DE RESISTENCIA, ϕ	36
3.2 CAPACIDAD A FLEXIÓN	37
3.2.1 RESISTENCIA DE LA SECCIÓN	38
3.2.2 RESISTENCIA AL PANDEO LATERAL-TORSIONAL.....	48
3.2.3 PANDEO DISTORSIONAL	57
CAPÍTULO IV	63
CÁLCULO DE CAPACIDAD A FLEXIÓN DE LOS PERFILES DOBLADOS EN FRÍO DEL ECUADOR	63
4.1 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD A FLEXIÓN DE LOS PERFILES DE ACERO DOBLADOS EN FRÍO... 64	64
4.1.1 EJEMPLO 1: DISEÑO A FLEXIÓN DE UNA SECCIÓN G (CORREAS).....	64
4.1.2 EJEMPLO 2: DISEÑO A FLEXIÓN DE UNA SECCIÓN C	83
4.1.3 EJEMPLO 3: DISEÑO A FLEXIÓN DE UNA SECCIÓN TIPO CAJÓN (DOBLE G)	97
4.2 TABLAS Y GÁFICAS DE RESUMEN DE DISEÑO A FLEXIÓN DE LOS PERFILES C, G, Y TIPO CAJÓN (DOBLE G)..... 106	106
4.2.1 TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO SECCIONES G	107
4.2.2 TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO SECCIONES C	109
4.2.3 TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO SECCIONES TIPO CAJÓN (2G).....	111
4.2.4 GRÁFICA DE MOMENTO DE DISEÑO POR PANDEO LATERAL-TORSIONAL DE SECCIONES G.....	113
4.2.5 GRÁFICA DE MOMENTO DE DISEÑO POR PANDEO LATERAL-TORSIONAL DE SECCIONES C.....	117
CAPÍTULO V	120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Momento de Diseño de una Sección Cajón, $F_y=36$ Ksi.....	112
Gráfica 2. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	113
Gráfica 3. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	113
Gráfica 4. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	114
Gráfica 5. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	114
Gráfica 6. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	115
Gráfica 7. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	115
Gráfica 8. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y= 36$ ksi.....	116
Gráfica 9. Momento de Diseño por Pandeo Lateral – Torsional Sección C, $F_y= 36$ ksi	117
Gráfica 10. Momento de Diseño por Pandeo Lateral- Torsional Sección C, $F_y= 36$ ksi	117
Gráfica 11. Momento de Diseño por Pandeo Lateral- Torsional Sección C, $F_y= 36$ ksi	118
Gráfica 12. Momento de Diseño por Pandeo Lateral- Torsional Sección C, $F_y= 36$ ksi	118
Gráfica 13. Momento de Diseño por Pandeo Lateral- Torsional Sección C, $F_y= 36$ ksi	119
Gráfica 14. Momento de Diseño por Pandeo Lateral- Torsional Sección C, $F_y= 36$ ksi	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Determinación del coeficiente de pandeo, k.....	18
Tabla 2. Momentos de Diseños para Secciones G, $F_y=36$ ksi	107
Tabla 3. Momento de Diseño para Secciones G, $F_y= 36$ ksi.....	108
Tabla 4. Momento de Diseño para Secciones C, $F_y= 36$ ksi.....	109
Tabla 5. Momento de Diseño para Secciones C, $F_y= 36$ Ksi	110
Tabla 6. Momento de Diseño de Secciones Tipo Cajón, $F_y=36$ ksi	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secciones Típicas de Perfiles de Acero Doblados en Frío	5
Figura 2. Línea de Perfilado	6
Figura 3. Representación esquemática del perfilado	7
Figura 4. Doblado con plegadoras	8
Figura 5. Ala de los Perfiles Doblados en Frío	9
Figura 6. Alma de los Perfiles Doblados en Frío	9
Figura 7. Labio de los Perfiles Doblados en Frío	10
Figura 8. Elementos a Flexión Rigidizados Comunes con Compresión en el Ala Superior.	11
Figura 9. Otros Tipos de Elementos a Flexión Rigidizados con Compresión en el Ala Superior.	11
Figura 10. Rigidizadores de Borde	12
Figura 11. Elementos a Flexión No Rigidizados con compresión en el ala superior.	13
Figura 12. Elementos con Múltiples Rigidizadores	13
Figura 13. Ancho plano w , para perfiles (a) Con Borde Rígido y (b) Borde No Rígido	14
Figura 14. Anchos efectivos de los Perfiles Doblados en Frío	15
Figura 15. Secciones simétricas con respecto a un punto.	16
Figura 16. Secciones simétricas con respecto a un eje	16
Figura 17. Secciones con doble eje de Simetría.	17
Figura 18. Esfuerzos en Alma de los Perfiles	18
Figura 19. Dimensiones de Perfiles G y Perfiles C para C_w	20
Figura 20. Dimensiones Secciones C y Secciones G para J.	22
Figura 21. Dimensiones Sección Cajón para J	23
Figura 22. Elementos a Flexión con un ala a compresión.	25
Figura 23. Ancho efectivo de elementos rígidos	27
Figura 24. Elemento no rigidizado a compresión uniforme	27
Figura 25. Dimensiones reales de elementos rígidos bajo gradiente de esfuerzos	29
Figura 26. Ancho efectivo de almas para elementos rígidos	30

Figura 27. Rigidizadores de Bordes. (a) Labio Simple (b) Labios Complejos	31
Figura 28. Peralte Efectivo del Labio Simple de Elementos con ala a Compresión Uniforme	33
Figura 29. Vigas con un ala fija entre el piso o cubierta.....	38
Figura 30. Distribución de esfuerzo de fluencia. (a) Secciones en equilibrio. (b) Eje neutro cerca al ala a compresión (Inicio de Fluencia en ala a Tensión). (c) Eje neutro cerca al ala a Tensión (Inicio de Fluencia en ala a Compresión).	39
Figura 31. Elementos no Rígidos bajo Gradiente de Esfuerzos. (a) Ambos Bordes Longitudinales en Compresión. (b) Un Borde Longitudinal en Compresión y el otro Borde Longitudinal en Tensión. (c) Para Métodos Alternos.....	44
Figura 32. Factor C_y , para elementos a compresión rigidizados sin atiesadores intermedios.....	45
Figura 33. Distribución de esfuerzos en sección en momento nominal. (a) y (b) Con fluencia en el ala a Tensión. (c) No fluencia en el ala a Tensión. ...	46
Figura 34. Posiciones de la viga sometida a pandeo lateral.	48
Figura 35. Pandeo Distorsional en Elementos a Flexión.....	57
Figura 36. Diagrama de Esfuerzo por Pandeo vs Longitud de Onda para Flexión alrededor del Eje Principal.....	58
Figura 37. Perfil de Sección G	65
Figura 38. Diagrama de Esfuerzos por Inicio de Fluencia para una sección G	70
Figura 39. Diagrama de Deformación y Esfuerzos por Capacidad de Reserva Inelástica de una sección G.....	75
Figura 40. Sección C.....	83
Figura 41. Diagrama de Esfuerzos de una Sección C	87
Figura 42. Diagrama de Deformación y Esfuerzo para una Sección C	92
Figura 43. Sección Tipo Cajón (Doble G)	97

RESUMEN

El trabajo propone tablas y gráficas de resistencia a flexión de los perfiles doblados en frío más utilizados en el Ecuador como, la sección C (canales), sección G (correas) y sección Doble G (Cajón). Está compuesto por cinco capítulos donde se presentan los objetivos del proyecto, un breve resumen sobre el proceso de doblado de los perfiles, las propiedades geométricas, definiciones de términos usados en todo el trabajo, también se da a conocer la metodología de diseño a flexión de las secciones estudiadas con ejemplos de aplicación para una mejor comprensión.

Las tablas y gráficas de resumen obtenidas están ordenadas de forma que son de fácil interpretación por lo que serán de mucha ayuda para los diseñadores estructurales de nuestro país.

Palabras Claves: Acero, Perfiles, Flexión, Pandeo Lateral-Torsional, Pandeo Distorsional, AISI.

ABSTRACT

The work proposes tables and graphs of flexural strength of cold bent profiles used in the Ecuador as section C (channels), section G (straps), and section double G (box). It is composed of five chapters which presents the objectives of the project, a brief summary of the process of bending of profiles, the geometric properties, definitions of terms used in the work, is also given to know the methodology of design bending of sections studied with application examples for a better understanding.

Obtained summary graphs and tables are arranged so that they are easy to interpret what will be very helpful for structural designers of our country.

Key words: Steel, Profiles, Bending, Lateral-Torsional Buckling, Distorsional Buckling, AISI.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El acero, en Ecuador, como material de construcción se lo ha utilizado en los últimos tiempos, ya sea, perfiles con secciones laminadas en caliente o dobladas en frío. Sin embargo, los criterios de diseño son totalmente diferentes.

Actualmente en las construcciones, los perfiles de acero doblado en frío se han empleado con frecuencia debido a sus múltiples aplicaciones, tales como: vigas y nervios para sistemas de pisos, correas para cubiertas livianas, armaduras, entre otros. En el caso de las vigas, estos perfiles trabajan a flexión, por esta razón es conveniente conocer los métodos de diseño para este tipo de comportamiento

A menudo el diseño a flexión de estos elementos estructurales es realizado por métodos de esfuerzos admisibles (ASD) el cual no considera el aporte de la plasticidad de los mismos. Por otro lado, hay una tendencia a creer que la capacidad a flexión de los perfiles doblados en frío es menor en relación a los perfiles laminados en caliente, debido a que existen esfuerzos residuales producto del proceso de doblado y por ello, el diseño por esfuerzos admisibles es de alguna manera justificado.

En nuestro país existe el reglamento de diseño para edificaciones, la *Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC-11)*, donde detalla que para el diseño de estructuras de acero con perfiles doblados en frío se debe seguir lo establecido en las “Especificaciones para el Diseño de Miembros Estructurales de Acero Conformado en Frío” elaborado por el *Instituto*

Americano de Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute - AISI). A pesar de ello en nuestro medio este último es poco conocido.

Por lo descrito anteriormente la intención de este trabajo es de dar a conocer los requerimientos y las expresiones de diseño a flexión de los perfiles de acero doblados en frío utilizando las especificaciones de diseño presentado por el AISI con el método Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD).

A fin de optimizar el diseño de las estructuras que empleen este tipo de material, se desarrollarán tablas de fácil interpretación que servirá de ayuda a nuestros diseñadores estructurales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Calcular la capacidad a flexión de los perfiles de acero doblados en frío más utilizados en el Ecuador, basado en las “Especificaciones Americanas de Diseño para Acero Conformado en Frío” (*North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI S100-2007*)

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar los criterios de diseño de la capacidad a flexión para canales (perfiles C), correas (perfiles G), tubos rectangulares (perfiles doble G).
- Demostrar con un ejemplo la metodología prescrita en las especificaciones del AISI.
- Resumir en tablas de fácil entendimiento los resultados obtenidos.
- Optimizar el tiempo de diseño para el cálculo estructural.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 SECCIONES DE PERFILES DE ACERO DOBLADOS EN FRÍO

En la actualidad se puede observar que los perfiles de acero doblados en frío tienen una gran acogida en la construcción de edificios, casas, galpones, entre otras estructuras; debido a esto, es importante conocer el proceso de producción de estos elementos, su variedad, las normas que lo rigen y los parámetros que afectan a su resistencia.

Los perfiles de acero doblados en frío son elementos de espesores pequeños forjados con máquinas hidráulicas, en donde las láminas delgadas de acero (flejes) son deformadas por medio de rodillos dando como resultado las diferentes formas de los perfiles.

Las secciones o formas de perfil de acero que más se emplean en las edificaciones son los canales (perfiles C), correas (perfiles G), tubos rectangulares, cuadrados, circulares y ángulos L. En ocasiones podemos usar varios estos elementos para formar secciones compuestas, por ejemplo, cajones con doble sección C o doble G. Existen otras formas como: sección Z y tipo sombrero u omega Ω , pero no son muy utilizadas. Las formas que le dan a estos perfiles de lámina delgada pretenden ofrecer la mayor rigidez posible a la sección para sus diversas aplicaciones.

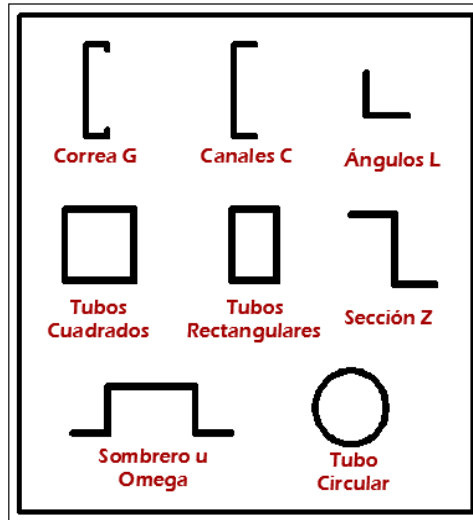


Figura 1. Secciones Típicas de Perfiles de Acero Doblados en Frío

En el mercado ecuatoriano se puede encontrar dos tipos de acabados de los perfiles doblados en frío, estos son: galvanizado o con matizado negro. Los espesores más comunes están entre 1.5mm a 6mm, y otros especiales que pueden llegar hasta 12mm. Por esta razón, estos materiales son considerados elementos muy livianos, influyendo en el peso de la estructura.

2.2 NORMAS DE CALIDAD PARA PERFILES DOBLADOS EN FRÍO

La materia prima con la que se elaboran los perfiles de acero doblados en frío, surge mediante el proceso de aleaciones químicas compuestas por Hierro y Carbono, que llegan a la planta de fabricación en láminas delgadas enrolladas que deben ser certificadas por las normas de calidad vigentes en el país. Las normas que se deben cumplir para la elaboración de los perfiles son las siguientes:

- ISO 9001 (Norma de Calidad Internacional)
- INEN 1623 (Perfiles Doblados en Frío)
- ASTM A-36, 572, 1011
- JIS (Acero Galvanizado)

2.3 PROCESO DE DOBLADO DE LOS PERFILES

Los perfiles estructurales doblados en frío pueden ser formados por dos tipos de técnicas, mediante:

- Perfiladoras (máquinas hidráulicas de proceso continuo).
- Plegadoras (doblado artesanal con la ayuda de un operador).

2.3.1 Doblado con Máquinas Perfiladoras.

El proceso de doblado con máquinas perfiladoras es continuo y muy útil cuando se desea obtener grandes producciones de perfiles para su comercialización. Primero la materia prima llega en láminas delgadas enrolladas o también llamados flejes que son cortados a medida de acuerdo a la longitud mínima que se necesita para el doblado del perfil. En el cálculo de la longitud de mínima se tiene en cuenta los radios de doblados de las esquinas para que las dimensiones del perfil que se obtengan estén dentro de las tolerancias permitidas en las normas.

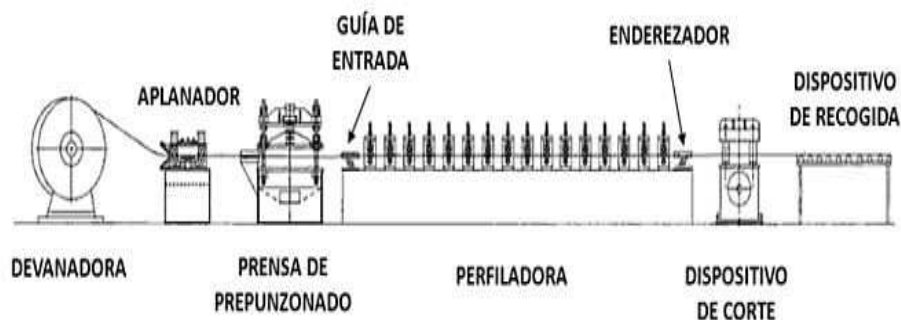


Figura 2. Línea de Perfilado

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Perfilado>

Los flejes son recogidos y trasladados a devanadoras mecánicas donde son desenrollados y conducidos hasta el aplanador, en el que se corrigen ciertas desviaciones de la lámina ocurridos por el desenvolvimiento de los flejes.

Posteriormente pasan a los acumuladores, donde se almacena material para luego ser transportados hacia los rodillos de la perfiladora donde se deforman hasta obtener la sección de los perfiles estructurales como se muestra en la Figura 3. Por último, los perfiles son cortados dependiendo de la longitud que se desee y transportados hasta bandas donde se recoge el producto final.

En ocasiones, de acuerdo a las funciones que vaya a tener el perfil, estos elementos pueden necesitar agujeros a lo largo de su longitud, para ello, es importante que en la línea de perfilado exista una prensa de punzonamiento que se encargará de perforar los elementos siguiendo un patrón establecido. Esta máquina se puede colocar antes o después de la perfiladora.

El proceso de doblado en la perfiladora puede variar dependiendo de qué perfil se quiera obtener, por ejemplo para las secciones que se estudiarán en este trabajo como las correas (secciones "G") con doblez en las esquinas con ángulo de 90° se lo obtiene en tres pasos o estaciones; en cambio para un canal (sección "C"), con el mismo ángulo de doblez se lo realiza en dos pasos.

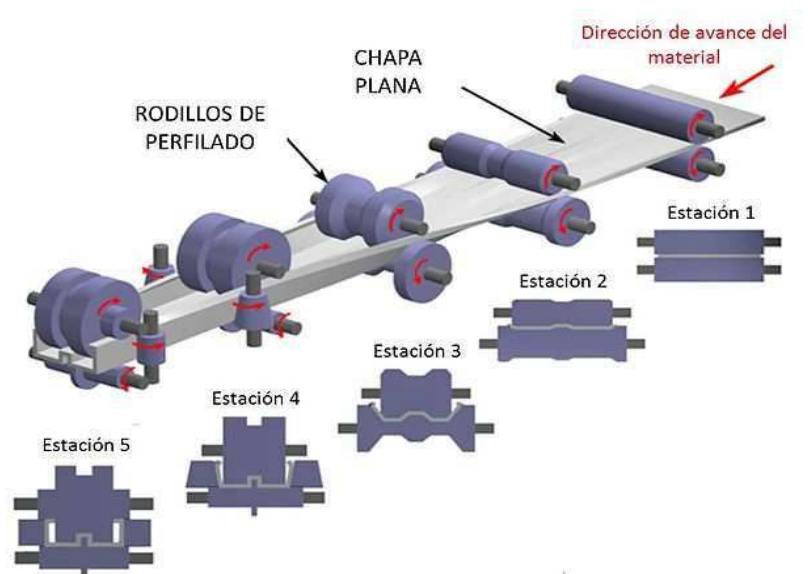


Figura 3. Representación esquemática del perfilado

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Perfilado>

2.3.2 Doblado de perfiles con Plegadoras.

Para este proceso se utiliza una máquina que cuenta con una matriz y un punzón. El punzón ejercer presión sobre la placa o fleje mientras que la matriz proporciona la forma deseada (ver Figura 4).

En el doblado de los perfiles intervienen los operadores porque son los que sostienen y manejan los flejes para colocarlos en la plegadora. A consecuencia de esto, un error en la manipulación de la materia prima puede presentar una desventaja en este mecanismo, ya que es posible que se pueda alabear la lámina de acero y así reducir la recuperación elástica del perfil.

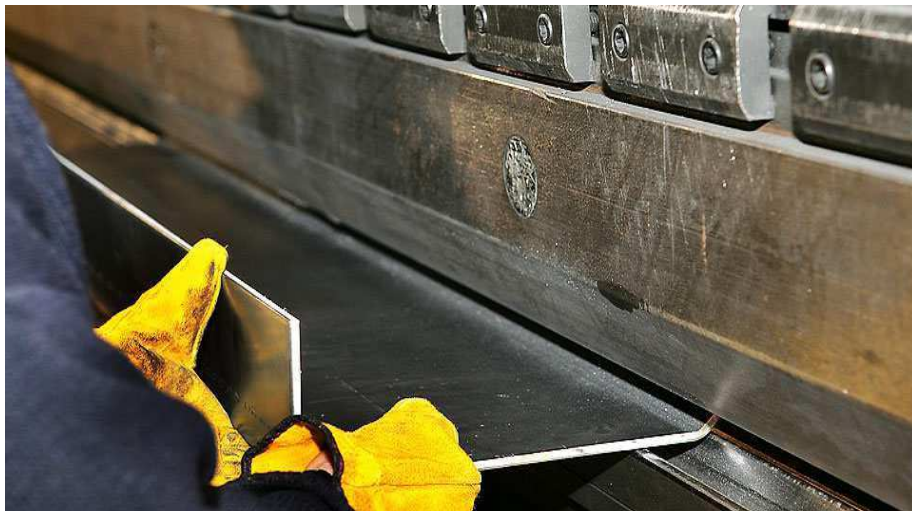


Figura 4. Doblado con plegadoras

Fuente: <http://www.polimetal.com.ar/resources/img/procesos/plegado-01.jpg>

2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS Y VARIABLES

Para el diseño de la capacidad a flexión de los perfiles doblados en frío es importante definir algunos de los términos que se utilizarán frecuentemente en el desarrollo de este trabajo de investigación.

2.4.1 Ala

Es la parte del perfil cuya dirección es paralela al eje “x”.

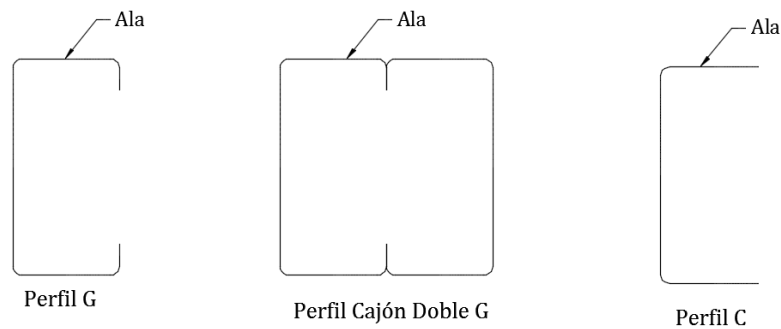


Figura 5. Ala de los Perfiles Doblados en Frío

2.4.2 Alma

Se conoce como alma, al tramo del perfil que se une a las alas y es paralela al eje “y”.

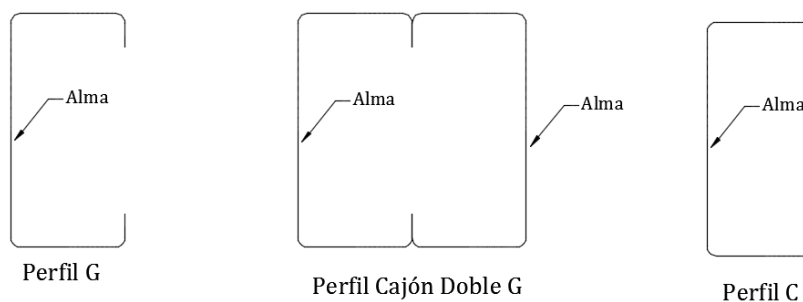


Figura 6. Alma de los Perfiles Doblados en Frío

2.4.3 Labios o Pestaña.

Es el tramo del perfil, que está unido en dirección perpendicular al plano del ala.

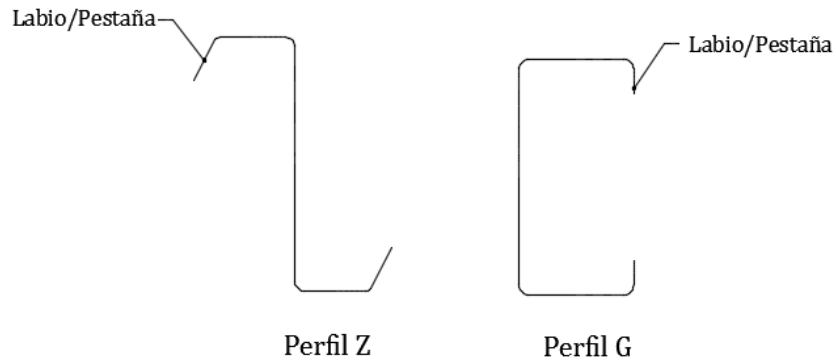


Figura 7. Labio de los Perfiles Doblados en Frío

2.4.4 Elementos con Alas a Compresión con bordes Rígidos o Parcialmente Rígidos.

Son los elementos cuya ala a compresión está rigidizada en sus bordes paralelos a la dirección de aplicación de la carga, ya sea por un alma, labio rígido, atiesador intermedio o algún otro tipo de rigidizador (Fig. 8). Se considera un elemento a compresión rígido si la separación entre los atiesadores o conectores es pequeña (Ver Fig. 9), la separación de los atiesadores son definidos por la Sección D1.3.

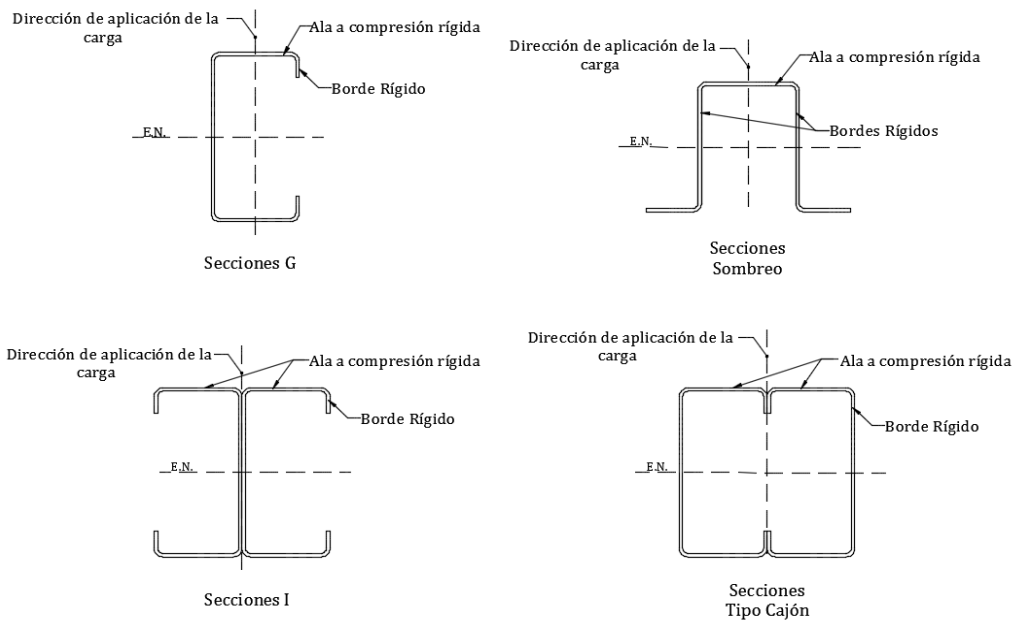


Figura 8. Elementos a Flexión Rigidizados Comunes con Compresión en el Ala Superior.

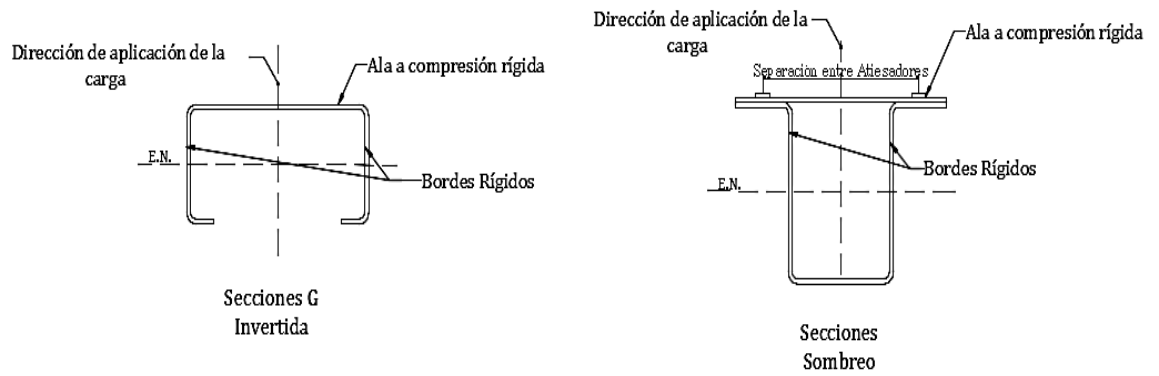


Figura 9. Otros Tipos de Elementos a Flexión Rigidizados con Compresión en el Ala Superior.

Cabe señalar que se considera como borde rígido, si el rigidizador de borde tiene suficiente rigidez a la flexión, de tal manera que la resistencia última del ala, es igual a la de un ala idéntica que se rigidiza por almas en ambos bordes longitudinales; y un elemento de compresión está parcialmente rigidizado, si la rigidez a la flexión del rigidizador es insuficiente para permitir la resistencia última del ala para igualar la de un ala idéntica rigidizada por almas en ambos bordes longitudinales (Fig. 10) (Desmond, PekÖz, & G., 1980).

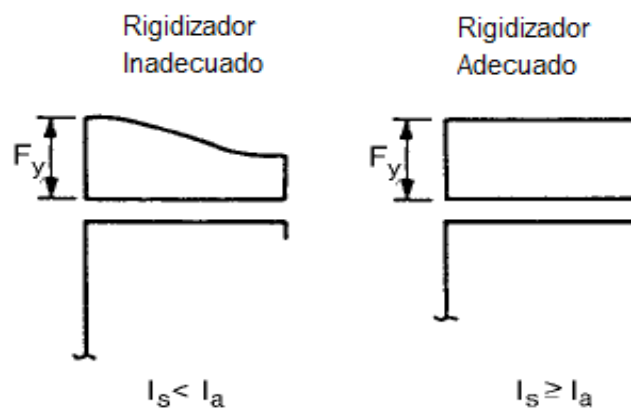


Figura 10. Rigidizadores de Borde

Fuente: Cold-Formed Steel Desing (Wei-Wen Yu P. P., 2000, pág. 132)

I_s = Momento de inercia total del rigidizador alrededor del eje centroidal paralelo al elemento rígido (Ec.2.36).

I_a = Momento de inercia adecuado del rigidizador (Ec.2.37).

2.4.5 Elementos con Alas a Compresión No Rígidas.

Son los elementos cuya ala a compresión solo tienen un borde rígido paralelo a la dirección del esfuerzo.

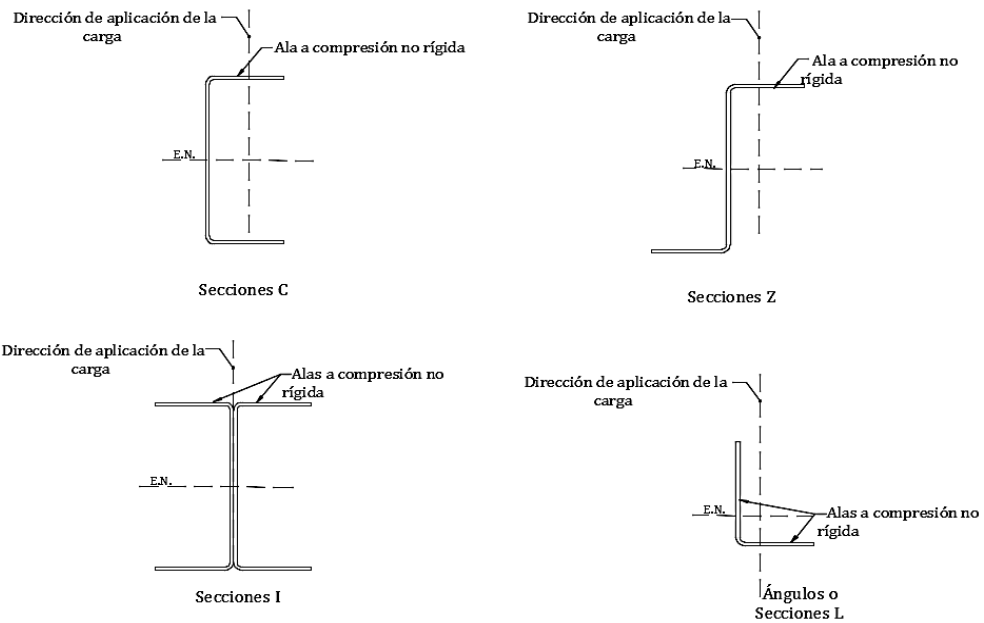


Figura 11. Elementos a Flexión No Rigidizados con compresión en el ala superior.

2.4.6 Elementos a Compresión con Múltiples Rigidizadores.

Son elementos con rigidizadores o atiesadores paralelos a la dirección de la carga que se pueden colocar en el alma o entre un alma y un borde rígido.

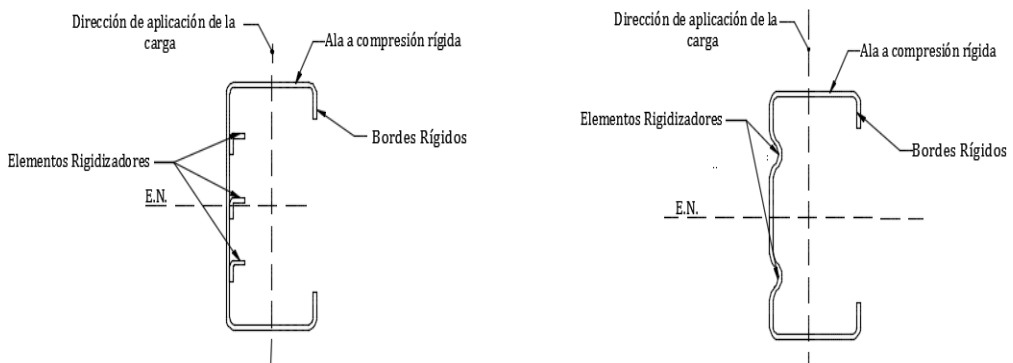


Figura 12. Elementos con Múltiples Rigidizadores.

2.4.7 Ancho plano, w.-

Se utiliza en el diseño de elementos estructurales conformados en frío, es el ancho que corresponde a la parte recta del ala y no incluye el doblado de las esquinas de la sección. El ancho efectivo de las secciones que se estudiará en este trabajo se calculan con las siguientes expresiones:

Elementos Rigidizados:

Correas y Cajones (2G): $w = b_o - 2(R + t)$ (2.1)

Elementos No Rigidizados:

Canales: $w = b_o - (R + t)$ (2.2)

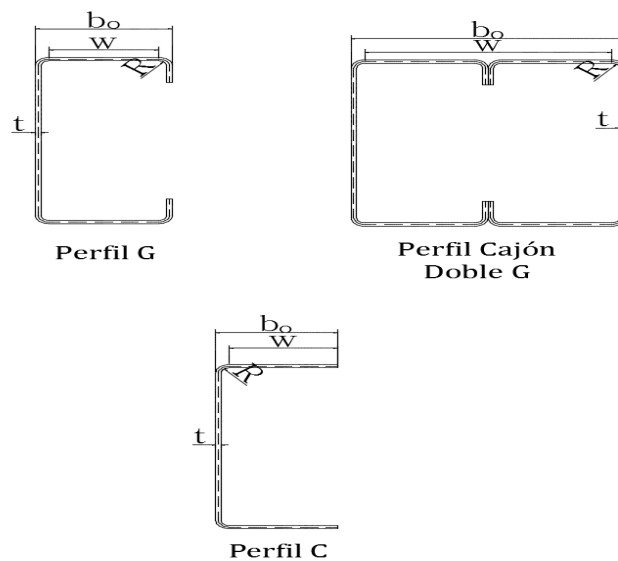


Figura 13. Ancho plano w, para perfiles (a) Con Borde Rígido y (b) Borde No Rígido

2.4.8 Dimensiones efectivas de los perfiles.

Son las dimensiones reducidas de la sección que realmente aportan a la resistencia a flexión del elemento. En la figura 14, se puede observar las dimensiones efectivas de varios perfiles entre ellos los anchos efectivos del ala (b_e), los anchos efectivos para el alma (b_{e1} y b_{e2}) y la sección efectiva del labio (d_s). Los tramos sombreados en las secciones son las porciones del perfil no efectivas.

El cálculo de las dimensiones efectivas de los perfiles se detalla en la Sección 2.5 de este trabajo.

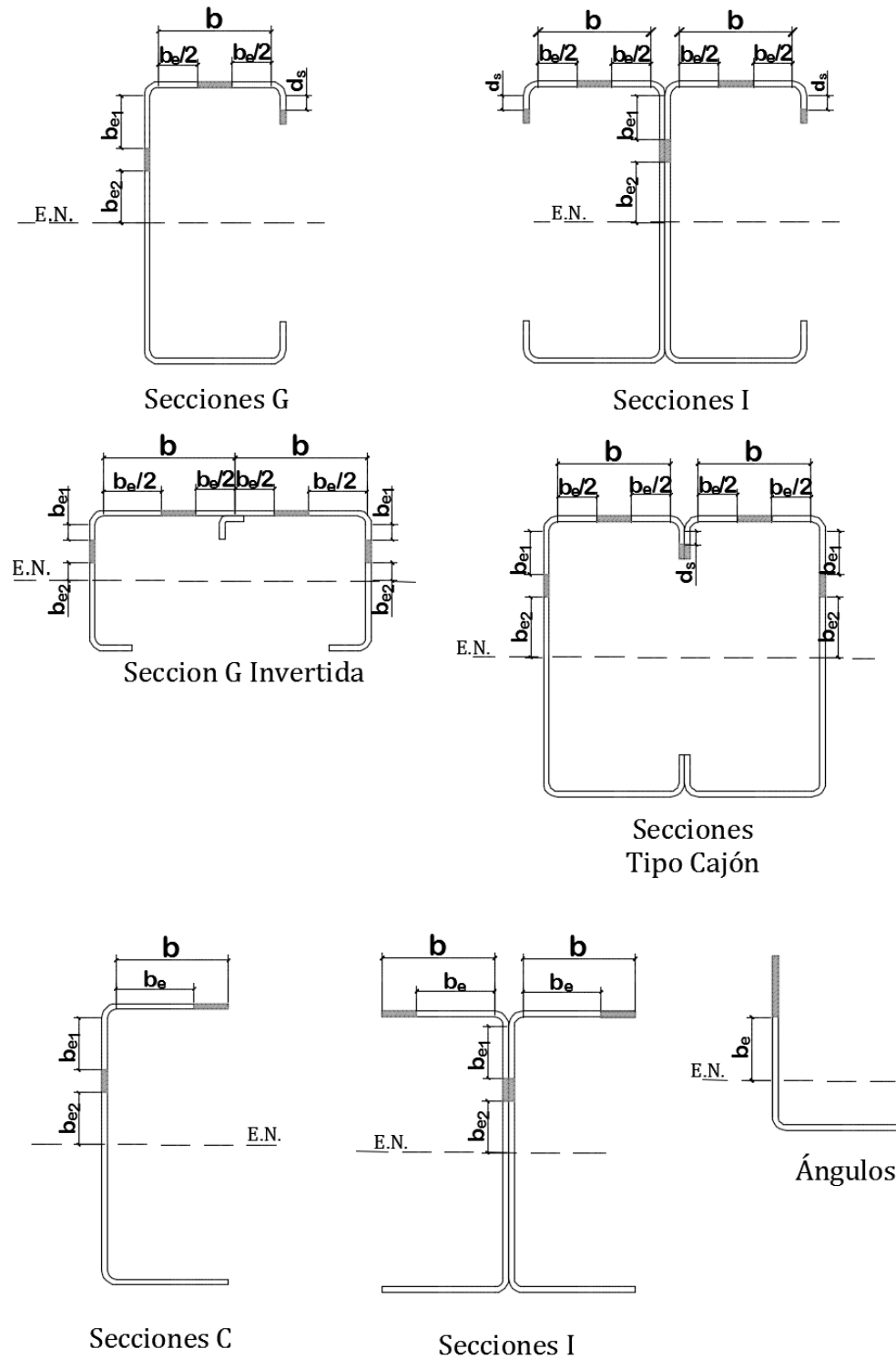


Figura 14. Anchos efectivos de los Perfiles Doblados en Frío

2.4.9 Secciones simétricas con respecto a un punto.-

Son las secciones que poseen simetría con respecto a un solo punto que por lo general coincide con el centroide de la sección, como es el caso de las secciones Z.

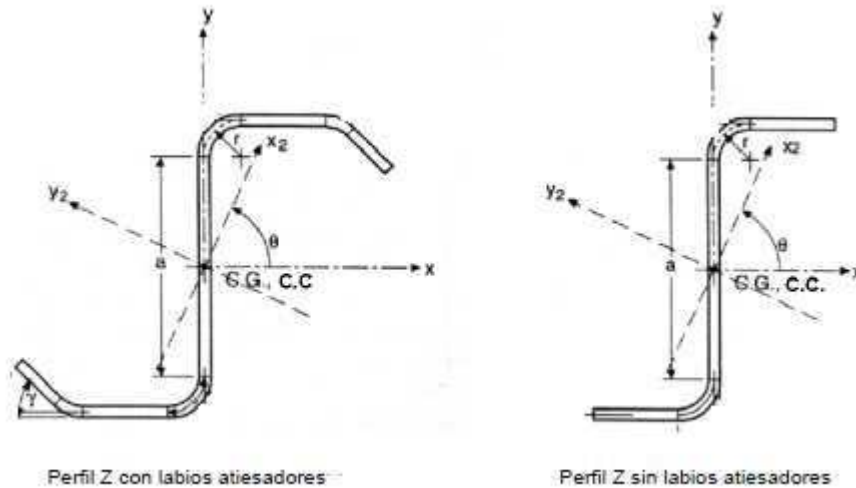


Figura 15. Secciones simétricas con respecto a un punto.

Fuente: Modificado de Diseño Básico De Perfiles Laminados En Frío (Peña & Paredes, 13)

2.4.10 Secciones simétricas simples.-

Son aquellas secciones que presentan simetría con respecto a un solo eje, como las secciones C y secciones G.

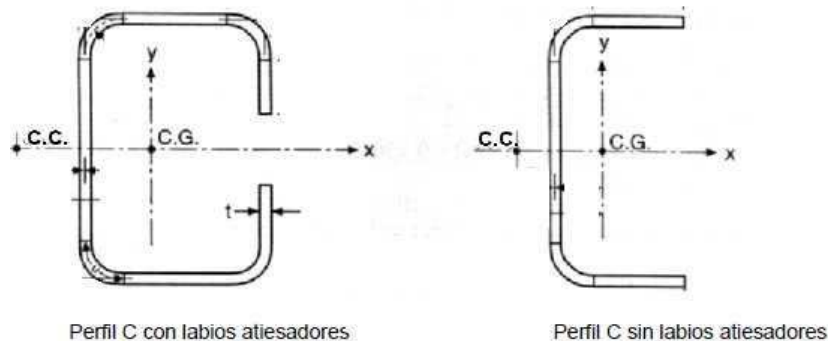


Figura 16. Secciones simétricas con respecto a un eje

Fuente: Modificado de Diseño Básico De Perfiles Laminados En Frío (Peña & Paredes, 13)

2.4.11 Secciones con doble simetría.-

Son aquellas secciones que son simétricas con respecto a dos ejes, por ejemplo las secciones tipo cajón (Fig. 17).

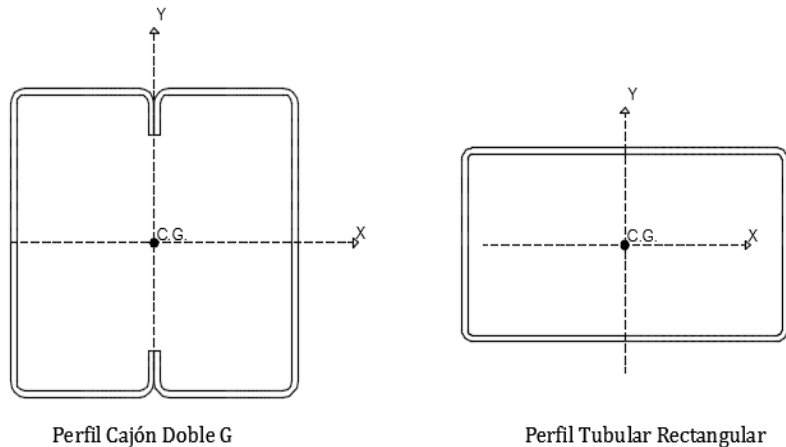


Figura 17. Secciones con doble eje de Simetría.

2.4.12 Coeficiente de Pandeo.-

Este valor varía dependiendo de que parte de las secciones vayamos a analizar.

- Alma:
 - Almas bajo gradiente de esfuerzo, si los esfuerzos a los extremos del ala f_1 está en compresión y f_2 en tensión:

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad (2.3)$$

$$\psi = \left| \frac{f_2}{f_1} \right| \quad (2.4)$$

$$f_1 = f_y \left(\frac{y_t}{y_{cg}} \right) \quad (2.5)$$

$$f_2 = f_y \left(\frac{y_b}{y_{cg}} \right) \quad (2.6)$$

Dónde:

f_1 y f_2 = Esfuerzos calculados en función de la sección efectiva del perfil (Fig.18)

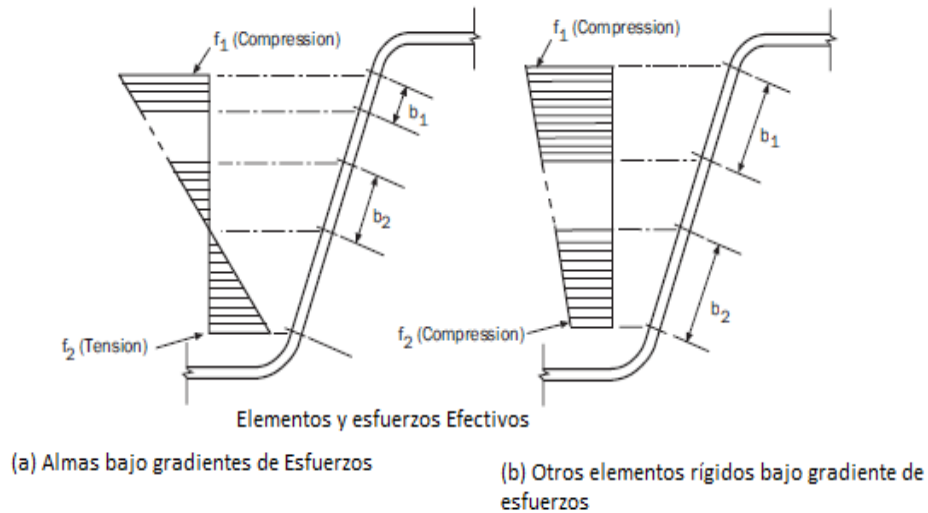


Figura 18. Esfuerzos en Alma de los Perfiles

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 21)

- Otros elementos rígidos bajo gradientes de esfuerzos si los esfuerzos f_1 y f_2 están en compresión.

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 - \psi) \quad (2.7)$$

○ *Alas:*

- Elementos Rigidizados:
 - Cajones: $k=4$
 - Correas: EL valor de se lo calcula de acuerdo a la tabla 1:

Tabla 1. Determinación del coeficiente de pandeo, k.

Borde Rígido de Labio Simple ($140^\circ \geq \theta \geq 40^\circ$)	
$D/w \leq 0.25$	$0.25 < D/w \leq 0.8$
$k = 3.57(R_I)^n + 0.43 \leq 4$	$k = \left(4.82 - \frac{4D}{w}\right) R_I^n + 0.43 \leq 4$

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 27)

Dónde: $n = \left(0.582 - \frac{w/t}{4S}\right) \geq \frac{1}{3} \quad (2.8)$

- Elementos No rigidizados:
 - Canales: $k= 0.43$
 - *Labio*: La tabla 1 también aplica para el cálculo del coeficiente de pandeo, k , para el labio de los perfiles G (correas).

2.5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS SECCIONES DE LOS PERFILES DOBLADLADOS EN FRÍO

Las propiedades geométricas de los perfiles a estudiarse en este trabajo son calculadas con las fórmulas proporcionadas en el Manual de Diseño de las Especificaciones AISI 1996. Las expresiones presentadas por la especificación fueron obtenidas a partir del método lineal, ya que este procedimiento considera que los elementos de área del perfil son reemplazados por elementos de línea ya sean estos curvos o rectos a través de la línea media de la lámina de acero.

A continuación se define algunas de las propiedades de los perfiles doblados en frío que no se encuentran con facilidad en la literatura del medio, como:

2.5.1 Constante de Torsión o Alabeo, C_w .

Esta propiedad mide la resistencia del perfil estructural sometido a torsión no uniforme. Es usado para el cálculo del momento resistente por pandeo lateral-torsional en vigas que no están arriostradas lateralmente (Sección 3.2.2.1). Las ecuaciones que corresponden a las propiedades de las secciones de los perfiles que se estudiarán son las siguientes:

- *Secciones Abiertas*:

$$C_w = \frac{\bar{a}^2 \bar{b}^2 t}{12} \left[\frac{2\bar{a}^3 \bar{b} + 3\bar{a}^2 \bar{b}^2 + \alpha \xi}{6\bar{a}^2 \bar{b} + (\bar{a} + 2\bar{c}\alpha)^3 - 24\bar{a}\bar{c}^2 \alpha} \right] \quad (2.9)$$

Donde:

t = Espesor del perfil

Canales (C): $\alpha = 0$

Correas (G): $\alpha = 1$

$$\bar{a} = h_o - t \quad (2.10)$$

$$\bar{b} = b_o - \left(\frac{t}{2} + \frac{\alpha t}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$\bar{c} = \alpha \left(D - \frac{t}{2} \right) \quad (2.12)$$

$$\xi = 48\bar{c}^4 + 112\bar{b}\bar{c}^3 + 8\bar{a}\bar{c}^3 + 48\bar{a}\bar{b}\bar{c}^2 + 12\bar{a}^2\bar{c}^2 + 12\bar{a}^2\bar{b}\bar{c} + 6\bar{a}^3\bar{c} \quad (2.13)$$

- *Secciones Cajón:* Debido a que las secciones en cajón tienen mayor resistencia a la torsión, se desprecia la constante torsional C_w .

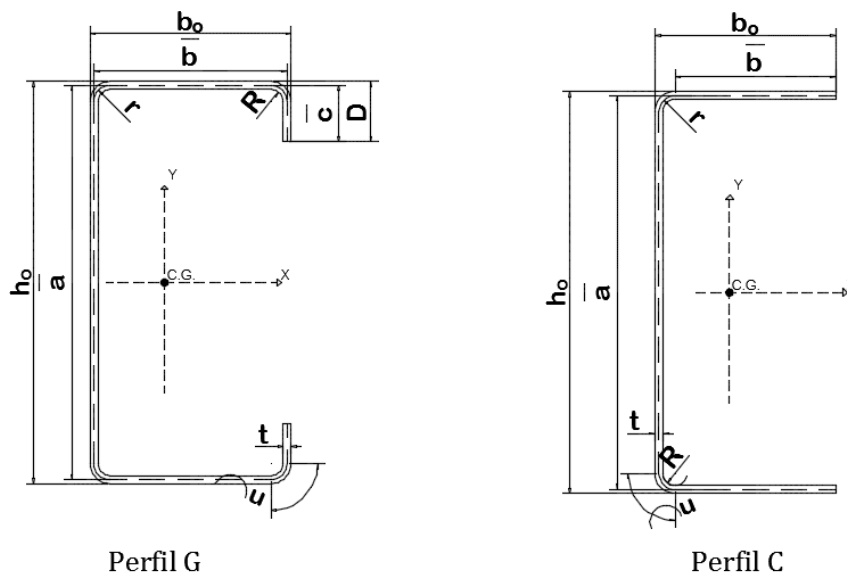


Figura 19. Dimensiones de Perfiles G y Perfiles C para C_w

2.5.2 Constante Torsional de St. Venant, J.-

Es la propiedad que mide la resistencia del elemento sometido a torsión pura o uniforme. Se utiliza en el cálculo de momento resistente a pandeo lateral-torsional para vigas sin arrojamiento lateral. Las fórmulas que se aplican para los perfiles en estudio son:

Secciones Abiertas:

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2(b + u) + 2\alpha(c + u)] \quad (2.14)$$

Donde:

t = espesor del perfil

Canales (C): $\alpha = 0$

Correas (G): $\alpha = 1$

$$a = h_o - (2r + t) \quad (2.15)$$

$$b = b_o - \left(r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \right) \quad (2.16)$$

$$c = \alpha \left(D - \left(r + \frac{t}{2} \right) \right) \quad (2.17)$$

$$r = R + t/2 \quad (2.18)$$

r = Radio de Giro medido a la Línea Central el Espesor del Perfil.

$$u = 1.57r \quad (2.19)$$

u = Longitud de Arco de las Esquinas del Perfil

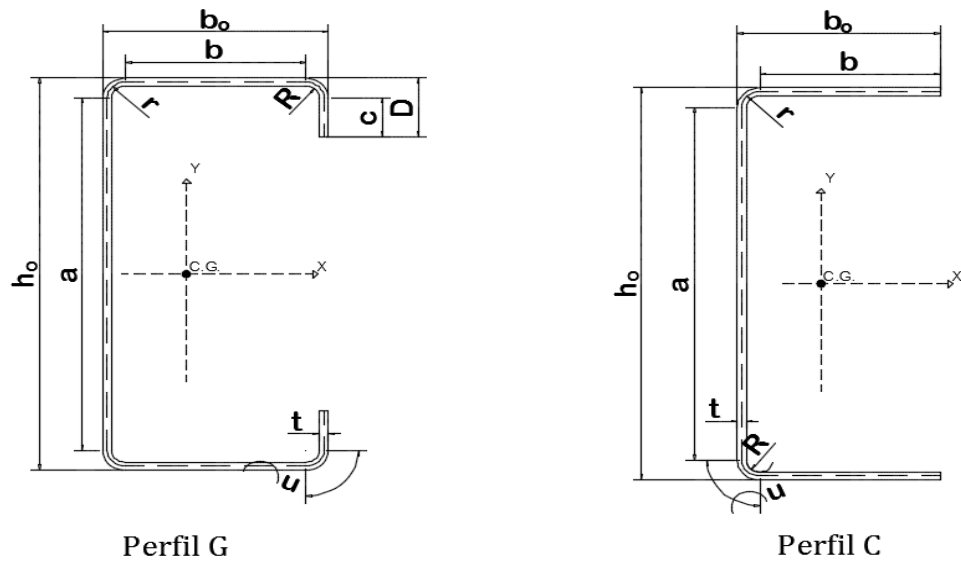


Figura 20. Dimensiones Secciones C y Secciones G para J.

Secciones Tipo Cajón:

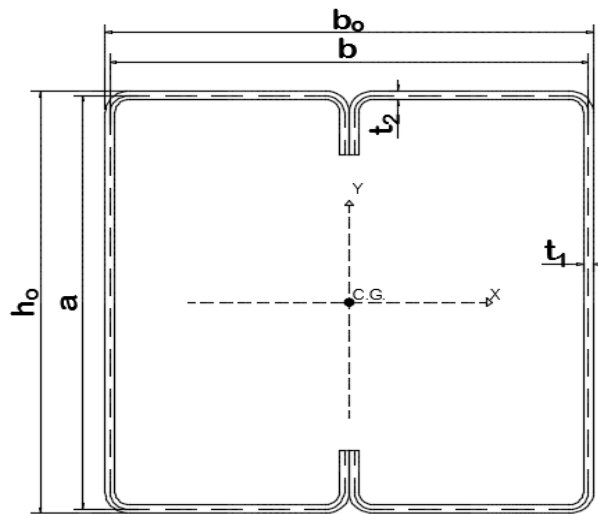
$$J = \frac{2(ab)^2}{(a/t_1) + (b/t_2)} \quad (2.20)$$

$$a = h_o - t \quad (2.21)$$

$$b = b_o - t \quad (2.22)$$

t_1 = espesor de las alas del perfil

t_2 = espesor de las almas del perfil



Perfil Cajón Doble G

Figura 21. Dimensiones Sección Cajón para J

Las propiedades geométricas básicas, tales como: Área (A), Momentos de Inercia (I), Módulo de Sección (S), etc. de las secciones C, G, y Doble G encuentran en el Anexo 1.

2.6 LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES DIMENSIONALES

Para determinar si las dimensiones de los perfiles doblados en frío son las adecuadas para el cálculo del diseño a flexión, las especificaciones del AISI 2007 en la Sección B establece las limitaciones que se exponen a continuación.

2.6.1 RELACIÓN ANCHO PLANO-ESPESOR, w/t .

La relación entre el ancho plano y el espesor de los elementos conformados en frío que se estudiarán en este texto se determinarán de acuerdo a lo siguiente:

- a) Elementos a compresión rígidos que tienen un borde longitudinal conectado a un alma o ala (ver fig. 22), el otro rígido por:
 - i) Labio/pestaña Simple, $w/t \leq 60$
 - ii) Otro tipo de rigidizador,
 - (1) Cuando $I_s < I_a$, $w/t \leq 60$
 - (2) Cuando $I_s \geq I_a$, $w/t \leq 90$, donde:
 - I_s = Momento de inercia total del atiesador alrededor del eje centroidal paralelo al elemento rígido (Ec.2.36).
 - I_a = Momento de inercia adecuado del atiesador, de modo que cada componente del elemento se comportará como una pieza rígida (Ec.2.37).
- b) Elementos a compresión Rígidos con ambos bordes longitudinales conectados a otros elementos rígidos, $w/t \leq 500$
- c) Elementos a compresión No Rígidos, $w/t \leq 60$

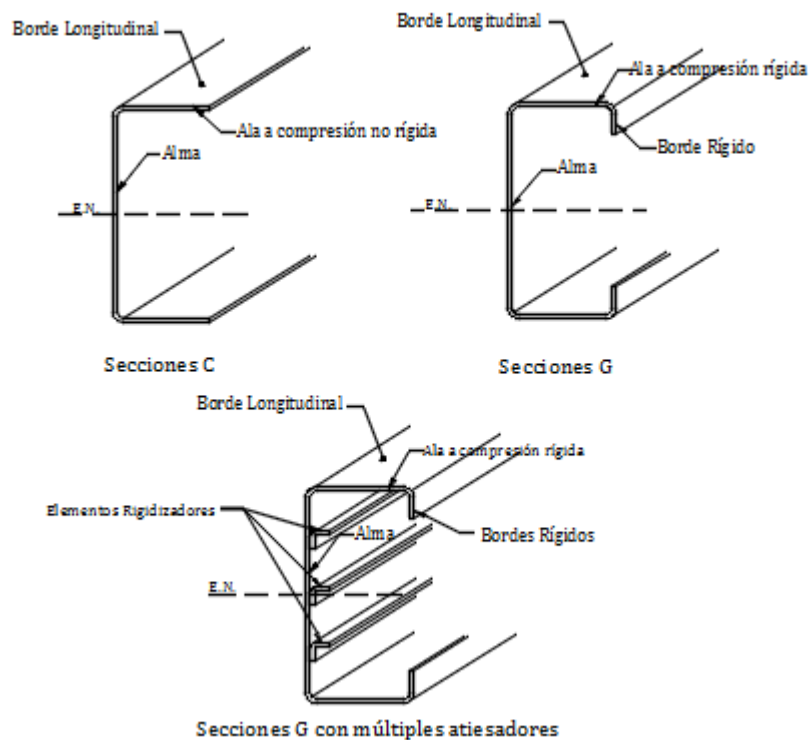


Figura 22.Elementos a Flexión con un ala a compresión.

2.6.2 RELACIÓN MÁXIMA ALTURA DEL ALMA - ESPESOR, h/t .

Para secciones a flexión con almas no reforzadas, es decir, no poseen un elemento que le aporte rigidez al alma del elemento, la relación entre la altura del perfil y su espesor no debe exceder a 200.

2.6.3 ANCHO EFECTIVO PARA ELEMENTOS A COMPRESIÓN, b .

2.6.3.1 Elementos rigidizados uniformemente comprimidos

El ancho efectivo b se calcula de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- a. Si $\lambda \leq 0.673$ $b = w$
- b. Si $\lambda > 0.673$ $b = \rho w$

Donde:

w = ancho plano (ver Sección 2.4 (g))

$$\rho = \text{factor de reducción, } \rho = \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} \quad (2.23)$$

$$\lambda = \text{factor de esbeltez, } \lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad (2.24)$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (2.25)$$

Dónde:

k = Coeficiente de Pandeo (ver Sección 2.4 (l))

E = Módulo de elasticidad del acero.

t = Espesor del elemento rígido a compresión.

μ = Relación de Poisson del acero, $\mu = 0.3$.

f : esfuerzo de compresión para elementos a flexión que se determina de acuerdo a:

(1) *Iniciación de Fluencia*:

- Si la fluencia inicial ocurre en el borde a compresión del elemento, $f = F_y$.

- Si la fluencia inicial ocurre en el borde a tensión, el esfuerzo de compresión, f , se determina en base a $M_y = S_f F_y$.

(2) *Capacidad de reserva inelástica:*

- El esfuerzo compresión f , es el esfuerzo considerado en M_n determinado en base de la sección efectiva como se explica más adelante en la Sección 3.2.1.2.

(3) *Pandeo Lateral - Torsional:*

Para secciones abiertas f , es el esfuerzo F_c calculado de acuerdo al módulo de sección efectiva (Sección 3.2.2.1).

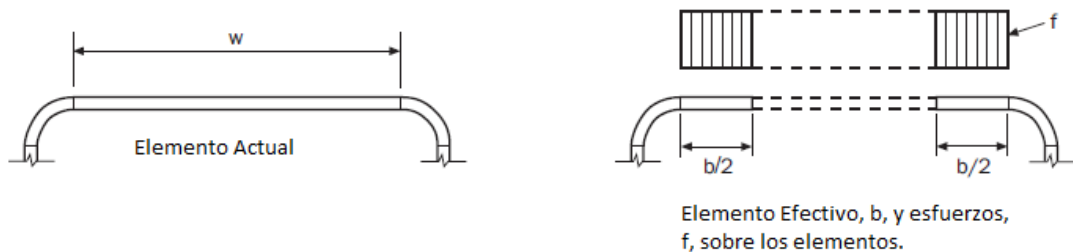


Figura 23. Ancho efectivo de elementos rígidos

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 19)

2.6.3.2 Elementos no rigidizados uniformemente comprimidos

El ancho efectivo, b , se determina de acuerdo a la Sección 2.6.3.1 excepto que el coeficiente de pandeo k , para este tipo de elementos es igual a 0.43.

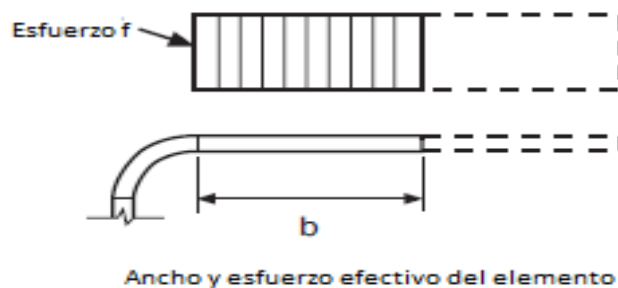


Figura 24. Elemento no rigidizado a compresión uniforme

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 23)

2.6.4 PERALTE DE ALMAS Y OTROS ELEMENTOS RÍGIDOS BAJO GRADIENTE DE ESFUERZOS.

a. Para almas bajo gradiente de esfuerzo, si los esfuerzos a los extremos del alma f_1 está en compresión y f_2 en tensión (Fig.26 (a)) calculados con las ecuaciones (2.5) y (2.6) respectivamente, los anchos efectivos se determinan con las siguientes expresiones:

- Para $h_o/b_o \leq 4$

$$b_1 = \frac{b_e}{(3 + \psi)} \quad (2.26)$$

$$b_2 = \frac{b_e}{2}, \text{ cuando } \psi > 0.236 \quad (2.27)$$

$$b_2 = b_e - b_1, \text{ cuando } \psi \leq 0.236 \quad (2.28)$$

La suma de $b_1 + b_2$ en este caso no debe exceder la porción en compresión del alma (y_c) calculado en base a la sección efectiva.

Dónde:

b_1 y b_2 = Anchos efectivos definidos en la figura 26

b_e = Ancho efectivo, b , determinado acorde a la Sección 2.6.3.1 de este trabajo, sustituyendo f por f_1 (Ec.2.5) y k calculado con la ecuación 2.3.

b_o y h_o = Ancho del ala a compresión y altura del alma respectivamente, de la sección real (Fig. 25).

ψ = Ver Ec. 2.4

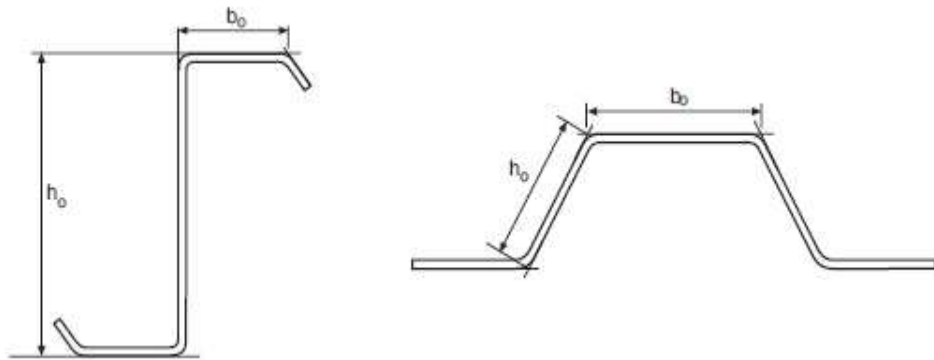


Figura 25. Dimensiones reales de elementos rígidos bajo gradiente de esfuerzos

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 22)

- Para $h_o/b_o > 4$

$$b_1 = \frac{b_e}{(3 + \psi)} \quad (2.29)$$

$$b_1 = \frac{b_e}{(1 + \psi) - b_1} \quad (2.30)$$

b. Para otros elementos rígidos bajo gradientes de esfuerzos si los esfuerzos f_1 y f_2 están en compresión (Fig. 26(b)) y el valor del coeficiente de pandeo k , calculado con la Ec. (2.7), las dimensiones efectivas b_1 y b_2 se calculan con las ecuaciones mostradas a continuación:

$$b_1 = \frac{b_e}{(3 + \psi)} \quad (2.31)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad (2.32)$$

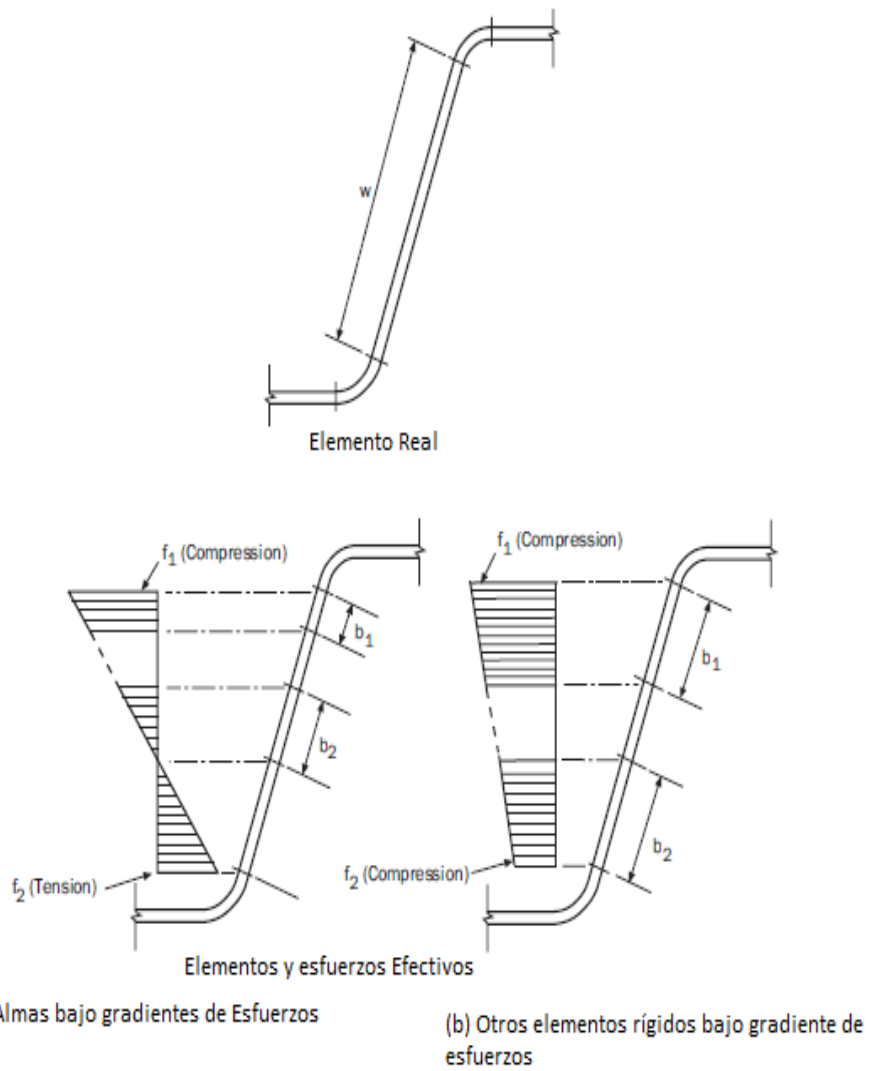


Figura 26. Ancho efectivo de almas para elementos rígidos

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 21)

2.6.5 PERALTE EFECTIVO DEL BORDE RIGIDIZADO DE ELEMENTOS A COMPRESIÓN UNIFORME CON LABIO SIMPLE, d_s .

Los perfiles con labio simple son aquellos perfiles donde el borde rigidizador solo tiene un dobléz como se muestra en la Figura 27(a). Los perfiles G y Z caen dentro de esta categoría.

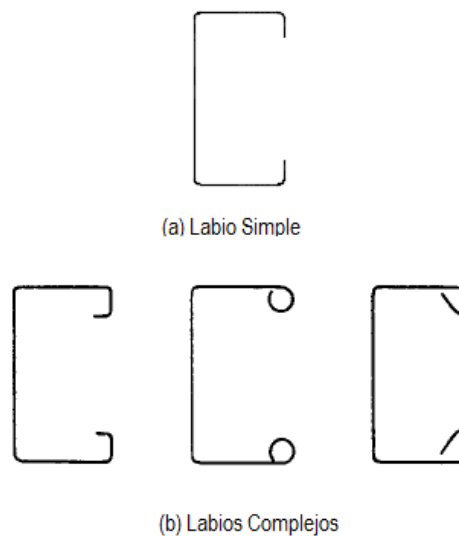


Figura 27. Rigidizadores de Bordes. (a) Labio Simple (b) Labios Complejos

Fuente: Cold-Formed Steel Desing. (Wei-Wen Yu P. P., 2000, págs. 128-129)

El peralte efectivo, d_s , para la pestaña o labio rigidizado se obtiene bajo las fórmulas planteadas a continuación:

3 Si $w/t \leq 0.328S$

$$I_a = 0 \quad (\text{No se necesita borde rígido})$$

$$d_s = d'_s$$

4 Si $w/t > 0.328 S$

$$d_s = d'_s(R_I) \quad (2.33)$$

Donde:

$$S = 1.28 \sqrt{E/f_y} \quad (2.34)$$

w = ancho plano (ver Sección 2.4 (g))

t = espesor de la sección

d_s = Peralte efectivo reducido del rigidizador (Fig. 24)

d'_s = Peralte efectivo del borde rígido. (Fig. 24)

$$(R_I) = \frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad (2.35)$$

Si R_I > 1, se permite utilizar la unidad.

I_s = Momento de inercia de la sección total del borde rígido alrededor del eje centroidal paralelo al elemento rígido. Para el cálculo de la inercia no se consideran las esquinas del elemento.

$$I_s = \frac{d^3 t \text{sen}^2 \theta}{12} \quad (2.36)$$

I_a = Momento de Inercia adecuado del atiesador, de modo que cada componente del elemento se comportan como un elemento rígido.

$$= 399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right] \quad (2.37)$$

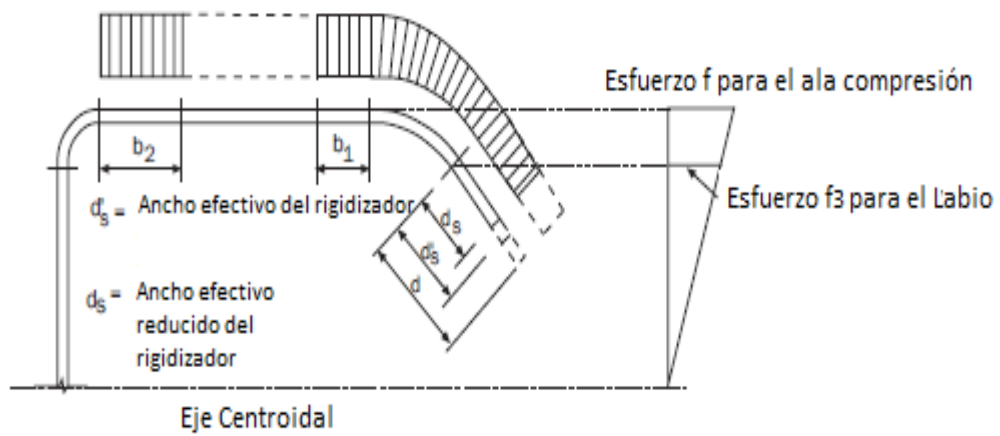
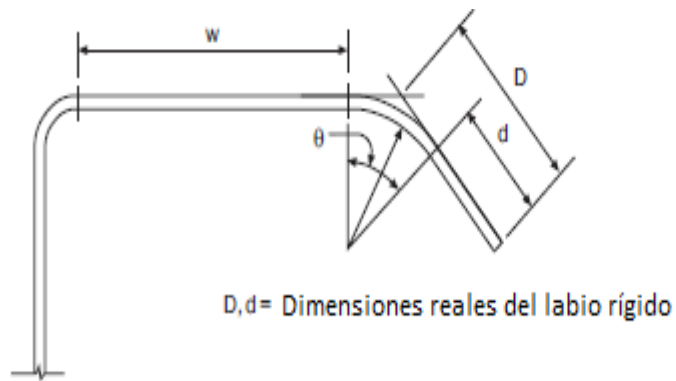


Figura 28. Peralte Efectivo del Labio Simple de Elementos con ala a Compresión Uniforme

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, pág. 27)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE DISEÑO A FLEXIÓN PARA PERFILES DOBLADOS EN FRÍO

3.1 MÉTODO DE DISEÑO POR FACTOR DE CARGA Y RESISTENCIA (LRFD)

El Diseño por Factor de Carga y Resistencia (LRFD) es el método de diseño que se ha venido aplicando últimamente para el cálculo estructural de las edificaciones, ya sea, para estructuras en Hormigón Armado y/o estructuras Metálicas, dejando detrás el método de Diseño por Esfuerzos Admisibles (ASD).

Este criterio se basa en utilizar factores de cargas y factores de resistencia, que bajo una adecuada aplicación de los mismos, no se supere ningún estado límite de la sección. Es decir, que la Carga Última (fuerzas mayoradas por factores de cargas) de los elementos sea igual o menor que la Resistencia Nominal (capacidad reducida por factores de resistencia).

Se define como Estado Límite a *“la condición ante la cual un elemento estructural bajo carga se ve afectado a tal grado que deja de ser seguro para los ocupantes de la estructura, o dicho elemento deja de desarrollar la función para la cual fue diseñado”* (Peña & Paredes).

En efecto, el uso del método de diseño por LRFD toma en cuenta factores que ayudan a dar una mejor afinación al diseño de los elementos, en comparación al método por ASD. De modo que, se crea menor incertidumbre al momento de diseñar la estructura con este criterio.

A manera de ilustrar y resumir el método de diseño por estados límites o LRFD, y cumplir las disposiciones de seguridad de la especificación AISI 2007 se presenta la siguiente expresión matemática:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (3.1)$$

Donde,

R_n = Resistencia nominal

Q_i = Efectos de carga

ϕ = Factor de resistencia correspondiente a R_n

γ_i = Factor de carga correspondiente a Q_i

ϕR_n = Resistencia de diseño

$\sum \gamma_i Q_i$ = Resistencia requerida para las cargas factorizadas

3.1.1 RESISTENCIA NOMINAL, R_n

La resistencia nominal R_n , es la capacidad que tiene el elemento de resistir los efectos de pandeo, fluencia del acero, etc., causados por momento flector, fuerza axial o fuerza cortante. Se determina bajo criterios de diseño establecidos, tomando en cuenta las propiedades de la sección y del material que está compuesto.

3.1.2 FACTORES DE COMBINACIONES DE CARGAS

Para el método LRFD, la especificación AISI en la Sección A5.1.2, determina para los perfiles doblados en frío, se tiene las siguientes expresiones de combinación de carga:

$$1.4D + L \quad (3.2)$$

$$1.2D + 1.6L + 0.5 (L_r \text{ ó } S \text{ o } R_r) \quad (3.3)$$

$$1.2D + 1.6 (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R_r) + (0.5L \text{ ó } 0.8W) \quad (3.4)$$

$$1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5 (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R_r) \quad (3.5)$$

$$1.2D + 1.5E + 0.5L + 0.2 S \quad (3.6)$$

$$0.9D + (1.3W \text{ ó } 1.5E) \quad (3.7)$$

Donde,

D = Carga Muerta

E = Carga Sísmica

L = Carga Viva debido al tipo de ocupación

L_r = Carga viva para cubierta

R_r = Carga de Lluvia, excepto por estancamiento

S = Carga de Nieve

W = Carga de Viento

3.1.3 FACTOR DE RESISTENCIA, ϕ

Es un valor adimensional que toma en consideración las propiedades de los materiales (esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad, etc.), propiedades de la sección transversal (momento de inercia, área, peralte, etc.) y por último suposiciones de diseño, que afectan a la resistencia real del elemento. Por lo tanto, el factor de resistencia es el que reduce los efectos de la resistencia nominal, y es menor que la unidad.

3.2 CAPACIDAD A FLEXIÓN

Los estados límites de las secciones de acero doblado en frío se deben a características propias del elemento que influyen en la resistencia a flexión, como: la resistencia por fluencia del acero (M_y), la resistencia por pandeo lateral-torsional y por pandeo distorsional de la sección.

Para el diseño de los elementos a flexión se aplicará el método LRFD bajo las limitaciones proporcionadas por el AISI (American Iron and Steel Institute), el cual propone que se debe satisfacer la siguiente expresión:

$$M_u \leq \phi_b M_n \quad (3.8)$$

Donde:

M_u = resistencia a flexión requerida o momento a flexión calculado a partir de los factores de carga para LRFD.

ϕ_b = factor de reducción de resistencia a flexión

=0.95 para elementos a flexión con alas a compresión rígidas o parcialmente rígidas.

=0.90 para elementos a flexión con alas de compresión no rígidas; resistencia nominal al pandeo lateral-torsional; resistencia nominal al pandeo distorsional, vigas que tienen un ala fija entre el piso o cubierta (Fig.29); y vigas que tienen un ala fija a un sistema de piso de junta permanente

M_n = resistencia a flexión nominal o momento establecido por las 5 consideraciones siguientes:

1. Resistencia de la Sección
2. Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional
3. Resistencia al Pandeo Distorsional

4. Resistencia de Vigas que tienen un ala fija entre el piso o cubierta (Fig. 29)
5. Resistencia de Vigas que tienen un ala fija a un sistema de piso de junta permanente

$\phi_b M_n$ = Resistencia de diseño a flexión

En este trabajo SOLO se analizarán y estudiarán las tres primeras consideraciones mencionadas para el diseño a flexión de los perfiles doblados en frío.

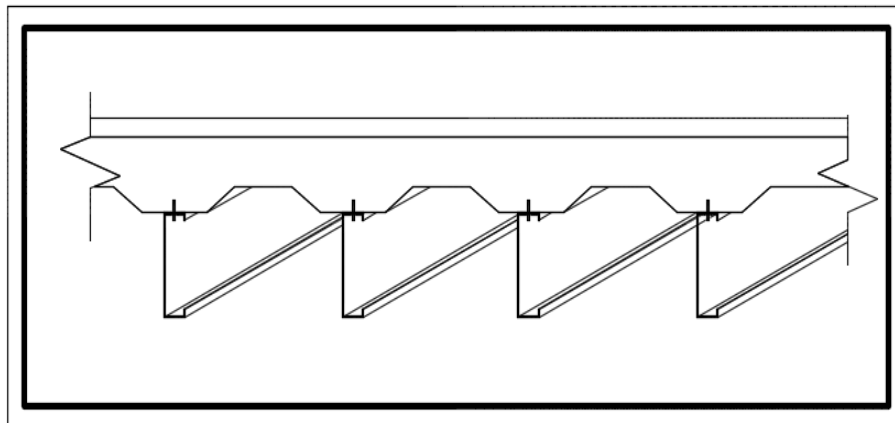


Figura 29. Vigas con un ala fija entre el piso o cubierta

3.2.1 RESISTENCIA DE LA SECCIÓN

Las especificaciones del AISI 2007 para perfiles doblados en frío, en la sección C3.1.1 incorporan dos procedimientos para determinar la resistencia a flexión, los cuales se detallan a continuación.

3.2.1.1 PROCEDIMIENTO I: INICIO DE FLUENCIA

Como se indicó en la sección 3.2 de este trabajo, la flexión de un elemento de acero doblado en frío está íntimamente relacionada con la resistencia de fluencia del acero. Para este caso, el momento nominal (M_n) es igual al momento efectivo de fluencia (M_y), de acuerdo a las especificaciones del AISI 2007.

El momento de fluencia (M_y) se produce cuando una de las fibras extremas del elemento llega primero a la fluencia y, por ende, depende de la posición del eje neutro de la sección transversal del perfil.

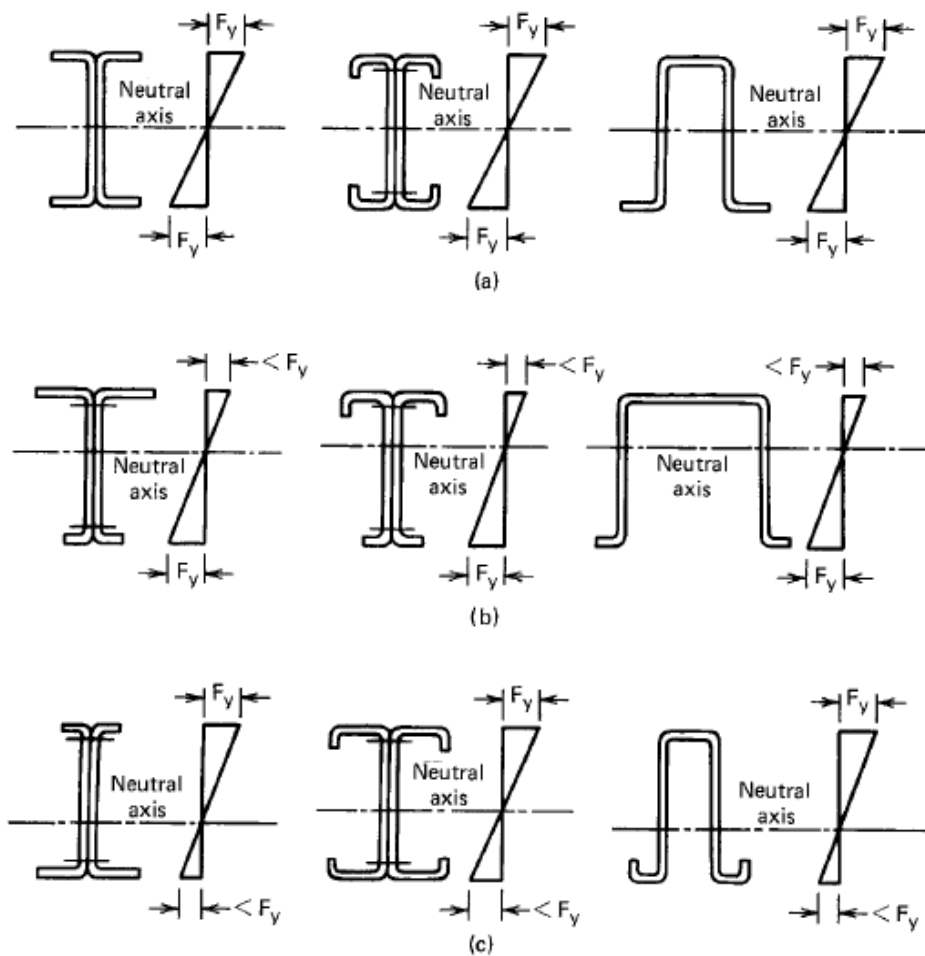


Figura 30. Distribución de esfuerzo de fluencia. (a) Secciones en equilibrio. (b) Eje neutro cerca al ala a compresión (Inicio de Fluencia en ala a Tensión). (c) Eje neutro cerca al ala a Tensión (Inicio de Fluencia en ala a Compresión).

Fuente: Cold Formed Steel Design, (Wei-Wen Yu, 2000, pág. 149)

El cálculo del momento de fluencia (M_y) se obtiene de la sección C3.1.1(a) de las Especificaciones AISI (2007) para acero doblado en frío es la siguiente:

$$M_y = S_e * F_y \quad (3.9)$$

Donde;

F_y = Esfuerzo de fluencia de diseño

S_e = Módulo de Sección Elástico de la sección efectiva calculado a la fibra extrema a compresión o tensión, $S_e = I_{xe} / y_{cge}$.

El valor de S_e se lo obtiene de acuerdo a la posición del eje neutro de la sección efectiva y depende de uno de los casos expuestos a continuación:

- a. Si el eje neutro de la sección de una viga se encuentra más próximo a la fibra a tensión (Fig. 30), la mayor concentración de esfuerzo por fluencia inicial se va a producir en el ala a compresión. El valor de y_{cg} (posición del eje neutro) estará en función de las dimensiones efectivas del perfil. El factor de esbeltez del ala a compresión (λ) (Ec. 2.24) y el ancho efectivo del ala a compresión (b) (Sección 2.6.3.1), se determinan de acuerdo la relación entre el ancho plano del ala a compresión y el espesor del perfil (w/t), Sección 2.6.1, el esfuerzo a compresión (f) en este caso es igual al esfuerzo de fluencia (F_y).
- b. Si el eje neutro de la viga está ubicada a la mitad de la altura de la sección transversal (Fig.30c) se recomienda usar el mismo criterio aplicado en el literal (a) de esta sección para el cálculo de y_{cg} .
- c. Si el eje neutro está más cercano a la fibra a compresión de la viga (Fig.30b), el mayor esfuerzo por fluencia inicial se da en el ala a tensión. El esfuerzo de compresión que se produce en este caso es menor al esfuerzo de tensión, y se calcula de acuerdo a la posición del eje neutro, este último depende del área efectiva de la

sección. Por lo tanto, para calcular el valor del área efectiva se debe conocer primero el esfuerzo a compresión, lo que dificulta el procedimiento. Sin embargo, se sugiere que las propiedades de las secciones se realicen mediante aproximaciones sucesivas.¹

Ejemplos del cálculo del momento a flexión por iniciación de fluencia se muestran en el capítulo 4 de este trabajo.

3.2.1.2 PROCEDIMIENTO II: CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA

Se define como Capacidad de Reserva Inelástica a *“la capacidad de carga de un elemento más allá de la fluencia inicial”* (Yener & Peköz, 1980).

Los perfiles doblados en frío aunque tiene grandes relaciones ancho-espesor superior a los límites del diseño plástico, pueden desarrollar capacidad inelástica. Usualmente se suponía que, a causa del pandeo local, la capacidad inelástica de estos perfiles doblados en frío no llegaba a la fluencia inicial (M_y) debido a que no podían desarrollar articulaciones plásticas; sin embargo, en pruebas realizadas por los investigadores Shifferaw y Schafer (2007) se demostró que las vigas con este tipo de elementos si alcanzaban la fluencia inicial y en ocasiones hasta la excedían.

La especificación AISI 2007, en el procedimiento II de la Sección C.3.1.1, señala que para el cálculo del momento flector nominal (M_n), la sección del perfil debe cumplir ciertos límites que están basados en la capacidad de reserva inelástica, y sólo se puede utilizar si satisfacen lo que se expresa a continuación:

- (1) El miembro no está sujeto a torsión ni a pandeo lateral, torsional o torsional-flexional.

¹ Texto citado del libro Cold-Formed Desing (Wei-Wen Yu P. P., 2000, pág. 150)

(2) El efecto del doblado en frío no se incluye al determinar el límite de fluencia F_y .

(3) La relación entre la profundidad de la porción comprimida del alma y su espesor no es mayor que λ_1 . Donde:

$$\lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{F_y/E}} \quad (3.10)$$

(4) El esfuerzo de corte debe ser menor que $0.35F_y$ por el área del alma, ht .

(5) El ángulo entre cualquier alma y la vertical no es mayor que 30° .

Entonces, si se comprueba que las cinco condiciones mencionadas se cumplen, la resistencia nominal a la flexión, M_n , no debe ser mayor que $1.25 S_e F_y$ (los valores de S_e y F_y determinados por el Procedimiento I), ni aquella que produzca una máxima deformación por compresión $\epsilon_{cu} = C_y \epsilon_y$, donde:

$$\epsilon_y = \text{Deformación de fluencia} = F_y/E \quad (3.11)$$

E = Módulo de elasticidad longitudinal

C_y = Factor de deformación por compresión determinado de la siguiente manera:

(a) Elementos A Compresión Rigidizados Sin Atiesadores Intermedios

$$C_y = 3 \quad \text{para } \frac{w}{t} \leq \lambda_1$$

$$C_y = 3 - 2 \left(\frac{\frac{w}{t} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \quad \text{para } \lambda_1 \leq \frac{w}{t} \leq \lambda_2$$

$$C_y = 1 \quad \text{para } \frac{w}{t} \geq \lambda_2$$

donde,

$$\lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{F_y/E}} \quad (3.12)$$

$$\lambda_2 = \frac{1.28}{\sqrt{F_y/E}} \quad (3.13)$$

(b) Elementos A Compresión No Rigidizados

- i. *Elementos de compresión no rigidizados bajo gradiente de tensión causando la compresión en un borde longitudinal y la tensión en el otro borde longitudinal (fig. 23b):*

$$\begin{aligned} C_y &= 3 && \text{para } \lambda \leq \lambda_3 \\ C_y &= 3 - 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_3}{\lambda_4 - \lambda_3} \right) && \text{para } \lambda_3 \leq \lambda \leq \lambda_4 \\ C_y &= 1 && \text{para } \lambda \geq \lambda_4 \end{aligned}$$

donde,

$$\lambda_3 = 0,43$$

$$\lambda_4 = 0,673 (1 + \psi) \quad (3.14)$$

$$\psi = \left| \frac{f_2}{f_1} \right|, \quad (3.15)$$

Donde f_1 y f_2 son tensiones a compresión y tracción respectivamente calculadas en base a la sección efectiva. (fig. 31)

- ii. *Elementos de compresión no rigidizados bajo gradiente de tensión que causan compresión en ambos bordes longitudinales (fig. 31a):*

$$C_y = 1$$

iii. Elementos de compresión no rigidizados a compresión uniforme:

$$C_y = 1$$

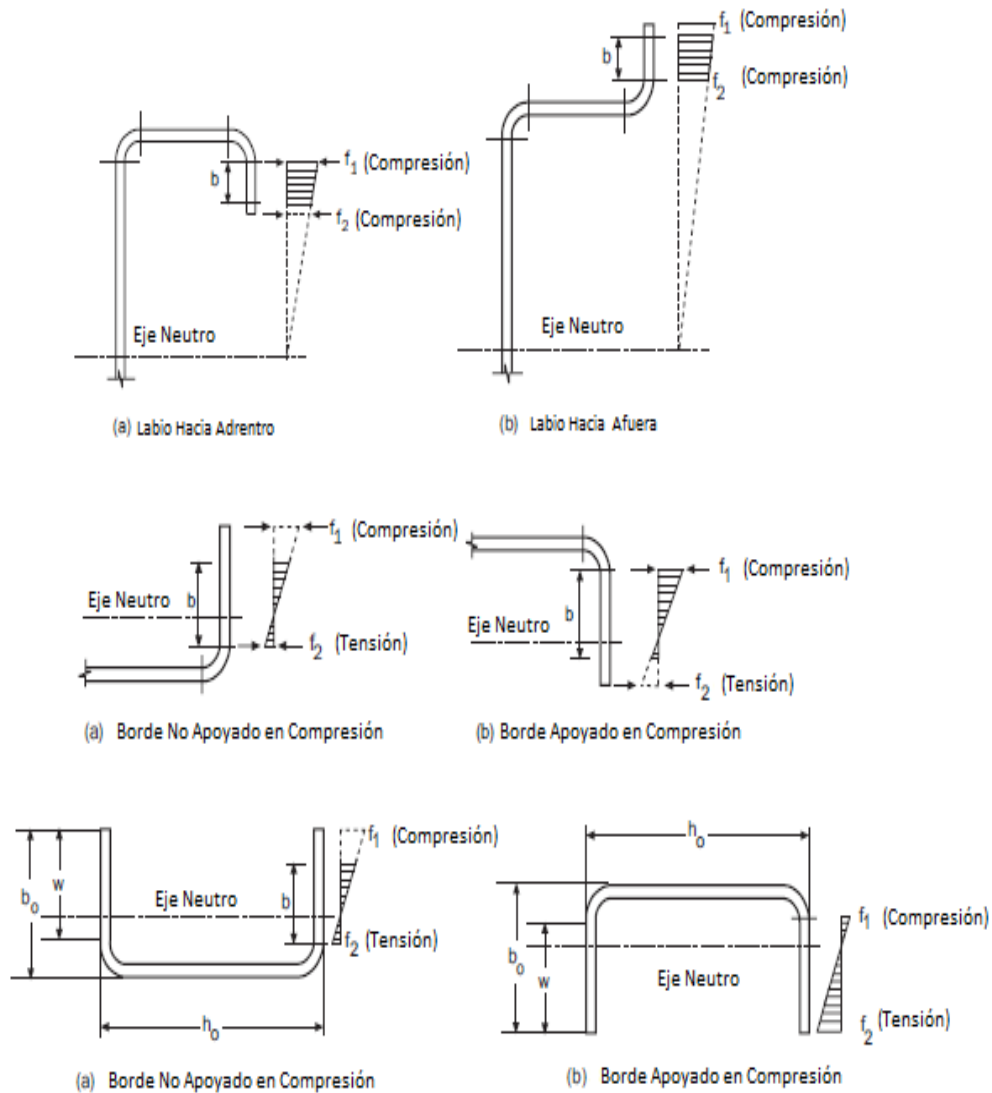


Figura 31. Elementos no Rígidos bajo Gradiente de Esfuerzos. (a) Ambos Bordes Longitudinales en Compresión. (b) Un Borde Longitudinal en Compresión y el otro Borde Longitudinal en Tensión. (c) Para Métodos Alternos

Fuente: (Copyright American Iron and Steel Institute, 2007, págs. 24-25)

(c) Elementos a compresión con rigidez múltiple y elementos a compresión con rigidizadores de borde

$$C_y = 1$$

El AISI 2007 propone limitaciones para la deformación por compresión, pero no limita a las deformaciones por tensión que se pueda producir en el elemento, en la siguiente gráfica (Fig.32) podemos apreciar mejor los límites para la deformación máxima a compresión.

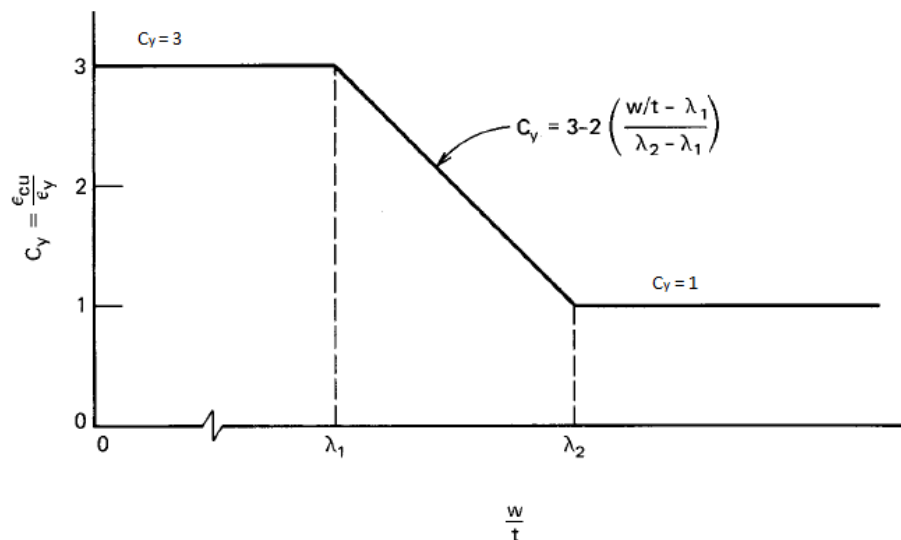


Figura 32. Factor C_y , para elementos a compresión rigidizados sin atiesadores intermedios

Fuente: Cold-Formed Steel Desing (Wei-Wen Yu P. P., 2000, pág. 179)

En función de la máxima deformación por compresión ϵ_{cu} permitida por la Especificación AISI 2007, la posición del eje neutro se puede determinar utilizando la ecuación (3.16) y el momento nominal M_n se puede definir con la ecuación (3.17) de este texto.

$$\int \sigma dA = 0 \quad (3.16)$$

$$\int \sigma_y dA = M_n \quad (3.17)$$

En donde, σ es el esfuerzo en la sección transversal.

Este procedimiento ha sido desarrollado por los investigadores Yener & Peköz, 1980, quienes hicieron experimentos y estudios con secciones en sombrero, determinando criterios y fórmulas que también son aplicables a perfiles de secciones abiertas, como: las correas G y canales C que se estudiarán en este trabajo.

El siguiente gráfico (Fig.33) muestra la distribución de esfuerzos de una sección en sombrero, y se puede observar que dependiendo de la posición del eje neutro los perfiles alcanzan la fluencia, ya sea en el ala a tensión o a compresión. Los valores de y_p , y_t , y_c , y_{cp} , y_{tp} , son las alturas al eje neutro para los esfuerzos a tensión o compresión y b_c , d , y b_t se calculan tomando en cuenta las dimensiones a la línea media del ala y alma del perfil.

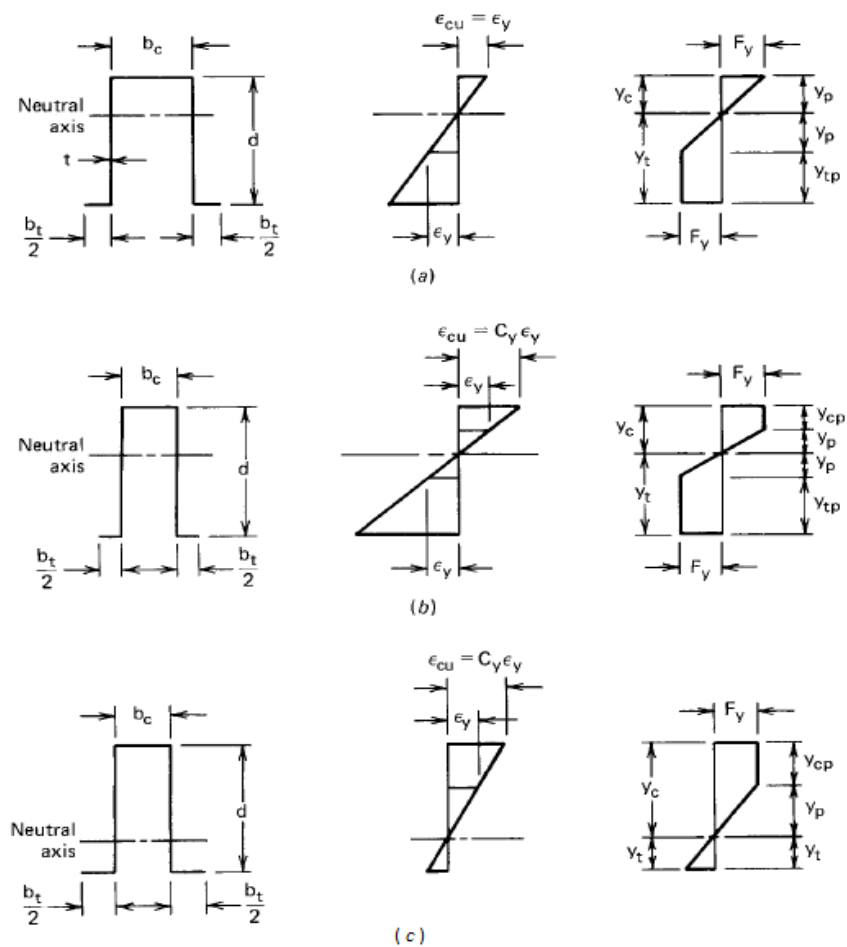


Figura 33. Distribución de esfuerzos en sección en momento nominal. (a) y (b) Con fluencia en el ala a Tensión. (c) No fluencia en el ala a Tensión.

Fuente: Cold-Formed Steel Desing (Wei-Wen Yu P. P., 2000, págs. 180-181)

Si las secciones del perfil producen fluencia en el ala a tensión, las fórmulas para determinar y_p , y_t , y_c , y_{cp} , y_{tp} , y M_n son las siguientes:

$$y_c = \frac{b_t - b_c + 2d}{4} \quad (3.18)$$

$$y_t = d - y_c \quad (3.19)$$

$$y_p = \frac{y_c}{\epsilon_{cu}/\epsilon_y} \quad (3.20)$$

$$y_{cp} = y_c - y_p \quad (3.21)$$

$$y_{tp} = y_t - y_p \quad (3.22)$$

$$M_n = F_y t \left[b_c y_c + 2y_{cp} \left(y_p + \frac{y_{cp}}{2} \right) + \frac{4}{3} (y_p)^2 + 2y_{tp} \left(y_p + \frac{y_{tp}}{2} \right) + b_y y_t \right] \quad (3.23)$$

En el caso de que la sección del perfil no experimente fluencia en el ala a tensión se utilizan las mismas fórmulas excepto para y_c , y M_n . Para y_c , se debe calcular con la siguiente ecuación cuadrática

$$y_c^2 \left(2 - \frac{1}{C_y} - C_y \right) + y_c (b_c + 2C_y d + C_y b_t) - (C_y d^2 + C_y b_t d) = 0 \quad (3.24)$$

El momento nominal M_n se determina con la ecuación (3.25) en caso de que se cumpla la siguiente condición $y_p > y_t$.

$$M_n = F_y t \left[b_c y_c + 2y_{cp} \left(y_p + \frac{y_{cp}}{2} \right) + \frac{2}{3} (y_p)^2 + \frac{2}{3} (y_t)^2 \left(\frac{\sigma_t}{F_y} \right) + b_y y_t \left(\frac{\sigma_t}{F_y} \right) \right] \quad (3.25)$$

En la ecuación (3.25) el valor de σ_t , es:

$$\sigma_t = \frac{F_y C_y y_t}{y_c} \quad (3.26)$$

El desarrollo de la aplicación de este método de diseño se lo muestra en el capítulo 4.

3.2.2 RESISTENCIA AL PANDEO LATERAL-TORSIONAL

Los perfiles doblados en frío sometidos a flexión pueden pandearse lateralmente. Esto, debido a que sus espesores son relativamente pequeños y pierden estabilidad al no estar arriostrados para desplazamientos laterales.

Para perfiles cuyo momento de inercia respecto a un eje perpendicular al plano es mucho mayor al que corresponde al otro eje principal, el pandeo lateral puede presentarse mucho antes que los esfuerzos debidos a la flexión alcancen el límite de fluencia. Este modo de pandeo es crítico, sobretodo en perfiles donde el centro de cortante no coincide con el centroide de la sección y es denominado pandeo lateral-torsional ya que presenta una deformación lateral y torcimiento simultáneo.

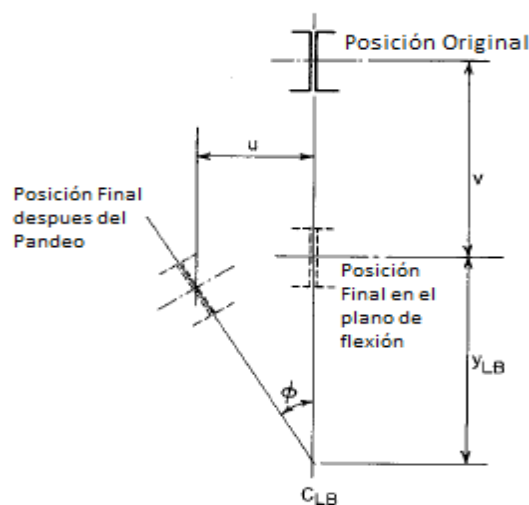


Figura 34. Posiciones de la viga sometida a pandeo lateral.

Fuente: Cold-Formed Steel Desing (Wei-Wen Yu P. P., 2000, pág. 197)

En esta sección se proporcionará los criterios de diseño para el pandeo lateral-torsional de las secciones tipo cajón y secciones abiertas con simetría simple, doble y con un punto simétrico, de acuerdo al número y ubicación de los apoyos, ya que si la distancia entre apoyos es mayor hay más posibilidades de que ocurra pandeo en la sección del perfil.

3.2.2.1 PANDEO LATERAL-TORSIONAL PARA SECCIONES ABIERTAS CON SIMETRÍA SIMPLE Y DOBLE

De acuerdo a las especificaciones AISI 2007, los criterios de diseño para secciones abiertas de simple y doble simetría se basa en estudios realizados con canales (perfiles C), correas (perfiles G) y secciones I (compuesta por dos perfiles C o G). Estas disposiciones no se aplican a vigas con alas de compresión sin soporte lateral; es decir, que no estén lateralmente estables. Además, tampoco consideran efectos de torsión como los que se producen de cargas cuya resultante no pasa por el centro de cortante de la sección.

En la especificación del AISI 2007 la resistencia a flexión por pandeo lateral-torsional se determina de acuerdo a la Sección C3.1.2.1 que presenta la siguiente expresión:

$$M_n = S_c * F_c \quad (3.27)$$

Dónde:

M_n = Momento Nominal

S_c = Módulo de Sección Elástico de la sección efectiva calculado en la fibra extrema a compresión para un esfuerzo F_c

F_c = Esfuerzo crítico elástico o inelástico de pandeo lateral-torsional, que se calcula de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Si $F_e \geq 2.78 F_y$
 - El segmento de elemento que no esté sujeto a pandeo lateral en momentos menores o iguales a M_y . La resistencia a la flexión se determinará de acuerdo con el procedimiento I del cálculo a flexión por Inicio de Fluencia.

- Si $2.78 F_y > F_e > 0.56 F_y$, se debe determinar F_c con la siguiente expresión:
 - $$F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_c} \right) \quad (3.28)$$

- Para $F_e \leq 0.56 F_y$,
 - El esfuerzo crítico debido al pandeo lateral-torsional F_c , va a ser igual a F_e

F_y = Esfuerzo de fluencia de diseño

F_e = Esfuerzo crítico elástico de pandeo lateral-torsional establecido por los siguientes casos.

a) Secciones simples, dobles y con un punto de simetría.

i) *Flexión con respecto al eje de simetría*

- Secciones simétricas simples y dobles.

$$F_e = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (3.29)$$

- Secciones con un punto simetría.

$$F_e = \frac{C_b r_o A}{2S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (3.30)$$

Donde,

C_b = Coeficiente de momento

$$C_b = \frac{12.5 M_{m\acute{a}x.}}{2.5M_{m\acute{a}x.} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.31)$$

$M_{m\acute{a}x.}$ = Valor absoluto del momento máximo en el segmento entre apoyos laterales.

M_A = Valor absoluto del momento a un cuarto de la longitud del segmento arriostrado lateralmente.

M_B = Valor absoluto del momento al centro del segmento entre apoyos laterales.

M_C = Valor absoluto del momento a tres cuartos del claro del segmento arriostrado lateralmente.

El AISI permite tomar $C_b = 1$, en todos los casos para ser más conservadores y para segmentos en voladizo cuando el extremo libre no tiene apoyo lateral.

r_o = Radio de giro polar de la sección transversal alrededor del centro de cortante, $r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2}$ (3.32)

r_x, r_y = Radio de giro alrededor de los ejes principales de la sección transversal del perfil.

x_o = Distancia desde el centro de corte hasta el centroide a lo largo del eje "x" de la sección transversal del elemento, tomado como negativo.

A = rea de la sección transversal.

S_f = Módulo de Sección Elástica de la sección completa con respecto a la fibra extrema a compresión.

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad (3.33)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (3.34)$$

Donde;

E = Módulo de elasticidad del acero

K_y, K_t = Factor de longitud efectiva para flexión alrededor del eje “y” y torsión, respectivamente.

L_y, L_t = Longitud entre apoyos laterales para flexión alrededor del eje “y” y torsión, respectivamente.

C_w = Constante de torsión de la sección transversal.

Para las secciones que poseen simetría simple, eje “x” será el eje de simetría orientado de manera que el centro de corte tiene una coordenada negativa en x. Para las secciones de punto simétrico, tales como Z-secciones, eje x será el eje centroidal perpendicular al alma. El esfuerzo F_e también podrá ser calculado mediante la ecuación (3.39) y (3.40) propuestas en el caso (b) para secciones I doblemente simétricas, secciones C simétricas simples, o secciones Z un punto de simetría.

ii) *Flexión en secciones simetrías simples alrededor del eje centroidal perpendicular al eje de simetría.*

$$F_e = \frac{C_s A \sigma_{ex}}{C_{TF} S_f} \left[j + C_s \sqrt{j^2 + r_o^2 (\sigma_t / \sigma_{ex})} \right] \quad (3.35)$$

donde,

$C_s = +1$, para momento que produce compresión del lado del eje centroidal coincidente con el centro de cortante.

$= -1$, para momento que produce tensión del lado del eje centroidal coincidente con el centro de cortante.

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_x L_x}{r_x}\right)^2} \quad (3.36)$$

K_x = Factor de longitud efectiva para flexión alrededor del eje "x".

L_x = Longitud entre apoyos laterales para flexión alrededor del eje "x".

$$C_{TF} = 0.6 - 0.4 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) \quad (3.37)$$

Donde: M_1 y M_2 = Donde M_1 es el menor y M_2 es el mayor de los momentos en los extremos de la longitud entre apoyos laterales en el plano de flexión, y donde $\frac{M_1}{M_2}$ es positivo cuando M_1 y M_2 tienen el mismo signo (flexión en curvatura doble) y negativo cuando tienen signo contrario (flexión en curvatura simple). Cuando el valor del momento en cualquier punto de la longitud entre apoyos laterales es mayor que el valor del momento en ambos extremos de dicha longitud, y para miembros sujetos a combinación de carga axial y flexión, C_{TF} deberá ser igual a uno.

$$j = \frac{1}{2I_v} \left[\int_A x^3 dA + \int_A xy^2 dA \right] - x_o \quad (3.38)$$

b) Para secciones I, secciones C simétricas simples, o secciones Z, flexionadas alrededor del eje centroidal perpendicular al alma (eje x), se permitirán las siguientes ecuaciones para ser utilizado en lugar de (a) para el cálculo de F_e :

- Secciones simétricas simples (secciones C) y dobles (Secciones I).

$$F_e = \frac{C_b \pi^2 E d I_{yc}}{S_f (K_y L_y)^2} \quad (3.39)$$

- Secciones con un punto simetría (secciones Z).

$$F_e = \frac{C_b \pi^2 E d I_{yc}}{2 S_f (K_y L_y)^2} \quad (3.40)$$

Donde,

d = Altura de la sección

I_{yc} = Momento de Inercia de la porción de la sección sujeta a compresión con respecto al eje centroidal paralelo al alma, usando la sección completa no reducida.

3.2.2.2 PANDEO LATERAL-TORSIONAL PARA SECCIONES TIPO CAJON.

En versiones anteriores al AISI 2007 se consideraba que el pandeo lateral torsional no era un estado limite crítico para las secciones en cajón ya que poseen dos almas y esto ayuda a que tenga mayor rigidez; lo que hace posible que el elemento sea más estable bajo las solicitaciones que se le aplique. Por dichas razones, el pandeo lateral- torsional en las secciones en cajón será menor comparado con el de las secciones abiertas.

La capacidad a flexión por pandeo lateral-torsional de los perfiles delgados doblados en frio también dependen de la longitud entre los arrostros laterales que se coloquen a la viga; y en el caso de las secciones tipo cajón el AISI 2007 en la sección C3.1.2.2 establece una ecuación que determina la longitud de arrostro lateral crítica L_u , que no debe ser excedida para que no se produzca el pandeo lateral-torsional.

Existen dos limitaciones para el cálculo de la resistencia nominal a flexión de estas este tipo de secciones, las cuales son:

- a) Si $L \leq L_u$, se debe determinar el momento nominal a flexión de acuerdo con la Resistencia Nominal de la Sección (Sección 3.2.1).
- b) Si $L > L_u$, la resistencia nominal a flexión se calcula de acuerdo con la resistencia al pandeo lateral-torsional de las secciones abiertas (Sección 3.2.2.1), donde el esfuerzo crítico elástico de pandeo latero-torsional F_e .

Donde L es la distancia entre apoyos laterales y L_u , longitud crítica está dada por la siguiente expresión

$$L_u = \frac{0.36C_b\pi}{F_y S_f} \sqrt{EGJ I_y} \quad (3.41)$$

El esfuerzo crítico elástico de pandeo latero-torsional F_e , de secciones cerradas tipo cajón es igual a

$$F_e = \frac{C_b \pi}{K_y L_y S_f} \sqrt{E G J I_y} \quad (3.42)$$

Dónde:

I_y = Momento de Inercia de la sección no reducida con respecto al eje centroidal paralelo al alma.

J = constante torsional de la sección cajón

En el desarrollo de la Ecuación (3.42) se despreció la constante de alabeo C_w , ya que el efecto de alabeo no uniforme en secciones cajón es pequeño, y se considera la constante torsional, J , despreciando la curvatura de las esquinas del perfil, y puede ser determinada mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{2(ab)^2}{(a/t_1) + (b/t_2)} \quad (3.43)$$

Donde:

a = distancia entre centros de la línea media de almas

b = distancia entre centros de la línea media de alas

t_1 = espesor de las alas del perfil

t_2 = espesor de las almas del perfil

3.2.3 PANDEO DISTORSIONAL

El pandeo distorsional es un modo de falla que afecta principalmente a las vigas de secciones abiertas con bordes rígidos, como las correas (Secciones G), ya que deforma a la sección a causa de la rotación que ocurre cerca de las uniones entre el ala y alma del perfil.



Figura 35. Pandeo Distorsional en Elementos a Flexión

Fuente: Design for Distortional Buckling of Flexural Members (Hancock, 1997)

El pandeo distorsional es un estado límite de los elementos a flexión, que surge simultáneamente con el pandeo local. Se puede observar en la figura 36, que el pandeo distorsional se presenta en el ala a compresión luego de haber ocurrido el pandeo local.

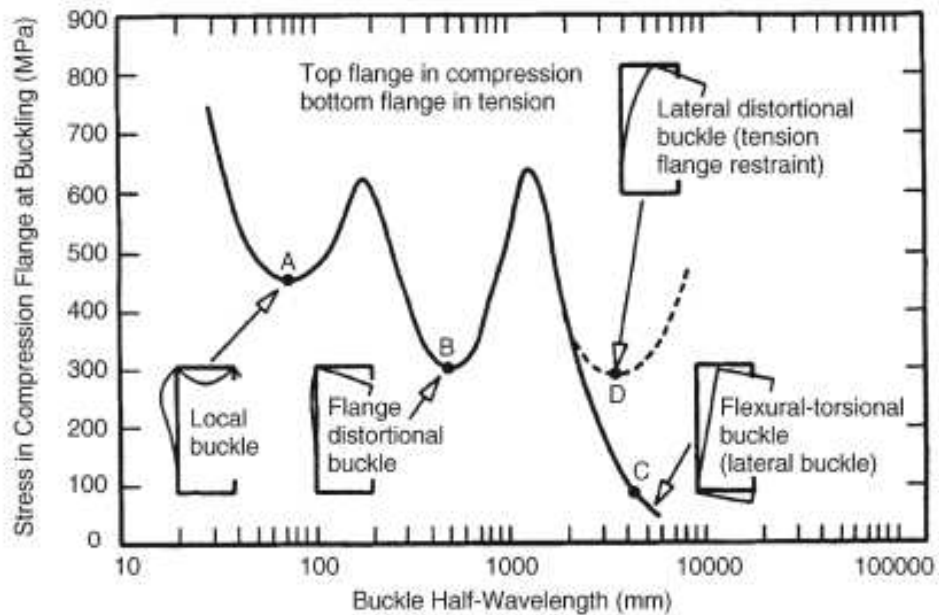


Figura 36. Diagrama de Esfuerzo por Pandeo vs Longitud de Onda para Flexión alrededor del Eje Principal

Fuente: Cold- Formed Steel Desing (Wei-Wen Yu P. P., 2000, pág. 235)

Para el cálculo de la capacidad a flexión de los perfiles doblados en frío por resistencia al pandeo distorsional, las especificaciones del AISI 2007 en la Sección C3.1.4, presenta las disposiciones que son aplicables para perfiles de sección abierta que posean alas con rigidizadores de borde como las secciones I, Z y G, excepto los elementos que cumplan los criterios de la sección D6.1.1 y D6.1.2 de la Especificación AISI 2007.

El momento nominal por pandeo distorsional se determina según las ecuaciones que se muestran a continuación:

- Para $\lambda_d \leq 0.673$, el momento nominal $M_n = M_y$
- Para $\lambda_d > 0.673$, el momento nominal M_n es igual a

$$\circ M_n = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (3.44)$$

Donde,

$$\lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}} \quad (3.45)$$

$$M_y = S_{fy}F_y \quad (3.46)$$

$$M_{crd} = S_f F_d \quad (3.47)$$

S_{fy} = Módulo Elástico de la sección total no reducida relativa a la fibra extrema a la primera fluencia.

S_f = Módulo Elástico de la sección total no reducida relativa a la fibra extrema a compresión.

F_d = Esfuerzo Elástico por Pandeo Distorsional de acuerdo a los siguientes literales:

- a. Disposiciones simplificadas para secciones C y Z no arriostradas con refuerzos de labios simples.

Para secciones C y Z que no tienen restricción de giro del ala a compresión y están dentro de los límites dimensionales previstos en esta sección, la ecuación (3.48) se permite ser utilizada para calcular una predicción conservadora del esfuerzo de pandeo distorsional, F_d . Si no se cumple las limitaciones dimensionales de esta sección ver los literales (b) y (c).

- Límites dimensionales:
 - o $50 \leq h_o/t \leq 200$
 - o $25 \leq b_o/t \leq 100$
 - o $6.25 < D/t \leq 50$
 - o $45^\circ \leq \theta < 90^\circ$
 - o $2 \leq h_o/b_o \leq 8$
 - o $0.04 \leq D \sin\theta / b_o \leq 0.5$; las variables h_o , b_o , t , D , ya fueron definidas en capítulos anteriores.

El esfuerzo de pandeo distorsional, F_d , puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$F_d = \beta k_d \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad (3.48)$$

Donde:

β = Valor que representa el gradiente de momento, el cual se permite ser conservador considerando la unidad o también puede ser calculado con la formula a continuación;

$$1.0 \leq 1 + 0.4 \left(\frac{L}{L_m} \right)^{0.7} \left(1 - \frac{M_1}{M_2} \right)^{0.7} \leq 1.3 \quad (3.49)$$

L = Valor mínimo entre L_{cr} y L_m

$$L_{cr} = 12h_o \left(\frac{b_o D \text{ Sen } \theta}{h_o t} \right)^{0.6} \leq 10h_o \quad (3.50)$$

L_m = distancia de separación entre las restricciones que limitan el pandeo distorsional (para elementos restringidos continuamente $L_m=L_{cr}$)

M_1 y M_2 = Momento final mínimo y máximo, respectivamente, en los segmentos no arriostrados (L_m) de la viga; M_1/M_2 , es negativo cuando los momentos causan curvatura inversa y positiva cuando se flexiona en curvatura simple.

$$k_d = 0.5 \leq 0.6 \left(\frac{b_o D \text{ Sen } \theta}{h_o t} \right)^{0.7} \leq 8.0 \quad (3.51)$$

E = Módulo de Elasticidad

μ = Relación de Poisson

- b. Para secciones C y Z o alguna otra sección abierta con un ala a compresión rígida extendida a un lado del ala donde el atiesador es o bien un labio simple o un atiesador complejo.

Esta consideración aplica a cualquier tipo de sección abierta con una sola alma y un ala a compresión rígida, incluyendo las secciones que cumplan las limitaciones dimensionales que se mencionaron en el literal anterior de esta sección. El esfuerzo por pandeo distorsional, F_d , se calcula de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$F_d = \beta \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad (3.52)$$

β = se calcula igual que el literal (a)

L = Valor mínimo entre L_{cr} y L_m

$$L_{cr} = \left(\frac{4\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left(I_{xf}(x_o - h_x)^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_o - h_x)^2 \right) + \frac{\pi^4 h_o^4}{720} \right)^{1/4} \quad (3.53)$$

Donde

h_o = Altura del alma total

I_{xf} = Momento de inercia del ala con respecto al eje x

x_o = Distancia desde la unión alma-ala al centroide del ala.

h_x = Distancia desde el centroide del ala al centro de corte del ala

C_{wf} = Constante de Torsión del ala

I_{xyf} = Producto del momento de inercia del ala

I_{yf} = Momento de inercia del ala con respecto al eje y

Las propiedades a compresión del ala más un refuerzo de borde I_{xf} , x_o , h_x , C_{wf} , I_{xyf} , I_{yf} , sobre un sistema de ejes x-y situado en el centro de gravedad del ala, con el eje x medido positivo a la derecha desde el centroide, y el eje y positivo hacia abajo desde el centroide.

L_m = distancia de separación entre las restricciones que limitan el pandeo distorsional (para elementos restringidos continuamente $L_m=L_{cr}$).

M_1 y M_2 = Momento final mínimo y máximo, respectivamente, en los segmentos no arriostrados (L_m) de la viga; M_1/M_2 , es negativo cuando los

momentos causan curvatura inversa y positiva cuando se flexiona en curvatura simple.

$k_{\phi fe}$ = Rigidez rotacional elástica proporcionado por el ala a la unión ala/alma.

$$= \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \left[EI_{xf}(x_o - h_x)^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_o - h_x)^2 \right] + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 GJ_f \quad (3.54)$$

G = Módulo de Cortante

E = Módulo de Elasticidad del Acero

J_f = Constante de Torsión de St. Venant del ala a compresión, sobre un sistema de ejes x-y situado en el centro de gravedad del ala, con el eje x medido positivo a la derecha desde el centroide, y el eje y positivo hacia abajo desde el centroide.

$k_{\phi we}$ = Rigidez rotacional elástica proporcionado por el alma a la unión ala/alma.

$$= \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{3}{h_o} + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{19h_o}{60} + \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \frac{h_o^3}{240} \right) \quad (3.55)$$

k_{ϕ} = Rigidez rotacional elástica proporcionado por restricción del elemento (panel, punta/soporte, cubierta) en la junta del ala/alma del elemento (es cero si el ala a compresión no está restringido).

$\tilde{k}_{\phi fg}$ = Rigidez geométrica rotacional (dividida por el esfuerzo F_d) solicitado por el ala desde la unión ala/alma.

$$= \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left[A_f \left((x_o - h_x)^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right)^2 - 2y_o(x_o - h_x) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right) + h_x^2 + y_o^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right] \quad (3.56)$$

A_f = Área de la sección transversal del ala más el borde rígido alrededor de un sistema de ejes x-y situado en el centro de gravedad del ala, con el eje x medido positivo a la derecha desde el centroide, y el eje y positivo hacia abajo desde el centroide.

y_o = Distancia y desde la unión ala/alma hasta el centro del ala.

$\tilde{k}_{\phi wg}$ = Rigidez geométrica rotacional (dividida por el esfuerzo F_d) solicitado por el alma desde la unión ala/alma.

$$= \frac{h_o t \pi^2}{13440} \left(\frac{[45360(1 - \xi_{web}) + 62160] \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 448\pi^2 + \left(\frac{h_o}{L}\right)^2 [53 + 3(1 - \xi_{web})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 420 \left(\frac{L}{h_o}\right)^4} \right) \quad (3.57)$$

$\xi_{web} = (f_1 - f_2) / f_1$, gradiente de esfuerzos del alma, donde f_1 y f_2 son los esfuerzos extremos opuestos del alma, $f_1 > f_2$, la compresión es positiva, la tensión es negativa, y los esfuerzos se calculan en función de la sección bruta, (por ejemplo, flexión simétrica pura, $f_1 = f_2$, $\xi_{web} = 2$)

c. Análisis de Pandeo Elástico Rotacional

Un análisis de pandeo elástico racional que considera el pandeo distorsional será permitido ser utilizado en lugar de las expresiones dadas en los literales (a) o (b) de esta sección.

CAPÍTULO IV

CÁLCULO DE CAPACIDAD A FLEXIÓN DE LOS PERFILES DOBLADOS EN FRÍO DEL ECUADOR

4.1 EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD A FLEXIÓN DE LOS PERFILES DE ACERO DOBLADOS EN FRÍO

En este capítulo se presentaran 3 ejemplos de diseño de elementos doblados en frio para explicar, de una manera más clara, el uso de las fórmulas de diseño a flexión mostradas en el capítulo III de este trabajo.

Ejemplo 1: Diseño a flexión de una sección G (Correa)

Ejemplo 2: Diseño a flexión de una sección C (Canal)

Ejemplo 3: Diseño a flexión de una sección doble G (Cajón)

Las propiedades de los materiales usadas en los ejemplos son los siguientes:

Acero A36,	$F_y=36$ Ksi	(25.31 Kg/mm ²)
Módulo de Elasticidad,	$E=29500$ Ksi	(20741.45 Kg/mm ²)
Módulo Cortante,	$G=11300$ Ksi	(7945.03 Kg/mm ²)
Relación de Poisson,	$\mu = 0.3$	

4.1.1 EJEMPLO 1: DISEÑO A FLEXIÓN DE UNA SECCIÓN G (CORREAS)

Se tiene una viga simplemente apoyada con carga distribuida lateralmente arriostrada, la distancia entre los arriostramientos es de 750mm, para ello, se escoge la sección G100x50x15x2mm. Para obtener el momento de diseño

de la sección se elegirá el menor momento de diseño calculado bajo los siguientes procedimientos:

- Resistencia de la Sección
 - o Inicio de Fluencia
 - o Capacidad de Reserva Inelástica
- Resistencia por Pandeo Lateral- Torsional
- Resistencia por Pandeo Distorsional

Resistencia de la Sección

Procedimiento I: Inicio de Fluencia

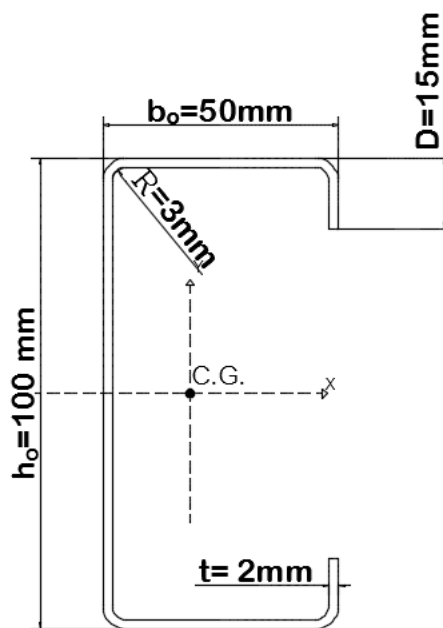


Figura 37. Perfil de Sección G

Para determinar la Resistencia a Flexión por Inicio de Fluencia es necesario calcular primero las propiedades geométricas de la sección real y sección efectiva del perfil. A continuación se muestra el procedimiento de cálculo:

- Paso 1: Propiedades geométricas de las esquinas de la sección

$$r = R + \frac{t}{2} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$r = 3 + \frac{2}{2} = 4 \text{ mm}$$

$$u = 1.57 r \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$u = 1.57 (4) = 6.28 \text{ mm}$$

$$c = 0.637 r \quad (\text{Centro de gravedad de la esquina})$$

$$c = 0.637 (4) = 2.548 \text{ mm}$$

- Paso 2: Propiedades geométricas efectivas del Perfil.
 - Dimensiones Efectivas
 - Alas del perfil

$$\text{Ancho plano del ala: } w = b_o - 2 (R + t) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$w = 50 - 2 (3 + 2) = 40 \text{ mm}$$

De acuerdo a Sección 2.6.1 (a), para labios simples, $\frac{w}{t} \leq 60$ entonces se verifica:

$$\frac{w}{t} = \frac{40}{2} = 20 \quad \text{SI CUMPLE}$$

- Borde a compresión
 - Ancho Efectivo, b.

El ancho efectivo b, del borde a compresión rígido se determina según la sección 2.6.3.1(1), que permite asumir el esfuerzo f igual al esfuerzo de fluencia del acero, es decir, $f = F_y = 25.31 \text{ Kg/mm}^2$.

$$S = 1.28 \sqrt{\frac{20741.45}{25.31}} = 36.64 \quad (\text{Ec. 2.34})$$

$$0.328 * S = 0.328 (36.64) = 12.02$$

$$\frac{w}{t} > 0.328 * S$$

$$d = D - (R + t) = 15 - (3 + 2) = 10 \text{ mm}$$

$$I_s = \frac{d^3 * t * \sin^2 \theta}{12} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

$$I_s = \frac{10^3 * 2}{12} = 166.67 \text{ mm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 \left[\frac{w}{s} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 * \frac{w}{s} + 5 \right] \quad (\text{Ec. 2.37})$$

$$I_a = 399 (2)^4 \left[\frac{20}{36.64} - 0.328 \right]^3 \leq (2)^4 \left[115 * \frac{20}{36.63} + 5 \right]$$

$$I_a = 66.0 \leq 1084.37 \quad \mathbf{SI \ CUMPLE}$$

$$I_a = 66.0 \text{ mm}^4$$

$$R_l = \frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad (\text{Ec. 2.35})$$

$$R_l = \frac{I_s}{I_a} = \frac{166.67}{66} = 2.52 > 1 \quad \text{Se usa } R_l = 1$$

El coeficiente de pandeo k, se obtiene de acuerdo a la Tabla 1:

$$\frac{D}{w} = \frac{15}{40} = 0.375 < 0.8 \text{ y } \theta = 90^\circ$$

$$n = \left(0.582 - \frac{w}{4 * S} \right) \geq \frac{1}{3} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$n = \left(0.582 - \frac{20}{4 \cdot (36.64)} \right) = 0.44$$

$$k = \left(4.82 - \frac{5(D)}{w} \right) (R_I)^n + 0.43 \leq 4$$

$$k = \left(4.82 - \frac{5(15)}{40} \right) (1)^{0.44} + 0.43 \leq 4$$

$$k = 3.37 < 4 \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$F_{cr} = k * \left(\frac{\pi^2 * E}{12(1-\mu^2)} \right) * \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (\text{Ec. 2.25})$$

$$F_{cr} = \frac{3.37 * \pi^2 * 20741.45}{12 (1-0.3^2)} = \left(\frac{2}{40} \right)^2 = 157.93 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{25.31}{157.93}} = 0.40 < 0.673$$

Como $\lambda < 0.673$ el ancho efectivo del ala a compresión b , será igual al ancho plano w :

$$\underline{\underline{b = w = 40 \text{ mm}}}$$

- Peralte efectivo del labio rigidizador a compresión, d_s .

Se calcula el peralte efectivo d_s , de acuerdo a las Sección 2.6.5

$$\frac{w}{t} > 0.328 * S$$

$$d_s = d = 10 \text{ mm}$$

$$ds = (d's) (R_i)$$

$$ds = (10) (1)$$

$$\underline{ds = 10 \text{ mm}}$$

- *Borde a Tensión*

La Especificación AISI 2007 no considera límites para calcular el ancho efectivo del ala a tensión del elemento, por lo tanto, se tiene:

- Ancho efectivo del ala a tensión, b.

$$\underline{b = w = 40 \text{ mm}}$$

- Peralte efectivo del labio rigidizador a tensión, ds.

$$\underline{ds = d = 10 \text{ mm}}$$

- Alma perfil

- Alma efectiva, h.

Se asume que el alma es 100% efectiva

$$h = h_o - 2 (R + t)$$

$$h = 100 - 2 (3 + 2) = 90 \text{ mm}$$

De acuerdo a la sección 2.6.2 se debe cumplir que la relación entre la altura efectiva del alma y el espesor del perfil debe ser menor a 200.

$$\frac{h}{t} = \frac{90}{2} = 45 \text{ mm} < 200 \quad \text{SI CUMPLE}$$

- *Cálculo del eje neutro considerando que el ala es 100% efectiva*

TRAMOS	Longitud Efectiva, L(mm)	Distancia a la Fibra Superior desde el Centro de gravedad de cada tramo, y (mm)	L*y	L*y ²
1	10.00	90.00	900.00	81000.00
2	12.56	97.55	1225.20	119516.09
3	40.00	99.00	3960.00	392040.00
4	12.56	2.45	30.80	75.51
5	40.00	1.00	40.00	40.00
6	10.00	10.00	100.00	1000.00
7	90.00	50.00	4500.00	225000.00
	215.12		10756.00	818671.61

$$Y_{cg} = \frac{\sum ly}{\sum l} = \frac{10756.00}{215.12} = 50 \text{ mm}$$

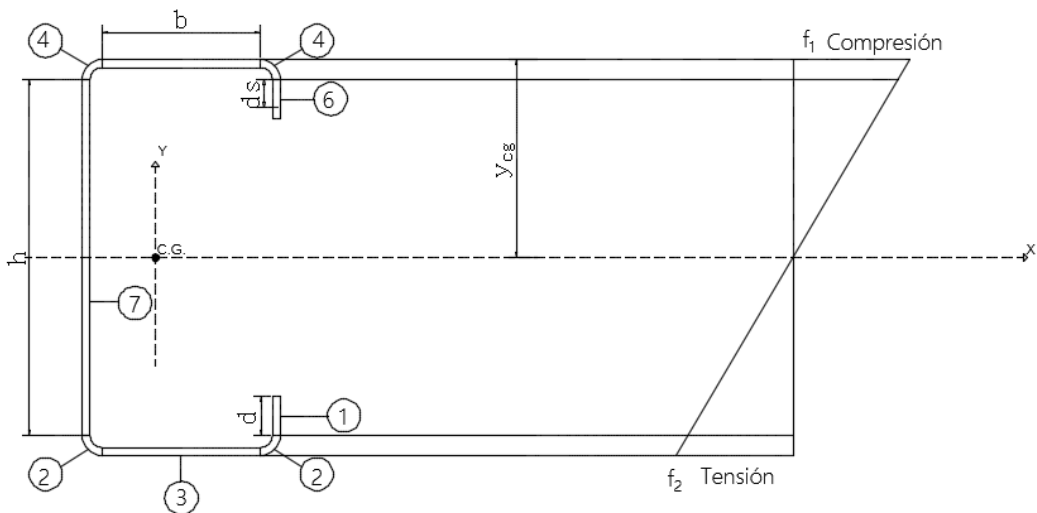


Figura 38. Diagrama de Esfuerzos por Inicio de Fluencia para una sección G

- Revisión si el alma es 100% efectiva:

$$Y_1 = Y_{cg} - (R + t) = 50 - (3 + 2) = 45 \text{ mm}$$

$$Y_2 = h - Y_1 = 90 - 45 = 45 \text{ mm}$$

- *Cálculo de los esfuerzos de compresión y tracción respectivamente*

$$f_1 = f_y \frac{Y_1}{Y_{cg}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$f_1 = 25.31 \left(\frac{45}{50} \right) = 22.78 \text{ Kg/mm}^2$$

$f_1 =$ compresión (+)

$$f_2 = - f_1 = - 28.78 \text{ Kg/mm}^2$$

$f_2 =$ tensión (-)

- *Cálculo del peralte efectivo ($b_1 + b_2$), se determina según lo expuesto en la Sección 2.6.4*

$$\text{Para } \frac{h_o}{b_o} = \frac{100}{50} = 2 \leq 4$$

$$\psi = \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = \left| \frac{-22.78}{22.78} \right| = 1 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$k = 24$$

$$F_{cr} = \frac{24 * \pi^2 (20741.45)}{12 (1 - 0.3^2)} \left(\frac{2}{90} \right)^2 = 222.18 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{22.78}{222.18}} = 0.32 < 0.673$$

$$b_e = h = 90 \text{ mm} \quad (\text{Ancho efectivo del alma del perfil})$$

Dado que $\psi > 0.236$ los valores de b_1 y b_2 , se calculan con las siguientes fórmulas:

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \psi} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$b_2 = \frac{b_e}{2} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$b_1 = \frac{90}{3+1} = 22.5 \text{ mm}$$

$$b_2 = \frac{90}{2} = 45 \text{ mm}$$

Se compara si $b_1 + b_2$ es mayor a la porción en compresión del ala Y_1 ,

$$b_1 + b_2 = 22.5 + 45 = 67.5 \text{ mm}$$

Como $b_1 + b_2 > Y_1$, se concluye que el alma es totalmente efectiva. Por lo tanto, no se debe realizar reducción del peralte efectivo.

$$\mathbf{h = 90 \text{ mm}}$$

○ Cálculo del Momento de Inercia de la Sección Efectiva

Se considera la inercia del alma y de los bordes rígidos del perfil ya que los momentos de inercia del ancho plano del alma y de las esquinas del elemento son muy bajos y pueden despreciarse.

$$\text{Tramo 1: } I_{xx} = \frac{1}{12} (10)^3 = 83.33 \text{ mm}^3$$

$$\text{Tramo 7: } I_{xx} = \frac{1}{12} (90)^3 = 60750 \text{ mm}^3$$

$$\Sigma I_{xx} = 60833.33 \text{ mm}^3$$

$$I'_x = \Sigma I_{xx} + \Sigma Ly^2 - Y_{cg} \Sigma L = 60833.33 \text{ mm}^3 + 818676.38 \text{ mm}^3 - 537800 \text{ mm}^3$$

$$I'_x = 341709.71 \text{ mm}^3$$

$$I_{ex} = I'_x * t$$

$$I_{ex} = (341709.71)(2) = 683419.42 \text{ mm}^4$$

○ Módulo de Sección con respecto a la fibra superior

$$S_{ex} = \frac{I_{ex}}{Y_{cg}} = \frac{683419.42}{50} = 13668.39 \text{ mm}^3$$

- Paso 3: Cálculo del Momento Nominal (M_n) y Momento de Diseño (ϕM_n)

Momento Nominal:

$$M_n = F_y * S_{ex} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$M_n = (25.31) (13668.39) = 345946.95 \text{ Kg/mm}$$

Momento de Diseño por Inicio de Fluencia:

Factor de Resistencia: $\phi = 0.95$ para secciones rígidas

$$M_u = \phi M_n \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$M_u = 0,95 (345946.95) = 328649.60 \text{ Kg-mm} * \frac{1m}{1000mm} * \frac{1Ton}{1000Kg}$$

$$\phi M_n = 0.33 \text{ Ton-m}$$

Procedimiento II: Capacidad de Reserva Inelástica

Para la demostración de este método de cálculo se considerará que no existe pandeo lateral en el perfil.

- Paso 1: Dimensiones de la sección considerando la línea central del perfil y esquinas rectos

- *Patín a compresión y tensión*

$$b_c = b_t = b_o - t = 50 - 2 = 48 \text{ mm}$$

- *Peralte del labio rígido*

$$d = D - \frac{t}{2} = 15 - \frac{2}{2} = 14 \text{ mm}$$

- *Peralte del alma*

$$a = h_o - t = 100 - 2 = 98 \text{ mm}$$

- Paso 2: Dimensiones efectivas del perfil

El cálculo del ancho efectivo es igual que el obtenido en el procedimiento por Inicio de Fluencia, por lo tanto, los valores de b , h y d_s son:

$$b = 40 \text{ mm}$$

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

$$h = 98 \text{ mm}$$

- Paso 3: Deformación unitaria máxima compresión (Sección 3.2.1.2(a))

$$\lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{\frac{F_y}{E}}} = \frac{1.11}{\sqrt{\frac{25.31}{207041.45}}} = 31.77 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$\frac{w}{t} = \lambda_1$$

$$C_y = 3$$

$$\epsilon_{cu} = 3 \epsilon_y$$

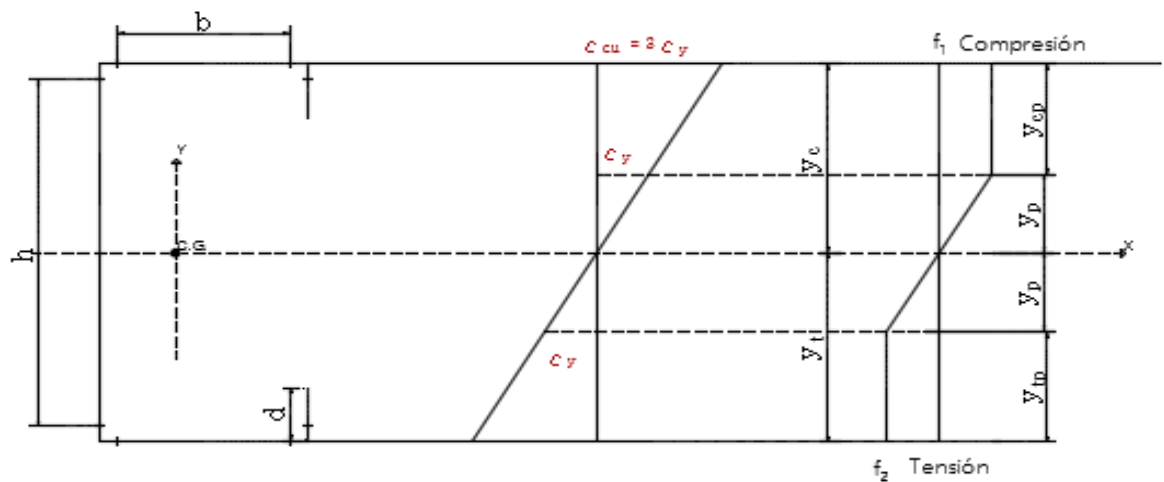


Figura 39. Diagrama de Deformación y Esfuerzos por Capacidad de Reserva Inelástica de una sección G

$$\epsilon_y = \frac{F_y}{E} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$\epsilon_y = \frac{25.31}{20741.45} = 1.22 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_{cu} = 3 \epsilon_y = 3 (1.22 \times 10^{-3}) = 3.66 \times 10^{-3}$$

$$Y_c = \frac{b_t - b_c + 2d}{4} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

$$Y_c = \frac{2(98)}{4} = 49 \text{ mm}$$

$$Y_t = d - Y_c \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$Y_t = 98 - 49 = 49 \text{ mm}$$

$$Y_p = Y_c \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$Y_p = Y_c \frac{\epsilon_y}{3\epsilon_y} = \frac{49}{3} = 16.33 \text{ mm}$$

$$Y_{cp} = Y_c - Y_p \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$Y_{cp} = 49 - 16.33 = 32.67 \text{ mm}$$

$$Y_{tp} = Y_{cp} = 32.67 \text{ mm}$$

• Paso 4: Cálculo del Momento Nominal, M_n .

Se debe cumplir con las limitaciones de la Sección 3.2.1.2, para esto se asume que se cumple los puntos (1), (2) y (4) y se verifica que los literales (3) y (5) estén dentro de los límites establecidos.

(1) No está sujeto a Pandeo

(2) No se toma en cuenta el efecto del doblado en frío para determinar F_y

(3) Relación $\frac{Y_c}{t} = \frac{49}{2} = 24.5 < \lambda_1$

(4) Se asume que la condición por cortante si cumple

(5) El ángulo del alma con la vertical es igual a $0^\circ < 30^\circ$

El momento M_n se calcula con la ecuación 2.23.

$$M_n = F_y t \left[b_c * Y_c + 2Y_{cp} \left(Y_p + \frac{Y_{cp}}{2} \right) + \frac{4}{3} (Y_p)^2 + 2Y_{tp} \left(Y_p + \frac{Y_{tp}}{2} \right) + b_t * Y_t \right]$$

$$M_n = 25.31(2) \left[48(49) + 2(32.67) \left(16.33 + \frac{32.67}{2} \right) + \frac{4}{3} (49)^2 + 2(32.67) \left(16.33 + \frac{32.67}{2} \right) + 48(49) \right]$$

$$M_n = 50.62 [2352 + 2134.33 + 3201.33 + 2134.33 + 2352]$$

$$M_n = 50.62 (12173.99)$$

$$M_n = 616247.38 \text{ Kg-mm} * \frac{1\text{Ton}}{1000\text{Kg}} * \frac{1\text{m}}{1000\text{mm}}$$

$$M_n = 0.62 \text{ T-m}$$

El momento calculado por este método no debe ser mayor que 1.25My, momento calculado por Inicio de Fluencia.

$$1.25 S_e F_y = 1.25 (345946.95) = 432433.69 \text{ Kg-mm}$$

$$1.25 S_e F_y = 0.43 \text{ T-m}$$

$$M_n > 1.25 S_e F_y$$

Se usa 1.25 S_e F_y = 0.43 T-m

- Paso 6: Momento de Diseño por Reserva de Capacidad Inelástica

$$\phi M_n = 0.95 M_n$$

$$\phi M_n = 0.95 (0.43) = 0.41 \text{ T-m}$$

$$\phi M_n = 0.41 \text{ T-m}$$

Resistencia al Pandeo Lateral

La viga a analizar se arriostra lateralmente, cada 750mm. Entonces:

$$k_t L_t = 75 \text{ cm}$$

$$k_y L_y = 75 \text{ cm}$$

Los valores de Esfuerzo de Fluencia y Módulo de Elasticidad del acero son:

$$F_y = 25.31 \text{ Kg/mm}^2$$

$$E = 20741.45 \text{ Kg/mm}^2$$

- Paso 1: Cálculo de esfuerzo F_e de acuerdo a la Sección 3.2.2.1.

Se asume $C_b = 1$, de acuerdo a esta sección.

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 * E}{\frac{K_y L_y^2}{r_y}} \quad (\text{Ec.3.33})$$

$$r_y = 12.6 \text{ mm} \quad (\text{Tabla de Propiedades Anexo 1})$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2(20741.45)}{\left(\frac{750}{18.6}\right)^2}$$

$$\sigma_{ey} = 125.90 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A * r_o^2} \left[G * J + \frac{\pi^2 * E_{cu}}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (\text{Ec. 3.34})$$

$$\sigma_t = \frac{1}{(430.24)0.24^2} \left[7945.03(573.65) + \frac{\pi^2(20741.45)(341640613)}{(750)^2} \right]$$

$$\sigma_t = 6.585 \times 10^{-7} [128890303.1]$$

$$\sigma_t = 88.32 \text{ Kg/mm}^2$$

$$F_e = \frac{C_b * r_o * A}{S_t} \sqrt{F_{ey} * F_t} \quad (\text{Ec. 3.29})$$

$$F_e = \frac{1.00(58.24)(430.24)}{13840} \sqrt{(125.90)(88.32)}$$

$$\underline{F_e = 190.91 \text{ Kg/mm}^2}$$

- Paso 2: Cálculo del esfuerzo lateral torsional, F_c .

$$2.78 F_y = 2.78 (25.31) = 70.36 \text{ Kg/mm}^2$$

$$0.56 F_y = 0.56 (25.31) = 14.17 \text{ Kg/mm}^2$$

$F_e > 2.78 F_y$ cumple el caso II

$$F_c = F_y$$

- Paso 3: Cálculo del Momento de Nominal (M_n) y Momento de Diseño (ϕM_n)

Momento nominal:

$$M_n: S_c F_c$$

S_c , será igual al momento calculado de la sección efectiva de acuerdo al procedimiento por inicio de fluencia.

$$S_c = 13668.20 \text{ mm}^3$$

$$M_n: (13668.20) (25.31) = 345963.95 \text{ Kg-mm}$$

Momento de Diseño por Pandeo Lateral Torsional.

$$\phi = 0.90$$

$$\phi M_n = 0.90 M_n$$

$$\phi M_n = 0.90 (345963.95)$$

$$\phi M_n = 311367.55 \text{ Kg-mm}$$

$$\phi M_n = 0.31 \text{ Ton-m}$$

Resistencia al Pandeo Distorsional

Para este modo de falla se debe cumplir lo dispuesto en la Sección 3.2.3

- Paso 1: Se debe verificar las limitaciones dimensionales

$$(1) 50 \leq \frac{h_o}{t} \leq 200$$

$$\frac{h_o}{t} = \frac{100}{2} = 50 \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$(2) 25 \leq \frac{b_o}{t} \leq 100$$

$$\frac{b_o}{t} = \frac{50}{2} = 25 \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$(3) 6.25 \leq \frac{D}{t} \leq 50$$

$$\frac{D}{t} = \frac{15}{2} = 7.5 \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$(4) 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$(6) 0.04 \leq \frac{D \sin \theta}{b_o} \leq 0.5$$

$$(5) 2 \leq \frac{h_o}{b_o} \leq 8$$

$$\frac{h_o}{b_o} = \frac{100}{50} = 2 \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$\frac{D \sin \theta}{b_o} = \frac{15 \sin 90}{50} = 0.3 \quad \text{SI CUMPLE}$$

- Paso 2: Cálculo de esfuerzo elástico por pandeo distorsional

Se considera $\beta = 1$

$$K_d = 0.5 \leq 0.6 \left(\frac{b_o * D \sin \theta}{h_o * t} \right)^{0.7} \leq 8.0 \quad (\text{Ec. 3.51})$$

$$\left(\frac{b_o * D \sin \theta}{h_o * t} \right)^{0.7} = \left(\frac{50 (15) \sin 90}{100 (2)} \right)^{0.7} = (3.75)^{0.7} = 2.52 (0.6) = 1.51$$

$$K_d = 1.51$$

$$F_d = \beta K_d \frac{\pi^2 * E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3.48})$$

$$F_d = (1) (1.51) \frac{\pi^2 * 20741.45}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{2}{50} \right)^2 = F_d = 45.29 \text{ Kg/mm}^2$$

- Paso 3: Cálculo del factor λ_d , para calcular el momento nominal por pandeo distorsional.

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (\text{Ec. 3.45})$$

$$M_{crd} = S_f * F_d \quad (\text{Ec. 3.47})$$

S_f = Módulo de Sección real

$$S_f = 13840 \text{ mm}^3$$

$$M_{crd} = (13840)(45.29) = 626813.6 \text{ Kg-mm}$$

$$M_y = S_{fy} * F_y \quad (\text{Ec. 3.46})$$

$$S_{fy} = S_f$$

$$M_y = (13840)(25.31) = 350290.4 \text{ Kg-mm}$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{350290}{626813.6}} = 0.75$$

- Paso 4: Cálculo de Momento Nominal (M_n) y momento de Diseño (ϕM_n)

Momento Nominal:

Como $\lambda_d > 0.673$ el momento nominal M_n , se calcula con la ecuación 3.44

$$M_n = 1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y$$

$$M_n = 1 - 0.22 \left(\frac{626813.6}{350290.4} \right)^{0.5} \left(\frac{626813.6}{350290.4} \right)^{0.5} (350290.4)$$

$$M_n = (0.70) (468579.54) = 328005.68 \text{ Kg-mm}$$

Momento Nominal:

El momento de diseño por pandeo lateral torsional será igual:

$$\phi M_n = 0.90 (3328005.68) = 295205.11 \text{Kg-mm}$$

$$\phi M_n = 0.30 \text{ Ton-m}$$

Luego de calcular los momentos de diseño por cada estado limite que se puede presentar en la viga del perfil a diseñar, se debe escoger el menor momento de diseño calculado por los procedimientos expuestos.

- A) Por Resistencia de la Sección
 - a. 0.33 Ton-m (Iniciación de Fluencia)
 - b. 0.41 Ton-m (Capacidad de Reserva Inelástica)
- B) Por Resistencia al Pandeo Lateral- Torsional
 - a. 0.31 Ton-m
- C) Por Resistencia al Pandeo Distorsional
 - a. 0.30 Ton-m

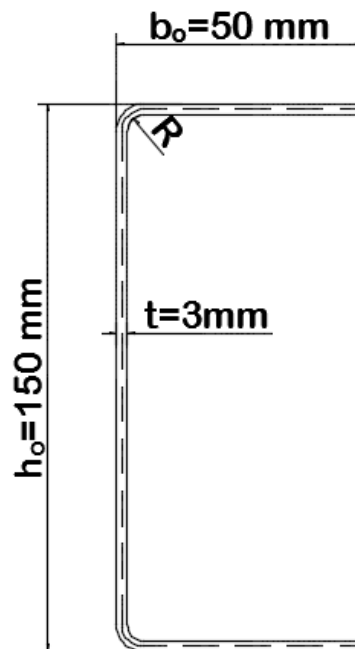
El menor momento producido es:

$$\phi M_n = 0.30 \text{ Ton-m}$$

*Es decir, que en este perfil el modo de falla crítico para el cual se debe diseñar es por **PANDEO DISTORSIONAL**.*

4.1.2 EJEMPLO 2: DISEÑO A FLEXIÓN DE UNA SECCIÓN C

Se tiene una viga simplemente apoyada con carga distribuida lateralmente arriostrada, la distancia entre los arriostramientos es de 1000mm, para ello, se escoge la sección G150x50x15x3mm. Para obtener el momento de diseño de la sección se elegirá el menor momento de diseño calculado bajo los procedimientos que apliquen para este tipo de sección.



Perfil C

Figura 40. Sección C

Resistencia de la Sección Transversal

Inicio de Fluencia

- Paso 1: Cálculo de las propiedades geométricas de la esquina de la sección

$$r = R + \frac{t}{2} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$r = 6.75 + \frac{3}{2} = 8.25\text{mm}$$

$$u = 1.57 r \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$u = 1.57 (8.25) = 12.95\text{mm}$$

$$c = 0.637 r$$

$$c = 0.637 (8.25) = 5.26\text{mm}$$

- Paso 2: Cálculo de las propiedades efectivas de la sección
 - Dimensiones Efectivas del Perfil
 - Alas del perfil

$$w = B - (R + t) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$w = 50 - (6.75 + 3) = 40.25$$

Según Sección 2.6.1(c) verifica que la relación entre el ancho plano y el espesor del perfil sea menor a 60.

$$\frac{w}{t} = \frac{40.5}{3} = 13.42 < 60 \quad \text{SI CUMPLE}$$

- Ancho efectivo del ala a compresión

De acuerdo a lo presentado en el Capítulo II en la Sección 2.6.3.1, el ancho efectivo se determina con las siguientes ecuaciones:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 * E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad (\text{Ec. 2.15})$$

El coeficiente k, según la sección 2.6.3.2 es igual a 0.43.

$$F_{cr} = 0.43 \left(\frac{\pi^2 (20741.45)}{12 (1-0.3^2)}\right) \left(\frac{3}{40.25}\right)^2 = 44.78 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\lambda \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{25.31}{44.78}} = 0.75 > 0.673$$

Como $\lambda > 0.673$, el ancho efectivo b será igual a:

$$b = \rho w$$

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.75}}{0.75} = 0.94$$

$$b = (0.94) * (40.25)$$

$$\mathbf{b = 37.84 \text{ mm}}$$

- *Ancho efectivo del Ala a tensión*

$$\mathbf{b = w = 40.25 \text{ mm}}$$

- *Peralte efectivo del Alma del perfil*

Se asume que es 100 % efectiva el alma de la sección

$$h = h_o - 2 (R + t)$$

$$h = 150 - 2 (6.75 + 3) = 130.5 \text{ mm}$$

Se verifica la relación entre la altura plana del perfil y su espesor según la Sección 2.6.2

$$\frac{h}{t} = \frac{130 \cdot 5}{3} = 43.5 \text{ mm} < 200 \quad \text{SI CUMPLE}$$

▪ *Posición del eje neutro de la sección efectiva*

Tramos	Long Efectiva (mm)	Área (mm ²)	Y (mm)	Ay	Ay ²
1	32.84	133.52	1.5	170.28	225.96
2	12.95	38.85	4.49	174.44	785.24
3	130.5	391.5	75	29362.5	2202187.5
4	12.95	38.85	145.51	5653.06	822577.77
5	40.25	91.5	148.5	13587.75	2017780.88
	234.57			48948.39	5043333.29

$$Y_{cg} = \frac{\sum A_y}{\sum A} = \frac{48948.39}{674.46} = 72.50 \text{ mm}$$

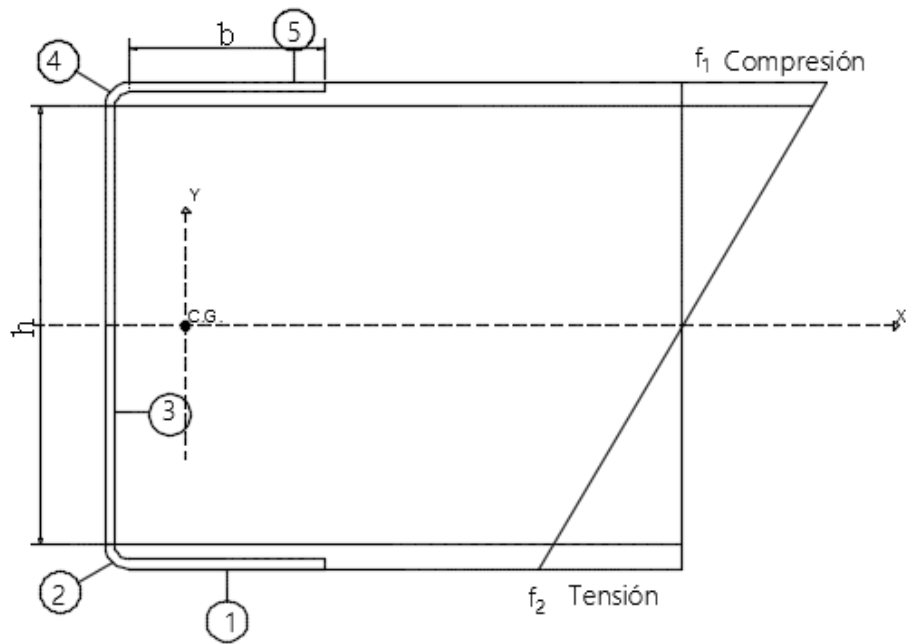


Figura 41. Diagrama de Esfuerzos de una Sección C

$$Y_1 = Y_{cg} - (R + t) = 72.50 - (6.75 + 3) = 62.82 \text{ mm}$$

$$Y_2 = h - Y_1 = 130.5 - 62.82 = 67.68 \text{ mm}$$

Esfuerzos a tensión y compresión (f_2 , f_1 respectivamente)

$$f_1 = F_y \left(\frac{Y_1}{Y_{cg}} \right) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$f_1 = 25.31 \left(\frac{62.82}{72.57} \right) = 21.91 \text{ Kg/mm}^2$$

$$f_2 = F_y \left(\frac{Y_2}{Y_{cg}} \right) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$f_2 = 25.31 \left(\frac{67.68}{72.57} \right) = 23.60 \text{ Kg/mm}^2$$

El peralte efectivo se determina de acuerdo a la suma de las porciones efectivas b_1 y b_2 . El valor de b_e , se calcula con el procedimiento de la Sección 2.6.3.1

$$\Psi = \left| \frac{f_2}{f_1} \right| \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\Psi = \left| \frac{-22.02}{22.02} \right| = 1$$

El coeficiente k , se determina de acuerdo a la Sección 2.4 (I)

$$k = 4 + 2(1 + \Psi)^3 + 2(1 + \Psi) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$k = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 * E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 \quad (\text{Ec. 2.25})$$

$$F_{cr} = 24 \left(\frac{\pi^2(20741.45)}{12(1 - 0.3^2)} \right) \left(\frac{3}{130.5} \right)^2 = 237.76 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{22.02}{237.76}} = 0.304 < 0.673$$

$$b_e = h = 130.5 \text{ mm}$$

$$\text{Para } \frac{h_o}{b_o} \leq 4$$

$$\frac{h_o}{b_o} = \frac{150}{50} = 3 < 4$$

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \Psi} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$b_1 = \frac{130.5}{3 + 1} = 32.63 \text{ mm}$$

Para $\Psi > 0.236$

$$b_2 = \frac{b_e}{2} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$b_2 = \frac{130.5}{2} = 65.25 \text{ mm}$$

La suma $b_1 + b_2 = 32.63 + 65.25 = 97.88 > Y_1$. El Alma es 100% efectiva.

$$\mathbf{h = 130.5 \text{ mm}}$$

- *Cálculo del Momento de Inercia de la Sección Efectiva*

$$I_x = \Sigma I_{xx} + \Sigma A y^2 - Y_{cg}^2 \Sigma A$$

Tramo 3:

$$I_{xx} = \frac{1}{12} (130.5)^3 (3) = 555611.91 \text{ mm}^4$$

$$+ \Sigma A y^2 = 5043536.77 \text{ mm}^4$$

$$- Y_{cg} \Sigma A = \underline{- 3668625.0 \text{ mm}^4}$$

$$I_{ex} = 1930523.68 \text{ mm}^4$$

- *Módulo de sección efectiva*

$$S_{ex} = \frac{I_x}{Y_{cg}} = \frac{1930523.69}{75} = 25740.32 \text{ mm}^3$$

- *Paso 3: Cálculo de Momento Nominal (M_n) y Momento de Diseño (ϕM_n)*

Momento de Nominal M_n :

$$M_y = F_y * S_{ex} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$M_y = (25.31) (25740.32) = 651587.39 \text{ Kg/mm}$$

Momento de Diseño por Iniciación de Fluencia (ϕM_n):

Para secciones con bordes no rígidos $\Phi = 0.90$

$$M_u = \phi M_n$$

$$\phi M_n = (0.90) (651587.39)$$

$$\phi M_n = 586338.66 \text{ Kg-mm}$$

$$\phi M_n = 0.58 \text{ T-m}$$

Reserva de Capacidad Inelástica

Para demostración de este método de cálculo se asumirá que no existe pandeo lateral.

- Paso 1: Propiedades Geométricas de la Sección
 - Patín a compresión y tensión

$$b_c = b_o - \left(\frac{t}{2}\right)$$

$$b_c = 50 - \frac{3}{2} = 48.5 \text{ mm}$$

$$b_t = b_o - \frac{t}{2} = 50 - \frac{3}{2} = 48.5 \text{ mm}$$

- Altura del alma

$$h = h_o - t$$

$$h = 150 - 3 = 147 \text{ mm}$$

- Paso 2: Propiedades efectivas de la sección

El cálculo del ancho efectivo es igual que el obtenido en el procedimiento por Inicio de Fluencia, por lo tanto, los valores de b y h son:

$$b = 37.84 \text{ mm}$$

$$h = 130.5 \text{ mm}$$

- Paso 3: Cálculo de la Deformación Unitaria del Borde a Compresión

Según la Sección 3.2.1.2 (b) se escoge $C_y = 1$, para elementos sin rigidizador de borde a compresión uniforme

$$\epsilon_{cu} = C_y * \epsilon_y$$

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_y$$

- Paso 4: Cálculo del Diagrama de Esfuerzos y Deformación

$$Y_c = \frac{b_t - b_c + 2d}{4} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

$$Y_c = \frac{2(147)}{4} = 73.5 \text{ mm}$$

$$Y_t = d - Y_c \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$Y_t = 147 - 73.5 = 73.5 \text{ mm}$$

$$Y_p = \frac{Y_c}{\frac{E_{cu}}{E_y}} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$Y_c = 73.5 \text{ mm}$$

$$Y_{cp} = Y_c - Y_p \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$Y_{cp} = 0$$

$$Y_{tp} = Y_t - Y_p \quad (\text{Ec. 3.22})$$

$$Y_{tp} = 0$$

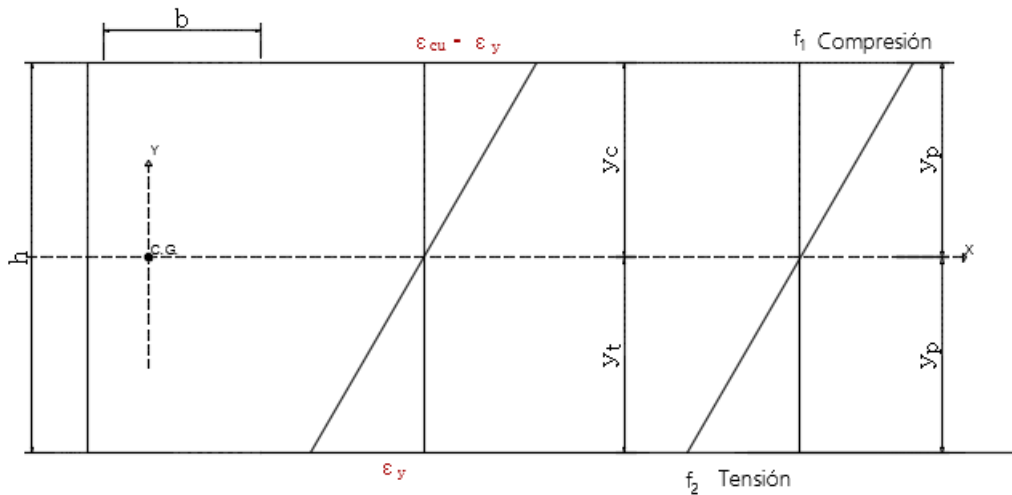


Figura 42. Diagrama de Deformación y Esfuerzo para una Sección C

▪ Paso 5: Cálculo del Momento Nominal (Mn)

Se verifica las condiciones (1), (2), (3), (4), (5) que se analizaron para el perfil abierto G.

- (1) No está sujeto a Pandeo.
- (2) No se toma en cuenta el efecto del doblado en frío para determinar F_y
- (3) Relación $\frac{Y_c}{t} = \frac{73.5}{3} = 24.5 < \lambda_1$; **SI CUMPLE**

$$\lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{\frac{F_y}{E}}} = \frac{1.11}{\sqrt{\frac{25.31}{20741.45}}} = 31.78$$

- (4) Se asume que la condición por cortante si cumple.
- (5) El ángulo del alma con la vertical es igual a $0^\circ < 30^\circ$

Si se satisface las limitaciones anteriores el Momento Nominal (M_n), se calcula a continuación. Caso contrario, no se puede calcular por este método.

$$M_n = F_y * t \left[b_c * Y_c + 2Y_{cp} \left(Y_p + \frac{Y_{cp}}{2} \right) + \frac{4}{3} * (Y_p)^2 + 2 * Y_{tp} \left(Y_p + \frac{Y_{tp}}{2} \right) + b_t * Y_t \right] \text{ (Ec. 3.25)}$$

$$M_n = 922140.54 \text{ Kg-mm} = 0.92 \text{ T-m}$$

El momento calculado por la ecuación (3.25) no debe ser mayor que $1.25M_y$, M_y =momento calculado por Inicio de Fluencia.

$$1.25 M_y = 1.25 (0.58) = 0.74 \text{ T-m}$$

$$M_n > 1.25 M_y$$

Se elige $1.25 M_y = 0.74 \text{ T-m}$

- Paso 6: Cálculo del Momento de Diseño por Reserva de Capacidad Inelástica ($M_u = \phi M_n$)

Para elementos No Rigidizados el factor de resistencia Φ , es igual a 0.90.

$$\underline{M_u} = \Phi M_n$$

$$\underline{M_u} = (0.90) (0.74) = 0.66 \text{ T-m}$$

$$\underline{\Phi M_n = 0.66 \text{ T-m}}$$

Pandeo Lateral Torsional

Como se tiene que la viga esta arriostrada lateralmente, a 1000mm.

Entonces:

$$k_t L_t = k_y L_y = 1000 \text{ mm}$$

Las propiedades de la Sección Total del perfil son las siguientes:

$$r_o = 63.99 \text{ mm}$$

$$S_x = 30666.67 \text{ mm}^3$$

$$J = 2132.15 \text{ mm}^4$$

$$C_w = 618421618.27 \text{ mm}^6$$

$$F_y = 25.31 \text{ Kg/mm}^2$$

- Paso 1: Cálculo del Esfuerzo Efectivo por Pandeo Lateral - Torsional

Se asume $C_b = 1$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{k_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2(20741.45)}{\left(\frac{100}{14.9}\right)^2} = 45.44 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[G * J + \frac{\pi^2 * E * C_w}{(k_t L_t)^2} \right] \quad (\text{Ec. 3.34})$$

$$\sigma_t = \frac{1}{(710.72)(63.99)^2} \left[7945.63(2132.15) + \frac{\pi^2(20741.45)(618421618.27)}{(1000)^2} \right]$$

$$\sigma_t = 49.32 \text{ Kg/mm}^2$$

El Esfuerzo F_e es igual a:

$$F_e = \frac{C_b * r_o * A}{S_f} \sqrt{F_{ey} * F_t} \quad (\text{Ec. 3.29})$$

$$F_e = \frac{(1)(63.99)(710.72)}{30666.67} \sqrt{(45.44)(49.32)}$$

$$\underline{F_e = 442.35 \text{ Kg/mm}^2}$$

- Paso 2: Cálculo del esfuerzo lateral torsional, F_c .

$$2.78 F_y = 2.78 (25.31) = 70.36 \text{ Kg/mm}^2$$

Se aplica el caso (I)

$$F_e > 0.78 F_y$$

$$F_c = F_y$$

$$F_c = 25.31 \text{ Kg/mm}^2$$

- Paso 3: Cálculo de Momento Nominal (M_n)

$$M_n = S_c F_c \quad (\text{Ec. 3.27})$$

$$S_c = 25740.32 \text{ mm}^3$$

$$M_n = (25740.32) (25.31)$$

$$M_n = 651487.50 \text{ Kg-mm}$$

- Paso 4: Cálculo de Momento de Diseño ($M_u = \phi M_n$)

Para elementos No Rigidizados el factor de resistencia Φ , es igual a 0.90.

$$M_u = \Phi M_n$$

$$M_u = (0.90) (651487.50) = 586338.75 \text{ Kg-mm}$$

$$\Phi M_n = 0.58 \text{ T-m}$$

La sección C no aplica para el cálculo por Pandeo Distorsional, ya que este modo de falla solo se presenta en secciones abiertas con alas rigidizadas.

Siguiendo el mismo criterio aplicado a secciones G, se debe escoger el menor momento de diseño calculado por los procedimientos calculados.

1. Por Resistencia de la Sección
 - a. 0.58 Ton-m (Iniciación de Fluencia)
 - b. 0.66 Ton-m (Capacidad de Reserva Inelástica)
2. Por Resistencia al Pandeo Lateral- Torsional
 - a. 0.58 Ton-m

El menor momento producido es:

$$\phi M_n = 0.58 \text{ Ton-m}$$

Es decir, que en este perfil el modo de falla crítico para el cual se debe diseñar es por **PANDEO LATERAL-TORSIONAL o INICIO DE FLUENCIA.**

4.1.3 EJEMPLO 3: DISEÑO A FLEXIÓN DE UNA SECCIÓN TIPO CAJÓN (DOBLE G)

Se tiene una viga simplemente apoyada con carga distribuida lateralmente arriostrada, la distancia entre los arriostramientos es de 1200mm, para ello, se escoge la sección 2G100x50x15x2mm. Para obtener el momento de diseño de la sección se elegirá el menor momento de diseño calculado bajo los procedimientos que apliquen para este tipo de sección.

Resistencia de la Sección Transversal

Inicio de Fluencia

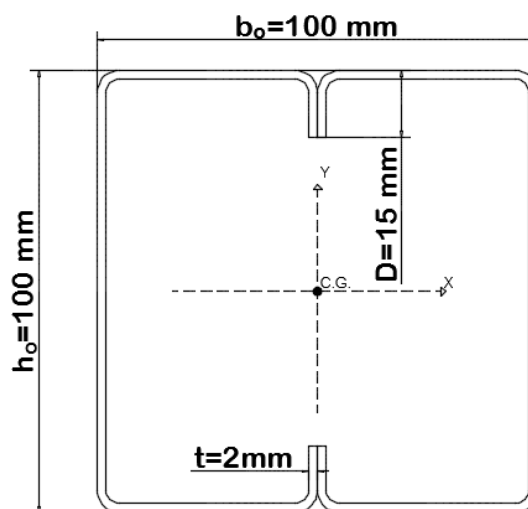


Figura 43. Sección Tipo Cajón (Doble G)

- Paso 1: Cálculo de las propiedades geométricas de las esquinas de la sección

$$r = R + \frac{t}{2} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$r = 3 + \frac{2}{2} = 4 \text{ mm}$$

$$u = 1.57 r \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$u = 1.57 (4) = 6.28 \text{ mm}$$

$$c = 0.637 r = 0.637 (4) = 2.548 \text{ mm}$$

▪ Paso 2: Cálculo de las propiedades geométricas efectivas del perfil.

▪ *Alas del perfil*

$$w = B - 2 (R + t) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$w = 50 - 2 (3 + 2) = 40 \text{ mm}$$

Se verifica la relación $\frac{w}{t} \leq 60$ de acuerdo a la sección 2.6.1

$$\frac{w}{t} = \frac{40}{2} = 20 \quad \text{SI CUMPLE}$$

○ *Ancho del Borde a compresión, b.*

Se sume que el esfuerzo f es igual al esfuerzo de fluencia F_y , según lo descrito en la sección 2.6.5(a).

$$S = 1.28 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

$$S = 1.28 \sqrt{\frac{20741.45}{25.31}} = 36.64$$

$$0.328 * S = 0.328 (36.64) = 12.02$$

Se aplica **CASO II** porque $\frac{w}{t} > 0.328 * S$

$$I_s = \frac{d^3 * t * \sin^2 \theta}{12} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

$$I_s = \frac{10^2 * 2}{12} = 166.67 \text{ mm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 \left[\frac{w}{s} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 * \frac{w}{s} + 5 \right] \quad (\text{Ec. 2.37})$$

$$I_a = 399 (2)^4 \left[\frac{20}{36.64} - 0.328 \right]^3 \leq (2)^4 \left[115 * \frac{20}{36.63} + 5 \right]$$

$$I_a = 66.0 \leq 1084.37 \quad \text{SI CUMPLE}$$

$$I_a = 66.0 \text{ mm}^4$$

$$R_I = \frac{I_s}{I_a} \leq 1$$

$$R_I = \frac{I_s}{I_a} = \frac{166.67}{66} = 2.52 > 1$$

Según AISI si R_I es mayor a la unidad se usa 1

Para obtener el valor del coeficiente de pandeo k , se aplica la sección 2.4 (I)

$k = 4$ para anchos efectivos de secciones tipo cajón.

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 * E}{12 (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (\text{Ec. 2.25})$$

$$F_{cr} = \frac{4 * \pi^2 * 20741.45}{12 (1 - 0.3^2)} \left(\frac{2}{40} \right)^2 = 157.93 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{25.31}{157.93}} = 0.40 < 0.673$$

Entonces, $b = w$

$$\underline{\underline{b = 40 \text{ mm}}}$$

- *Labio rigidizador a compresión, ds.*

Se calcula el peralte efectivo d's, de acuerdo a las Sección 2.6.5

$$\frac{w}{t} > 0.328 \cdot S$$

$$d's = d = 10 \text{ mm}$$

$$ds = (d's) (R_l)$$

$$ds = (10)(1)$$

$$\underline{\underline{ds = 10 \text{ mm}}}$$

El código no establece limitaciones para la porción a tensión del elemento por lo que las dimensiones efectivas son siguientes:

- Ancho efectivo del ala a tensión

$$\underline{\underline{b = w = 40 \text{ mm}}}$$

- Peralte efectivo del labio atiesador a tensión

$$\underline{\underline{d's = d = 10 \text{ mm}}}$$

- *Peralte efectivo del Alma del Perfil, h.*

Se asume que toda la sección aporta a la resistencia a flexión del perfil es decir, que es 100% efectiva.

$$h = h_o - 2(R + t)$$

$$h = 100 - 2(3 + 2) = 90 \text{ mm}$$

Según la disposición de la sección 2.6.2 la relación $h/t < 200$.

$$\frac{h}{t} = \frac{90}{2} = 45 \text{ mm} < 200; \text{ SI CUMPLE}$$

- *Cálculo del Centro de Gravedad Efectiva de la sección, Y_{cg} .*

TRAMOS	Longitud Efectiva, L(mm)	Área (mm ²)	Distancia a la Fibra Superior desde el Centro de gravedad de cada tramo, y (mm)	A*y	A*y ²
1	10.00	40	90.00	3600.00	324000.00
2	12.56	100.48	97.55	9801.62	956128.72
3	40.00	160	99.00	15840.00	1568160.00
4	12.56	100.48	2.45	246.38	604.12
5	40.00	160	1.00	160.00	160.00
6	8.33	40	9.17	366.62	3360.30
7	90.00	360	50.00	18000.00	900000.00
		ΣA: 960.96		ΣA*y: 48014.62	ΣAy²: 3752413.14

$$y_{cg} = \frac{\Sigma A*y}{\Sigma A} = \frac{48014.62}{960.96} = 50 \text{ mm}$$

Revisión si el alma es 100% efectiva:

$$Y_1 = Y_{cg} - (R + t) = 50 - (3 + 2) = 45 \text{ mm}$$

$$Y_2 = h - Y_1 = 90 - 45 = 45 \text{ mm}$$

Cálculo de los esfuerzos de compresión y tracción respectivamente

$$f_1 = f_y \frac{Y_1}{Y_{cg}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$f_1 = 25.31 \left(\frac{45}{50} \right) = 22.78 \text{ Kg/mm}^2$$

$f_1 =$ compresión (+)

$$f_2 = - f_1 = - 28.78 \text{ Kg/mm}^2$$

$f_2 =$ tensión (-)

Cálculo del peralte efectivo ($b_1 + b_2$), se determina según lo expuesto en la Sección 2.6.4

$$\text{Para } \frac{h_o}{b_o} = \frac{100}{100} = 1 \leq 4$$

$$\psi = \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = \left| \frac{-22.78}{22.78} \right| = 1 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$k = 24$$

$$F_{cr} = \frac{24 \cdot \pi^2 (20741.45)}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{2}{90} \right)^2 = 222.18 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{22.78}{222.18}} = 0.32 < 0.673$$

$$b_e = h = 90 \text{ mm}$$

Dado que $\psi > 0.236$ los valores de b_1 y b_2 , se calculan con las siguientes fórmulas:

$$b_1 = \frac{b_e}{3 + \psi} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$b_1 = \frac{90}{3 + 1} = 22.5 \text{ mm}$$

$$b_2 = \frac{b_e}{2} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$b_2 = \frac{90}{2} = 45 \text{ mm}$$

Se compara si $b_1 + b_2$ es mayor a la porción en compresión del ala Y_1 ,

$$b_1 + b_2 = 22.5 + 45 = 67.5 \text{ mm}$$

Como $b_1 + b_2 > Y_1$, se concluye que el alma es totalmente efectiva. Por lo tanto, no se debe realizar reducción del peralte efectivo.

$$\underline{h = 90 \text{ mm}}$$

- *Cálculo del Momento de Inercia Efectivo, I_{ex}*

Solo se considera la inercia efectiva de las almas y las pestañas rígidas ya que los momentos de inercia de las esquinas y de las almas es despreciable con respecto al eje de principal.

$$\text{Tramo 1: } I_{xx} = 4 * \frac{1}{12} 10^3 2 = 666.67 \text{ mm}^4$$

$$\text{Tramo 7: } I_{xx} = 2 * \frac{1}{12} 90^3 2 = 243000 \text{ mm}^4$$

$$\Sigma I_{xx} = 243666.67 \text{ mm}^4$$

$$\Sigma A y^2 = 3772192.06 \text{ mm}^4$$

$$-y_{cg}^2 \Sigma A = \underline{-2402400 \text{ mm}^4}$$

$$I_{ex} = 1613458.73 \text{ mm}^4$$

- *Cálculo del Módulo de la Sección Efectiva, S_{ex} , con respecto a la fibra a compresión.*

$$S_{ex} = \frac{I_{ex}}{y_c} = \frac{1613458.73}{50} = 32269.17 \text{ mm}^3$$

- *Paso 3: Cálculo del Momento Nominal y de Diseño. (M_n y ϕM_n)*

Momento Nominal:

$$M_n = F_y S_{ex} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$M_n = (25.31) (32269.17)$$

$$M_n = 816732.81 \text{ Kg-mm}$$

Momento de Diseño:

$$M_u = \phi M_n \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$\phi M_n = (0.95)(816732.81)$$

$$\phi M_n = 775896.17 \text{ Kg-mm} \approx 0.77 \text{ T-m}$$

$$\underline{\phi M_n = 0.77 \text{ T-m}}$$

El procedimiento por Reserva de Capacidad Inelástica no aplica para secciones tipo cajón ya que las fórmulas que se desarrollaron sirven para secciones abiertas.

Resistencia por Pandeo Lateral - Torsional

En este modo de falla, el momento nominal a flexión de un perfil en cajón dependerá si la longitud de arriostramiento es menor o mayor que la longitud crítica entre los apoyos laterales.

- Paso 1: Cálculo de la longitud de arriostramiento crítica, L_u .

Se considera $C_b = 1$

$$E = 20741.45 \text{ Kg/mm}^2$$

$$G = 7945.03 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (Módulo de Corte)}$$

$$J = \frac{2(ab)^2}{\left(\frac{a}{t_1}\right) + \left(\frac{b}{t_2}\right)} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

$$J = 1882384 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 1230200 \text{ mm}^4$$

$$L_u = \frac{0.36\pi C_b}{F_y S_f} \sqrt{EGJ I_y} \quad (\text{Ec.3.41})$$

$$L_u = \frac{0.36\pi}{25.31 * 27704} \sqrt{20741.45 * 7945.03 * 1882384 * 1230200}$$

$$L_u = 31508.41 \text{ mm} > L=1200 \text{ mm}$$

- Paso 2: Cálculo del Momento Nominal (Mn) y de Diseño (Mu=φMn).

Momento Nominal:

Según la Sección 3.2.2.2 (a) si $L < L_u$ el momento $M_n = M_y$. Por lo tanto, el momento será igual al calculado con el procedimiento I (Inicio de Fluencia)

$$M_n = 816732.81 \text{ Kg-mm}$$

Momento de Diseño:

Aplicando el factor de resistencia, $\phi=0.90$, el momento de diseño a flexión es igual a:

$$M_u = \phi M_n$$

$$\phi M_n = 0.90 M_n$$

$$\phi M_n = 0.90 (0.81) = 0.73 \text{ T-m}$$

$$\phi M_n = 0.73 \text{ T-m}$$

La sección cajón no aplica para el cálculo por Pandeo Distorsional, ya que este modo de falla solo se presenta en secciones abiertas con alas rigidizadas.

Siguiendo el mismo criterio aplicado a secciones G y C, se debe escoger el menor momento de diseño calculado por los procedimientos calculados.

- (1) Por Resistencia de la Sección
 - a. 0.77 Ton-m (Iniciación de Fluencia)
 - b. No Aplica (Capacidad de Reserva Inelástica)
- (2) Por Resistencia al Pandeo Lateral- Torsional
 - a. 0.73 Ton-m
- (3) Por Resistencia al Pandeo Distorsional
 - a. No Aplica

El menor momento producido es:

$$\phi M_n = 0.73 \text{Ton-m}$$

*Es decir, que en este perfil el modo de falla crítico para el cual se debe diseñar es por **PANDEO LATERAL-TORSIONAL**.*

4.2 TABLAS Y GÁFICAS DE RESUMEN DE DISEÑO A FLEXIÓN DE LOS PERFILES C, G, Y TIPO CAJÓN (DOBLE G)

El propósito de este trabajo es mostrar de una manera la fácil la resistencia a flexión de los perfiles doblados en frío, para ello, se mostraron en la Sección 4.1 de este capítulo, los métodos de cálculo para la elementos estructurales más comunes como: Correas (Sección G) (Sec. 4.1.1), Canales (Sección C) (Sec. 4.1.2), Cajones (Doble G) (Sec. 4.1.3).

Una vez determinado la resistencia flexión para las diferentes dimensiones de las secciones G, C y Cajón, se elaboró tablas y gráficas de resumen donde se puede obtener el momento de diseño sin necesidad de realizar todo el procedimiento de cálculo. A continuación se presentan los resultados obtenidos para secciones con Esfuerzo de Fluencia, $F_y = 36 \text{ ksi}$, también se realizó tablas para $F_y = 50 \text{ ksi}$ ver Anexo 3.

4.2.1 TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO SECCIONES G

Tabla 2. Momentos de Diseños para Secciones G, $F_y=36$ ksi

CORREAS "G"					
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)					
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO DISTORSIONA L	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
				L= 3.00 m	L= 6.00 m
G60x30x10x1.5mm	0.09	0.11	0.08	0.03	0.01
G60x30x10x2mm	0.11	0.14	0.11	0.04	0.02
G60x30x10x3mm	0.15	0.18	0.14	0.08	0.04
G80x40x15x1.5mm	0.16	0.20	0.15	0.07	0.03
G80x40x15x2mm	0.21	0.26	0.20	0.10	0.04
G80x40x15x3mm	0.29	0.36	0.28	0.17	0.08
G100x50x15x2mm	0.33	0.41	0.30	0.18	0.07
G100x50x15x3mm	0.46	0.58	0.45	0.29	0.13
G100x50x20x4mm	0.59	0.74	0.58	0.43	0.22
G100x50x25x5mm	0.71	0.88	0.69	0.56	0.34
G125x50x15x2mm	0.44	0.55	0.38	0.23	0.08
G125x50x15x3mm	0.62	0.78	0.60	0.36	0.14
G125x50x20x4mm	0.81	1.02	0.79	0.55	0.25
G125x50x25x5mm	0.98	1.23	0.96	0.73	0.39
G125x50x30x6mm	1.13	1.42	1.12	0.90	0.55
G150x50x15x2mm	0.57	0.71	0.47	0.26	0.09
G150x50x15x3mm	0.80	1.00	0.77	0.42	0.16
G150x50x20x4mm	1.05	1.32	1.02	0.66	0.23
G150x75x25x5mm	1.71	2.14	1.66	1.44	0.84

*Revisar la resistencia por Pandeo Lateral-Torsional en las Gráfica 1, 2, 3 para longitudes de arriostramiento diferentes a $L=3.00$ m y $L=6.00$ m.

Tabla 3. Momento de Diseño para Secciones G, Fy= 36 ksi

CORREAS "G"					
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)					
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO DISTORSIONAL	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
				L= 3.00 m	L= 6.00 m
G150x75x30x6mm	2.00	2.50	1.95	1.74	1.17
G175x50x15x2mm	0.70	0.88	0.56	0.32	0.10
G175x50x15x3mm	1.00	1.25	0.94	0.49	0.18
G175x75x25x4mm	1.76	2.20	1.70	1.43	0.68
G175x75x25x5mm	2.11	2.64	2.05	1.74	0.93
G175x75x30x6mm	2.49	3.11	2.42	2.12	1.31
G200x50x15x2mm	0.84	1.06	0.66	0.37	0.11
G200x50x15x3mm	1.21	1.51	1.10	0.56	0.20
G200x75x25x4mm	2.12	2.65	2.04	1.70	0.75
G200x75x25x5mm	2.54	3.18	2.46	2.07	1.02
G200x75x30x6mm	3.01	3.76	2.92	2.52	1.42
G250x75x25x4mm	2.89	3.61	2.68	2.26	0.91
G250x100x25x5mm	4.20	5.25	3.83	3.73	2.73
G250x100x30x6mm	5.00	6.25	4.82	4.53	2.96
G300x100x30x4mm	4.53	5.67	3.76	4.04	2.16
G300x100x35x5mm	5.62	7.03	5.27	5.08	2.91
G300x100x35x6mm	6.56	8.21	6.33	5.93	3.63

*Revisar la resistencia por Pandeo Lateral-Torsional en las Gráfica 3, 4, 5 ,6, 7, 8 para longitudes de arriostramiento diferentes a L=3.00m y L=6.00m.

4.2.2 TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO SECCIONES C

Tabla 4. Momento de Diseño para Secciones C, $F_y = 36$ ksi

CANALES "C"				
PERFILES	MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)			
	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
			L= 3.00 m	L= 6.00 m
C60x30x2mm	0.09	0.12	0.03	0.01
C60x30x3mm	0.13	0.16	0.06	0.03
C60x30x4mm	0.15	0.19	0.10	0.05
C80x40x2mm	0.15	0.19	0.06	0.02
C80x40x3mm	0.24	0.30	0.12	0.06
C80x40x4mm	0.30	0.37	0.19	0.09
C80x40x5mm	0.35	0.43	0.25	0.14
C80x40x6mm	0.38	0.48	0.30	0.18
C100x50x2mm	0.22	0.28	0.09	0.04
C100x50x3mm	0.38	0.47	0.21	0.09
C100x50x4mm	0.49	0.62	0.33	0.16
C100x50x5mm	0.58	0.73	0.43	0.23
C100x50x6mm	0.66	0.82	0.52	0.31
C100x60x4mm	0.58	0.72	0.43	0.22
C100x60x5mm	0.69	0.86	0.56	0.33
C100x60x6mm	0.78	0.97	0.66	0.44
C125x50x2mm	0.31	0.38	0.12	0.04
C125x50x3mm	0.51	0.64	0.24	0.10

*Revisar la resistencia por Pandeo Lateral-Torsional en las Gráficas 9 al 12 para longitudes de arriostramiento diferentes a $L=3.00$ m y $L=6.00$ m.

Tabla 5. Momento de Diseño para Secciones C, $F_y = 36$ Ksi

CANALES "C"				
PERFILES	MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)			
	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
			L= 3.00 m	L= 6.00 m
C125x50x4mm	0.67	0.84	0.39	0.18
C125x50x5mm	0.80	1.00	0.53	0.26
C125x50x6mm	0.91	1.14	0.67	0.35
C125x60x5mm	0.93	1.17	0.70	0.36
C125x60x6mm	1.07	1.33	0.85	0.49
C125x60x8mm	1.29	1.61	1.12	0.78
C125x80x6mm	1.38	1.72	1.22	0.83
C125x80x8mm	1.69	2.11	1.57	1.22
C125x80x10mm	1.92	2.40	1.85	1.55
C150x50x2mm	0.40	0.50	0.14	0.05
C150x50x3mm	0.66	0.83	0.29	0.12
C150x50x4mm	0.87	1.09	0.45	0.20
C150x50x5mm	1.04	1.30	0.63	0.29
C150x50x6mm	1.20	1.49	0.80	0.39
C150x60x5mm	1.20	1.50	0.81	0.37
C150x60x6mm	1.38	1.73	1.05	0.54
C150x60x8mm	1.69	2.11	1.40	0.88
C150x80x6mm	1.76	2.20	1.51	0.92
C150x80x8mm	2.18	2.73	1.93	1.44
C150x80x10mm	2.51	3.14	2.37	1.88

*Revisar la resistencia por Pandeo Lateral-Torsional en las Gráfica 12 al 14 para longitudes de arriostramiento diferentes a $L=3.00$ m y $L=6.00$ m.

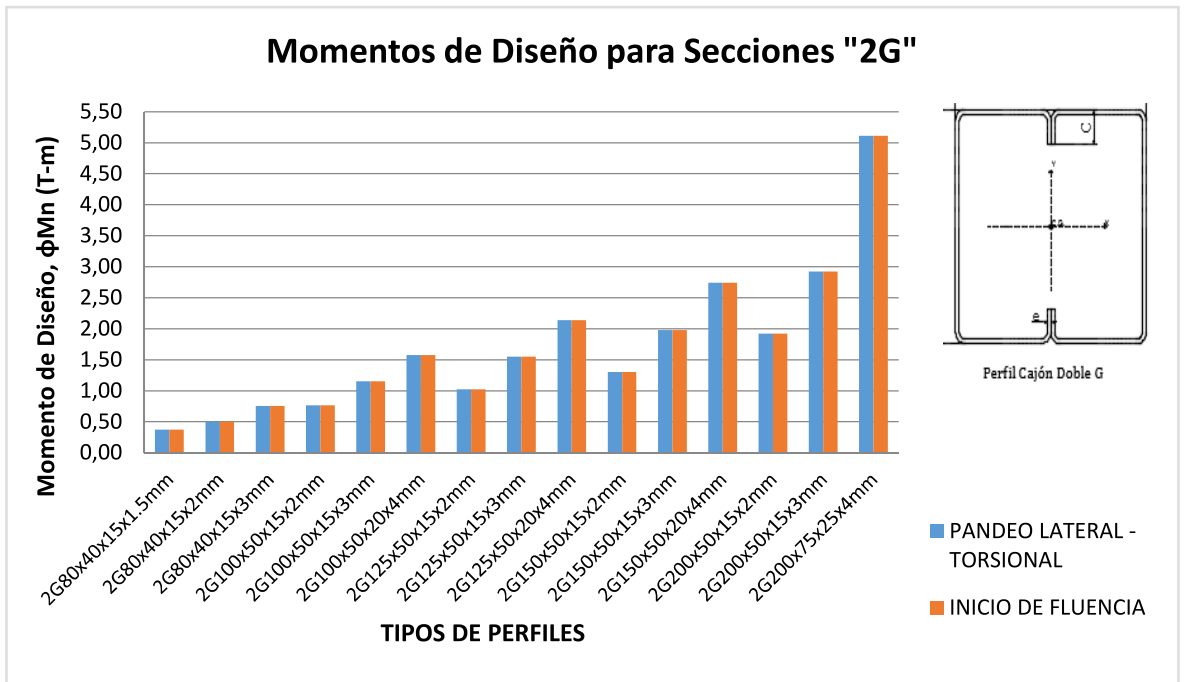
4.2.3 TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO SECCIONES TIPO CAJÓN (2G)

Tabla 6. Momento de Diseño de Secciones Tipo Cajón, $F_y=36$ ksi

TIPO CAJÓN "2G"			
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)			
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
		L_u (mm)	ϕM_n
2G80x40x15x1.5mm	0.38	24997.43	0.38
2G80x40x15x2mm	0.50	24884.92	0.50
2G80x40x15x3mm	0.75	24912.13	0.75
2G100x50x15x2mm	0.77	31511.01	0.77
2G100x50x15x3mm	1.15	31542.62	1.15
2G100x50x20x4mm	1.58	31706.61	1.58
2G125x50x15x2mm	1.02	30270.90	1.02
2G125x50x15x3mm	1.55	30233.89	1.55
2G125x50x20x4mm	2.14	30322.23	2.14
2G150x50x15x2mm	1.30	29110.20	1.30
2G150x50x15x3mm	1.98	29026.58	1.98
2G150x50x20x4mm	2.74	24722.16	2.74
2G200x50x15x2mm	1.92	26979.32	1.92
2G200x50x15x3mm	2.92	26832.60	2.92
2G200x75x25x4mm	5.11	37642.77	5.11

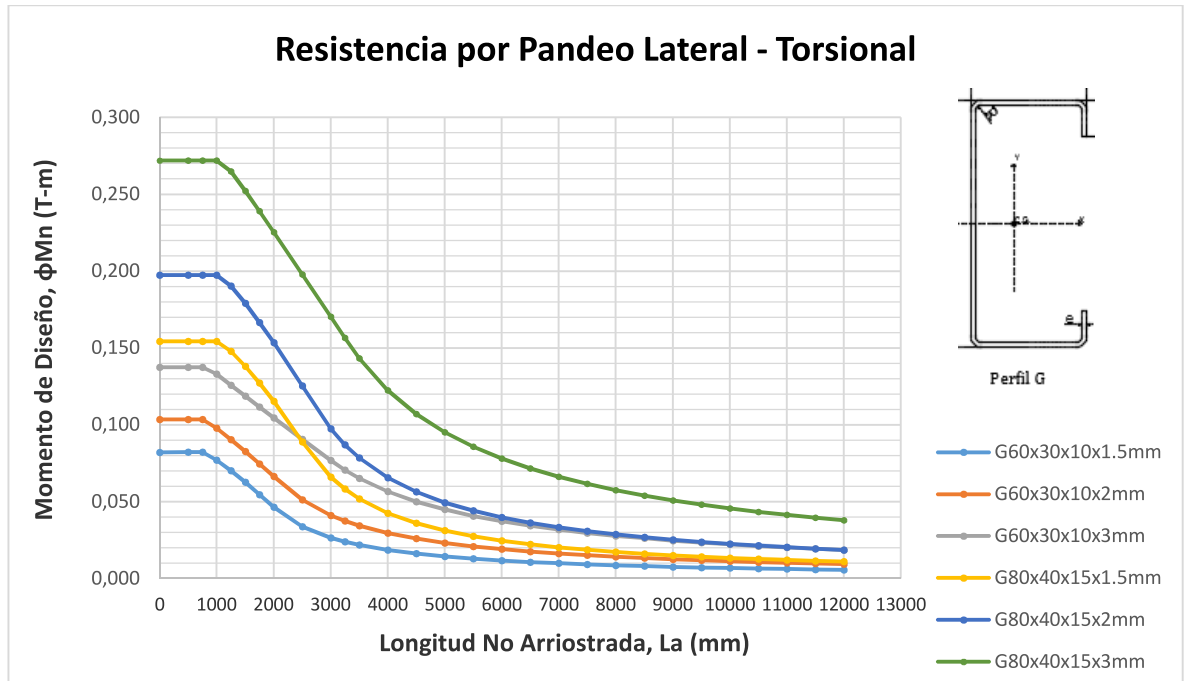
*Momento de diseño aplicado solo a longitudes no arriostradas menores que la longitud crítica, L_u .

Gráfica 1. Momento de Diseño de una Sección Cajón, $F_y=36$ Ksi

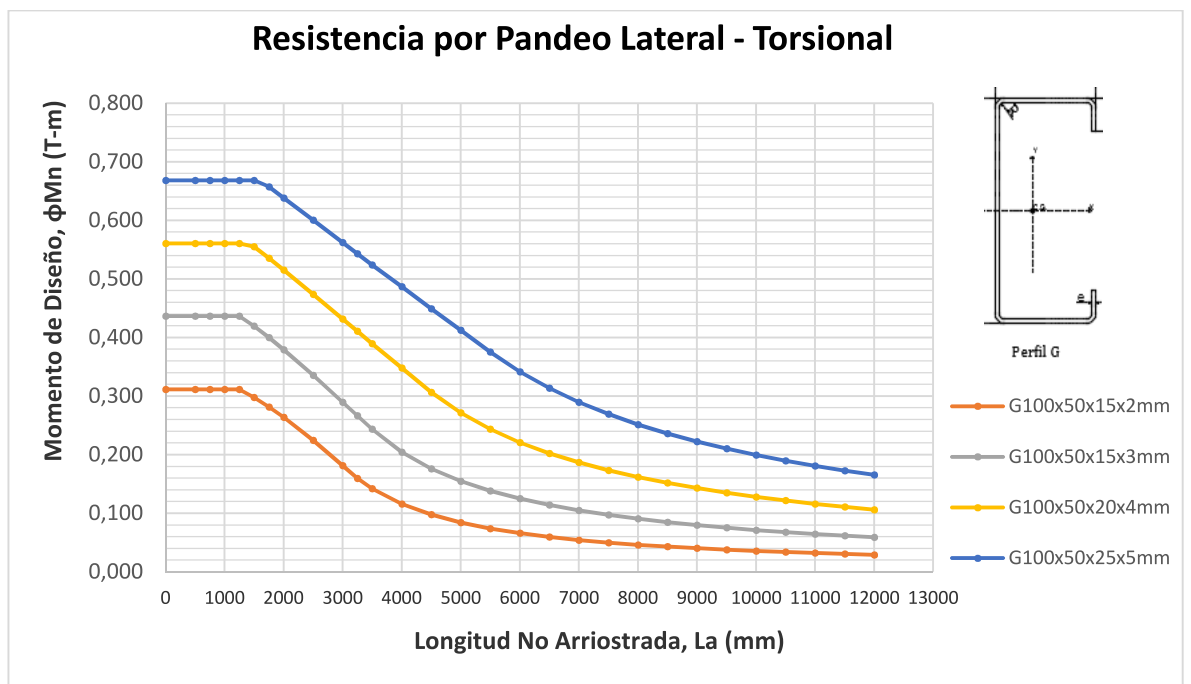


4.2.4 GRÁFICA DE MOMENTO DE DISEÑO POR PANDEO LATERAL-TORSIONAL DE SECCIONES G

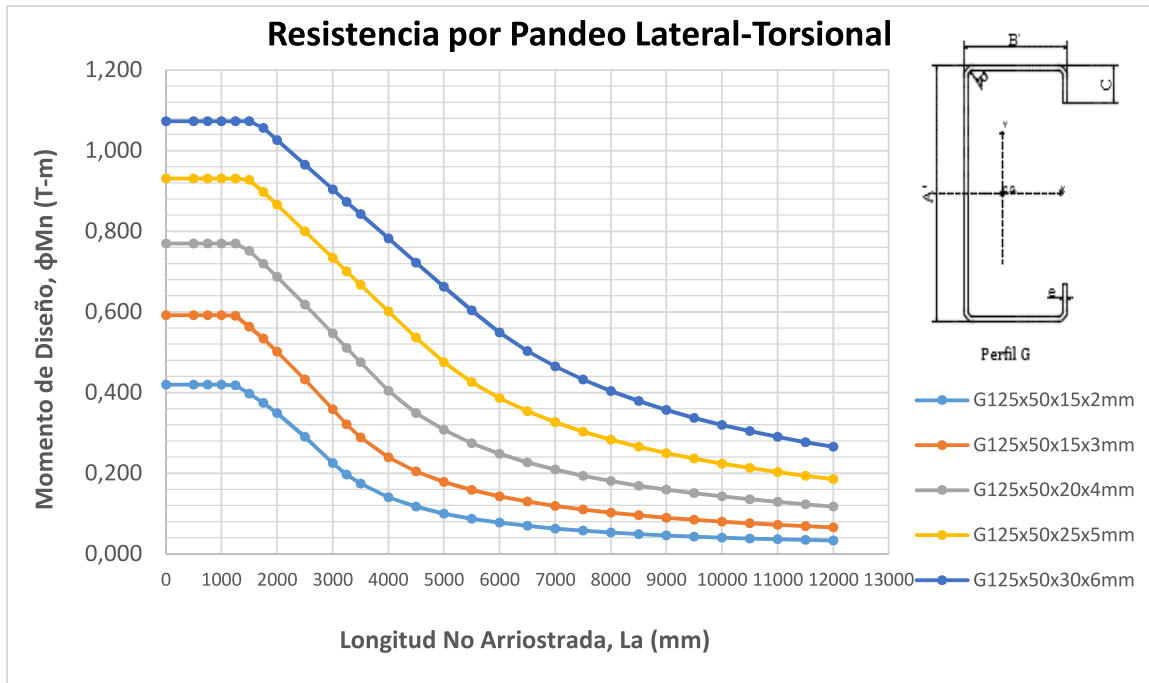
Gráfica 2. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi



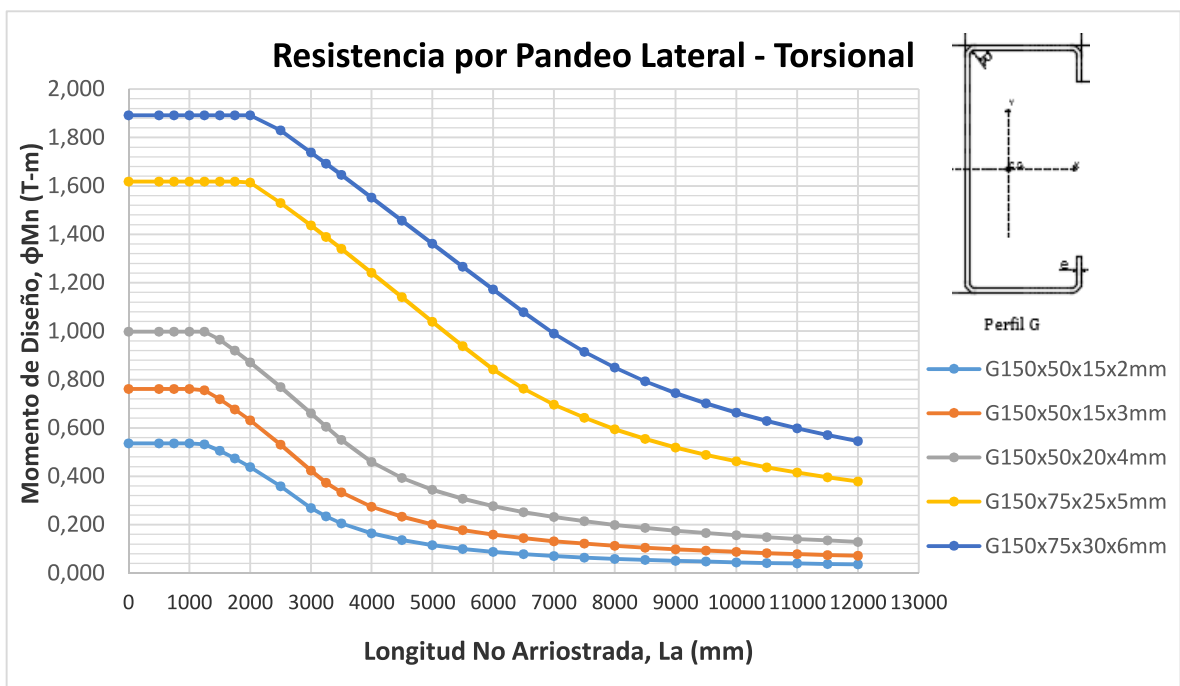
Gráfica 3. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi



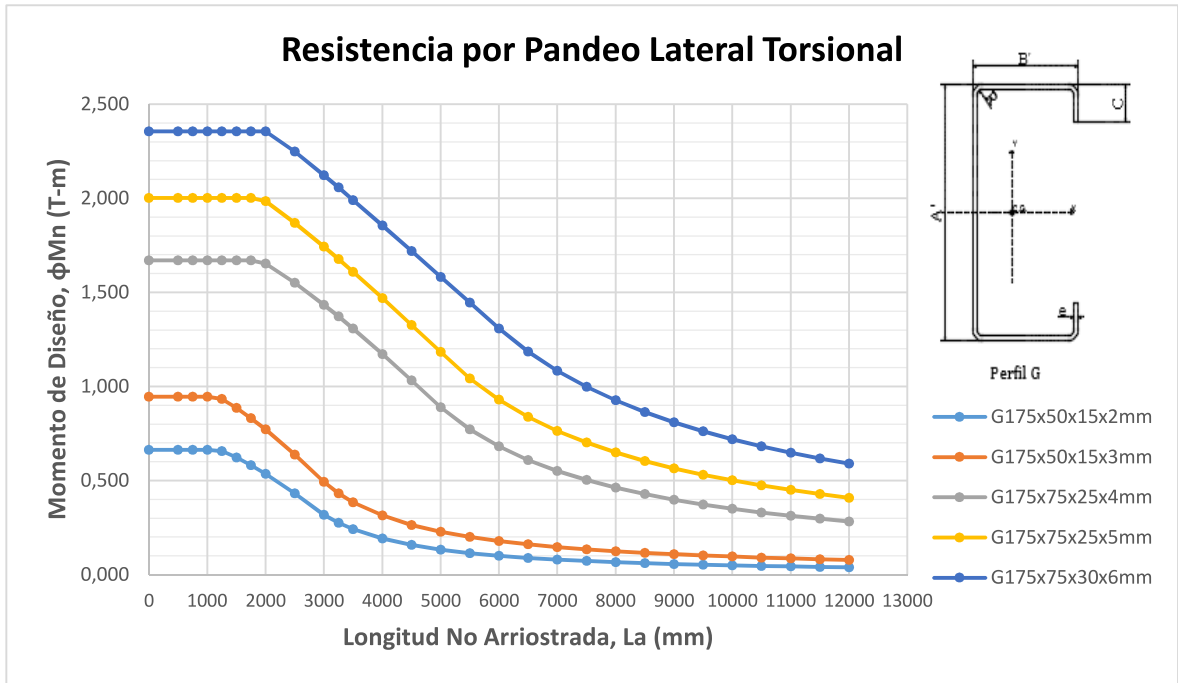
Gráfica 4. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi



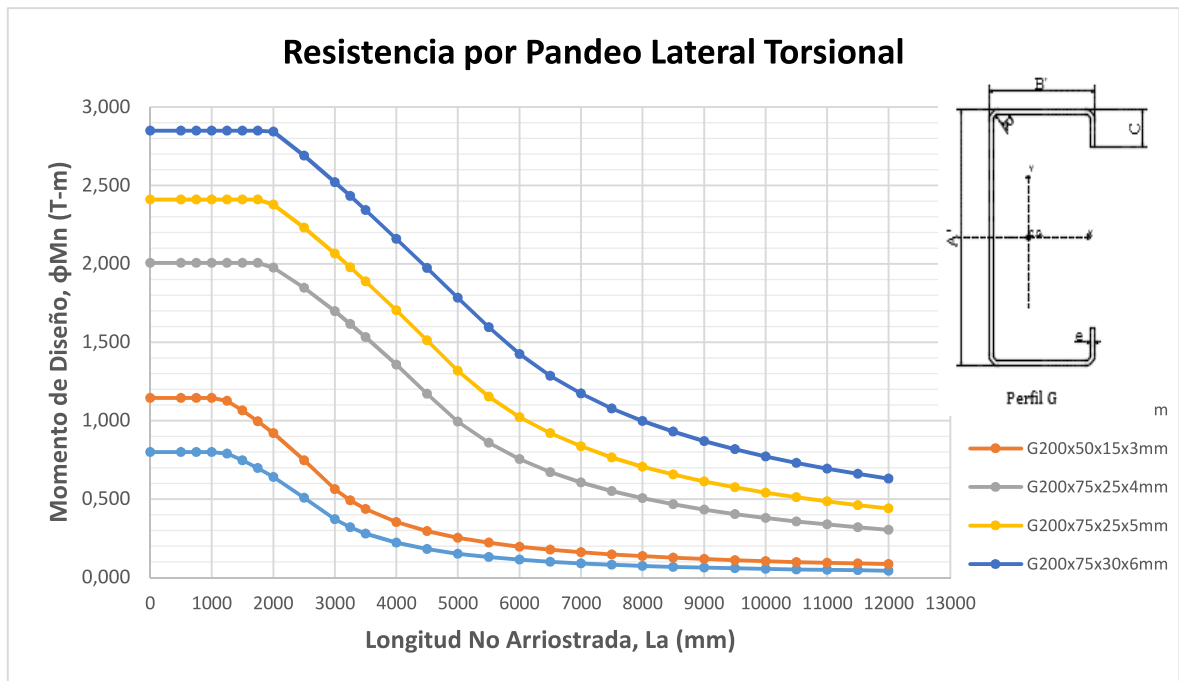
Gráfica 5. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi



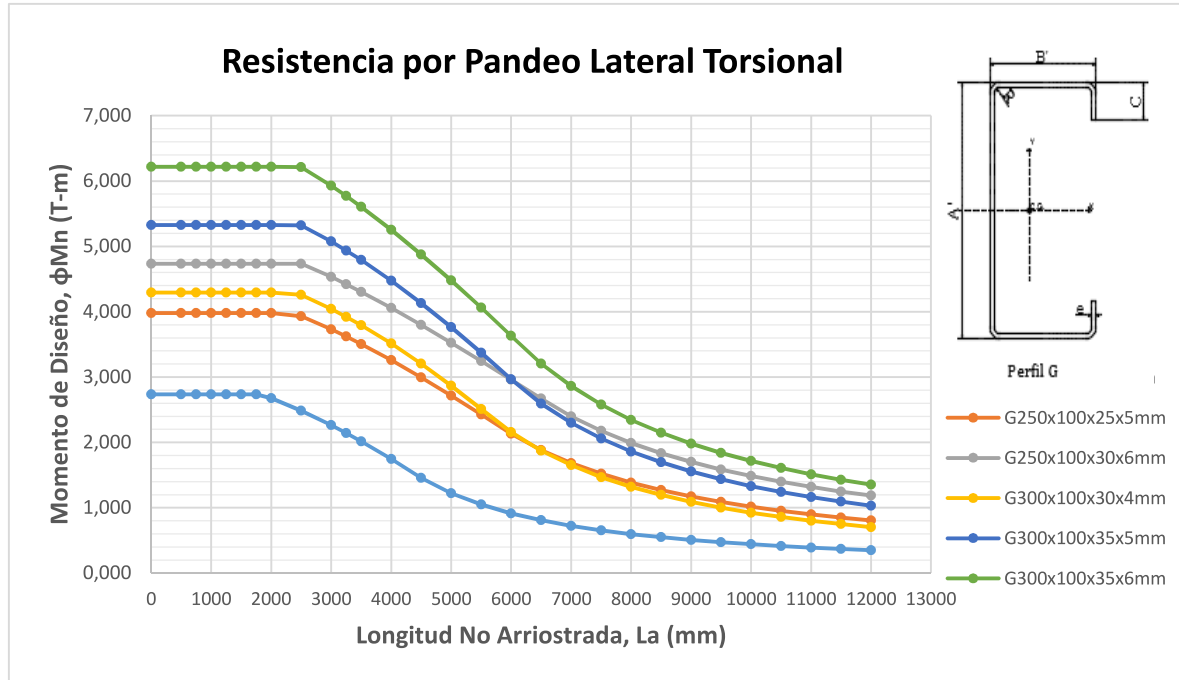
Gráfica 6. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi



Gráfica 7. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi

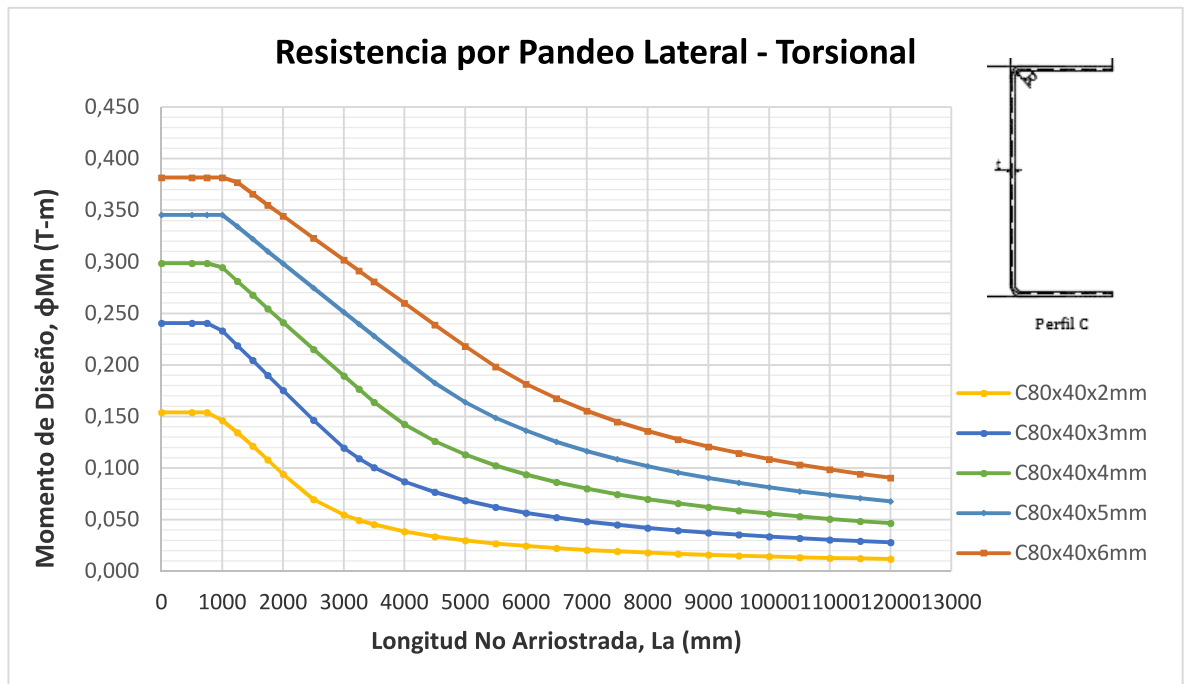


Gráfica 8. Momento de Diseño por Resistencia al Pandeo Lateral-Torsional Sección G, $F_y = 36$ ksi

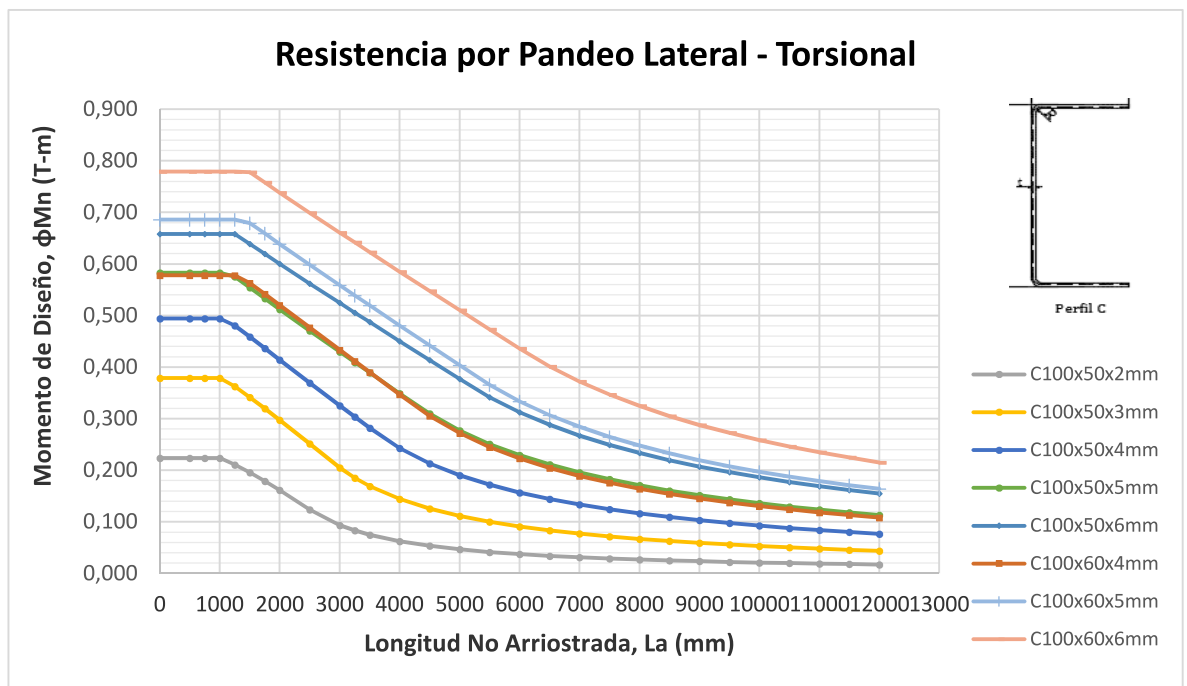


4.2.5 GRÁFICA DE MOMENTO DE DISEÑO POR PANDEO LATERAL-TORSIONAL DE SECCIONES C.

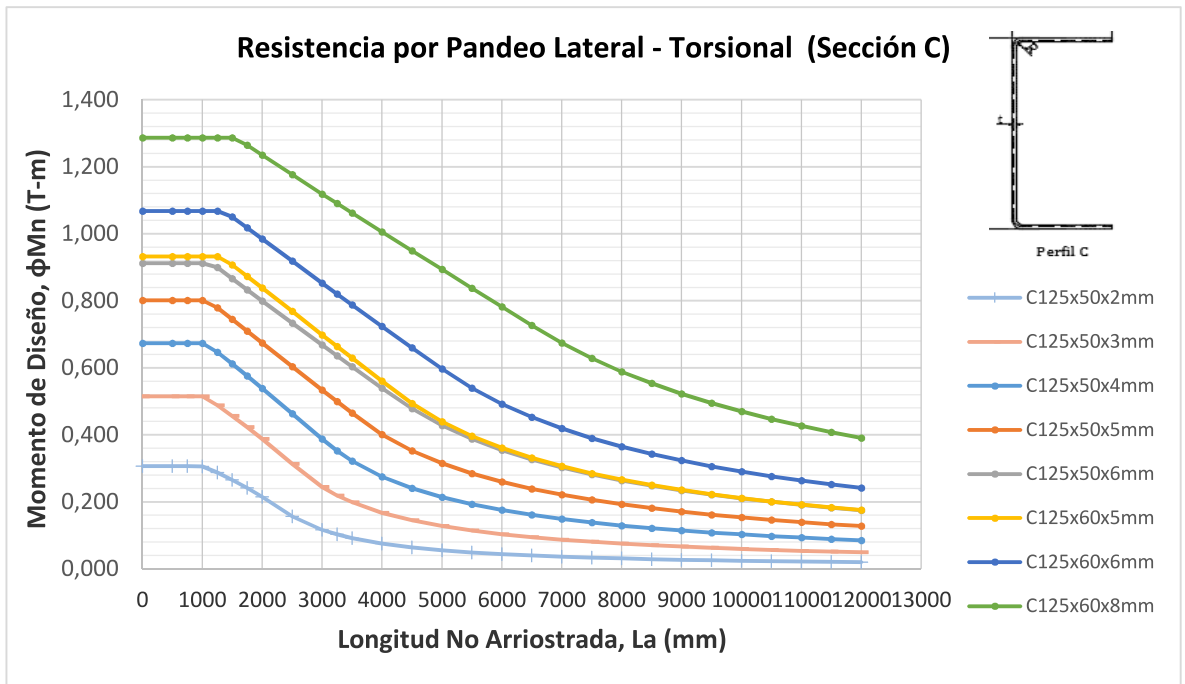
Gráfica 9. Momento de Diseño por Pandeo Lateral – Torsional Sección C, $F_y = 36$ ksi



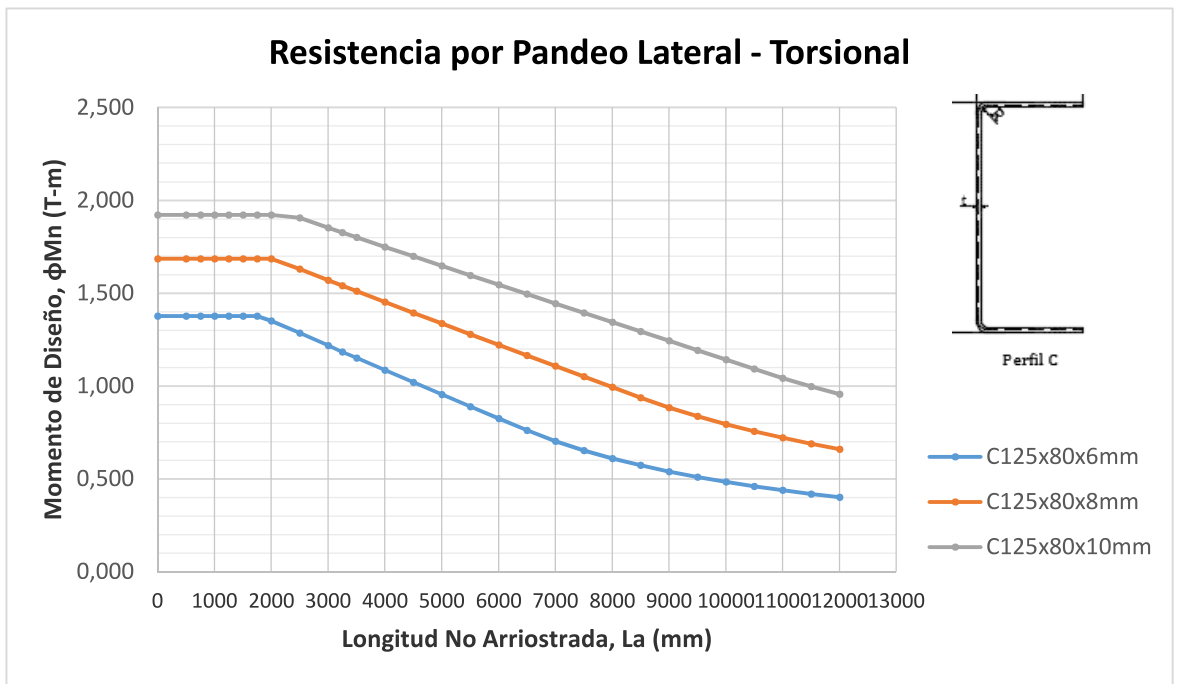
Gráfica 10. Momento de Diseño por Pandeo Lateral- Torsional Sección C, $F_y = 36$ ksi



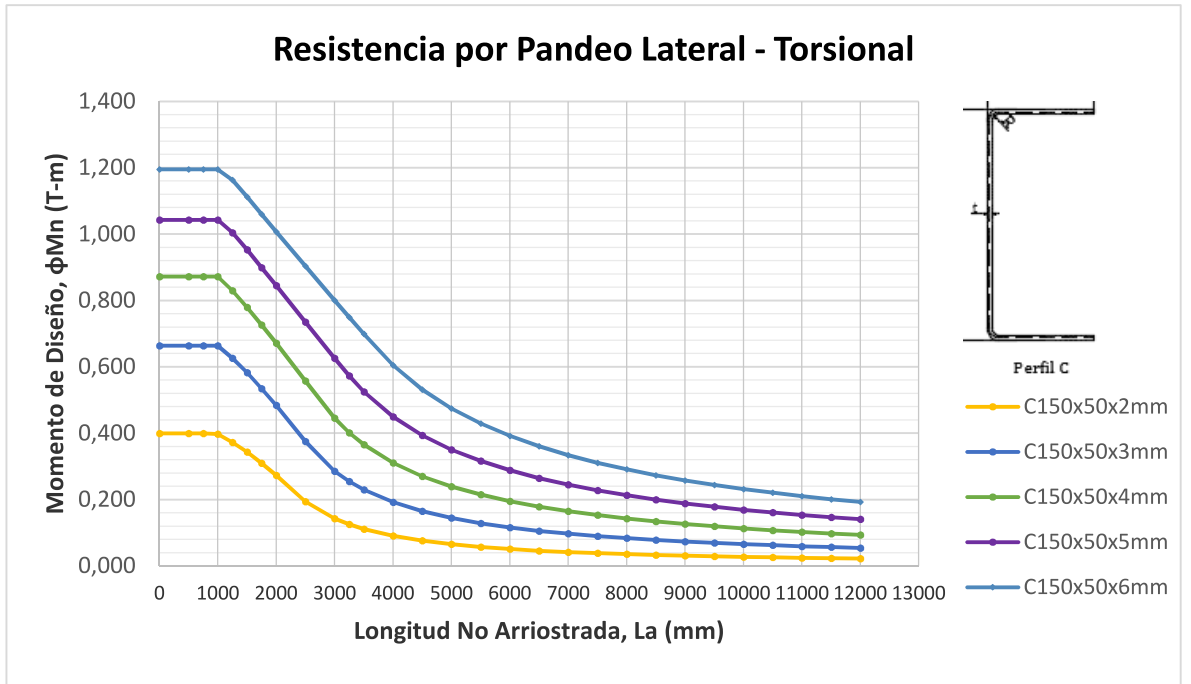
Gráfica 11. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional Sección C, $F_y = 36$ ksi



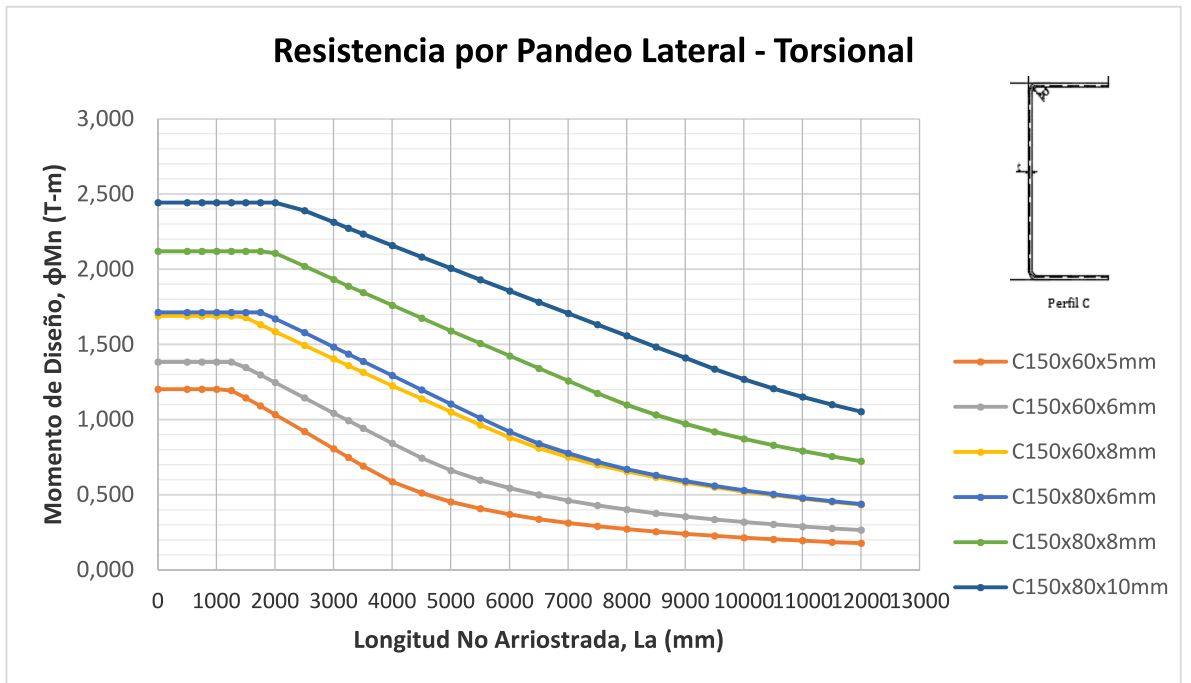
Gráfica 12. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional Sección C, $F_y = 36$ ksi



Gráfica 13. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional Sección C, $F_y = 36 \text{ ksi}$



Gráfica 14. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional Sección C, $F_y = 36 \text{ ksi}$



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los resultados mostraron que el pandeo lateral y distorsional es crítico en las secciones G, ya que con estos se obtuvieron los menores momentos de diseño.
- La resistencia por pandeo lateral-torsional para las secciones abiertas G y C dependen de la longitud de arriostramiento lateral, ya que son inversamente proporcionales, es decir, mientras más grandes sea la separación entre los arriostramientos laterales, la capacidad a flexión va a disminuir o viceversa.
- Las secciones tipo cajón (doble G), debido a que tienen dos almas que rigidizan al elemento, poseen mayor resistencia a flexión por pandeo lateral-torsional que las secciones abiertas.
- Las tablas y gráficas conseguidas darán facilidad para obtener el momento de diseño a flexión de una forma más rápida, ya que no es necesario hacer todo el procedimiento de cálculo.
- Se observó en las gráficas (Gráf.8, 11,14) que en ciertos perfiles de igual peralte pero con diferente ancho de ala y espesor, la resistencia por pandeo lateral-torsional tiene resultados similares.
- Se debe revisar para los perfiles de secciones abiertas tipo G (correas) la resistencia por pandeo lateral-torsional y distorsional, debido a que estos modos de falla es crítico para estas secciones.
- Es necesario tener en cuenta las limitaciones de diseño cuando se requiera calcular el momento por Reserva de Capacidad Inelástica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arquitectura 21. (Diciembre de 2012). *Perfiles metalicos doblados en frio tema bastante extenso*. Recuperado el 16 de Enero de 2015, de Arquitectura 21: <http://www.arquitectura21.com/2012/02/perfiles-metalicos-doblados-en-frio-tema-bastante-extenso.html>
- Cancino, A. M. (2009). Estudio y aplicación Especificación AISI 2001 North American Specification for the desing of cold-formed steel structural members. (D. Dissertation, Ed.) Universidad de Concepción.
- Chao, P. G. (14 de Abril de 2011). *Wikipedia*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de http://es.wikipedia.org/wiki/Perfilado#mediaviewer/File:L%C3%ADnea_de_perfilado.jpg
- COMENTARIOS AL REGLAMENTO ARGENTINO DE ELEMENTO ESTRUCTURALES DE ACERO DE SECCIÓN ABIERTA CONFORMADOS EN FRÍO* (Julio ed.). (2009). Buenos Aires, Argentina: INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL . Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/303_2013/comentarios%20303_2013.pdf
- Copyright American Iron and Steel Institute 1997. (1996). Especificación AISI para el Diseño de Miembros Estructurales de Acero. En C. d. Steel, *MIEMBROS (ELEMENTOS)* (págs. 51-52). Washington, U.S.A. Recuperado el 24 de Octubre de 2014
- Copyright American Iron and Steel Institute. (2007). Especificación AISI para el Diseño de Miembros Estructurales de Acero. En C. d. Steel, *Members* (págs. 51-52). Washington, U.S.A. Recuperado el 24 de Octubre de 2014
- Desmond, T. P., PekÖz, T., & G., W. (Noviembre de 1980). *Intermediate stiffeners for thin-walled members*. (M. S. -Rolla), Ed.) Recuperado el 28 de Febrero de 2015, de <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/35062/Page%200119-%20Edge%20Stiffeners%20for%20Cold-%20Formed%20Steel%20Members.pdf?sequence=1>
- E-CENTRO. (s.f.). *E-CENTRO Articulos Informativos*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2014, de http://centrodeartigo.com/articulos-informativos/article_69041.html
- Galarza, V. V. (2009). *Diseño de una Estructura de Acero Formado en Frío por el método LRFD para un Galpon Industrial*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado el 28 de Noviembre de 2014, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10564/1/D-42724.pdf>
- Gillen, D. M., & Umaña, R. V. (2002). *Manual de Construcción para Estructuras Metálicas con base en Perfiles Doblados en Frío*. Costa Rica: Escuela de

- Ingeniería en Construcción. Recuperado el 08 de Diciembre de 2014, de <http://bibliodigital.itcr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/2238/252/tesis.pdf?sequence=1>
- Hancock, G. J. (1997). Design for Distortional Buckling of Flexural. En G. J. Hancock, *Thin-Walled Structures* (págs. 3-12). Elsevier Science Ltd.
- IPAC Duferco Group. (2014). *SERVICIOS*. Recuperado el 12 de ENERO de 2014, de <http://www.ipac-acero.com/servicios.php>
- M.Sc., M. R. (s.f.). *Diseño de Naves industriales con Lamina Delagada de Acero*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2014, de Publicaciones ESPE- Libros Virtuales: <http://publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/naves-industriales/naves-industriales/naves-industriales01.pdf>
- Marija, R. (2000). Tablas y propiedades de perfiles laminados en frío pertenecientes a la fábrica nacional Metalco. *Ingeniería- Revista de la Universidad de Costa Rica*, 201-204. Recuperado el 03 de Diciembre de 2014, de <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/8004/7626>
- MSC Ingenieros S.A. (s.f.). Fórmulas para determinar Propiedades de las Secciones . Nicaragua. Recuperado el 13 de Diciembre de 2014, de <http://www.mscestructurales.com/descargas/Formulas%20para%20Determinar%20Propiedades%20de%20Secciones.pdf>
- Peña, M. C., & Paredes, I. J. (2014 de Enero de 13). *Índice de /PUBLICO/04_INGENIERIA CIVIL/ACERO 2/Texto Laminados en Frio/*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2014, de ftp://soporte.uson.mx/publico/04_INGENIERIA%20CIVIL/ACERO%202/Texto%20Laminados%20en%20Frio/CAPITULO3.PDF
- Pérez, O. A. (2004). Diseño de una Máquina Perfiladora de Chapa en frío. 19-41, Anexo A. Catalunya. Recuperado el Diciembre de 2014, de <http://hdl.handle.net/2099.1/2601>
- Tapia, G. L. (2006). *Diseño y ensayo de Cerchas con Perfiles de Acero Galvanizado de Bajo Espesor*. Chile: Universida Austral de Chile. Recuperado el 04 de Diciembre de 2014, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/bmfci392d/doc/bmfci392d.pdf>
- UTN – FRM – CIVIL. (12 de Mayo de 2006). Recuperado el 12 de diciembre de 2014, de ELEMENTOS CON CHAPA CONFORMADA EN FRÍO- Secciones Tubulares- Secciones Abiertas: http://www1.frm.utn.edu.ar/metalicas/Ciclo%202009/Guias%20de%20Estudio/CMM_Elementos%20con%20Chapa%20Conformada.pdf
- Wei-Wen Yu, P. P. (1996). SECCION C. En *Comentario sobre la Especificación para Acero Conformado en Frío, AISI, 1996* . Copyright American Iron and Steel Institute 1997. Obtenido de http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Comentario2da_parte.pdf

- Wei-Wen Yu, P. P. (2000). *Cold-Formed Steel Desing* (Tercera ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado el 28 de Octubre de 2014, de <http://www.nosazimadares.ir/sazeh/DocLib9/Cold%20formed%20steel%20design/Binder1.pdf>
- Y. Shifferaw, B. S. (2007). Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Johns Hopkins University, Whiting School of Engineering: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/inelasticbending/shifferaw-schafer-ssrc07-v10.pdf>
- Yener, M., & Peköz, T. (1980). *MOSpace*. (M. S. Rolla), Editor) Recuperado el 13 de Noviembre de 2014, de Inelastic load carrying capacity of cold-formed steel beams: <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/handle/10355/16658>

ANEXOS

TABLA DE CONTENIDO ANEXOS

ANEXO 1.....	126
TABLAS DE PROPIEDADES DE LAS SECCIONES.....	126
CORREAS "G"	126
CORREAS "G"	127
ANEXO 2.....	136
GRÁFICAS DE MOMENTOS DE DISEÑO DE SECCIONES C Y G CON $F_y=36$ ksi	136
.....	136
ANEXO 3.....	139
TABLAS Y GRÁFICAS DE MOMENTO DE DISEÑO PARA SECCIONES C, G,	
CAJÓN (2G) CON $F_y = 50$ ksi	139
ANEXO 4.....	155
FÓRMULAS PARA CALCULAR LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS	
SECCIONES C Y G.....	155

ANEXO 1

TABLAS DE PROPIEDADES DE LAS SECCIONES

CORREAS "G"

CORREAS "G"		PROPIEDADES DIMENSIONALES																			
		DIMENSIONES REALES (mm)							DIMENSIONES PLANAS (mm)							DIMENSIONES EFECTIVAS (mm)					
PERFILES	ho	bo	D	t	R	u	w	h	d's	b	b1	b2	h	ds	DIMENSIONES REALES (mm)		DIMENSIONES PLANAS (mm)		DIMENSIONES EFECTIVAS (mm)		
															ho	bo	D	t	R	u	w
G60x30x10x1.5mm	60	30	10	2	2.25	4.71	22.50	52.50	6.25	22.50	52.50	6.25	52.50	6.25	52.50	6.25	52.50	6.25	52.50	6.25	52.50
G60x30x10x2mm	60	30	10	2	3.00	6.28	20.00	50.00	5.00	20.00	50.00	5.00	50.00	5.00	50.00	5.00	50.00	5.00	50.00	5.00	50.00
G60x30x10x3mm	60	30	10	3	4.50	9.42	15.00	45.00	2.50	15.00	45.00	2.50	45.00	2.50	45.00	2.50	45.00	2.50	45.00	2.50	45.00
G80x40x15x1.5mm	80	40	15	2	2.25	4.71	32.50	72.50	11.25	32.50	72.50	11.25	72.50	11.25	72.50	11.25	72.50	11.25	72.50	11.25	72.50
G80x40x15x2mm	80	40	15	2	3.00	6.28	30.00	70.00	10.00	30.00	70.00	10.00	70.00	10.00	70.00	10.00	70.00	10.00	70.00	10.00	70.00
G80x40x15x3mm	80	40	15	3	4.50	9.42	25.00	65.00	7.50	25.00	65.00	7.50	65.00	7.50	65.00	7.50	65.00	7.50	65.00	7.50	65.00
G100x50x15x2mm	100	50	15	2	3.00	6.28	40.00	90.00	10.00	40.00	90.00	10.00	90.00	10.00	90.00	10.00	90.00	10.00	90.00	10.00	90.00
G100x50x15x3mm	100	50	15	3	4.50	9.42	35.00	85.00	7.50	35.00	85.00	7.50	85.00	7.50	85.00	7.50	85.00	7.50	85.00	7.50	85.00
G100x50x20x4mm	100	50	20	4	6.00	12.56	30.00	80.00	10.00	30.00	80.00	10.00	80.00	10.00	80.00	10.00	80.00	10.00	80.00	10.00	80.00
G100x50x25x5mm	100	50	25	5	7.50	15.70	25.00	75.00	12.50	25.00	75.00	12.50	75.00	12.50	75.00	12.50	75.00	12.50	75.00	12.50	75.00
G125x50x15x2mm	125	50	15	2	3.00	6.28	40.00	115.00	10.00	40.00	115.00	10.00	115.00	10.00	115.00	10.00	115.00	10.00	115.00	10.00	115.00
G125x50x15x3mm	125	50	15	3	4.50	9.42	35.00	110.00	7.50	35.00	110.00	7.50	110.00	7.50	110.00	7.50	110.00	7.50	110.00	7.50	110.00
G125x50x20x4mm	125	50	20	4	6.00	12.56	30.00	105.00	10.00	30.00	105.00	10.00	105.00	10.00	105.00	10.00	105.00	10.00	105.00	10.00	105.00
G125x50x25x5mm	125	50	25	5	7.50	15.70	25.00	100.00	12.50	25.00	100.00	12.50	100.00	12.50	100.00	12.50	100.00	12.50	100.00	12.50	100.00
G125x50x30x6mm	125	50	30	6	9.00	18.84	20.00	95.00	15.00	20.00	95.00	15.00	95.00	15.00	95.00	15.00	95.00	15.00	95.00	15.00	95.00
G150x50x15x2mm	150	50	15	2	3.00	6.28	40.00	140.00	10.00	40.00	140.00	10.00	140.00	10.00	140.00	10.00	140.00	10.00	140.00	10.00	140.00
G150x50x15x3mm	150	50	15	3	4.50	9.42	35.00	135.00	7.50	35.00	135.00	7.50	135.00	7.50	135.00	7.50	135.00	7.50	135.00	7.50	135.00

*Dimensiones definidas en pág. 135

CORREAS "G"

CORREAS "G"														
PROPIEDADES DIMENSIONALES														
PERFILES	DIMENSIONES REALES (mm)						DIMENSIONES PLANAS (mm)				DIMENSIONES EFECTIVAS (mm)			
	ho	bo	D	t	R	u	w	h	d's	b	b1	b2	h	ds
G150x50x20x4mm	150	50	20	4	6.00	12.56	30.00	130.00	10.00	30.00	32.50	65.00	130.00	10.00
G150x75x25x5mm	150	75	25	5	7.50	15.70	50.00	125.00	12.50	50.00	31.25	62.50	125.00	12.50
G150x75x30x6mm	150	75	30	6	9.00	18.84	45.00	120.00	15.00	45.00	30.00	60.00	120.00	15.00
G175x50x15x2mm	175	50	15	2	3.00	6.28	40.00	165.00	10.00	40.00	41.28	82.50	165.00	10.00
G175x50x15x3mm	175	50	15	3	4.50	9.42	35.00	160.00	7.50	35.00	40.00	80.00	160.00	7.50
G175x75x25x4mm	175	75	25	4	6.00	12.56	55.00	155.00	15.00	55.00	38.75	77.50	155.00	15.00
G175x75x25x5mm	175	75	25	5	7.50	15.70	50.00	150.00	12.50	50.00	37.50	75.20	150.00	12.50
G175x75x30x6mm	175	75	30	6	9.00	18.84	45.00	145.00	15.00	45.00	30.25	72.50	145.00	15.00
G200x50x15x2mm	200	50	15	2	3.00	6.28	40.00	190.00	10.00	40.00	46.73	93.95	190.00	10.00
G200x50x15x3mm	200	50	15	3	4.50	9.42	35.00	185.00	7.50	35.00	46.25	92.50	185.00	7.50
G200x75x25x4mm	200	75	25	4	6.00	12.56	55.00	180.00	15.00	55.00	45.00	90.00	180.00	15.00
G200x75x25x5mm	200	75	25	5	7.50	15.70	50.00	175.00	12.50	50.00	43.75	87.50	175.00	12.50
G200x75x30x6mm	200	75	30	6	9.00	18.84	45.00	170.00	15.00	45.00	42.50	85.00	170.00	15.00
G250x75x25x4mm	250	75	25	4	6.00	12.56	55.00	230.00	15.00	55.00	57.50	115.00	230.00	15.00
G250x100x25x5mm	250	100	25	5	7.50	15.70	75.00	225.00	12.50	75.00	56.25	112.50	225.00	12.50
G250x100x30x6mm	250	100	30	6	9.00	18.84	70.00	220.00	15.00	70.00	55.00	110.00	220.00	15.00
G300x100x30x4mm	300	100	30	4	6.00	12.56	80.00	280.00	20.00	80.00	70.00	140.00	280.00	20.00
G300x100x35x5mm	300	100	35	5	7.50	15.70	75.00	275.00	22.50	75.00	68.75	137.50	275.00	22.50
G300x100x35x6mm	300	100	35	6	9.00	18.84	70.00	270.00	20.00	70.00	67.50	135.00	270.00	20.00

**Dimensiones definidas en pág. 135

CORREAS "G"

CORREAS												
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS												
PERFILES	PROPIEDADES SECCIÓN GRUESA						PROPIEDADES SECCIÓN EFECTIVA					
	A (mm²)	I_x (cm⁴)	S_x (cm³)	Cw (cm⁶)	J (cm⁴)	r_o (cm)	I_{ex} (mm⁴)	S_{ex} (mm³)	A_e (mm²)			
G60x30x10x1.5mm	193.26	11.02	3.67	20.85	0.01	34.85	108307.10	3610.24	193.26			
G60x30x10x2mm	250.24	13.98	4.66	25.68	0.03	34.19	136385.92	4546.20	250.24			
G60x30x10x3mm	353.04	18.90	6.30	32.74	0.11	32.89	180980.59	6032.69	353.04			
G80x40x15x1.5mm	268.26	27.43	6.86	104.47	0.02	46.93	270825.35	6770.63	268.26			
G80x40x15x2mm	350.24	35.30	8.83	131.48	0.05	46.78	346684.31	8667.11	350.24			
G80x40x15x3mm	503.04	49.00	12.25	175.36	0.15	45.50	477426.81	11935.67	503.04			
G100x50x15x2mm	430.24	69.20	13.84	341.64	0.06	58.24	683409.88	13668.20	430.24			
G100x50x15x3mm	623.04	97.80	19.56	465.66	0.19	56.91	957732.59	19154.65	623.04			
G100x50x20x4mm	840.96	126.70	25.34	747.43	0.45	56.79	1230642.15	24612.84	840.96			
G100x50x25x5mm	1064.00	152.51	30.50	1124.24	0.89	56.16	1467045.01	29340.90	1064.00			
G125x50x15x2mm	480.24	116.00	18.56	540.57	0.06	63.35	1150209.33	18403.35	480.24			
G125x50x15x3mm	698.04	165.00	26.40	742.07	0.21	62.00	1623582.31	35977.32	698.04			
G125x50x20x4mm	940.96	217.00	34.72	1151.14	0.50	62.05	2111812.78	33789.00	940.96			
G125x50x25x5mm	1189.00	264.32	42.29	1668.51	0.99	61.59	2554457.43	40871.96	1189.00			
G125x50x30x6mm	1442.16	307.13	49.14	2314.18	1.73	60.75	2942990.59	47087.85	1442.16			
G150x50x15x2mm	530.24	179.00	23.87	798.05	0.07	69.21	1767083.79	23561.12	530.24			
G150x50x15x3mm	773.04	255.00	34.00	1100.82	0.23	67.94	2507569.53	33434.26	773.04			

***A**=Área; **I_x**= Momento de Inercia alrededor del Eje x; **S_x**= Módulo de Sección con respecto al eje x; **Cw**= Constante de Torsión; **J**=Constante de Torisón de St. Venant; **r_o**=radio de giro polar; **A_e**=Área Efectiva; **I_{ex}**= Momento de Inercia Efectivo alrededor del Eje x; **S_{ex}**= Módulo de Sección Efectivo con respecto al eje x.

CORREAS "G"

CORREAS												
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS												
PERFILES	PROPIEDADES SECCIÓN GRUESA						PROPIEDADES SECCIÓN EFECTIVA					
	A (mm²)	I_x (cm⁴)	S_x (cm³)	C_w (cm⁶)	J (cm⁴)	r_o (cm)	I_{ex} (mm⁴)	S_{ex} (mm³)	A_e (mm²)			
G150x50x20x4mm	1040.96	337.00	44.93	1672.45	0.56	67.95	3287033.42	43827.11	1040.96			
G150x75x25x5mm	1564.00	545.36	72.71	6268.90	1.30	85.34	5327574.84	71034.33	1564.00			
G150x75x30x6mm	1892.16	641.40	85.52	8513.67	2.27	85.14	6230125.87	83068.34	1892.16			
G175x50x15x2mm	580.24	258.00	29.49	1117.87	0.08	75.55	2549658.24	29138.95	580.24			
G175x50x15x3mm	848.04	369.00	42.17	1547.22	0.25	74.37	3633131.75	41521.51	848.04			
G175x75x25x4mm	1380.96	653.00	74.63	7275.34	0.74	91.67	6417895.73	73347.38	1380.96			
G175x75x25x5mm	1689.00	785.95	89.82	8562.60	1.41	90.38	7689402.26	87878.88	1689.00			
G175x75x30x6mm	2042.16	929.39	106.22	11435.30	2.45	90.31	9046486.14	103388.41	2042.16			
G200x50x15x2mm	630.24	356.00	35.60	1503.14	0.08	83.06	3513557.70	35135.58	630.24			
G200x50x15x3mm	923.04	507.00	50.70	2085.66	0.28	81.53	5023706.48	50237.06	923.04			
G200x75x25x4mm	1480.96	895.00	89.50	9593.28	0.79	96.44	8804966.36	88049.66	1480.96			
G200x75x25x5mm	1814.00	1080.00	108.00	11319.66	1.51	95.94	10579042.18	105790.42	1814.00			
G200x75x30x6mm	2192.16	1282.17	128.22	14938.04	2.63	95.83	12501021.42	125010.21	2192.16			
G250x75x25x4mm	1680.96	1520.00	121.60	15462.88	0.90	109.59	14998757.64	119990.06	1680.96			
G250x100x25x5mm	2314.00	2219.24	177.54	36643.07	1.93	123.72	21849572.01	174796.58	2314.00			
G250x100x30x6mm	2792.16	2647.38	211.79	47492.63	3.35	124.44	25977316.97	207818.54	2792.16			
G300x100x30x4mm	2120.96	2860.00	190.67	51075.49	1.13	138.59	28273340.58	188488.94	2120.96			
G300x100x35x5mm	2664.00	3560.00	237.33	68146.98	2.22	138.39	35072940.34	233819.60	2664.00			
G300x100x35x6mm	3152.16	4170.00	278.00	78468.82	3.78	136.87	40947300.02	272982.00	3152.16			

*A=Área; I_x= Momento de Inercia alrededor del Eje x; S_x= Módulo de Sección con respecto al eje x; C_w= Constante de Torsión; J=Constante de Torsión de St. Venant; r_o=radio de giro polar; A_e=Área Efectiva; I_{ex}= Momento de Inercia Efectivo alrededor del Eje x; S_{ex}= Módulo de Sección Efectivo con respecto al eje x.

CANALES "C"

CANALES C												
PERFILES	PROPIEDADES DIMENSIONALES											
	DIMENSIONES REALES (mm)						DIMENSIONES PLANAS (mm)			DIMENSIONES EFECTIVAS (mm)		
	ho	bo	t	R	u		w	h	b	b1	b2	h
C60x30x2mm	60	30	2	4.50	5.50		23.50	47.00	23.50	11.75	23.50	47.00
C60x30x3mm	60	30	3	6.75	8.25		20.25	40.50	20.25	10.125	20.25	40.50
C60x30x4mm	60	30	4	9.00	11.00		17.00	34.00	17.00	8.50	17.00	34.00
C80x40x2mm	80	40	2	4.50	5.50		33.50	67.00	33.50	17.15	33.50	67.00
C80x40x3mm	80	40	3	6.75	8.25		30.25	60.50	30.25	15.13	30.25	60.50
C80x40x4mm	80	40	4	9.00	11.00		27.00	54.00	27.00	13.50	27.00	54.00
C80x40x5mm	80	40	5	11.25	13.75		23.75	47.50	23.75	11.88	23.75	47.50
C80x40x6mm	80	40	6	13.50	16.50		20.50	41.00	20.50	10.25	20.50	41.00
C100x50x2mm	100	50	2	4.50	5.50		43.50	87.00	43.50	22.69	43.50	87.00
C100x50x3mm	100	50	3	6.75	8.25		40.25	80.50	40.25	20.28	40.25	80.50
C100x50x4mm	100	50	4	9.00	11.00		37.00	74.00	37.00	18.50	37.00	74.00
C100x50x5mm	100	50	5	11.25	13.75		33.75	67.50	33.75	16.88	33.75	67.50
C100x50x6mm	100	50	6	13.50	16.50		30.50	61.00	30.50	15.25	30.50	61.00
C100x60x4mm	100	60	4	9.00	11.00		47.00	74.00	47.00	18.50	47.00	74.00
C100x60x5mm	100	60	5	11.25	13.75		43.75	67.50	43.75	16.88	43.75	67.50
C100x60x6mm	100	60	6	13.50	16.50		40.50	61.00	40.50	15.25	40.50	61.00

*Dimensiones definidas en pág. 135

CANALES "C"

CANALES C															
PROPIEDADES DIMENSIONALES															
PERFILES	DIMENSIONES REALES (mm)					DIMENSIONES PLANAS (mm)					DIMENSIONES EFECTIVAS (mm)				
	ho	bo	t	R	u	w	h	b	b1	b2	h				
C125x50x2mm	125	50	2	4.50	5.50	43.50	112.00	43.50	29.04	43.50	112.00	43.50	29.04	43.50	112.00
C125x50x3mm	125	50	3	6.75	8.25	40.25	105.50	40.25	26.55	40.25	105.50	40.25	26.55	40.25	105.50
C125x50x4mm	125	50	4	9.00	11.00	37.00	99.00	37.00	24.75	37.00	99.00	37.00	24.75	37.00	99.00
C125x50x5mm	125	50	5	11.25	13.75	33.75	92.50	33.75	23.13	33.75	92.50	33.75	23.13	33.75	92.50
C125x50x6mm	125	50	6	13.50	16.50	30.50	86.00	30.50	21.50	30.50	86.00	30.50	21.50	30.50	86.00
C125x60x5mm	125	60	5	11.25	13.75	43.75	92.50	43.75	23.13	43.75	92.50	43.75	23.13	43.75	92.50
C125x60x6mm	125	60	6	13.50	16.50	40.50	86.00	40.50	21.50	40.50	86.00	40.50	21.50	40.50	86.00
C125x60x8mm	125	60	8	18.00	22.00	34.00	73.00	34.00	18.25	34.00	73.00	34.00	18.25	34.00	73.00
C125x80x6mm	125	80	6	13.50	16.50	60.50	86.00	60.50	21.50	60.50	86.00	60.50	21.50	60.50	86.00
C125x80x8mm	125	80	8	18.00	22.00	54.00	73.00	54.00	18.25	54.00	73.00	54.00	18.25	54.00	73.00
C125x80x10mm	125	80	10	22.50	27.50	47.50	60.00	47.50	15.00	47.50	60.00	47.50	15.00	47.50	60.00
C150x50x2mm	150	50	2	4.50	5.50	43.50	137.00	43.50	35.37	43.50	137.00	43.50	35.37	43.50	137.00
C150x50x3mm	150	50	3	6.75	8.25	40.25	130.50	40.25	32.81	40.25	130.50	40.25	32.81	40.25	130.50
C150x50x4mm	150	50	4	9.00	11.00	37.00	124.00	37.00	31.00	37.00	124.00	37.00	31.00	37.00	124.00
C150x50x5mm	150	50	5	11.25	13.75	33.75	117.50	33.75	29.38	33.75	117.50	33.75	29.38	33.75	117.50
C150x50x6mm	150	50	6	13.50	16.50	30.50	111.00	30.50	27.75	30.50	111.00	30.50	27.75	30.50	111.00
C150x60x5mm	150	60	5	11.25	13.75	43.75	117.50	43.75	29.38	43.75	117.50	43.75	29.38	43.75	117.50
C150x60x6mm	150	60	6	13.50	16.50	40.50	111.00	40.50	27.75	40.50	111.00	40.50	27.75	40.50	111.00
C150x60x8mm	150	60	8	18.00	22.00	34.00	98.00	34.00	24.50	34.00	98.00	34.00	24.50	34.00	98.00
C150x80x6mm	150	80	6	13.50	16.50	60.50	111.00	60.50	27.75	60.50	111.00	60.50	27.75	60.50	111.00
C150x80x8mm	150	80	8	18.00	22.00	54.00	98.00	54.00	24.50	54.00	98.00	54.00	24.50	54.00	98.00
C150x80x10mm	150	80	10	22.50	27.50	47.50	85.00	47.50	21.25	47.50	85.00	47.50	21.25	47.50	85.00

*Dimensiones definidas en pág. 135

CANALES "C"

CANALES C												
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS												
PERFILES	PROPIEDADES SECCIÓN GRUESA						PROPIEDADES SECCIÓN EFECTIVA					
	A (mm ²)	I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	Cw (cm ⁶)	J (cm ⁴)	ro (mm)	I _{ex} (mm ⁴)	S _{ex} (mm ³)	A _e (mm ²)			
C60x30x2mm	222.54	12.5	4.17	11.96	0.03	31.33	121544.02	4051.47	222.54			
C60x30x3mm	320.715	17.5	5.83	16.45	0.10	30.95	165850.90	5528.36	320.715			
C60x30x4mm	410.16	21.1	7.03	20.08	0.22	30.33	199351.92	6645.06	410.16			
C80x40x2mm	302.54	30.8	7.70	52.63	0.04	42.12	281653.58	6760.83	302.54			
C80x40x3mm	440.715	43.9	10.98	74.01	0.13	41.65	422358.96	10558.97	440.715			
C80x40x4mm	570.16	55.4	13.85	92.44	0.30	41.16	524170.73	13104.27	570.16			
C80x40x5mm	690.875	65.49	16.37	108.15	0.58	40.69	606780.09	15169.50	690.875			
C80x40x6mm	802.86	74.18	18.55	121.35	0.96	40.16	670173.36	16754.33	802.86			
C100x50x2mm	382.54	61.5	12.30	164.78	0.05	52.91	529890.78	9822.83	382.54			
C100x50x3mm	560.715	88.5	17.70	234.81	0.17	52.43	842403.72	16639.96	560.715			
C100x50x4mm	730.16	113	22.60	297.27	0.39	51.96	1084621.54	21692.43	730.16			
C100x50x5mm	890.875	135	27.00	352.63	0.74	51.44	1279713.70	25594.27	890.875			
C100x50x6mm	1042.86	155.26	31.05	401.35	1.25	51.00	1444807.84	28896.16	1042.86			
C100x60x4mm	810.16	128	25.60	494.09	0.43	59.12	1268941.54	25378.83	810.16			
C100x60x5mm	990.875	152	30.40	588.97	0.83	58.64	1505338.70	30106.77	990.875			
C100x60x6mm	1162.86	181.8	36.36	673.69	1.40	58.38	1709887.84	34197.76	1162.86			
C125x50x2mm	432.54	103.6	16.58	279.58	0.06	58.36	899152.32	13452.62	432.54			
C125x50x3mm	635.715	149	23.84	400.35	0.19	57.83	1426801.21	22578.58	635.715			
C125x50x4mm	830.16	192	30.72	509.37	0.44	57.29	1848017.55	29568.28	830.16			
C125x50x5mm	1015.875	231	36.96	607.31	0.85	56.78	2198001.81	35168.03	1015.875			

*A=Área; I_x= Momento de Inercia alrededor del Eje x; S_x= Módulo de Sección con respecto al eje x; Cw= Constante de Torsión; J=Constante de Torsión de St. Venant; r_o=radio de giro polar; A_e=Área Efectiva; I_{ex}= Momento de Inercia Efectivo alrededor del Eje x; S_{ex}= Módulo de Sección Efectivo con respecto al eje x.

CANALES "C"

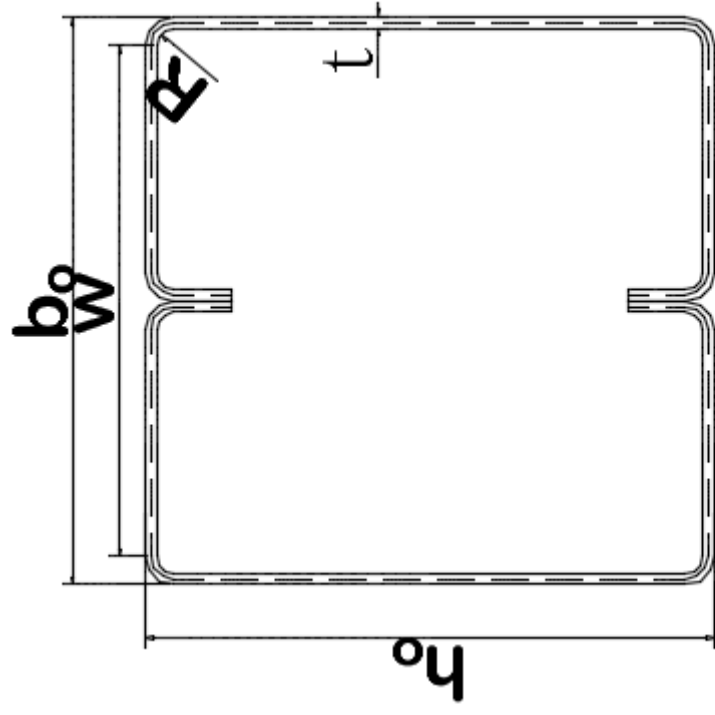
CANALES C												
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS												
PERFILES	PROPIEDADES SECCIÓN GRUESA						PROPIEDADES SECCIÓN EFECTIVA					
	A (mm ²)	I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	Cw (cm ⁶)	J (cm ⁴)	ro (mm)	I _{ex} (mm ⁴)	S _{ex} (mm ³)	A _e (mm ²)			
C125x50x6mm	1192.86	266	42.56	694.79	1.43	56.18	2503867.82	40061.89	1192.86			
C125x60x5mm	1115.875	266.98	42.72	1011.87	0.93	63.20	2558001.81	40928.03	1115.875			
C125x60x6mm	1312.86	309.25	49.48	1163.35	1.58	62.70	2928697.82	46859.17	1312.86			
C125x60x8mm	1680.64	383.34	61.33	1422.24	3.59	61.74	3531200.37	56499.21	1680.64			
C125x80x6mm	1552.86	394.28	63.08	2609.35	1.86	77.43	3778357.82	60453.73	1552.86			
C125x80x8mm	2000.64	493.02	78.88	3230.05	4.27	76.68	4626320.37	74021.13	2000.64			
C125x80x10mm	2413.5	576.62	92.26	3744.22	8.05	75.95	5270645.21	84330.32	2413.5			
C150x50x2mm	482.54	159	21.20	430.47	0.06	64.62	1394577.95	17509.84	482.54			
C150x50x3mm	710.715	230	30.67	618.42	0.21	63.99	2207624.61	29145.23	710.715			
C150x50x4mm	930.16	297	39.60	789.41	0.50	63.43	2870838.56	38277.85	930.16			
C150x50x5mm	1140.875	359	47.87	944.33	0.95	62.90	3433750.85	45783.34	1140.875			
C150x50x6mm	1342.86	416.69	55.56	1084.02	1.61	62.26	3935696.55	52475.95	1342.86			
C150x60x5mm	1240.875	441.85	58.91	1571.97	1.03	68.63	3959375.85	52791.68	1240.875			
C150x60x6mm	1462.86	478.93	63.86	1813.41	1.76	68.04	4557776.55	60770.35	1462.86			
C150x60x8mm	1880.64	598.74	79.83	2232.34	4.01	67.02	5564168.46	74188.91	1880.64			
C150x80x6mm	1702.86	603.42	80.46	4053.80	2.04	81.40	5801936.55	77359.15	1702.86			
C150x80x8mm	2200.64	760.23	101.36	5052.37	4.69	80.45	7177288.46	95697.18	2200.64			
C150x80x10mm	2663.5	896.29	119.51	5897.91	8.88	79.58	8277184.45	110362.46	2663.5			

*A=Área; I_x= Momento de Inercia alrededor del Eje x; S_x= Módulo de Sección con respecto al eje x; Cw= Constante de Torsión; J=Constante de Torsión de St. Venant; r_o=radio de giro polar; I_{ex}=Área Efectiva; I_{ex}= Módulo de Inercia Efectivo alrededor del Eje x; S_{ex}= Módulo de Sección Efectivo con respecto al eje x.

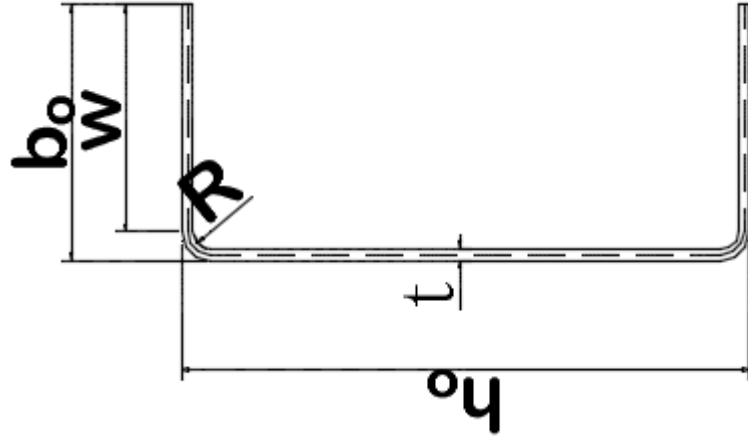
CAJONES (DOBLE G)

CAJONES "2G"																
PROPIEDADES DISMENSIONALES		PROPIEDADES SECCIÓN GRUESA														
PERFILES	DIMENSIONES REALES (mm)								A (mm ²)	I _x (cm ⁴)	r _x (cm)	S _x (cm ³)	I _y (cm ⁴)	r _y (cm)	S _y (cm ³)	J (cm ⁴)
	ho	bo	D	t	R	u	u	u								
2G80x40x15x1.5mm	80	40	15	1.5	2.25	3	4	5.31	53.47	3.17	13.37	46.79	2.97	11.7	725604.9	
2G80x40x15x2mm	80	40	15	2	3	4	4	7.07	70.54	3.16	17.64	61.71	2.95	15.43	949104.0	
2G80x40x15x3mm	80	40	15	3	4.5	6	6	10.47	102.17	3.12	25.54	89.84	2.93	22.46	1369599.0	
2G100x50x15x2mm	100	50	15	2	3	4	4	8.67	138.52	4	27.7	123.02	3.67	24.6	1882384.0	
2G100x50x15x3mm	100	50	15	3	4.5	6	6	12.87	201.95	3.96	40.39	180.18	3.74	36.04	2738019.0	
2G100x50x20x4mm	100	50	20	4	6	8	8	16.91	260.18	3.92	52.04	233.83	3.72	46.77	3538944.0	
2G125x50x15x2mm	125	50	15	2	3	4	4	9.67	232.87	4.91	37.26	147.03	3.9	29.41	2629844.6	
2G125x50x15x3mm	125	50	15	3	4.5	6	6	14.37	340.92	4.87	54.55	215.48	3.87	43.1	3836809.8	
2G125x50x20x4mm	125	50	20	4	6	8	8	18.91	441.2	4.83	70.59	279.94	3.85	55.99	4974431.6	
2G150x50x15x2mm	150	50	15	2	3	4	4	10.67	357.45	5.79	47.66	171.04	4	34.21	3420585.6	
2G150x50x15x3mm	150	50	15	3	4.5	6	6	15.87	524.8	5.75	69.97	250.77	3.98	50.15	4999649.5	
2G150x50x20x4mm	150	50	20	4	6	8	8	20.91	681.33	5.71	90.84	236.05	3.95	65.21	6494157.2	
2G200x50x15x2mm	200	50	15	2	3	4	4	12.67	709.8	7.48	70.98	219.07	4.16	43.81	5088043.5	
2G200x50x15x3mm	200	50	15	3	4.5	6	6	18.87	1045.08	7.45	104.61	321.36	4.13	64.27	7452120.0	
2G200x75x25x4mm	200	75	25	4	6	8	8	24.91	1363.9	7.4	136.39	418.26	4.1	83.65	19154981.4	

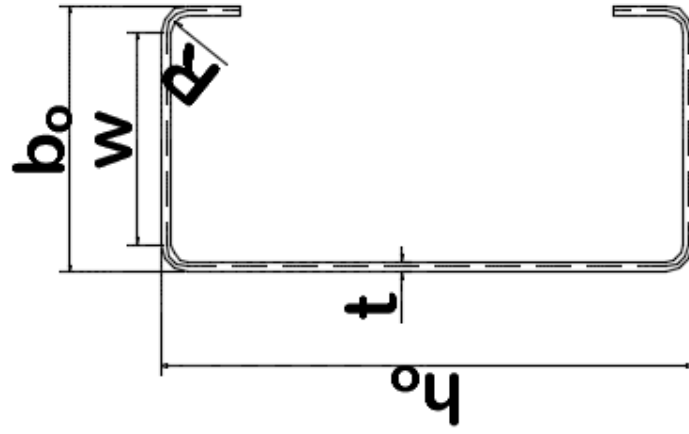
*A=Área; I_x= Momento de Inercia alrededor del Eje x; S_x= Módulo de Sección con respecto al eje x ; J=Constante de Torión de St. Venant; r_x=radio de con respecto al eje x; I_y= Momento de Inercia alrededor del Eje y; S_y= Módulo de Sección con respecto al eje y ; r_y=radio de con respecto al eje y.



Perfil Cajón
Doble G



Perfil C



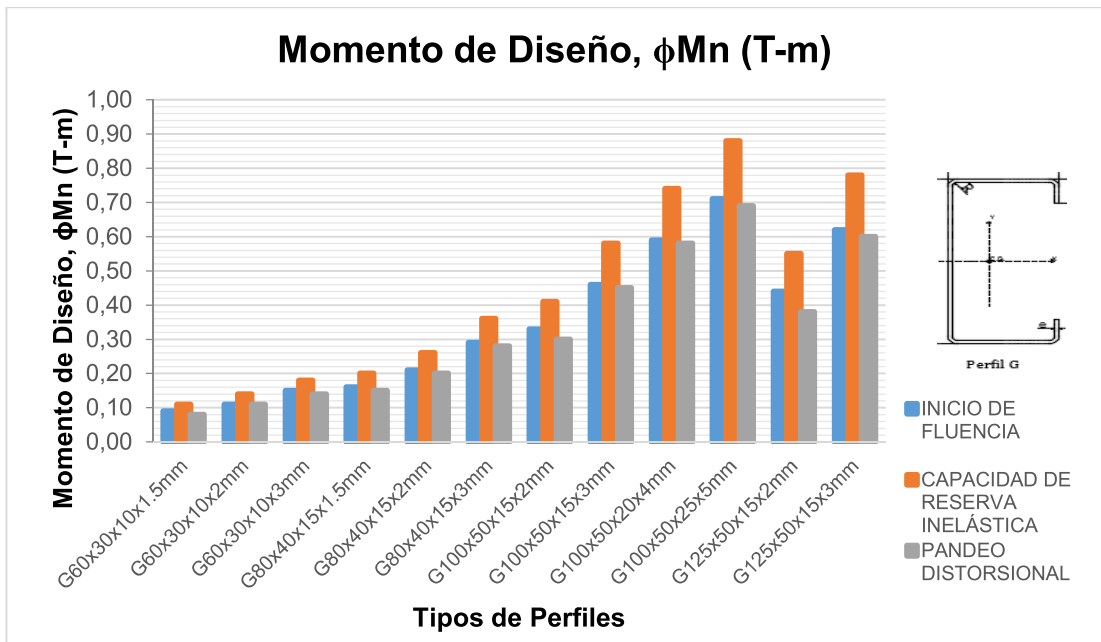
Perfil G

ANEXO 2

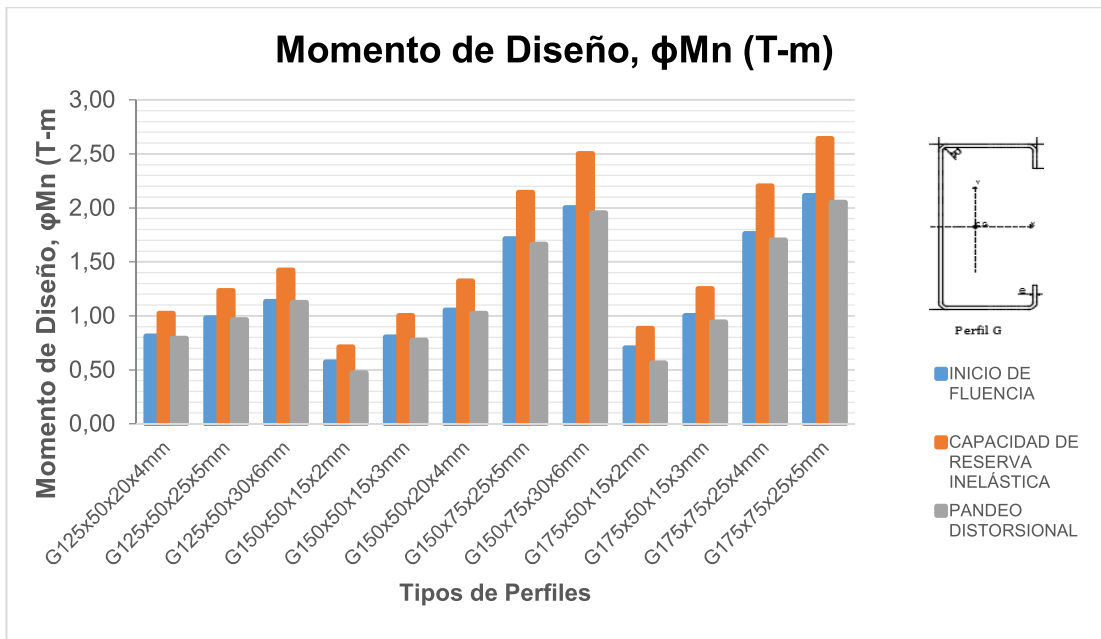
GRÁFICAS DE MOMENTOS DE DISEÑO DE SECCIONES C Y G CON $F_y=36$ KSI

SECCIONES G

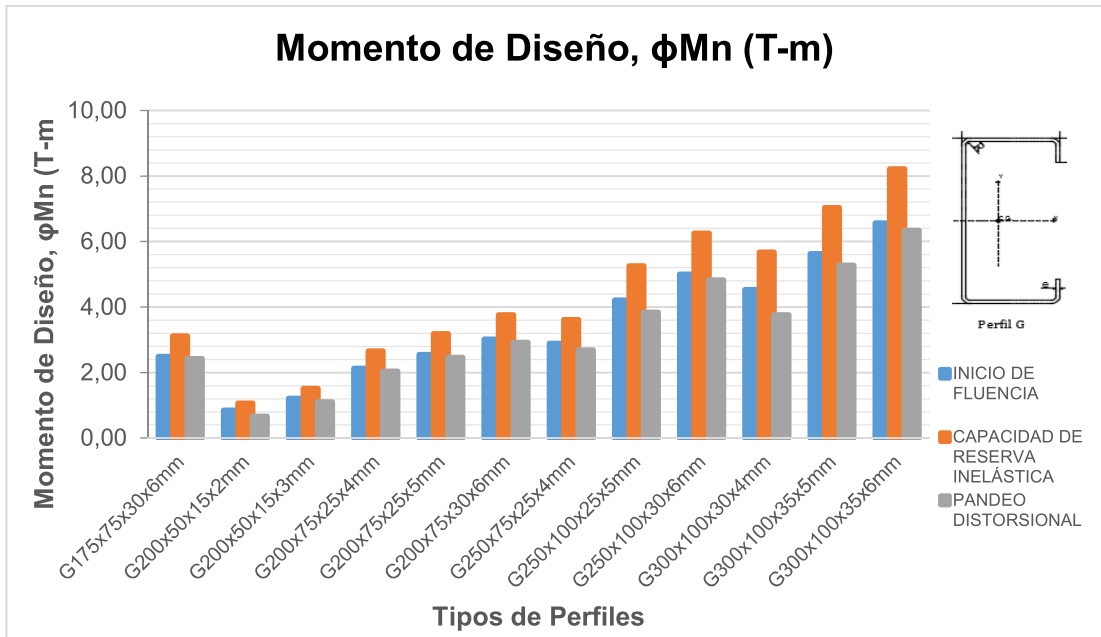
Gráfica A2 1. Momento de Diseño para una Sección G, $F_y= 36$ ksi



Gráfica A2 2. Momento de Diseño para una Sección G, $F_y= 36$ ksi

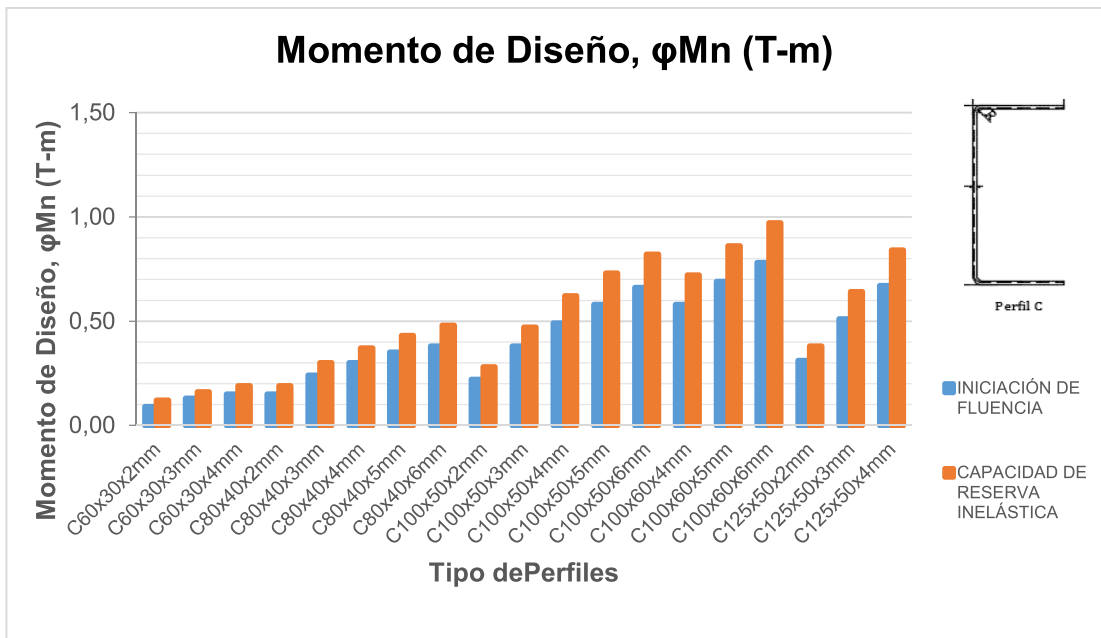


Gráfica A2 3. Momento de Diseño para una Sección G, $F_y = 36 \text{ ksi}$

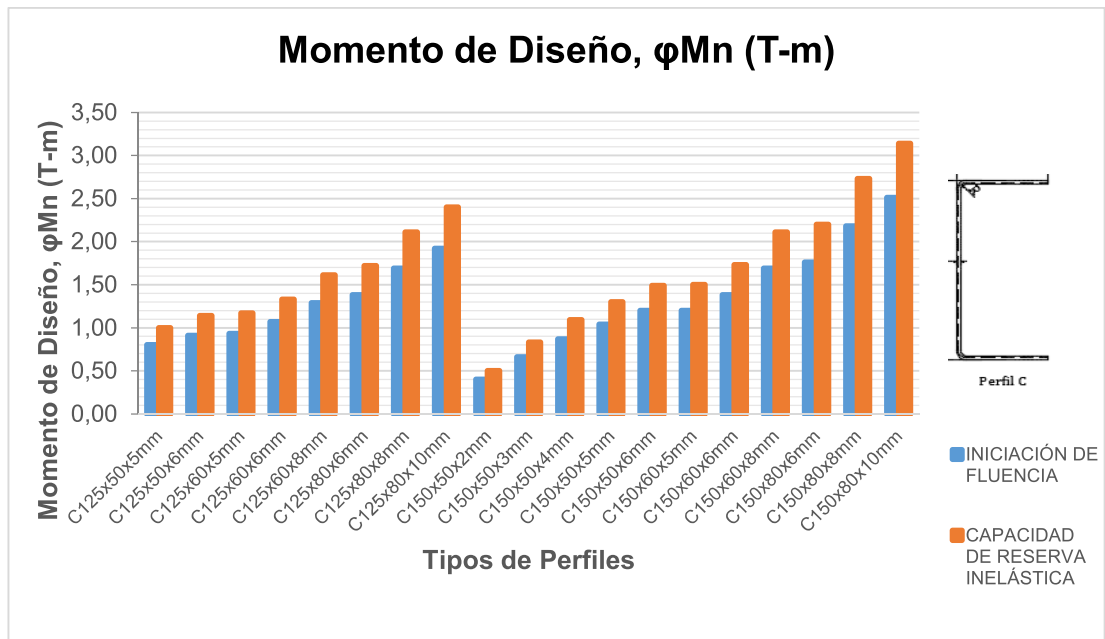


SECCIONES C

Gráfica A2 4. Momentos de Diseño para Secciones C, $F_y = 36 \text{ ksi}$



Gráfica A2 5. Momentos de Diseño para Secciones C, $F_y = 36 \text{ ksi}$



ANEXO 3

TABLAS Y GRÁFICAS DE MOMENTO DE DISEÑO PARA SECCIONES C, G, CAJÓN (2G) CON $F_y = 50$ KSI

TABLAS DE MOMENTO DE DISEÑO PARA SECCIONES G

Tabla A3 1. Momentos de Diseño para Secciones G, $F_y = 50$ ksi

CORREAS "G"					
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)					
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO DISTORSIONAL	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
				L= 3.00 m	L= 6.00 m
G60x30x10x1.5mm	0.12	0.15	0.11	0.03	0.01
G60x30x10x2mm	0.15	0.19	0.15	0.04	0.02
G60x30x10x3mm	0.20	0.25	0.20	0.08	0.04
G80x40x15x1.5mm	0.23	0.28	0.19	0.07	0.03
G80x40x15x2mm	0.29	0.36	0.27	0.10	0.04
G80x40x15x3mm	0.40	0.50	0.39	0.17	0.08
G100x50x15x2mm	0.45	0.56	0.37	0.18	0.07
G100x50x15x3mm	0.64	0.80	0.62	0.30	0.13
G100x50x20x4mm	0.82	1.03	0.80	0.50	0.22
G100x50x25x5mm	0.98	1.22	0.97	0.68	0.34
G125x50x15x2mm	0.61	0.76	0.47	0.22	0.08
G125x50x15x3mm	0.87	1.08	0.80	0.36	0.14
G125x50x20x4mm	1.13	1.41	1.10	0.59	0.25
G125x50x25x5mm	1.37	1.71	1.34	0.86	0.39
G125x50x30x6mm	1.57	1.97	1.55	1.10	0.55
G150x50x15x2mm	0.78	0.97	0.58	0.27	0.09
G150x50x15x3mm	1.12	1.40	0.99	0.42	0.56
G150x50x20x4mm	1.46	1.83	1.42	0.69	0.28
G150x75x25x5mm	2.37	2.97	2.30	1.80	0.84

* Revisar por Pandeo Lateral – Torsional en las Gráficas A3-7 a A3-10

Tabla A3 2. Momentos de Diseño para Secciones G, $F_y = 50$ ksi

CORREAS "G"					
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)					
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO DISTORSIONAL	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
				L= 3.00 m	L= 6.00 m
G150x75x30x6mm	2.77	3.47	2.71	2.22	1.19
G175x50x15x2mm	0.96	1.20	0.69	0.31	0.10
G175x50x15x3mm	1.39	1.73	1.19	0.49	0.18
G175x75x25x4mm	2.45	3.06	2.24	1.76	0.68
G175x75x25x5mm	2.93	3.67	2.84	2.16	0.93
G175x75x30x6mm	3.45	4.32	3.36	2.68	1.31
G200x50x15x2mm	1.16	1.45	0.81	0.37	0.11
G200x50x15x3mm	1.68	2.10	1.39	0.56	0.20
G200x75x25x4mm	2.94	3.68	2.61	2.07	0.75
G200x75x25x5mm	3.53	4.42	3.42	2.54	1.02
G200x75x30x6mm	4.17	5.22	4.06	3.15	1.42
G250x75x25x4mm	4.01	5.01	3.38	2.73	0.91
G250x100x25x5mm	5.80	7.25	4.80	4.78	2.12
G250x100x30x6mm	6.94	8.68	6.41	5.91	3.01
G300x100x30x4mm	6.22	7.77	4.66	5.16	2.13
G300x100x35x5mm	7.81	9.76	6.64	6.59	2.97
G300x100x35x6mm	9.12	11.40	8.36	7.70	3.64

* Revisar por Pandeo Lateral – Torsional en las Gráficas A3-10 y A3-13

TABLAS DE MOMENTOS DE DISEÑO PARA SECCIONES C

Tabla A3 3. Momentos de Diseño para Secciones C, $F_y = 50$ ksi

CANALES "C"				
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)				
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
			L= 3.00 m	L= 6.00 m
C60x30x2mm	0.12	0.15	0.03	0.01
C60x30x3mm	0.17	0.22	0.06	0.03
C60x30x4mm	0.21	0.26	0.10	0.05
C80x40x2mm	0.20	0.25	0.05	0.02
C80x40x3mm	0.33	0.42	0.12	0.06
C80x40x4mm	0.41	0.52	0.19	0.09
C80x40x5mm	0.48	0.60	0.28	0.14
C80x40x6mm	0.53	0.66	0.35	0.18
C100x50x2mm	0.29	0.37	0.09	0.04
C100x50x3mm	0.50	0.62	0.20	0.09
C100x50x4mm	0.69	0.86	0.34	0.16
C100x50x5mm	0.81	1.01	0.48	0.23
C100x50x6mm	0.91	1.14	0.62	0.31
C100x60x4mm	0.77	0.96	0.47	0.21
C100x60x5mm	0.95	1.19	0.67	0.33
C100x60x6mm	1.08	1.35	0.81	0.44
C125x50x2mm	0.40	0.50	0.11	0.04
C125x50x3mm	0.68	0.85	0.23	0.10
C125x50x4mm	0.94	1.17	0.39	0.18
C125x50x5mm	1.11	1.39	0.56	0.26
C125x50x6mm	1.27	1.58	0.74	0.35
C125x60x5mm	1.29	1.62	0.79	0.36
C125x60x6mm	1.48	1.85	1.00	0.49
C125x60x8mm	1.79	2.23	1.39	0.79

* Revisar por Pandeo Lateral – Torsional en las Gráficas A3-10 a A3-11

Tabla A3 4. Momentos de Diseño para Secciones C, $F_y = 50$ ksi

CANALES "C"				
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)				
PERFILES	INICIO DE FLUENCIA	CAPACIDAD DE RESERVA INELÁSTICA	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
			L= 3.00 m	L= 6.00 m
C125x80x6mm	1.91	2.39	1.53	0.83
C125x80x8mm	2.34	2.93	2.02	1.35
C125x80x10mm	2.67	3.34	2.42	1.83
C150x50x2mm	0.53	0.66	0.14	0.05
C150x50x3mm	0.88	1.10	0.27	0.11
C150x50x4mm	1.21	1.51	0.45	0.20
C150x50x5mm	1.45	1.81	0.63	0.29
C150x50x6mm	1.66	2.08	0.84	0.39
C150x60x5mm	1.67	2.09	0.84	0.37
C150x60x6mm	1.92	2.40	1.18	0.54
C150x60x8mm	2.35	2.93	1.69	0.88
C150x80x6mm	2.45	3.06	1.86	0.92
C150x80x8mm	3.03	3.78	2.50	1.49
C150x80x10mm	3.49	4.36	3.06	2.13

* Revisar por Pandeo Lateral – Torsional en la Gráfica A3-14 a A3-19

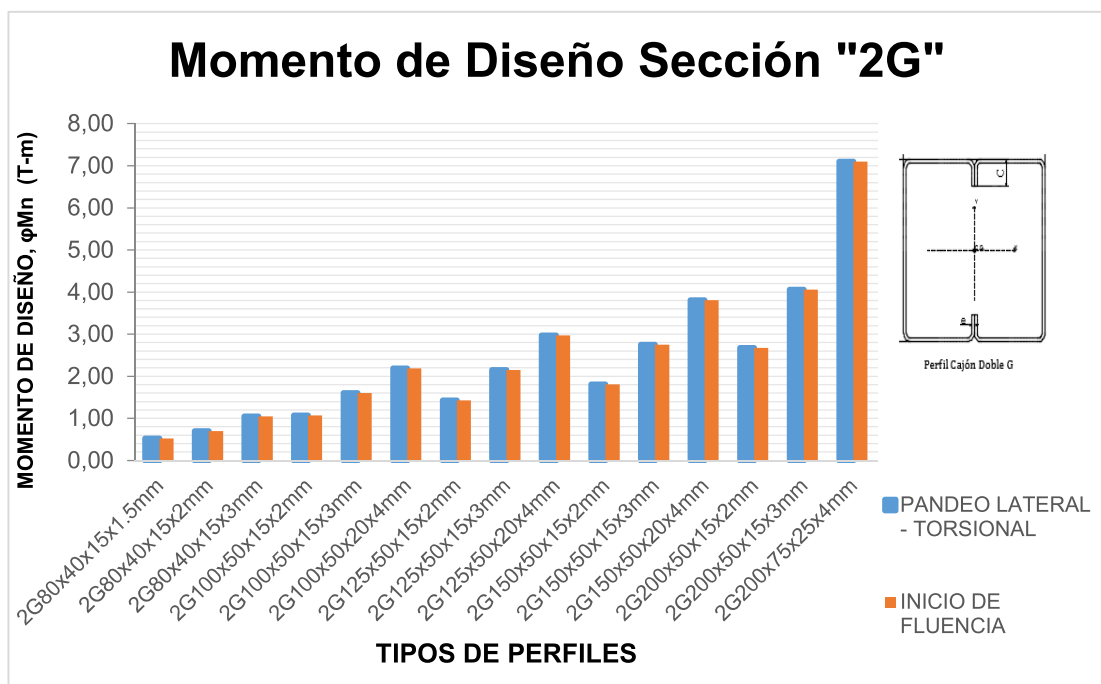
TABLA DE MOMENTO DE DISEÑO PARA SECCIONES TIPO CAJÓN (2G)

Tabla A3 5. Momento de Diseño para Secciones Tipo Cajón (2G), $F_y = 50$ ksi

TIPO CAJÓN "2G"		
MOMENTO DE DISEÑO, ϕM_n (T-m)		
PERFILES	PANDEO LATERAL - TORSIONAL	
	L_u (mm)	ϕM_n
2G80x40x15x1.5mm	17998.15	0.52
2G80x40x15x2mm	17917.14	0.70
2G80x40x15x3mm	17936.73	1.05
2G100x50x15x2mm	22687.93	1.07
2G100x50x15x3mm	22710.69	1.60
2G100x50x20x4mm	22828.76	2.19
2G125x50x15x2mm	21795.05	1.43
2G125x50x15x3mm	21768.40	2.15
2G125x50x20x4mm	21832.01	2.97
2G150x50x15x2mm	20959.34	1.81
2G150x50x15x3mm	20899.13	2.75
2G150x50x20x4mm	17799.95	3.81
2G200x50x15x2mm	19425.11	2.67
2G200x50x15x3mm	19319.47	4.06
2G200x75x25x4mm	27102.80	7.10

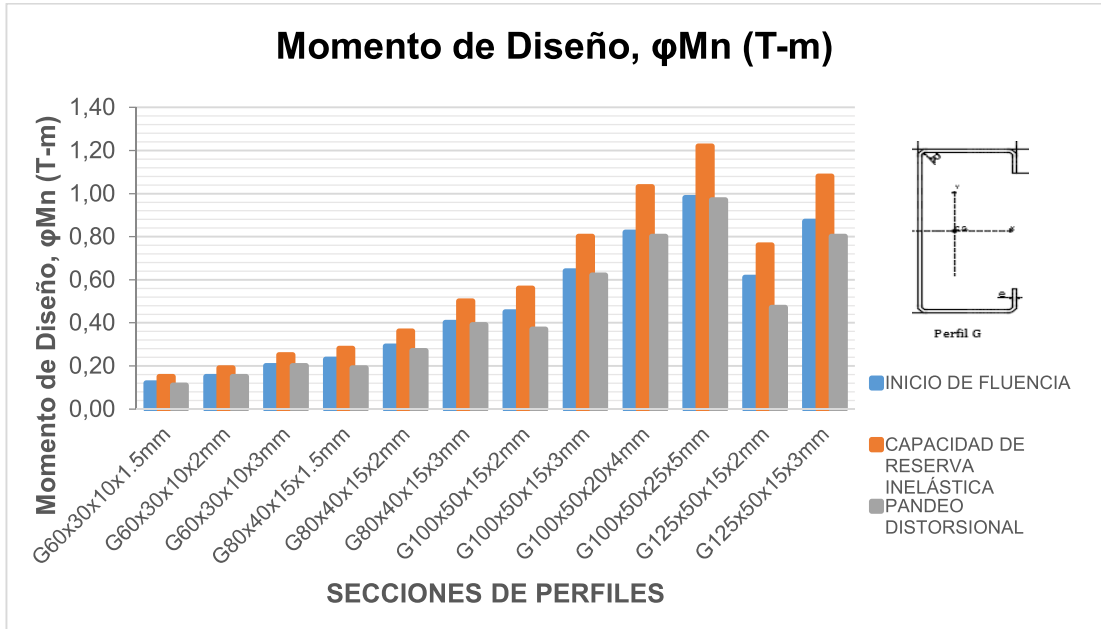
* Se utiliza esta tabla para longitudes no arriostradas menores a L_u .

Gráfica A3 1. Momento de Diseño por Pandeo Lateral - Torsional para secciones Cajón (2G), $F_y = 50$ ksi

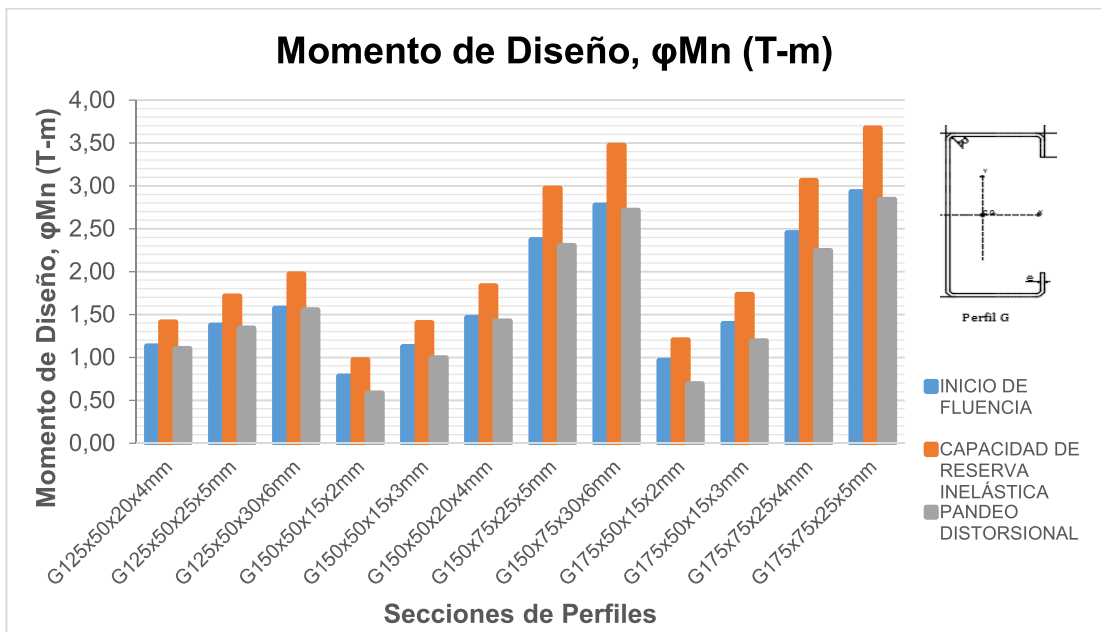


GRÁFICAS DE MOMENTOS DE DISEÑO PARA SECCIONES G

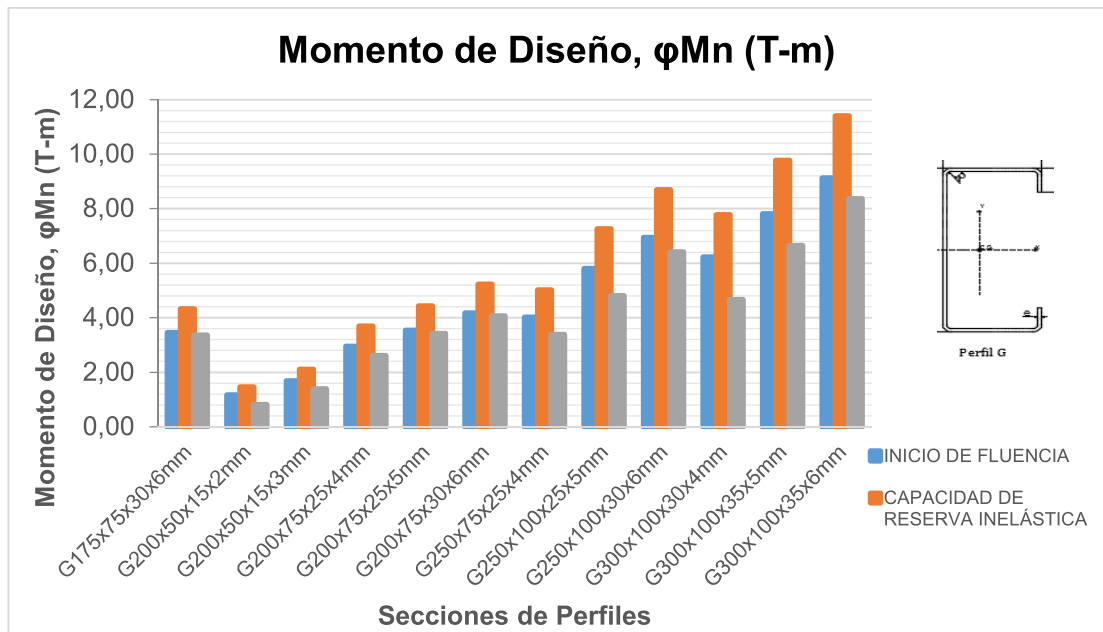
Gráfica A3 2. Momento de Diseño para una Sección G, $F_y = 50 \text{ ksi}$



Gráfica A3 3. Momento de Diseño para una Sección G, $F_y = 50 \text{ ksi}$

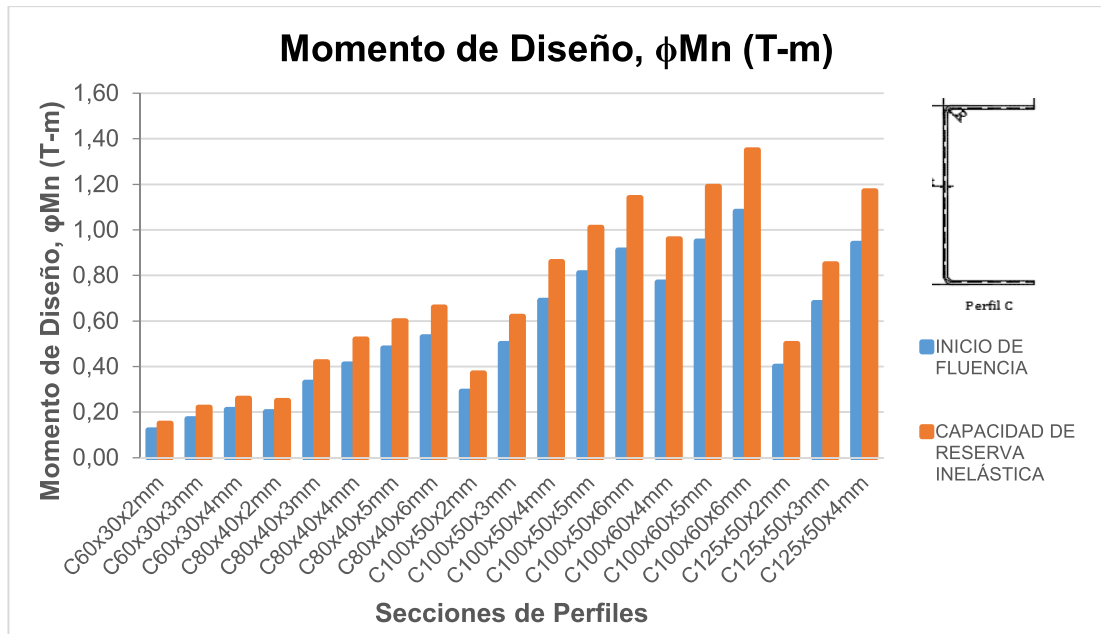


Gráfica A3 4. Momento de Diseño para una Sección G, $F_y= 50 \text{ ksi}$

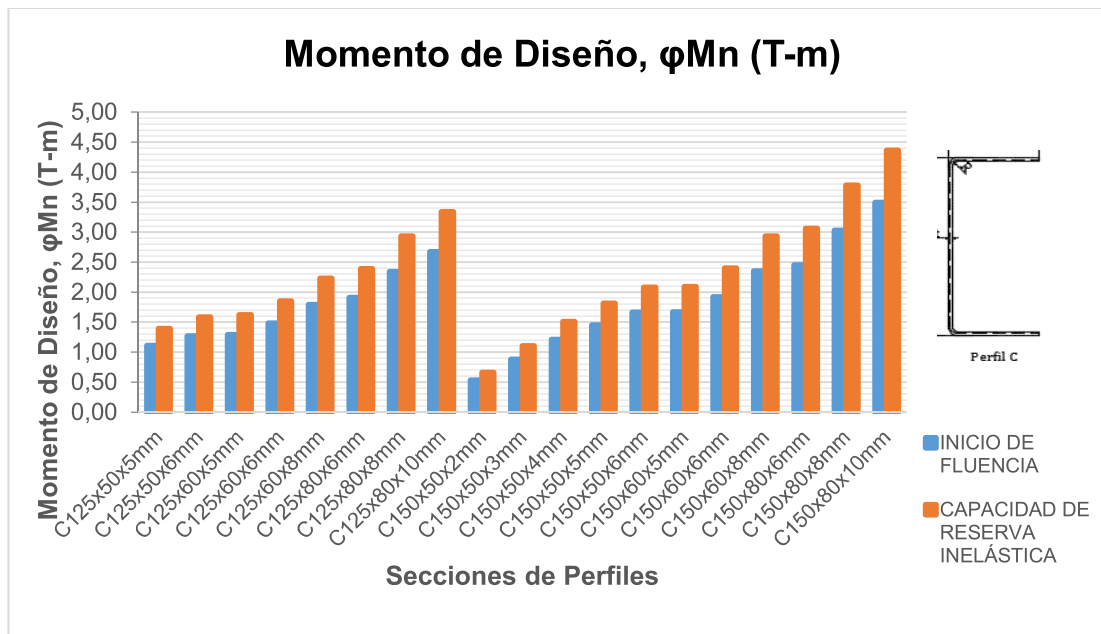


GRÁFICAS DE MOMENTOS DE DISEÑO PARA SECCIONES C

Gráfica A3 5. Momento de Diseño para una Sección C, $F_y = 50 \text{ ksi}$

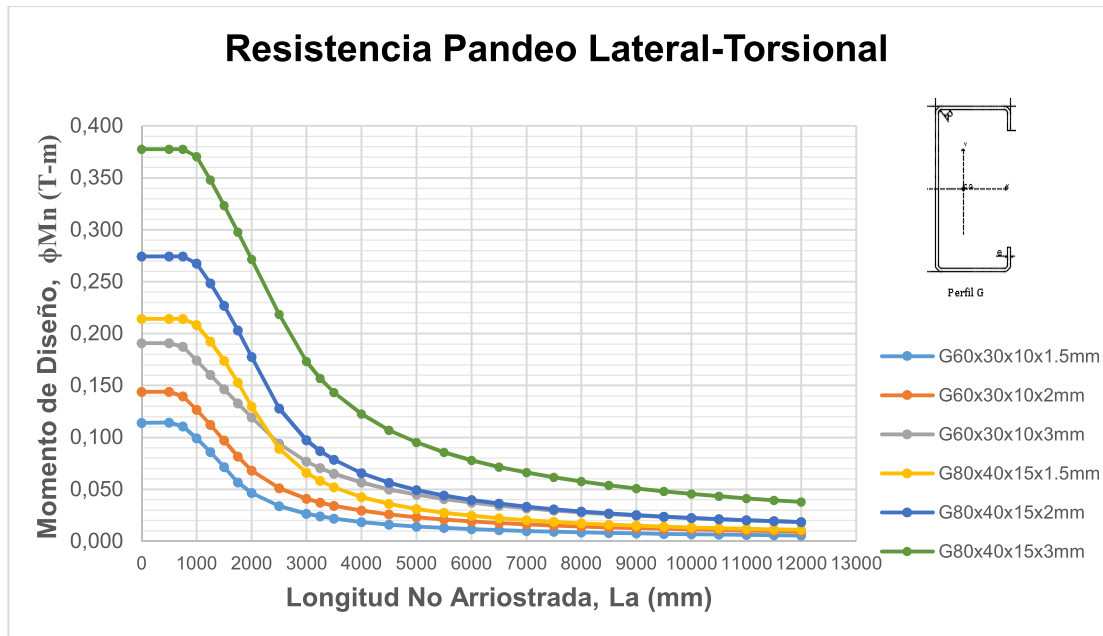


Gráfica A3 6. Momento de Diseño para una Sección C, $F_y = 50 \text{ ksi}$

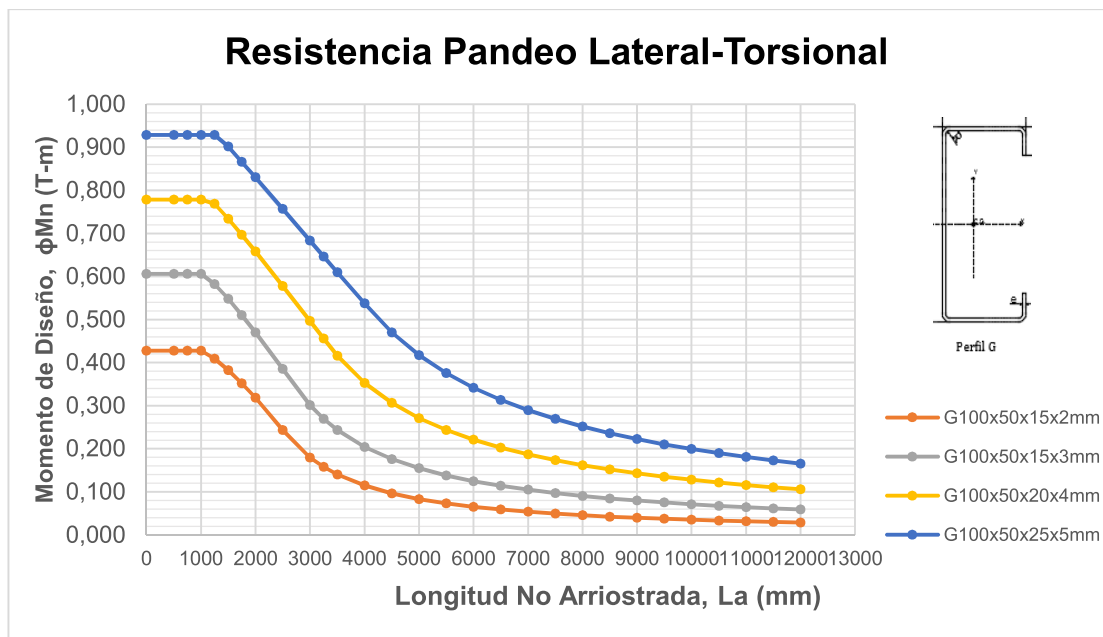


GRÁFICAS DE MOMENTOS DE DISEÑO POR PANDEO LATERAL-TORSIONAL DE SECCIONES G FY= 50KSI

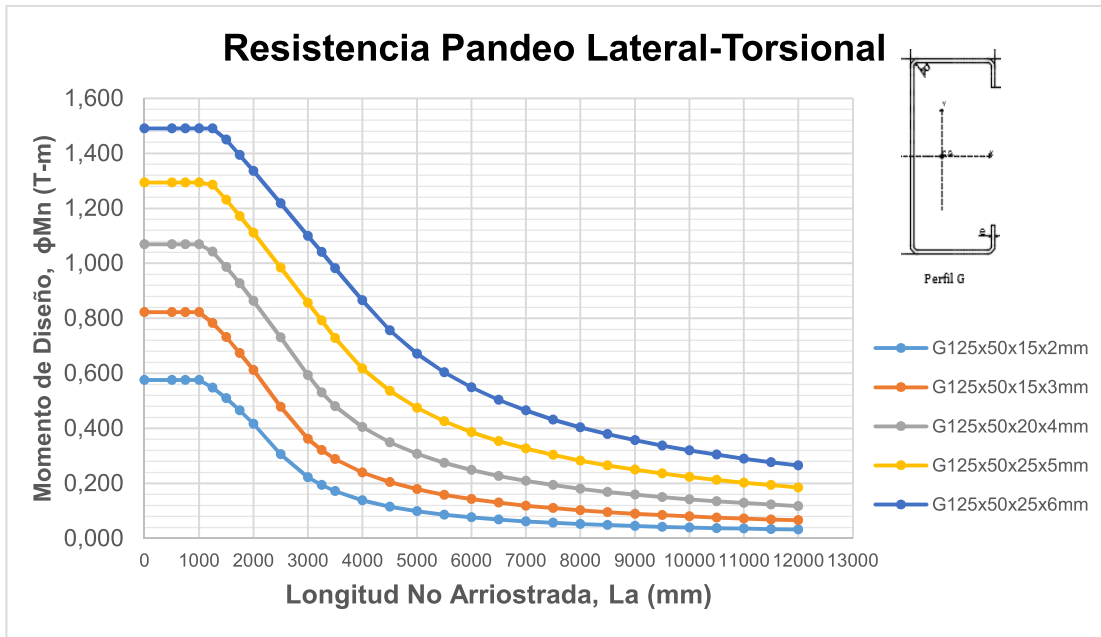
Gráfica A3 7. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi



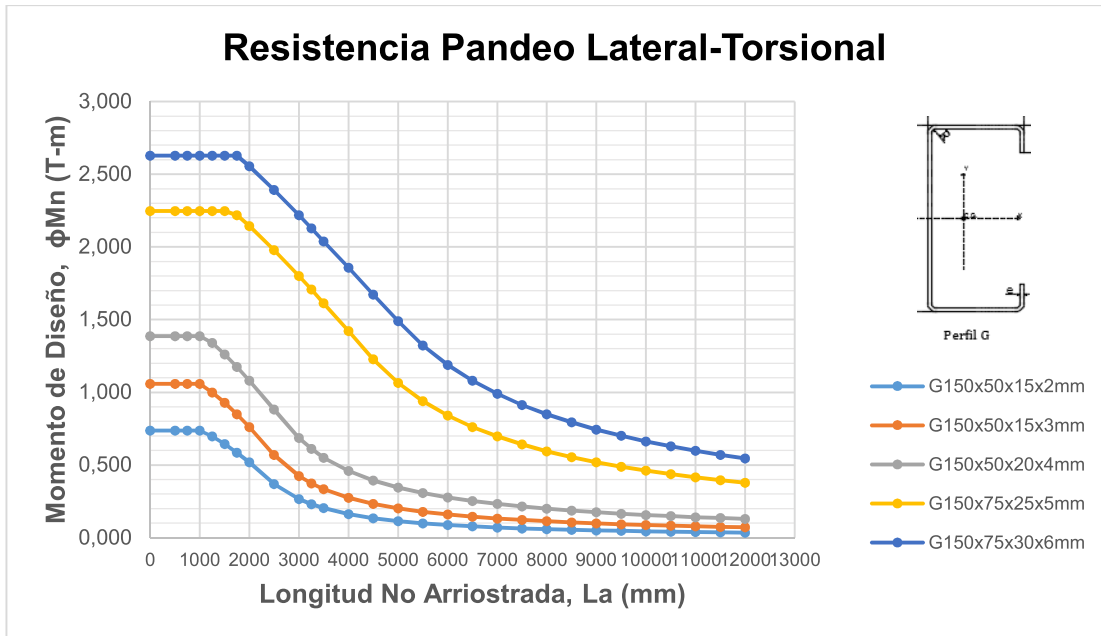
Gráfica A3 8. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi



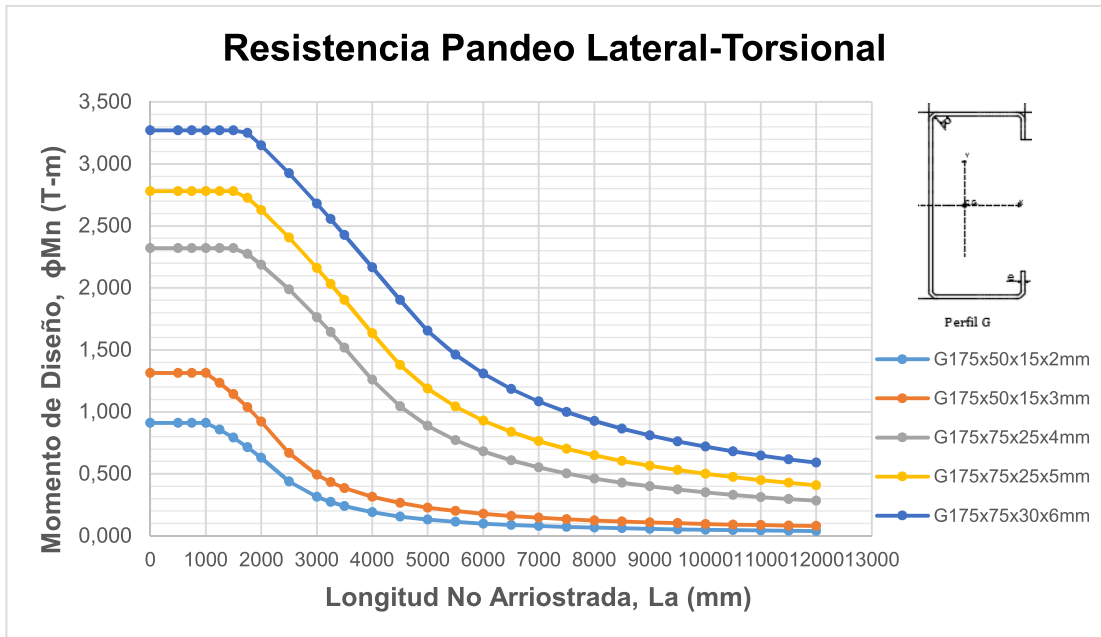
Gráfica A3 9. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi



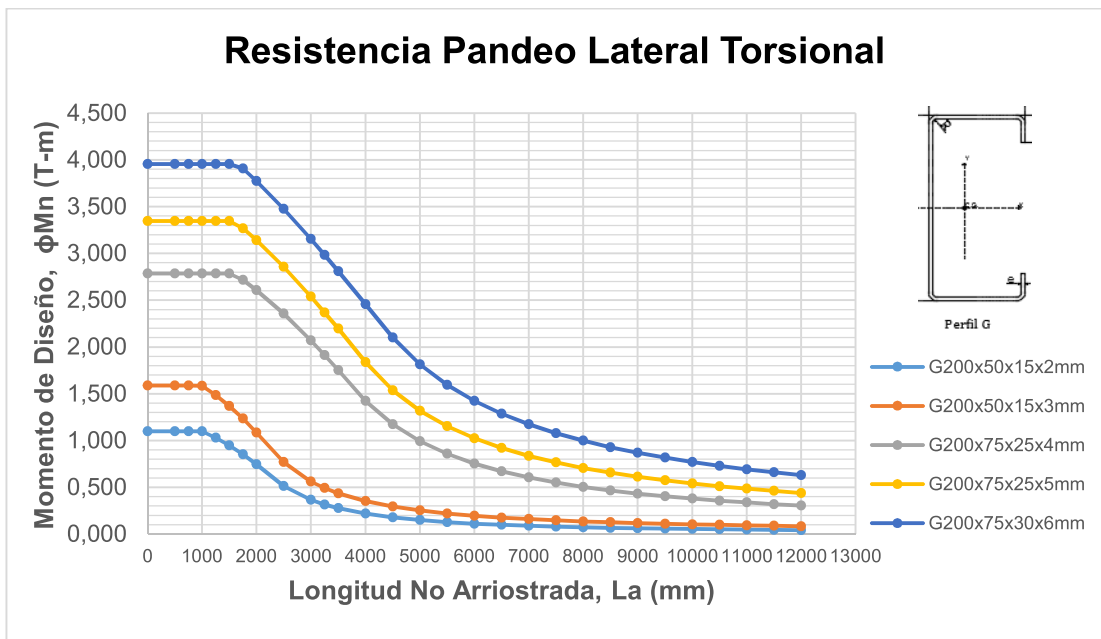
Gráfica A3 10. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi



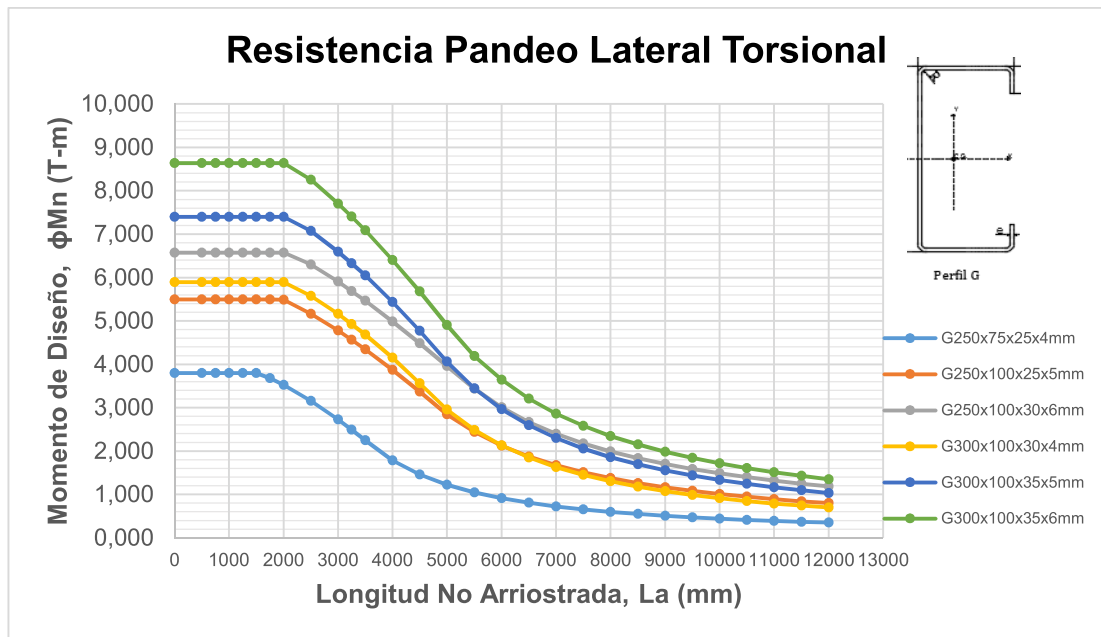
Gráfica A3 11. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi



Gráfica A3 12. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi

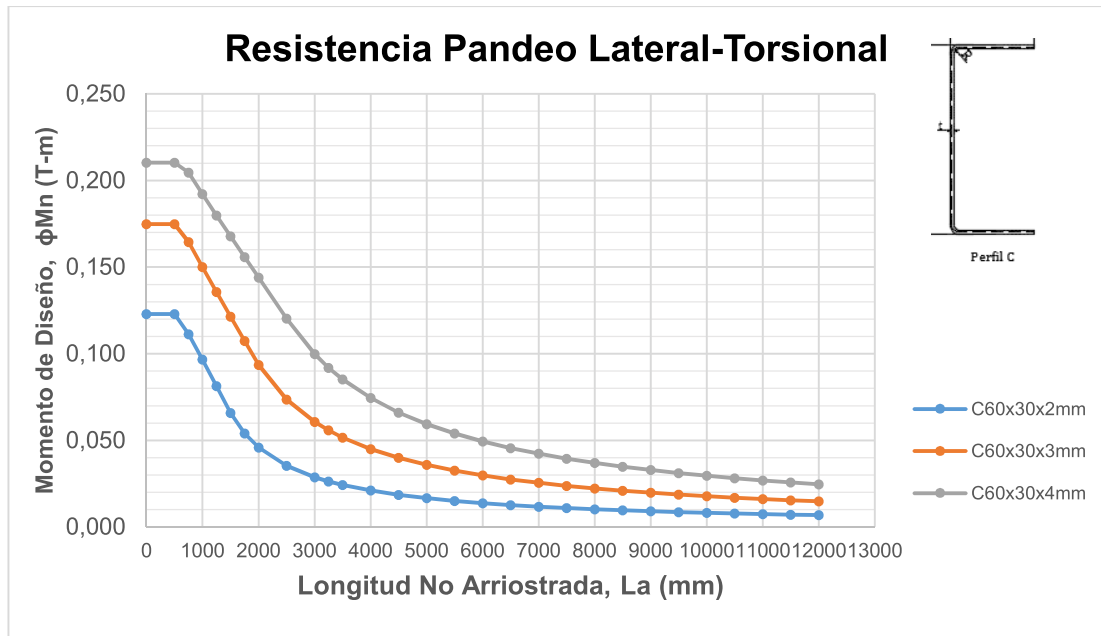


Gráfica A3 13. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones G, $F_y=50$ ksi

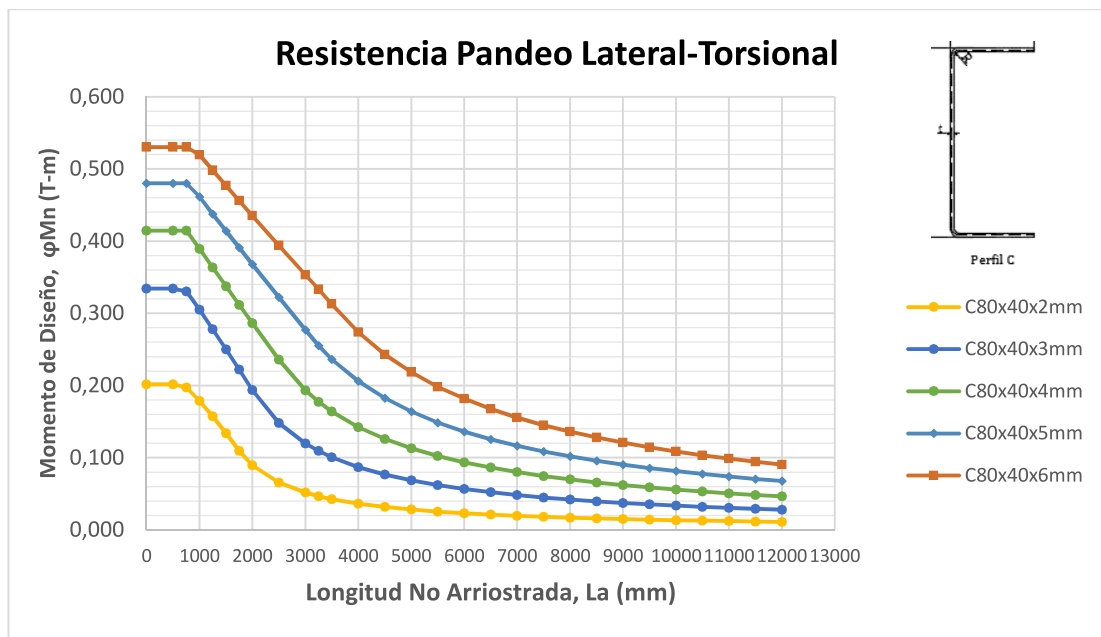


GRÁFICAS DE MOMENTOS DE DISEÑO POR PANDEO LATERAL-TORSIONAL DE SECCIONES C FY=50 KSI

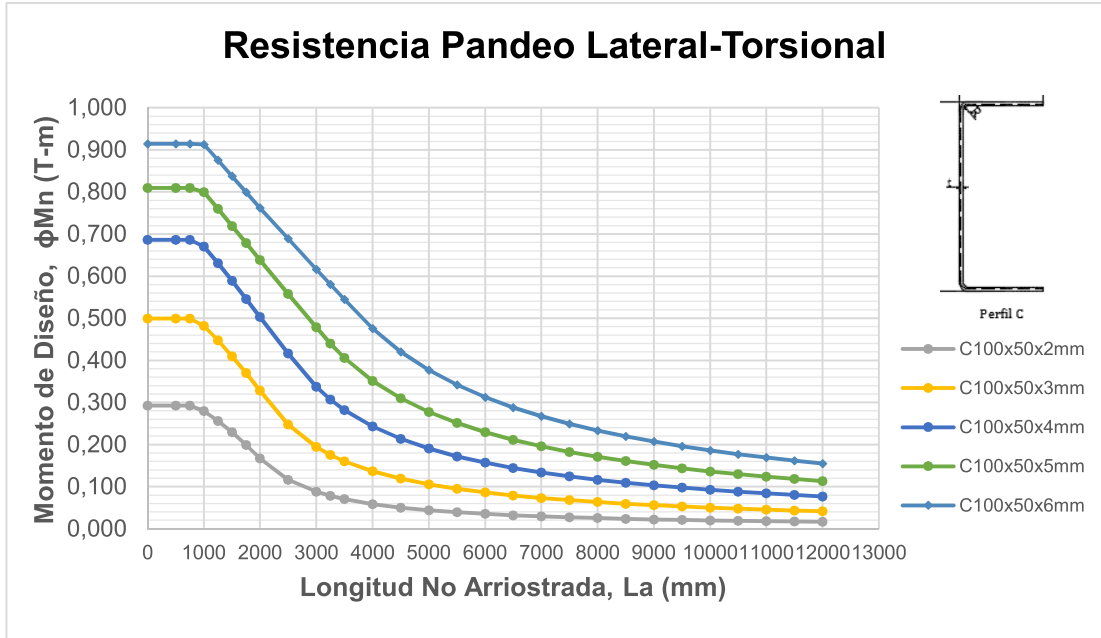
Gráfica A3 14. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



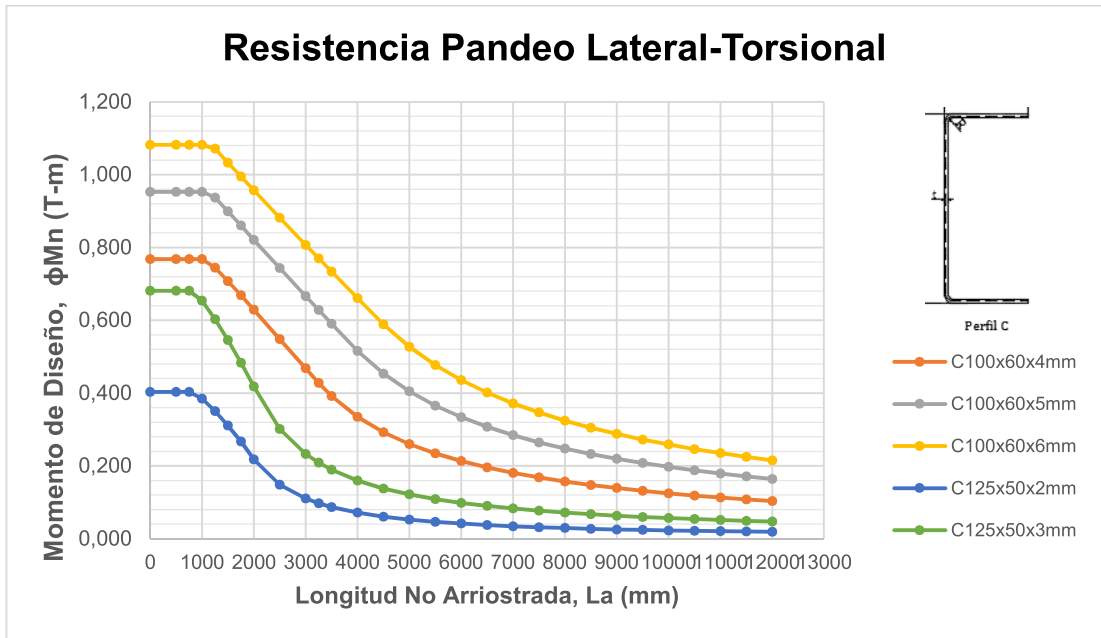
Gráfica A3 15. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



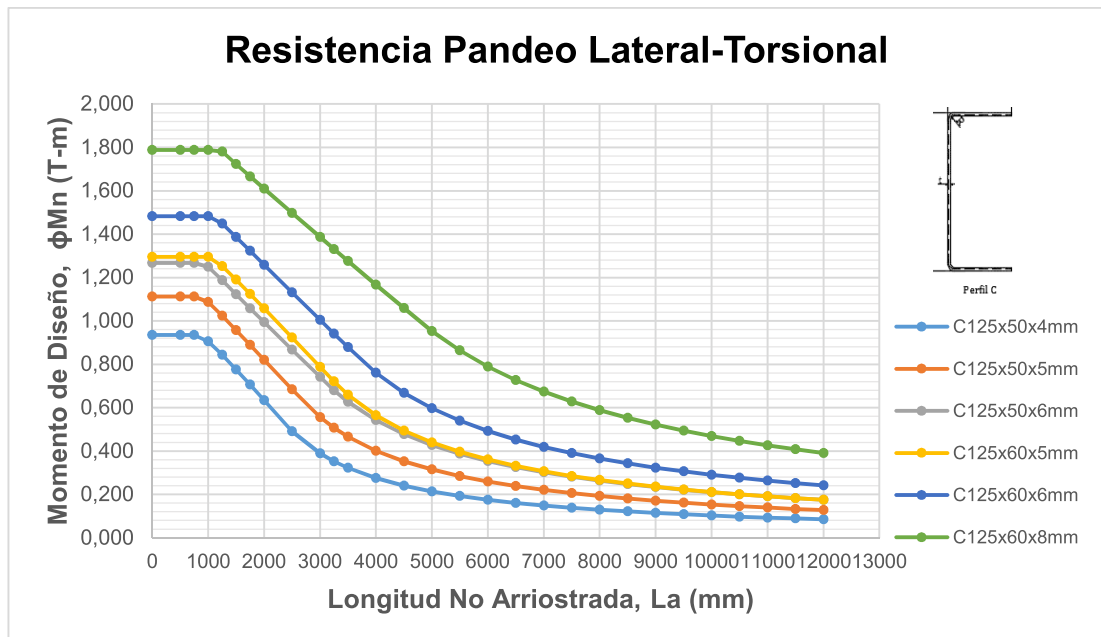
Gráfica A3 16. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



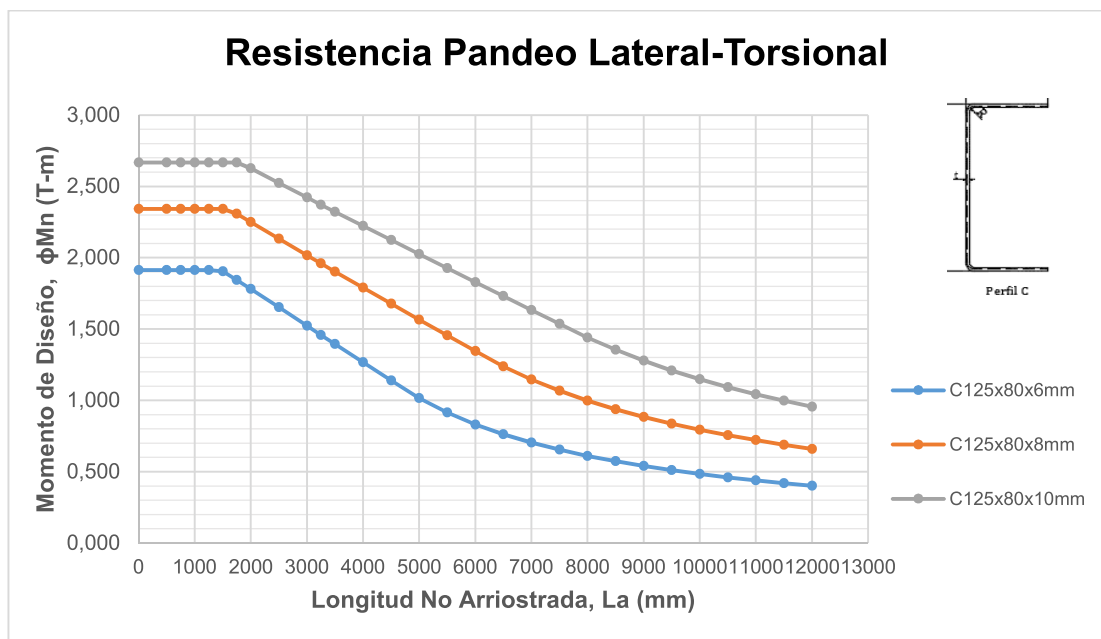
Gráfica A3 17. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



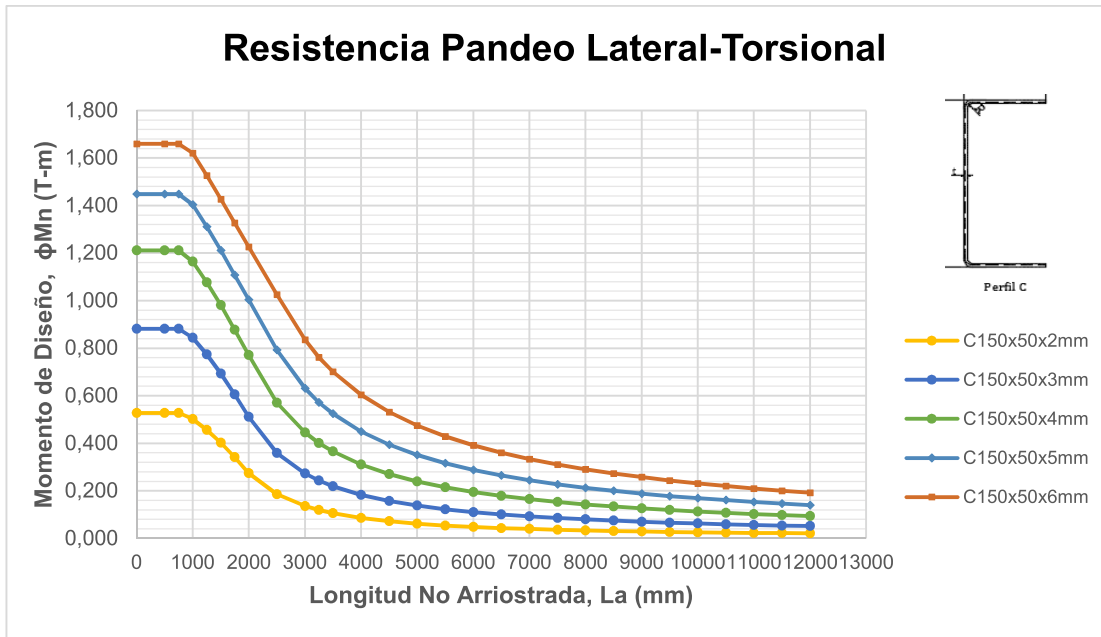
Gráfica A3 18. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



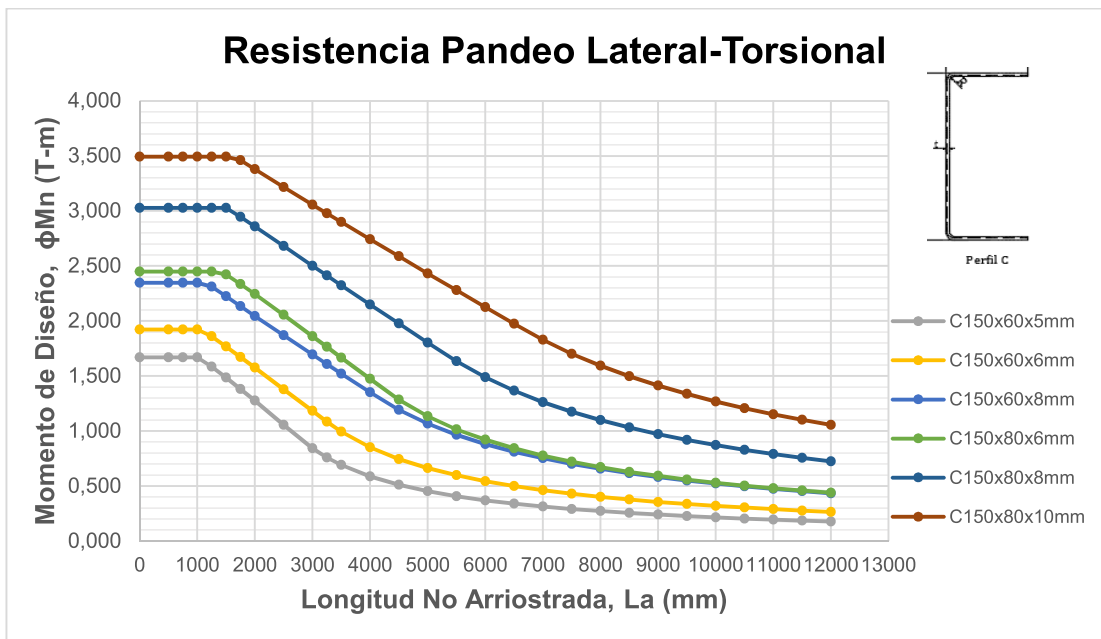
Gráfica A3 19. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



Gráfica A3 20. Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



Gráfica A3 21 Momento de Diseño por Pandeo Lateral-Torsional de Secciones C, $F_y=50$ ksi



ANEXO 4

FÓRMULAS PARA CALCULAR LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS SECCIONES C Y G

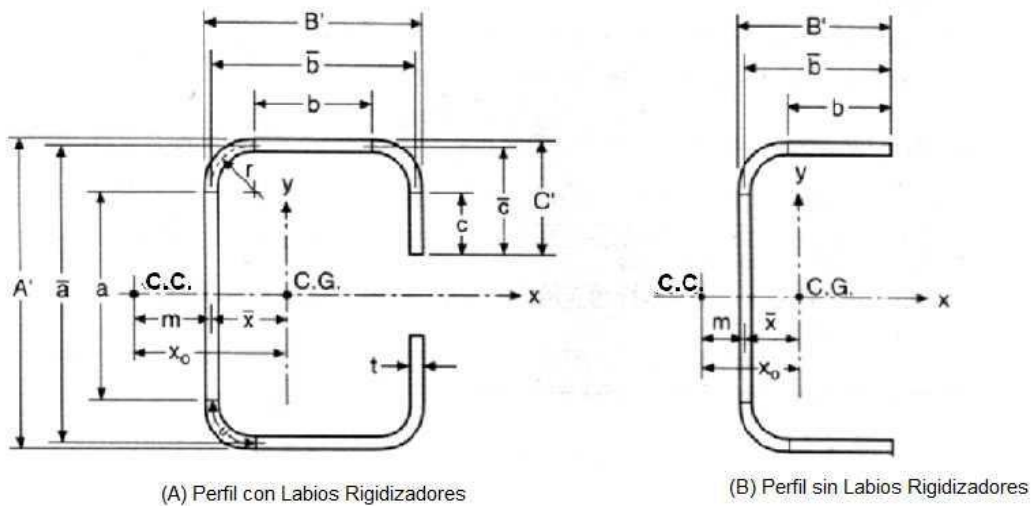


Figura A4 1. Secciones abiertas con simetría simple con y sin labios rigidizadores.

Fuente: Diseño de Perfiles Doblados en Frío. Apéndice A (Peña & Paredes, 13)

1. Parámetros Básicos

$$a = A' - (2r + t)$$

$$\bar{a} = A' - t$$

$$b = B' - [r + t/2 + \alpha(r + t/2)]$$

$$\bar{b} = B' - (t/2 + \alpha t/2)$$

$$c = \alpha[C' - (r + t/2)]$$

$$\bar{c} = \alpha(C' - t/2)$$

$$u = \pi r / 2 = 1.57r$$

$\alpha = 1.0$ para perfiles con labios atiesadores

$\alpha = 0$ para perfiles sin labios atiesadores

2. Area de la Sección

$$A = t[a + 2(b + u) + 2\alpha(c + u)]$$

3. Momento de Inercia con Respecto al Eje x

$$I_x = 2t[0.0417a^3 + b(a/2 + r)^2 + u(a/2 + 0.637r)^2 + 0.149r^3 + \alpha\xi]$$

$$\text{donde } \xi = 0.0833c^3 + \frac{c}{4}(a - c)^2 + u(a/2 + 0.637r)^2 + 0.149r^3$$

4. Distancia entre el Centroide y la Línea Central del Alma

$$\bar{x} = \frac{2t}{A} \{b(b/2 + r) + u(0.363r) + \alpha[u(b + 1.637r) + c(b + 2r)]\}$$

5. Momento de Inercia con Respecto al Eje y

$$I_y = 2t[b(b/2 + r)^2 + 0.0833b^3 + 0.356r^3 + \alpha\xi] - A\bar{x}^2$$

$$\text{donde } \xi = c(b + 2r)^2 + u(b + 1.637r)^2 + 0.149r^3$$

6. Distancia entre el Centro de Cortante y la Línea Central del Alma

$$m = \bar{b} \left[\frac{3\bar{a}^2\bar{b} + \alpha\bar{c}(6\bar{a}^2 - 8\bar{c}^2)}{\bar{a}^3 + 6\bar{a}^2\bar{b} + \alpha\bar{c}(8\bar{c}^2 - 12\bar{a}\bar{c} + 6\bar{a}^2)} \right]$$

7. Distancia entre el Centroide y el Centro de Cortante

$$x_o = -(\bar{x} + m)$$

El signo negativo indica que x_o se mide en la dirección negativa del eje x.

8. Constante Torsionante de St. Venant

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2(b + u) + 2\alpha(c + u)]$$

9. Constante de Alabeo

$$C_w = \frac{\bar{a}^2 \bar{b}^2 t}{12} \left[\frac{2\bar{a}^3 \bar{b} + 3\bar{a}^2 \bar{b}^2 + \alpha \xi}{6\bar{a}^2 \bar{b} + (\bar{a} + 2\bar{c}\alpha)^3 - 24\bar{a}\bar{c}^2\alpha} \right]$$

donde $\xi = 48\bar{c}^4 + 112\bar{b}\bar{c}^3 + 8\bar{a}\bar{c}^3 + 48\bar{a}\bar{b}\bar{c}^2 + 12\bar{a}^2\bar{c}^2 + 12\bar{a}^2\bar{b}\bar{c} + 6\bar{a}^3\bar{c}$

10. Parámetro β_w

$$\beta_w = - \left(\frac{t\bar{x}\bar{a}^3}{12} + t\bar{x}^3\bar{a} \right)$$

11. Parámetro β_f

$$\beta_f = \frac{t}{2} [(\bar{b} - \bar{x})^4 - \bar{x}^4] + \frac{t\bar{a}^2}{4} [(\bar{b} - \bar{x})^2 - \bar{x}^2]$$

12. Parámetro β_t

$$\beta_t = \alpha \left\{ 2\bar{c}t(\bar{b} - \bar{x})^3 + \frac{2}{3}t(\bar{b} - \bar{x}) [(\bar{a}/2)^3 - (\bar{a}/2 - \bar{c})^3] \right\}$$

13. Parámetro Usado para la Determinación del Momento Elástico Crítico

$$j = \frac{1}{2I_y} (\beta_w + \beta_f + \beta_t) - x_o$$