

**SOFTWARE PARA DISEÑO DE CORREAS CON PERFILES LAMINADOS Y
CONFORMADOS EN FRÍO CON MATLAB**



YESICA MARCELA ERASO GALLARDO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MECÁNICA ESTRUCTURAL JUMMOS
POPAYÁN, COLOMBIA
2022**

**SOFTWARE PARA DISEÑO DE CORREAS CON PERFILES LAMINADOS Y
CONFORMADOS EN FRÍO CON MATLAB**

YESICA MARCELA ERASO GALLARDO

**Trabajo en modalidad de investigación presentado como requisito para optar al
título de Ingeniera Civil**

Director

Esp. ANDRÉS FELIPE CORAL VARGAS

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MECÁNICA ESTRUCTURAL JUMMOS
POPAYÁN, COLOMBIA**

2022

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

El director y los jurados han evaluado este documento titulado: “Software para diseño de correas con perfiles laminados y conformados en frío con MATLAB”, escuchando la sustentación del mismo por su autora y lo encuentran satisfactorio por lo cual autorizan a la estudiante Yesica Marcela Eraso Gallardo, para que desarrolle las gestiones administrativas para optar al título de Ingeniera Civil.

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del director

Popayán, 12 de octubre de 2022

RESUMEN

El presente trabajo presenta un software para el análisis y diseño de correas, con perfiles laminados en caliente y conformados en frío, mediante la herramienta de App Designer de MATLAB. Las normativas bajo las cuales se realiza el cálculo de la resistencia corresponden a: la norma colombiana NSR10, y las normas estadounidenses AISC 360-16 y AISI S100-07. El software incluye perfiles de catálogos americanos y europeos, pero, además, permite ingresar las dimensiones de secciones transversales típicas. El programa ejecuta el análisis matricial de una viga sometida a flexión biaxial, presenta gráficas de cortante, momento y desplazamiento, el esquema de la viga y una tabla de resultados. Adicionalmente, para determinar las cargas a las cuales se encuentra sometida una correa, el programa tiene una sección orientada a facilitar el cálculo de la carga por viento para componentes y revestimientos (que aplica únicamente para correas).

Palabras clave: correa, flexión biaxial, resistencia a flexión, perfiles conformados en frío, perfiles laminados en caliente.

DEDICATORIA

*A mí misma, por amor propio, porque solo yo sé
cuánto me costó alcanzar esta meta.*

A mi madre: Leny Gallardo.

A mi padre: Carlos Eraso.

A mi hermana: Estefany Eraso.

AGRADECIMIENTOS

A mi director, Ing. Andrés Felipe Coral Vargas, por su orientación y colaboración en la realización de mi trabajo de grado.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos, sus experiencias y por motivarme a seguir el camino de la investigación.

A mis familiares y amigos, por su amor, por sus consejos y por acompañarme en esta etapa, porque directa o indirectamente aportaron su granito de arena para hacer realidad este sueño.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	30
PROBLEMA.....	32
JUSTIFICACIÓN	33
OBJETIVOS	34
Objetivo general.....	34
Objetivos específicos	34
MARCO TEÓRICO.....	35
Análisis estructural de una viga	35
Principio de superposición de efectos.....	35
Matriz de rigidez	35
Fuerzas totales.....	43
Constante torsional de St. Venant.....	47
Secciones abiertas	47
Secciones tipo cajón.....	49
Constante de torsión o alabeo, C_w	49
Secciones abiertas	50
Secciones cerradas tipo cajón	50
Propiedades de líneas curvas	50
Caso 1.....	51
Caso 2.....	52
Inercia de líneas rectas	52
Caso 1. Vertical.....	53
Caso 2. Horizontal	53
Caso 3. Línea inclinada.....	54

Factor de modificación para pandeo lateral torsional	54
Resistencia a flexión de perfiles conformados en frío	55
Límites y consideraciones dimensionales	55
Anchos efectivos.....	55
Rigidizador.....	68
Diagramas de flujo para el diseño a flexión.....	68
Diagramas de flujo para el diseño a cortante	82
Resistencia a flexión de perfiles laminados en caliente.....	86
Diagramas de flujo para el diseño a flexión.....	87
Diagramas de flujo para el diseño a cortante	116
Chequeos adicionales.....	124
Fuerza de viento.....	126
Carga de viento mínima	127
Velocidad básica de viento	127
Factor de dirección de viento.....	127
Factor de importancia	128
Categoría de exposición	128
Coeficiente de exposición.....	129
Factor topográfico.....	130
Factor de efecto ráfaga.....	132
Clasificación del cerramiento	134
Presión por velocidad.....	135
Coeficiente de presión interna	136
Coeficiente de presión externa o coeficiente de fuerza	137
Carga de viento de diseño.....	137

FUNCIONES DE AIRO CORREAS.....	139
Diagramas de flujo de funciones de AIRO correas	139
Glosario de funciones de AIRO correas	147
EJEMPLOS.....	155
Ejemplos de cálculo de resistencia para perfiles conformados en frío	155
Perfil C	155
Perfil G.....	178
Perfil doble G.....	206
Sección en I con simetría doble	231
Canal	239
Perfil tubular estructural rectangular	248
Perfil tubular estructural circular	254
Barra rectangular.....	258
RESULTADOS Y ANÁLISIS	261
Comparaciones de análisis.....	261
Modelo 1: viga simplemente apoyada.	261
Modelo 2: empotrado en un extremo, apoyo móvil y voladizo.	265
Modelo 3: empotrado y voladizo.	269
Modelo 4: viga continua	273
Resumen de las comparaciones	277
Comparaciones de resistencia al pandeo distorsional en perfiles conformados en frío	278
.....	278
Comparación 1	278
Comparación 2	295
Comparaciones de resistencia con otros programas	313

Comparación con Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo G	313
Comparación con Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo doble G.....	318
Comparación con Etabs de perfil laminado en C.....	323
Comparación con Etabs de perfil laminado en I.....	325
Comparación con Etabs de perfil laminado tubular estructural rectangular.....	327
Comparación con Etabs de perfil laminado tubular estructural circular.....	329
Comparación con Etabs de barra circular	331
Comparación con Etabs de barra rectangular	333
Comparación con CYPE de perfil laminado en I con patín esbelto	335
Comparación con CYPE de perfil laminado en I con alma no compacta.....	337
Comparación con CYPE de perfil laminado en I con alma esbelta.....	340
Comparación manual 1: flexión alrededor del eje fuerte sin arriostramiento lateral puntual. Zona 3, pandeo lateral torsional elástico.....	342
Comparación manual 2: flexión alrededor del eje fuerte con arriostramiento lateral puntual en la mitad de la luz. Zona 2; pandeo lateral torsional inelástico.	345
Comparación manual 3: flexión alrededor del eje fuerte con arriostramiento continuo. Zona 1; comportamiento plástico.....	347
Comparación manual 4: resistencia a cortante para flexión alrededor del eje fuerte.	349
Comparación manual 5: resistencia a cortante para flexión alrededor del eje fuerte.	350
Comparación manual 6: perfil laminado en I con patín no compacto	352
Ejemplo de cálculo de la carga de viento para una correa.....	354
MANUAL DE USUARIO DE AIRO CORREAS	359
CONCLUSIONES	380
LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	381

TRABAJOS FUTUROS 382

BIBLIOGRAFÍA 383

ANEXOS 385

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Factores de resistencia y coeficientes para secciones C y G.	85
Tabla 2: Límites de deflexión.	126
Tabla 3: Velocidad de viento básica.	127
Tabla 4: Factor de direccionalidad del viento K_d	128
Tabla 5: Factor de importancia.	128
Tabla 6: Constantes de exposición del terreno.....	130
Tabla 7: Parámetros para aumento de la velocidad sobre colinas y escarpes.	131
Tabla 8: Coeficientes de presión interna.	136
Tabla 9: Coordenada en Y del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.	163
Tabla 10: Coordenada en Y del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.	166
Tabla 11: Coordenada en X del centroide de la sección completa, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.	168
Tabla 12: Coordenada en X del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.	171
Tabla 13: Coordenada en X del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.	173
Tabla 14: Coordenada en X del eje neutro, tercera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.	174
Tabla 15: Coordenada en Y del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo G.	190
Tabla 16: Coordenada en Y del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo G.	194
Tabla 17: Coordenada en X del centroide de la sección completa, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo G.	200
Tabla 18: Comparación de resistencias del ejemplo de perfil conformado en frío tipo C versus resistencia presentada en el manual de ACESCO.	206
Tabla 19: Coordenada en Y del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo doble G.	216

Tabla 20: Coordenada en Y del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo doble G.	220
Tabla 21: Coordenada en X del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo doble G.	225
Tabla 22: Resumen de resultados de análisis, Etabs versus AIRO correas.	277
Tabla 23: Resumen se los resultados obtenidos en la comparación 1, cálculo de pandeo distorsional.....	295
Tabla 24: Resumen se los resultados obtenidos en la comparación 2, cálculo de pandeo distorsional.....	312
Tabla 25: Resumen de resultados obtenidos con Arquimet versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil conformado en frío tipo G.	317
Tabla 26: Resumen de resultados obtenidos con Arquimet versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil conformado en frío tipo doble G.	322
Tabla 27: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado en C.	324
Tabla 28: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado en I.....	326
Tabla 29: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado tubular estructural rectangular..	328
Tabla 30: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado tubular estructural circular.	330
Tabla 31: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado barra circular.	332
Tabla 32: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado barra rectangular.....	334
Tabla 33: Resumen de resultados obtenidos con CYPE para perfil laminado en I con patín esbelto versus AIRO correas.....	336
Tabla 34: Resumen de resultados obtenidos con CYPE para perfil laminado en I con alma no compacta versus AIRO correas.....	338
Tabla 35: Resumen de resultados obtenidos con CYPE para perfil laminado en I con alma esbelta versus AIRO correas.	342

Tabla 36: Resumen de resultados obtenidos manualmente para perfil laminado en I con patín no compacto versus AIRO correas.	354
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grados de libertad de una barra.....	36
Figura 2: Desplazamientos lineales y angulares unitarios en el nudo.	37
Figura 3: Desplazamiento unitario en dirección X del nudo i.	37
Figura 4: Desplazamiento unitario en dirección Y del nudo i.	38
Figura 5: Desplazamiento unitario en dirección Z del nudo i.....	38
Figura 6: Giro unitario alrededor del eje X del nudo i.....	39
Figura 7: Giro unitario alrededor del eje Y del nudo i.....	39
Figura 8: Giro alrededor del eje Z del nudo i.	40
Figura 9: Barra empotrada en sus extremos con carga uniforme.	45
Figura 10: Grados de libertad restringidos de la viga biempotrada.	45
Figura 11: Esquema del perfil conformado en frío tipo G para el cálculo de la constante torsional.....	48
Figura 12: Esquema del perfil conformado en frío tipo C para el cálculo de la constante torsional.....	48
Figura 13: Esquema del perfil conformado en frío tipo doble G para el cálculo de la constante torsional.	49
Figura 14: Línea curva.	50
Figura 15: Curva a 90 °.....	51
Figura 16: Curva con un ángulo menor a 90 °.....	52
Figura 17: Inercia de una línea recta vertical.....	53
Figura 18: Inercia de una línea recta horizontal.	53
Figura 19: Inercia de una línea recta inclinada.	54
Figura 20: Ancho efectivo de un elemento rigidizado bajo compresión uniforme.	56
Figura 21: Elemento rigidizado bajo compresión uniforme.	57
Figura 22: Ancho efectivo de alma bajo gradiente de esfuerzos.	58
Figura 23: Alma bajo gradiente de esfuerzos.	59
Figura 24: Ancho efectivo de un elemento no rigidizado bajo compresión uniforme. ...	60
Figura 25: Elemento no rigidizado bajo compresión uniforme.....	61
Figura 26: Ancho efectivo de un elemento no rigidizado y rigidizadores de borde bajo gradiente de esfuerzo cuando f1 y f2 están en compresión.	62

Figura 27: Elemento no rigidizado o rigidizador de borde bajo gradiente de esfuerzos con f_1 y f_2 en compresión.	63
Figura 28: Ancho efectivo para elemento no rigidizado y rigidizadores de borde bajo gradiente de esfuerzo con f_1 en compresión y f_2 en tensión.	64
Figura 29: Elemento no rigidizado y rigidizadores de borde bajo gradiente de esfuerzo con f_1 en compresión y f_2 en tensión.	65
Figura 30: Ancho efectivo para elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.....	66
Figura 31: Elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.....	68
Figura 32: Artículos de la NSR10 para resistencia a flexión que aplican a los perfiles conformados en frío considerados en AIRO correas.	69
Figura 33: Esquema que presenta las longitudes L_x y L_y usadas en el cálculo de la resistencia a pandeo lateral torsional.	70
Figura 34: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G.	72
Figura 35: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C.....	73
Figura 36: Pandeo lateral torsional en secciones abiertas C y G.	75
Figura 37: Pandeo lateral torsional en secciones cerradas tipo cajón.....	76
Figura 38: Pandeo distorsional.	80
Figura 39: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, para el cálculo de la resistencia a pandeo distorsional.....	81
Figura 40: Resistencia al corte de almas sin huecos para perfiles conformados en frío..	83
Figura 41: Artículos de la NSR10 para resistencia a flexión que aplican a los perfiles laminados en caliente considerados en AIRO correas.....	87
Figura 42: Momento plástico y pandeo lateral torsional para el perfil en I con simetría doble, alma compacta y patín compacto, solicitado por flexión alrededor de su eje mayor, y canales solicitados por flexión alrededor de su eje mayor.	89
Figura 43: Pandeo lateral torsional para perfil en I con simetría doble con alma compacta y patín no compacto o esbelto solicitado por flexión alrededor del eje mayor.....	91
Figura 44: Pandeo local del patín a compresión para perfil en I de simetría doble, alma compacta y patín no compacto o esbelto solicitado por flexión alrededor del eje mayor.	92

Figura 45: Pandeo lateral torsional del perfil en I de simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor.....	97
Figura 46: Pandeo local del patín a compresión del perfil en I de simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor	98
Figura 47: Fluencia del patín a tensión del perfil en I de simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor.	99
Figura 48: Pandeo lateral torsional del perfil en I de simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor.....	102
Figura 49: Pandeo local del patín a compresión del perfil en I de simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor.....	103
Figura 50: Fluencia del patín a tensión del perfil en I de simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor.....	104
Figura 51: Momento plástico y pandeo local del patín del perfil en I con simetría doble y canales solicitados por flexión alrededor de su eje menor.....	106
Figura 52: Sección transversal de un perfil laminado tubular estructural rectangular. .	108
Figura 53: Pandeo local del patín para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.	109
Figura 54: Pandeo local del alma para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.	110
Figura 55: Pandeo lateral torsional para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.	112
Figura 56: Pandeo local de perfiles tubulares estructurales circulares.	113
Figura 57: Pandeo lateral torsional de barras rectangulares.	115
Figura 58: Artículos de la NSR10 que aplican para el cálculo de la resistencia a cortante de los perfiles laminados en caliente presentados en AIRO correas.	116
Figura 59: Resistencia a cortante de secciones en I de simetría doble, para cortante en el plano del alma.	118
Figura 60: Resistencia a cortante de secciones en I de simetría doble, para cortante en la dirección débil.....	119
Figura 61: Resistencia a cortante de secciones tipo C, para cortante en el plano del alma.	120

Figura 62: Resistencia a cortante de secciones tipo C, para cortante en la dirección débil.	121
Figura 63: Resistencia a cortante para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.	122
Figura 64: Resistencia a cortante de perfiles tubulares estructurales circulares.....	123
Figura 65: Diagrama de flujo de la función correr en AIRO correas.	139
Figura 66: Diagrama de flujo de la función perfil en AIRO correas.	140
Figura 67: Diagrama de flujo de la función Área.	141
Figura 68: Diagrama de flujo para la función Inercia.....	142
Figura 69: Diagrama de flujo de la función idenP.....	144
Figura 70: Diagrama de flujo de la función TPFRR	145
Figura 71: Diagrama de flujo de la función Arrugamiento	146
Figura 72: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C del ejemplo de cálculo de resistencia.	155
Figura 73: Ancho efectivo del alma del ejemplo de perfil conformado en frío tipo C..	161
Figura 74: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (primera iteración).....	163
Figura 75: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (segunda iteración).	165
Figura 76: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del centroide de la sección completa.	168
Figura 77: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C en la determinación de anchos efectivos.	169
Figura 78: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar el ancho efectivo de los patines.	169
Figura 79: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del centroide de la sección efectiva.	171
Figura 80: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del eje neutro (primera iteración).....	172
Figura 81: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del eje neutro (segunda iteración).	174

Figura 82: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G del ejemplo de cálculo de resistencia.....	178
Figura 83: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (primera iteración).....	183
Figura 84: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo del patín.....	186
Figura 85: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo del alma (primera iteración).....	188
Figura 86: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (primera iteración).....	190
Figura 87: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (segunda iteración).....	191
Figura 88: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo del alma (segunda iteración).....	192
Figura 89: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, para determinar la coordenada en X del centroide de la sección completa.....	200
Figura 90: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G en la determinación de anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y.....	201
Figura 91: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G del ejemplo de cálculo de resistencia.....	207
Figura 92: Sección transversal de un perfil conformado en frío tipo G, que conforma el perfil tipo cajón del ejemplo.....	207
Figura 93: Posición del eje neutro de la sección completa del perfil conformado en frío tipo doble G.....	211
Figura 94: Anchos efectivos de la sección transversal del perfil conformado en frío tipo doble G.....	212
Figura 95: Sección transversal del perfil conformado tipo G que conforma el perfil en cajón, para el cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (primera iteración).....	212
Figura 96: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, que conforma el perfil en cajón, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (primera iteración).....	216

Figura 97: Sección transversal del perfil conformado tipo G que conforma el perfil en cajón, para el cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (segunda iteración).....	217
Figura 98: Sección transversal del perfil conformado tipo G que conforma el perfil en cajón, para el cálculo del ancho efectivo del alma.....	218
Figura 99: Anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y del perfil conformado en frío doble G.....	221
Figura 100: Ancho efectivo del alma para el perfil conformado en frío tipo doble G. .	223
Figura 101: Esquema para determinar la posición del eje neutro de la sección efectiva del perfil conformado en frío tipo doble G.....	225
Figura 102: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo cajón para determinar el ancho efectivo del alma cuando la flexión es alrededor del eje Y.....	227
Figura 103: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tipo I.	231
Figura 104: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tipo C.	240
Figura 105: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tubular estructural rectangular.....	248
Figura 106: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tubular estructural circular.	255
Figura 107: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente barra rectangular.....	258
Figura 108: Esquema de una viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	261
Figura 109: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en Etabs.	261
Figura 110: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	262
Figura 111: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en Etabs.	262
Figura 112: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	262
Figura 113: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en Etabs.	263

Figura 114: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	263
Figura 115: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en Etabs.	263
Figura 116: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	264
Figura 117: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en Etabs.	264
Figura 118: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	264
Figura 119: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en Etabs.	265
Figura 120: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.....	265
Figura 121: Esquema de una viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.	265
Figura 122: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.	266
Figura 123: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.....	266
Figura 124: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.	266
Figura 125: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.....	267
Figura 126: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.	267
Figura 127: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.....	267
Figura 128: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.	267

Figura 129: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.....	268
Figura 130: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.	268
Figura 131: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.....	268
Figura 132: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.	268
Figura 133: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.....	269
Figura 134: Esquema de una viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	269
Figura 135: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.	269
Figura 136: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	270
Figura 137: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.	270
Figura 138: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	270
Figura 139: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.	270
Figura 140: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	271
Figura 141: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.	271
Figura 142: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	271
Figura 143: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.	271
Figura 144: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	272

Figura 145: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.	272
Figura 146: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.	272
Figura 147: Esquema de una viga continua en AIRO correas.	273
Figura 148: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en Etabs.	273
Figura 149: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en AIRO correas.	273
Figura 150: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en Etabs.	274
Figura 151: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en AIRO correas.	274
Figura 152: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en Etabs.	274
Figura 153: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en AIRO correas.	275
Figura 154: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en Etabs.	275
Figura 155: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en AIRO correas.	275
Figura 156: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en Etabs.	276
Figura 157: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en AIRO correas.	276
Figura 158: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en Etabs.	276
Figura 159: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en AIRO correas.	276
Figura 160: Sección transversal del perfil conformado en frío para la Comparación 1. .	278
Figura 161: Ancho efectivo de la pestaña superior del perfil de la comparación 1.	283

Figura 162: Ancho efectivo del patín del perfil de la comparación 1.....	286
Figura 163: Ancho efectivo del alma del perfil de la comparación 1.....	288
Figura 164: Sección transversal del perfil conformado en frío para la Comparación 2. .	296
Figura 165: Ancho efectivo de la pestaña superior del perfil de la comparación 2.....	300
Figura 166: Ancho efectivo del patín del perfil de la comparación 2.....	304
Figura 167: Ancho efectivo del alma del perfil de la comparación 2.....	305
Figura 168: Datos ingresados en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo G...	313
Figura 169: Datos ingresados en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo G..	314
Figura 170: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo G, primera parte del reporte.	315
Figura 171: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo G, segunda parte del reporte.	316
Figura 172: Resultados obtenidos en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo G.	317
Figura 173: Datos ingresados en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo doble G.	318
Figura 174: Datos ingresados en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo doble G.	319
Figura 175: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo doble G, primera parte del reporte.	320
Figura 176: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo doble G, segunda parte del reporte.	321
Figura 177: Resultados obtenidos en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo doble G.....	322
Figura 178: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado en C.....	323
Figura 179: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado en C.	324
Figura 180: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado en C.	324
Figura 181: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado en I.	325
Figura 182: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado en I.	326

Figura 183: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado en I.	326
Figura 184: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado tubular estructural rectangular.....	327
Figura 185: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado tubular estructural rectangular.....	328
Figura 186: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado tubular estructural rectangular.....	328
Figura 187: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado tubular estructural circular.	329
Figura 188: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado tubular estructural circular.	330
Figura 189: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado tubular estructural circular.	330
Figura 190: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado barra circular de 2” de diámetro.....	331
Figura 191: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado barra circular.	332
Figura 192: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado barra circular.	332
Figura 193: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado barra rectangular.	333
Figura 194: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado barra rectangular.	334
Figura 195: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado barra rectangular.....	334
Figura 196: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con patín esbelto para flexión alrededor del eje fuerte.....	335
Figura 197: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con patín esbelto para flexión alrededor del eje débil.	336

Figura 198: Dimensiones y propiedades geométricas para el perfil laminado en I con patín esbelto.	336
Figura 199: Resultados en AIRO correas para el perfil laminado en I con patín esbelto.	337
Figura 200: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma no compacta para flexión alrededor del eje fuerte.	338
Figura 201: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma no compacta para flexión alrededor del eje débil.....	338
Figura 202: Dimensiones y propiedades geométricas para el perfil laminado en I con alma no compacta.	339
Figura 203: Resultados en AIRO correas para el perfil laminado en I con alma no compacta.	339
Figura 204: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma esbelta para flexión alrededor del eje fuerte.....	340
Figura 205: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma esbelta para flexión alrededor del eje débil.	341
Figura 206: Geometría para el perfil laminado en I con alma esbelta.	341
Figura 207: Resultados en AIRO correas para el perfil laminado en I con alma esbelta.	341
Figura 208: Esquema del arreglo de vigas y viguetas para la comparación manual 1. .	342
Figura 209: Modelo idealizado de la vigueta para la comparación manual 1.	342
Figura 210: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 1.	343
Figura 211: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 1. ...	344
Figura 212: Gráfica de resistencia a flexión vs longitud no arriestrada en AIRO correas para la comparación manual 1	344
Figura 213: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 2.	345
Figura 214: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 2. ...	346
Figura 215: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 3.	347
Figura 216: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 3. ...	348
Figura 217: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 4.	349
Figura 218: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 4. ...	350

Figura 219: Sección transversal del perfil laminado en I para la comparación manual 5.	350
.....	
Figura 220: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 5.	351
Figura 221: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 5. ...	352
Figura 222: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 6.	353
Figura 223: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 6. ...	354
Figura 224: Ubicación de la ciudad de Popayán en el mapa de velocidad básica de viento para Colombia.	355
Figura 225: Coeficientes G_{Cp} tomados de la figura B.6.5-8C para el ejemplo de carga de viento.	357
Figura 226: Resultados obtenidos en el módulo de viento de AIRO correas para el ejemplo de carga de viento.	358
Figura 227: Ventana principal de AIRO correas.	359
Figura 228: Ventana 1.	360
Figura 229: Ventana 2.	360
Figura 230: Ventana 3 (a).	360
Figura 231: Ventana 4 (a).	361
Figura 232: Ventana 5 (a).	361
Figura 233: Ventana 3 (b).	362
Figura 234: Ventana 4 (b).	362
Figura 235: Ventana mostrar perfil.	363
Figura 236: Ventana de viento.	363
Figura 237: Ventana de diagramas para envolvente.	364
Figura 238: Ventana de diagramas para carga en Y.	365
Figura 239: Ventana de diagramas para carga en X.	366
Figura 240: Sección de datos generales.	367
Figura 241: Placas de refuerzo para el alma.	368
Figura 242: Sección esquema de la viga.	369
Figura 243: Gráfica de resistencia a flexión vs longitud no arriostrada.	372
Figura 244: Tabla de resultados de AIRO correas.	372
Figura 245: Ejemplo de referencia de una luz en la tabla de resultados.	373

Figura 246: Ventana principal de AIRO correas con ejemplo de análisis y diseño.	374
Figura 247: Paso 1 en la instalación de AIRO correas.	375
Figura 248: Paso 2 en la instalación de AIRO correas.	375
Figura 249: Paso 3 en la instalación de AIRO correas.	376
Figura 250: Paso 4 en la instalación de AIRO correas.	376
Figura 251: Paso 5 en la instalación de AIRO correas.	377
Figura 252: Paso 6 en la instalación de AIRO correas.	377
Figura 253: Paso 7 en la instalación de AIRO correas.	378
Figura 254: Paso 8 en la instalación de AIRO correas.	378
Figura 255: Paso 9 en la instalación de AIRO correas.	379

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa de velocidad de viento básica para Colombia. Figura B.6.4-1 del título B de la NSR10.....	385
Anexo 2: Factor topográfico K_{zt} . Figura B.6.5-1 del título B de la NSR10.	386
Anexo 3: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-8B del título B de la NSR10..	387
Anexo 4: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-8C del título B de la NSR10..	388
Anexo 5: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-8D del título B de la NSR10.	389
Anexo 6: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-9 del título B de la NSR10. ...	390
Anexo 7: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-10 del título B de la NSR10. .	391
Anexo 8: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-11 ^a del título B de la NSR10.	392
Anexo 9: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-11B del título B de la NSR10.	393
Anexo 10: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-12 del título B de la NSR10.	394
Anexo 11: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-13 del título B de la NSR10.	395
Anexo 12: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-14 del título B de la NSR10.	396
Anexo 13: Coeficientes de presión neta. Figura B.6.5-16 ^a del título B de la NSR10. ...	397
Anexo 14: Coeficientes de presión neta. Figura B.6.5-16B del título B de la NSR10...	398
Anexo 15: Coeficientes de presión neta. Figura B.6.5-16C del título B de la NSR10...	399

INTRODUCCIÓN

Las correas son elementos principalmente de techo sometidas a flexión biaxial, que soportan cargas muertas debidas al peso propio o permanente, al peso de la cubierta y cielorrasos, entre otros, a cargas vivas debido a las operaciones de construcción y mantenimiento, la carga ejercida por el viento. Las correas, aunque no hacen parte del sistema de resistencia principal de la edificación, requieren un diseño que garantice su adecuado funcionamiento con integridad y seguridad como cualquier otro elemento estructural y no estructural.

Existen diferentes materiales y formas de sección transversal para correas. Los perfiles laminados resultan de un proceso industrial a altas temperaturas en el que se da forma a la materia prima por medio de rodillos o cilindros de laminación. Los perfiles conformados en frío se obtienen mediante un proceso que consiste en doblar láminas de acero de poco espesor a temperatura ambiente, estos elementos han ganado popularidad en los últimos años por su bajo peso y economía (Naspud Uruchima, 2021).

El software AIRO, desarrollado en este trabajo, cumple el objetivo de análisis y diseño de correas con perfiles laminados en caliente y conformados en frío. Este programa ofrece una amplia variedad de secciones transversales y a diferencia de otros programas (que limitan su catálogo a los productos de su empresa, como parte de una estrategia comercial) permite ingresar las dimensiones de otra sección transversal cuando un perfil no se encuentre en la base de datos. Conocida la geometría se calculan las propiedades geométricas y la resistencia de la viga.

El programa AIRO realiza los chequeos de diseño de los perfiles y los organiza de acuerdo a su peso de menor a mayor, con la intención de que el usuario tenga las opciones de escoger los perfiles más livianos. El programa permite generar un documento que contiene los datos ingresados por el usuario, el perfil seleccionado, la geometría, las propiedades geométricas, el análisis matricial de la viga con sus respectivos diagramas y la resistencia de diseño.

En este documento se presenta inicialmente la teoría relacionada al análisis matricial de una viga. Posteriormente, el cálculo de la resistencia de perfiles conformados en frío y laminados en caliente. Luego se encuentra el cálculo de la carga de viento para correas, ya sea como elementos de componentes y revestimientos, dado que ellos no hacen parte de los elementos de resistencia principal de una edificación.

Posteriormente se presenta los diagramas de flujo de los principales componentes de “AIRO correas” y la descripción de sus funciones más importantes. Luego se presentan ejemplos del cálculo de la resistencia de perfiles conformados en frío y laminados en caliente de todas las secciones transversales que contiene el programa. Así mismo, un ejemplo del cálculo de la carga por viento para estos elementos.

Por último, se presentan comparaciones de los resultados de análisis y diseño obtenidos con “AIRO correas” versus los resultados obtenidos con otros programas como Arquimet, Etabs o CYPE. También, comparaciones de los resultados obtenidos con AIRO versus ejercicios desarrollados analíticamente.

PROBLEMA

Actualmente existen diversos programas para el análisis y diseño de vigas con perfiles laminados en caliente y conformados en frío. Sin embargo, aunque algunos de ellos son gratuitos, se limitan a los perfiles fabricados por la empresa. Por otro lado, algunos programas permiten incorporar una base de datos de acuerdo a las necesidades del cliente, pero normalmente no son de dominio público o gratuitos. En ocasiones proporcionan una base de datos con los perfiles más usados en su país.

Aunque existen programas para diseño con perfiles conformados en frío, es necesario un programa que permita ingresar la información geométrica de un perfil en particular, para realizar el diseño sin necesidad de comprar los productos de la empresa creadora del software. Por otro lado, calcular la resistencia de los perfiles en cuestión resulta laborioso, dado que se requiere de un proceso iterativo para determinar la posición del eje neutro de la sección efectiva, razón por la cual realizar el cálculo manualmente no es eficiente y puede conducir a errores (Baque Jiménez, 2015).

En cuanto al análisis matricial de la viga, el cálculo de la resistencia y los chequeos adicionales, como, por ejemplo, arrugamiento del alma o deflexiones, a menudo los programas no permiten observar esta información con detalle, porque el usuario no tiene mayor control sobre los resultados obtenidos. Si bien los softwares son herramientas en el análisis y diseño de estructuras metálicas, es el usuario el único responsable del diseño que se ejecuta.

JUSTIFICACIÓN

Existen programas en Colombia para el diseño de correas, algunos gratuitos que se limitan al análisis de los perfiles que comercializa la empresa. Algunos programas que permiten introducir una base de datos, que contienen un variado catálogo o que permiten ingresar las dimensiones geométricas de una sección, se debe comprar su licencia para el uso de los mismos. Por otro lado, son escasos los programas extranjeros de acceso gratuito, que tienen incluida la norma AISC 360 – 16 o la AISI S100 -07, las cuales son la base de la NSR 10.

Actualmente las correas en perfiles metálicos están siendo ampliamente utilizadas, por lo que se requiere de un software para el análisis y diseño, que permita ingresar la información de manera sencilla y entregue resultados de fácil interpretación. Lo anterior resulta importante para los profesionales y estudiantes de ingeniería civil, para reducir el tiempo en la realización de los cálculos y aportar soluciones seguras.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un software usando el lenguaje de programación “m” de MATLAB mediante la herramienta para diseño de aplicaciones App Designer, para el diseño de correas con perfiles laminados en caliente y conformados en frío, bajo las normas NSR10, AISC 360-16 y AISI S100-07.

Objetivos específicos

- Calcular las fuerzas internas de la viga mediante análisis matricial.
- Determinar la resistencia de perfiles laminados en caliente.
- Evaluar la resistencia de perfiles conformados en frío.
- Crear el módulo de cálculo de la carga de viento en correas.
- Generar las memorias de cálculos de análisis y diseño.

MARCO TEÓRICO

Análisis estructural de una viga

AIRO correas utiliza análisis matricial para determinar la demanda de la viga.

Principio de superposición de efectos

El principio de superposición de efectos se basa en las siguientes premisas:

- Las deformaciones son proporcionales a las fuerzas.
- Los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones unitarias.
- Existe un comportamiento lineal entre esfuerzos y deformaciones en el rango elástico y antes del límite de proporcionalidad, por lo que el módulo de elasticidad es constante en dicho rango.
- La rigidez y el módulo de elasticidad no cambian a medida que se aumente la carga o el esfuerzo.

Debido a la relación lineal es posible sumar los efectos individuales, obteniendo una resultante de efectos. Para que se satisfaga el principio de superposición se debe cumplir que las deformaciones sean pequeñas, es decir que la geometría del cuerpo deformado es muy similar a la geometría del cuerpo sin deformar. Además, el efecto de segundo orden producido por las fuerzas axiales en la flexión es despreciable (Blanco Díaz, Cervera Ruiz, & Suárez Arroyo, 2015).

Barra

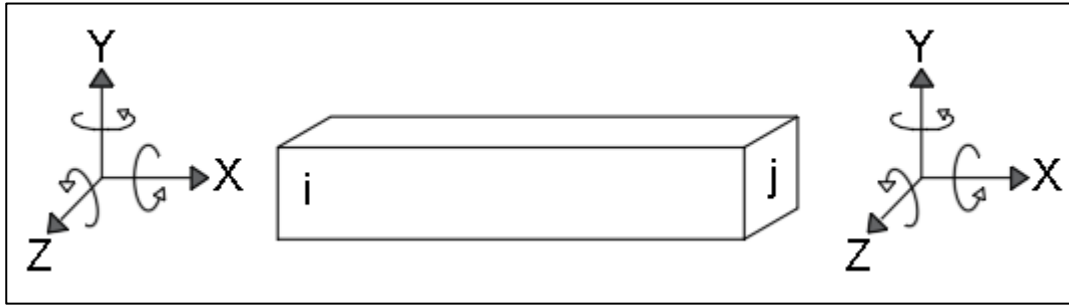
Una barra cualquiera tiene módulo de elasticidad (E), área de sección transversal (A), inercia (I), y longitud (L). Estas propiedades no cambian aun si se dividiera la barra en “n” elementos, la matriz de rigidez de cada partición de la barra sería igual al de la barra original.

Matriz de rigidez

Se define un sistema de coordenadas del elemento barra denominado sistema local de coordenadas, donde el eje X es paralelo al eje longitudinal de la barra. En el extremo izquierdo se encuentra el nudo inicial, denominado nudo *i* y en el extremo derecho se encuentra el nudo final, denominado nudo *j*. El eje Y forma con el eje X un plano principal de flexión. De igual manera, el eje Z forma con X un plano principal de flexión.

Cada nudo tiene tres posibles desplazamientos y tres posibles giros, es decir que la barra tiene 6 grados de libertad por nudo (Padilla Punzo & Rojas Rojas, 2009).

Figura 1: Grados de libertad de una barra.



Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de estos posibles desplazamientos se analiza por separado, se calculan los efectos producidos por un desplazamiento mientras los demás se mantienen nulos. Luego, aplicando el principio de superposición, se suman estos efectos.

Las fuerzas que se aplican en los nudos para generar los desplazamientos y los giros son: fuerza axial, fuerzas cortantes, momentos flectores y momento torsor.

Los desplazamientos lineales o angulares son unitarios, es decir valen uno (1).

A continuación, se analizan los desplazamientos unitarios para el nudo i y se presentan las fuerzas requeridas para producir dichos desplazamientos sin considerar las deformaciones por esfuerzos cortantes.

Donde:

dx : desplazamiento unitario en el eje X.

dy : desplazamiento unitario en el eje Y.

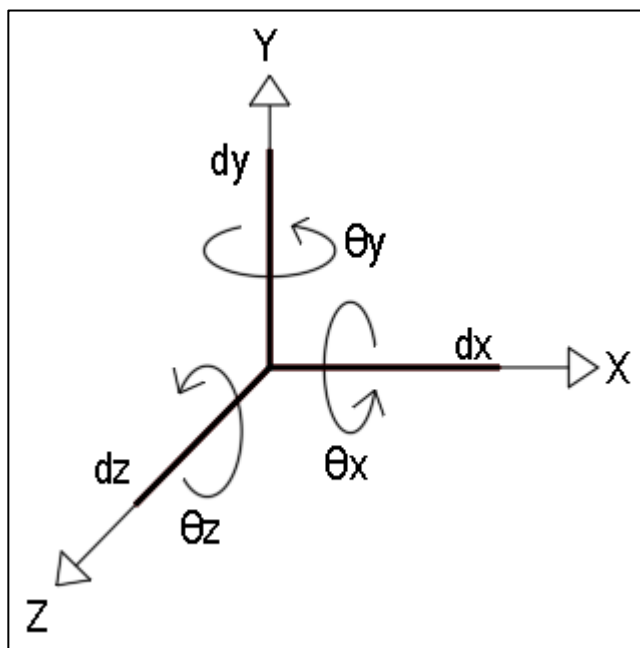
dz : desplazamiento unitario en el eje Z.

θ_x : giro unitario alrededor del eje X.

θ_y : giro unitario alrededor del eje Y.

θ_z : giro unitario alrededor del eje Z.

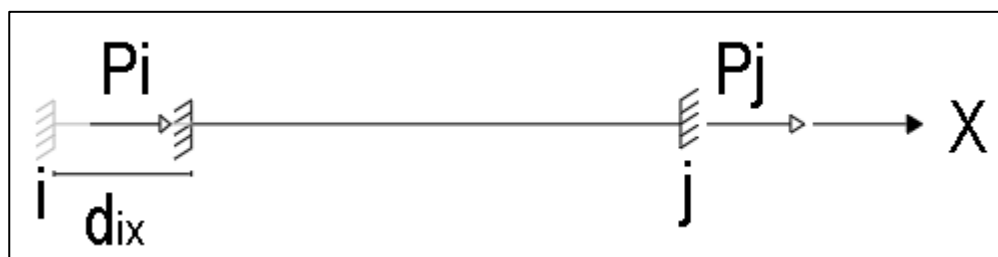
Figura 2: Desplazamientos lineales y angulares unitarios en el nudo.



Fuente: Elaboración propia.

Desplazamiento en dirección X del nudo i

Figura 3: Desplazamiento unitario en dirección X del nudo i.

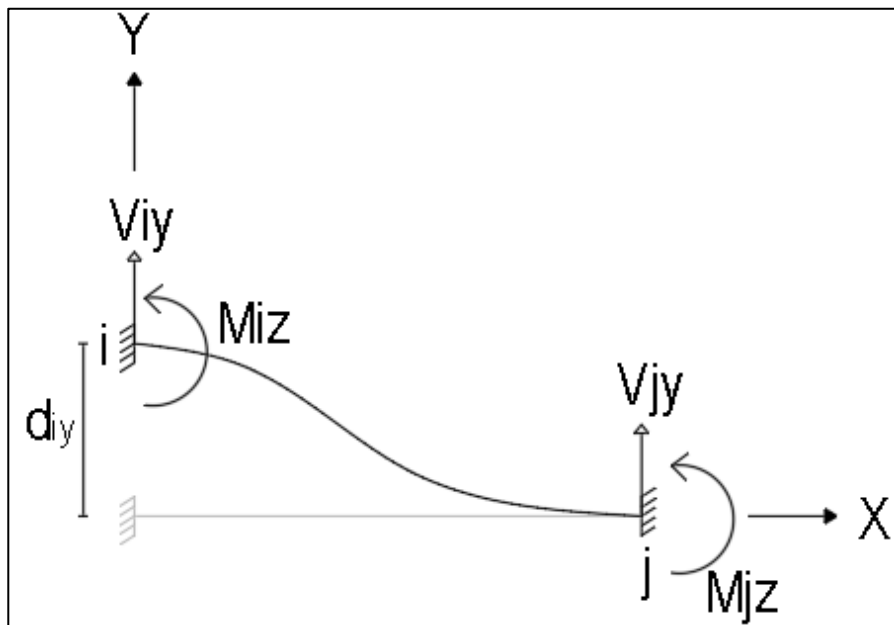


Fuente: Elaboración propia.

$$P_i = \frac{EA}{L} \quad P_j = \frac{-EA}{L}$$

Desplazamiento en dirección Y del nudo i

Figura 4: Desplazamiento unitario en dirección Y del nudo i.



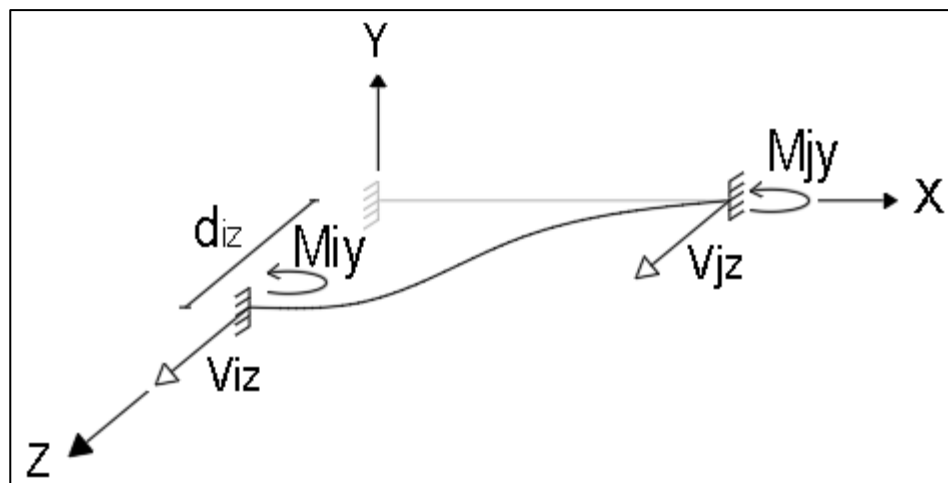
Fuente: Elaboración propia.

$$V_{iy} = \frac{12 E I_z}{L^3} \quad V_{jy} = \frac{-12 E I_z}{L^3}$$

$$M_{iz} = \frac{6 E I_z}{L^2} \quad M_{jz} = \frac{6 E I_z}{L^2}$$

Desplazamiento en dirección Z del nudo i

Figura 5: Desplazamiento unitario en dirección Z del nudo i.



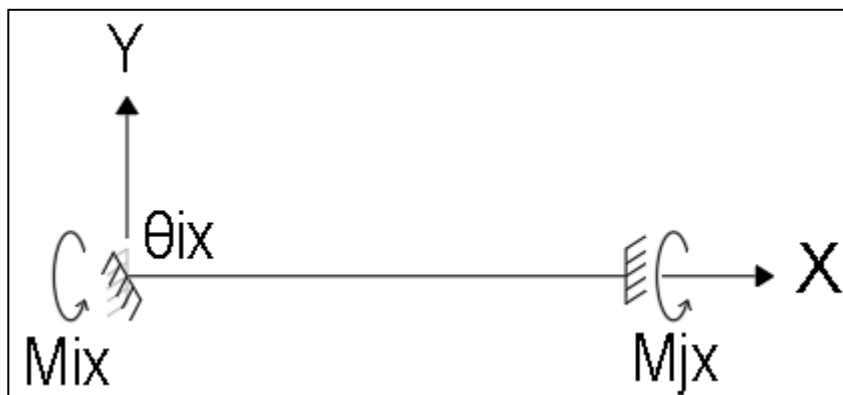
Fuente: Elaboración propia.

$$V_{iz} = \frac{12 E I_y}{L^3} \quad V_{jz} = \frac{-12 E I_y}{L^3}$$

$$M_{iy} = \frac{-6 E I_y}{L^2} \quad M_{jy} = \frac{-6 E I_y}{L^2}$$

Giro alrededor del eje X en el nudo i

Figura 6: Giro unitario alrededor del eje X del nudo i.

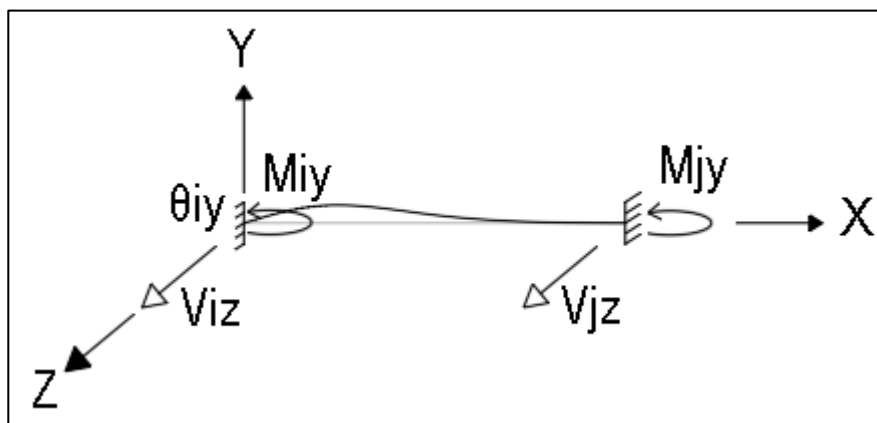


Fuente: Elaboración propia.

$$M_{ix} = \frac{GJ}{L} \quad M_{jx} = \frac{-GJ}{L}$$

Giro alrededor del eje Y en el nudo i

Figura 7: Giro unitario alrededor del eje Y del nudo i.



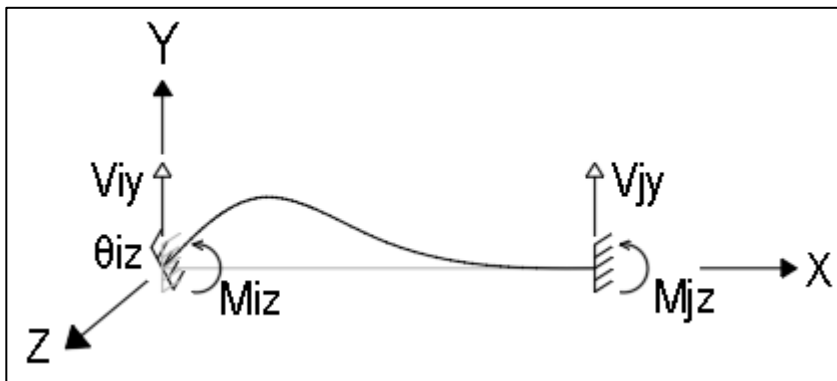
Fuente: Elaboración propia.

$$V_{iz} = \frac{-6 E I_y}{L^2} \quad V_{jz} = \frac{6 E I_y}{L^2}$$

$$M_{iy} = \frac{4 E I_y}{L} \quad M_{jy} = \frac{2 E I_y}{L}$$

Giro alrededor del eje Z del nudo i

Figura 8: Giro alrededor del eje Z del nudo i.



Fuente: Elaboración propia.

$$V_{iy} = \frac{6 E I_z}{L^2} \quad V_{jy} = \frac{-6 E I_z}{L^2}$$

$$M_{iz} = \frac{4 E I_z}{L} \quad M_{jz} = \frac{2 E I_z}{L}$$

Para el nudo j se realiza los mismos desplazamientos unitarios y se determina las fuerzas requeridas para lograrlos.

Matriz de rigidez en coordenadas locales

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_{iy} \\ V_{iz} \\ M_{ix} \\ M_{iy} \\ M_{iz} \\ P_j \\ V_{jy} \\ V_{jz} \\ M_{jx} \\ M_{jy} \\ M_{jz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ix} \\ d_{iy} \\ d_{iz} \\ \theta_{ix} \\ \theta_{iy} \\ \theta_{iz} \\ d_{jx} \\ d_{jy} \\ d_{jz} \\ \theta_{jx} \\ \theta_{jy} \\ \theta_{jz} \end{bmatrix}$$

Se puede despreciar:

- La fuerza axial y el desplazamiento axial porque la correa no está sometida a fuerza axial.
- El momento alrededor del eje Y y el giro alrededor del eje Y; porque de acuerdo al modelo plano de la correa no hay posibilidad de giro alrededor del eje en cuestión.
- La fuerza cortante en dirección Z y el desplazamiento en dirección Z; porque el análisis se realiza en el plano XY, y para evaluar el elemento alrededor del eje débil se rota el perfil y se evalúa en este mismo plano.
- El momento torsor. Sin embargo, la torsión existe porque debido a la inclinación de la cubierta una de las componentes de carga no pasa por el centro de corte. En el programa “AIRO correas” los efectos secundarios de la torsión se tienen en cuenta evaluando el pandeo lateral torsional.

La matriz elemental de rigidez simplificada en coordenadas locales y sin considerar deformaciones por cortante, es:

$$\begin{bmatrix} V_{iy} \\ M_{iz} \\ V_{jy} \\ M_{jz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{-12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} & \frac{-6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\ \frac{-12EI_z}{L^3} & \frac{-6EI_z}{L^2} & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{-6EI_z}{L^2} \\ \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} & \frac{-6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{iy} \\ \theta_{iz} \\ d_{jy} \\ \theta_{jz} \end{bmatrix}$$

Este sistema se puede resumir en la siguiente ecuación

$$F_L = K_L \cdot d_L$$

F_L : vector de fuerzas locales.

K_L : matriz elemental en coordenadas locales.

d_L : vector de desplazamientos locales.

En conclusión, esta matriz de rigidez tiene las siguientes condiciones:

- Se desprecia la rigidez de los nudos.
- Se desprecia el efecto de las deformaciones causadas por las fuerzas cortantes.
- La barra no se pandea por efecto de carga axial.
- Se desprecia la torsión

Matriz de rigidez en coordenadas globales

La matriz de rigidez en coordenadas locales es idéntica a la matriz de rigidez en coordenadas globales por cuanto la barra no tiene inclinación respecto al eje X (eje longitudinal), porque se estaría generando una componente de fuerza axial, lo que implica que el comportamiento del elemento correspondería al de la viga-columna (elemento sometido a flexocompresión o flexotensión, según sea el caso).

Fuerzas totales

El vector de fuerzas totales se compone de dos tipos de fuerzas, las fuerzas internas o momentos internos de grados de libertad libre y las fuerzas internas o momentos internos de grados de libertad restringidos. De igual forma el vector de desplazamientos totales se compone de desplazamientos o giros de grados de libertad restringidos y desplazamientos o giros de grados de libertad libres (Rochel Awad, 1993).

$$FT_G = KeT_G * dT_G$$

FT_G : vector de cargas en los nudos.

keT_G : matriz de rigidez total en coordenadas globales.

dT_G : vector de desplazamientos

$$\begin{bmatrix} FL \\ FR \end{bmatrix} = KeT_G * \begin{bmatrix} dL \\ dR \end{bmatrix}$$

FL: fuerzas internas o momentos internos de grados de libertad libres.

FR: fuerzas internas o momentos internos de grados de libertad restringidos.

dL: desplazamientos o giros de grados de libertad libres.

dR: desplazamientos o giros de grados de libertad restringidos.

Reordenamiento de la matriz de rigidez en coordenadas globales

Para determinar las fuerzas internas o momentos internos de grados de libertad restringidos, conviene reorganizar la matriz de rigidez en coordenadas globales.

$$\begin{bmatrix} Miz \\ Mjz \\ Viy \\ Vjy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4EI_z}{L} & \frac{2EI_z}{L} & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{-6EI_z}{L^2} \\ \frac{2EI_z}{L} & \frac{4EI_z}{L} & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{-6EI_z}{L^2} \\ \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{-12EI_z}{L^3} \\ \frac{-6EI_z}{L^2} & \frac{-6EI_z}{L^2} & \frac{-12EI_z}{L^3} & \frac{12EI_z}{L^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta iz \\ \theta jz \\ diy \\ djy \end{bmatrix}$$

$$kLLR = \begin{bmatrix} \frac{4EI_z}{L} & \frac{2EI_z}{L} \\ \frac{2EI_z}{L} & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

$$kTLR = \begin{bmatrix} \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{-6EI_z}{L^2} \\ \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{-6EI_z}{L^2} \end{bmatrix}$$

$$kTRL = \begin{bmatrix} \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{-6EI_z}{L^2} & \frac{-6EI_z}{L^2} \end{bmatrix}$$

$$kTRR = \begin{bmatrix} \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{-12EI_z}{L^3} \\ \frac{-12EI_z}{L^3} & \frac{12EI_z}{L^3} \end{bmatrix}$$

kLLR: fuerzas libres y desplazamientos libres.

kTLR: fuerzas libres y desplazamientos restringidos.

kTRL: fuerzas restringidas y desplazamientos libres.

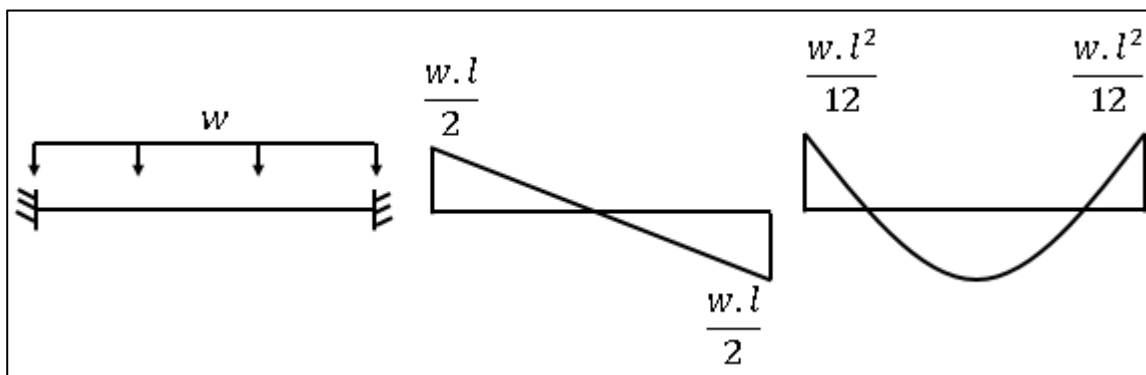
kTRR: fuerzas restringidas y desplazamientos restringidos.

$$\begin{bmatrix} FL \\ FR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kLLR & kTLR \\ kTRL & kTRR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dL \\ dR \end{bmatrix}$$

Fuerzas equivalentes

Se asume una barra empotrada en sus extremos con una carga uniformemente distribuida

Figura 9: Barra empotrada en sus extremos con carga uniforme.

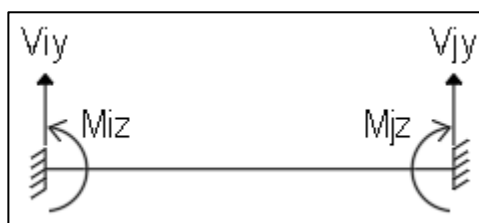


Fuente: Elaboración propia.

Se calculan las fuerzas equivalentes para cada una de las barras (cortante y momento).

Vector de fuerzas VF

Figura 10: Grados de libertad restringidos de la viga biempotrada.



Fuente: Elaboración propia.

Cada barra tiene dos nudos y cada nudo 2 grados de libertad, por tanto, el vector de fuerzas tendrá un tamaño de NGLT.

Fuerzas de grados de libertad libres, FL

En el vector de fuerzas VF se encuentran las fuerzas de grados de libertad restringidos y también las fuerzas de grados de libertad libres. Para construir el vector FL, se debe extraer de VF las fuerzas que corresponden a los grados de libertad libres.

Desplazamientos de grados de libertad libres, dL

Para determinar estos desplazamientos se aplica la siguiente ecuación

$$FL = kLLR * dL + kTLR * dR$$

Pero los desplazamientos en los grados de libertad restringidos son cero, por tanto, dR es igual a cero.

$$FL = kLLR * dL$$

Al despejar a dL se tiene:

$$dL = kLLR^{-1} * FL$$

Fuerzas internas o momentos internos de grados de libertad restringidos

$$FR = kTRL * dL$$

Fuerzas cortantes y momentos en los nudos

Para determinar las fuerzas internas, se realiza un análisis cuyo objetivo es determinar las cargas que, aplicadas sobre los nudos, producen los mismos desplazamientos que la carga distribuida. El equilibrio de la barra se plantea mediante dos vectores de carga. El primero contiene las cargas en los nudos y el segundo las cargas equivalentes que produzcan los mismos desplazamientos que la carga distribuida.

Por el principio de superposición puede sumarse:

- La carga real aplicada sobre la barra, las cargas aplicadas en los nudos necesarias para evitar que estos giren o se desplacen y las cargas de igual magnitud, pero de signo opuesto a las dos anteriores.
- Este sistema es estáticamente equivalente al sistema real, porque las cargas aplicadas en los nudos para evitar desplazamientos, se cancelan. Por otro lado, la suma de los desplazamientos es igual a los desplazamientos del sistema real (Rochel Awad, 1993).

Entonces, las fuerzas en los nudos se determinan mediante la siguiente expresión:

$$P = FN - FE$$

P: fuerzas internas.

FN: fuerzas aplicadas en los nudos.

FE: fuerzas equivalentes.

Constante torsional de St. Venant

La constante torsional mide la resistencia del elemento sometido a torsión pura o uniforme (AISI, Manual Cold-Formed Steel Design, Institute American Iron and Steel, 2003).

Secciones abiertas

$$J = \frac{t^3}{3} [h + 2(w + u) + 2 \alpha (p + u)]$$

$$h = D - (2r + t)$$

$$w = B - \left(r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \right)$$

$$p = \alpha \left(C - \left(r + \frac{t}{2} \right) \right)$$

$$r = R + \frac{t}{2}$$

$$u = \frac{\pi \cdot r}{2}$$

Secciones tipo C: $\alpha = 0$

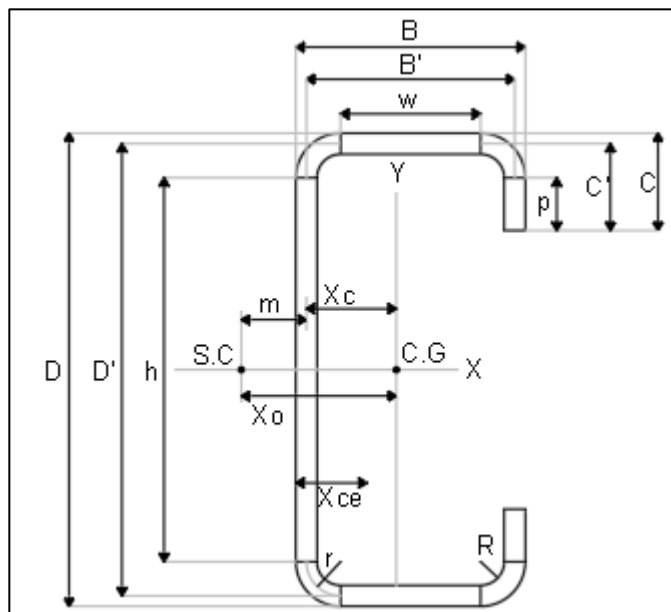
Secciones tipo G: $\alpha = 1$

t: espesor del perfil. (mm, in)

r: radio de giro medido a la línea central del espesor del perfil. (mm, in)

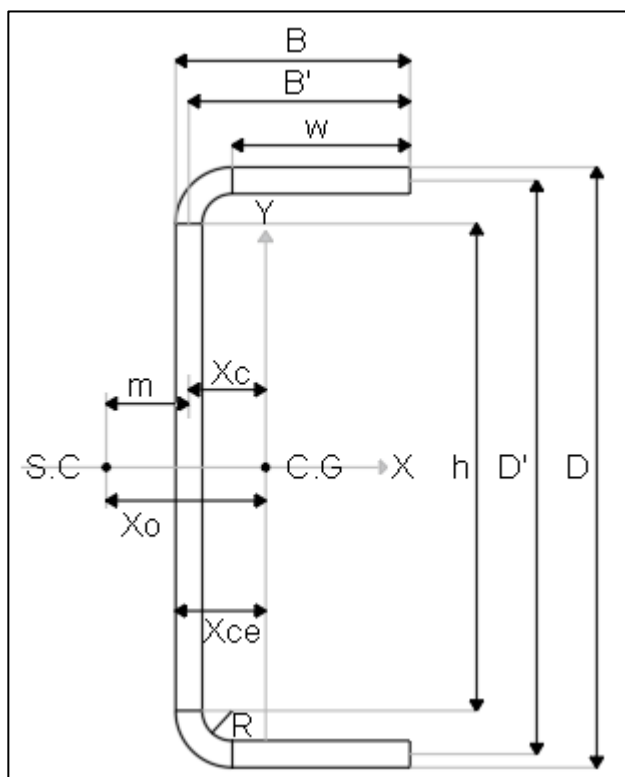
u: longitud de arco de las esquinas del perfil. (mm, in)

Figura 11: Esquema del perfil conformado en frío tipo G para el cálculo de la constante torsional.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12: Esquema del perfil conformado en frío tipo C para el cálculo de la constante torsional.



Fuente: Elaboración propia.

Secciones tipo cajón

$$J = \frac{2(D' \cdot B'_T)^2}{\frac{D'}{t_1} + \frac{B'_T}{t_2}}$$

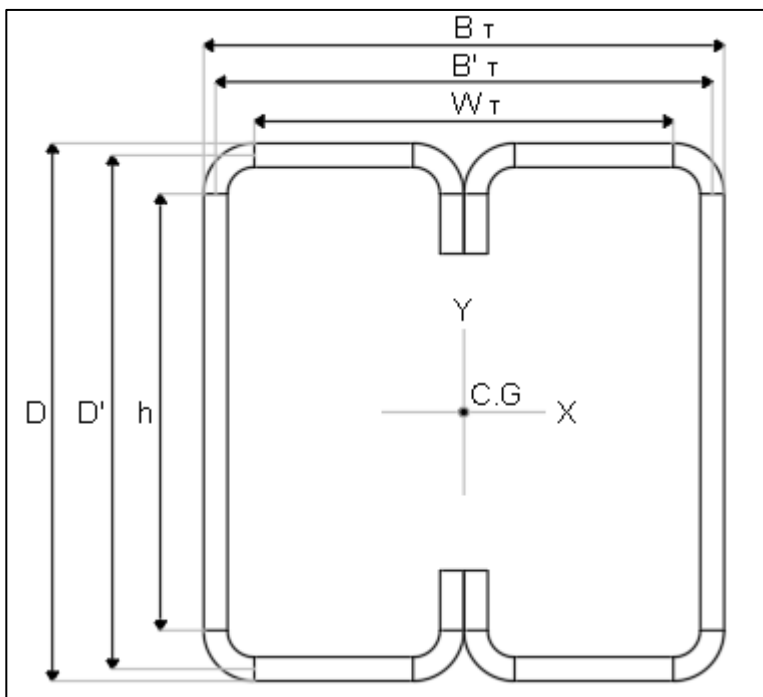
$$D' = D - t$$

$$B'_T = B_T - t$$

t_1 : espesor del patín. (mm, in)

t_2 : espesor del alma. (mm, in)

Figura 13: Esquema del perfil conformado en frío tipo doble G para el cálculo de la constante torsional.



Fuente: Elaboración propia.

Constante de torsión o alabeo, C_w

La constante de alabeo mide la resistencia del perfil sometido a torsión no uniforme (AISI, Manual Cold-Formed Steel Design, Institute American Iron and Steel, 2003).

Secciones abiertas

$$C_w = \frac{D'^2 B'^2 t}{12} \left[\frac{2 D'^3 B' + 3 D'^2 B'^2 + \alpha \left(\frac{48C'^4 + 112B'C'^3 + 8D'C'^3 + 48D'B'C'^2 +}{12D'^2C'^2 + 12D'^2B'C' + 6D'^3C'} \right)}{6 D'^2 B' + (D' + 2 \alpha C')^3 - \alpha 24 D' C'^2} \right]$$

Secciones tipo C: $\alpha = 0$

Secciones tipo G: $\alpha = 1$

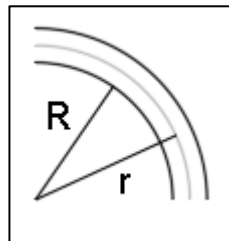
Secciones cerradas tipo cajón

Estas secciones tienen una mayor resistencia a la torsión, por ello se desprecia la constante torsional C_w .

Propiedades de líneas curvas

Las propiedades de las líneas curvas fueron tomadas del manual de la AISI (Cold-Formed Steel Design Manual).

Figura 14: Línea curva.

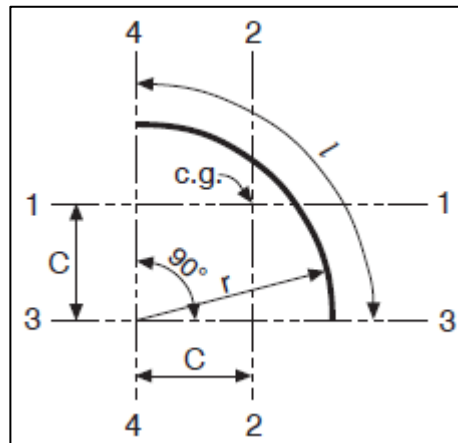


Fuente: Elaboración propia.

$$r = R + t/2$$

t: espesor del elemento o lámina usada para formar la sección transversal de los perfiles conformados en frío. (mm, in)

R: radio de doblez interno. (mm, in)

Caso 1**Figura 15:** Curva a 90 °.

Fuente: AISI manual cold-formed steel design, 2002.

$$u = l = \frac{\pi \cdot r}{2}$$

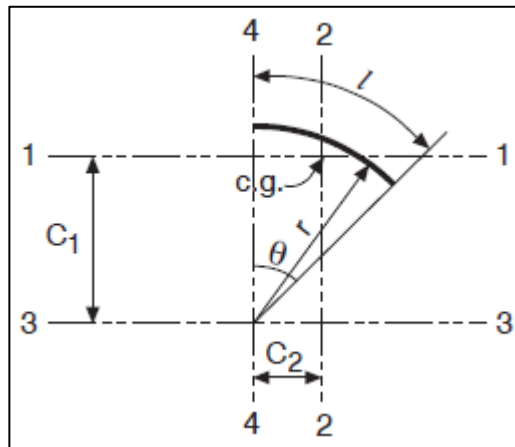
$$c = 0.637 r$$

$$I_1 = I_2 = 0.149 \cdot r^3$$

u: longitud de la línea curva. (mm, in)

c: distancia desde el origen del radio hasta el centro de gravedad. (mm, in)

I_1, I_2 : Inercia de la línea curva alrededor del eje 1 y 2 respectivamente. (mm^3, in^3)

Caso 2**Figura 16:** Curva con un ángulo menor a 90 °.

Fuente: AISI manual cold-formed steel design, 2002.

$$u = l = \theta \cdot r$$

$$c_1 = \frac{r \cdot \sin \theta}{\theta}$$

$$c_2 = \frac{r(1 - \cos \theta)}{\theta}$$

$$I_1 = \left[\frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta}{2} - \frac{\sin^2 \theta}{\theta} \right] r^3$$

$$I_2 = \left[\frac{\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta}{2} - \frac{(1 - \cos \theta)^2}{\theta} \right] r^3$$

u: longitud de la línea curva. (mm, in)

C₁ y C₂: distancias desde el origen del radio hasta el centro de gravedad. (mm, in)

I₁, I₂: Inercia de la línea curva alrededor del eje 1 y 2 respectivamente. (mm³, in³)

Inercia de líneas rectas

Las propiedades de las líneas rectas fueron tomadas del manual de la AISI (Cold-Formed Steel Design Manual).

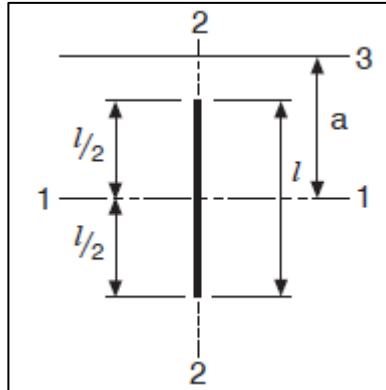
I₁: inercia alrededor del eje 1. (mm³, in³)

I_2 : inercia alrededor del eje 2. (mm^3 , in^3)

I_3 : inercia alrededor del eje 3. (mm^3 , in^3)

Caso 1. Vertical

Figura 17: Inercia de una línea recta vertical.

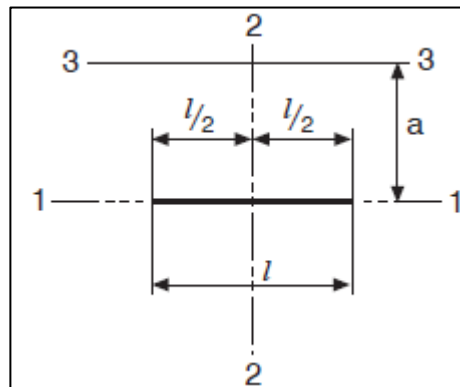


Fuente: AISI manual cold-formed steel design, 2002.

$$I_1 = \frac{l^3}{12} \quad I_2 = 0 \quad I_3 = l \cdot a^2 + \frac{l^3}{12}$$

Caso 2. Horizontal

Figura 18: Inercia de una línea recta horizontal.

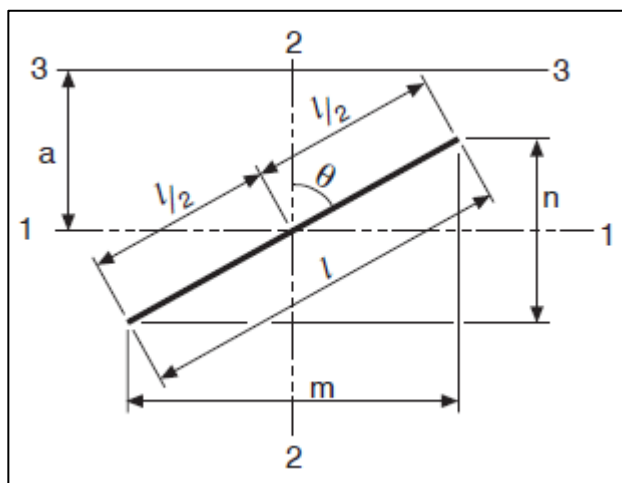


Fuente: AISI manual cold-formed steel design, 2002.

$$I_1 = 0 \quad I_2 = \frac{l^3}{12} \quad I_3 = l \cdot a^2$$

Caso 3. Línea inclinada

Figura 19: Inercia de una línea recta inclinada.



Fuente: AISI manual cold-formed steel design, 2002.

$$I_1 = \left[\frac{\cos^2 \theta}{12} \right] l^3 \quad I_2 = \left[\frac{\sin^2 \theta}{12} \right] l^3 \quad I_3 = l \cdot a^2 + \frac{l \cdot n^2}{12}$$

Factor de modificación para pandeo lateral torsional

Las ecuaciones para determinar el factor de modificación, C_b fueron tomadas de la NSR10.

$$C_b = \frac{12.5 M_{\max}}{2.5 M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3$$

M_{\max} : valor absoluto del momento máximo en el segmento comprendido entre puntos arriostrados.

M_A : valor absoluto del momento a un cuarto de la longitud del segmento comprendido entre puntos arriostrados.

M_B : valor absoluto del momento en el punto medio del segmento comprendido entre puntos arriostrados.

M_C : valor absoluto del momento a los tres cuartos de la longitud del segmento comprendido entre puntos arriostrados.

Se permite suponer $C_b=1$ de forma conservadora. En voladizos con el extremo libre sin arriostrar $C_b=1$.

Resistencia a flexión de perfiles conformados en frío

Nota: La teoría relacionada a la resistencia de los perfiles conformados en frío que se presenta a continuación fue tomada de la norma NSR10 y la AISI S100-07.

Límites y consideraciones dimensionales

Para los perfiles conformados en frío existen relaciones máximas entre la longitud de un elemento y su espesor.

Relación máxima ancho plano – espesor del patín: la máxima relación admisible w/t sin considerar rigidizadores intermedios, donde t es el espesor real del elemento y w representa el ancho plano, debe ser:

1. Elemento a compresión rigidizado con un borde longitudinal conectado al alma o a un patín y el otro borde longitudinal conectado a una pestaña sencilla $w/t \leq 60$.
2. Elemento a compresión rigidizado con ambos bordes longitudinales conectados a otros elementos rigidizados $w/t \leq 500$.
3. Elemento a compresión no rigidizado $w/t \leq 60$.

Relación altura – espesor del alma: la relación h/t debe ser:

1. Almas no reforzadas: $h/t \leq 200$.
2. Almas con rigidizadores de apoyo solamente: $h/t \leq 260$.
3. Almas con rigidizadores de apoyo y rigidizadores intermedios: $h/t \leq 300$.

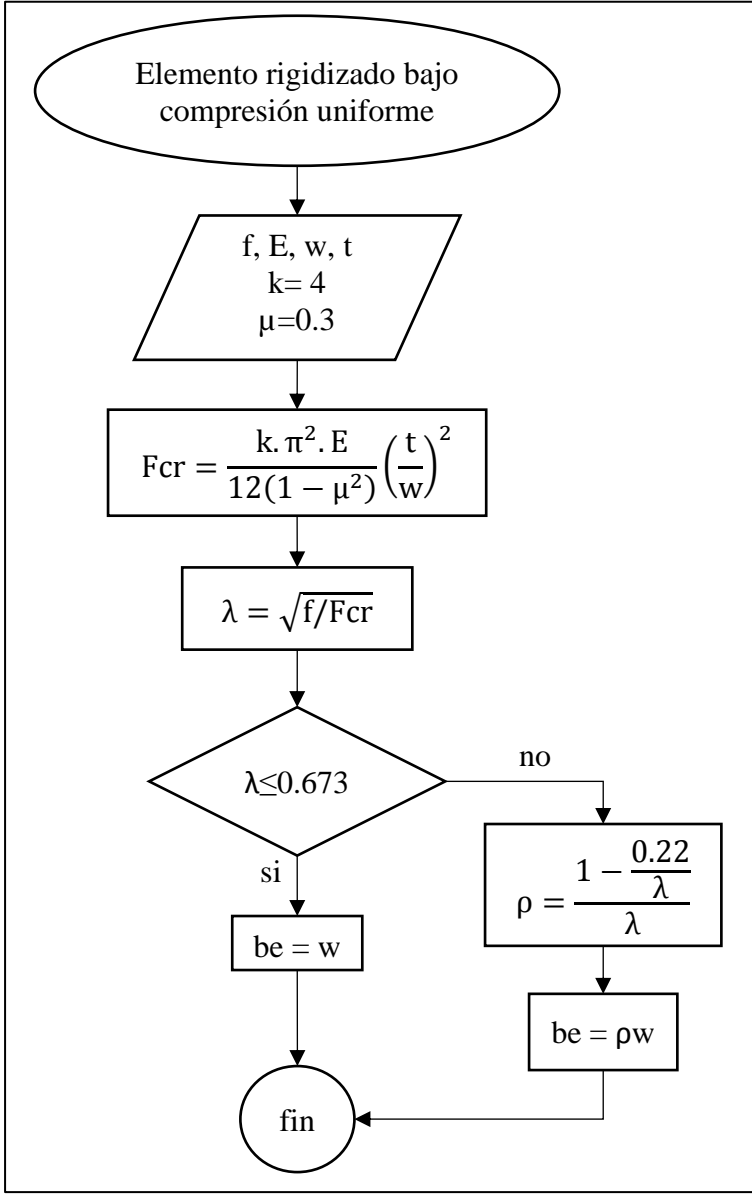
Anchos efectivos

El ancho efectivo de un elemento, corresponde a la porción del elemento que realmente aporta resistencia a la compresión debido a la flexión.

El método de los anchos efectivos propuesto por Winter consiste en despreciar el aporte de la porción del elemento que se pandea y considerar solamente aquella que se mantiene estable ante la compresión. Se determina el ancho efectivo para cada uno de los elementos sometidos a compresión que conforman la sección transversal del perfil. Esto se realiza en función del tipo de rigidizador lateral, la distribución de esfuerzos en el elemento y el tipo de diseño (por resistencia o por deformación). La resistencia del perfil se determina con la sección transversal efectiva. Es

decir, que los anchos de los elementos a compresión corresponden a los anchos efectivos calculados. Debido a esto, la posición del eje neutro cambia y la nueva posición se debe determinar mediante un proceso iterativo. AIRO correas realiza el proceso iterativo hasta obtener una diferencia del 2% entre la posición del eje neutro anterior y el actual (Naspud Uruchima, 2021).

Figura 20: Ancho efectivo de un elemento rigidizado bajo compresión uniforme.



Fuente: Elaboración propia.

be: ancho efectivo del elemento objeto de estudio. (mm, in)

w: ancho plano del elemento objeto de estudio. (mm, in)

ρ : factor de reducción local.

λ : factor de esbeltez.

k : coeficiente de pandeo de placa.

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

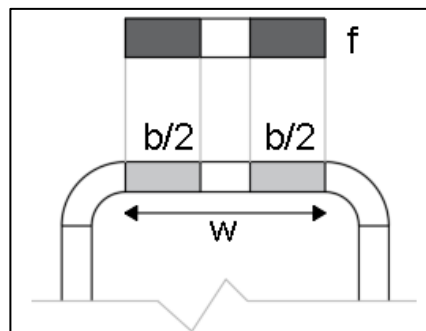
t : espesor del elemento rigidizado bajo compresión uniforme. (mm, in)

μ : relación de Poisson del acero.

f : esfuerzo de compresión en el elemento, calculado como:

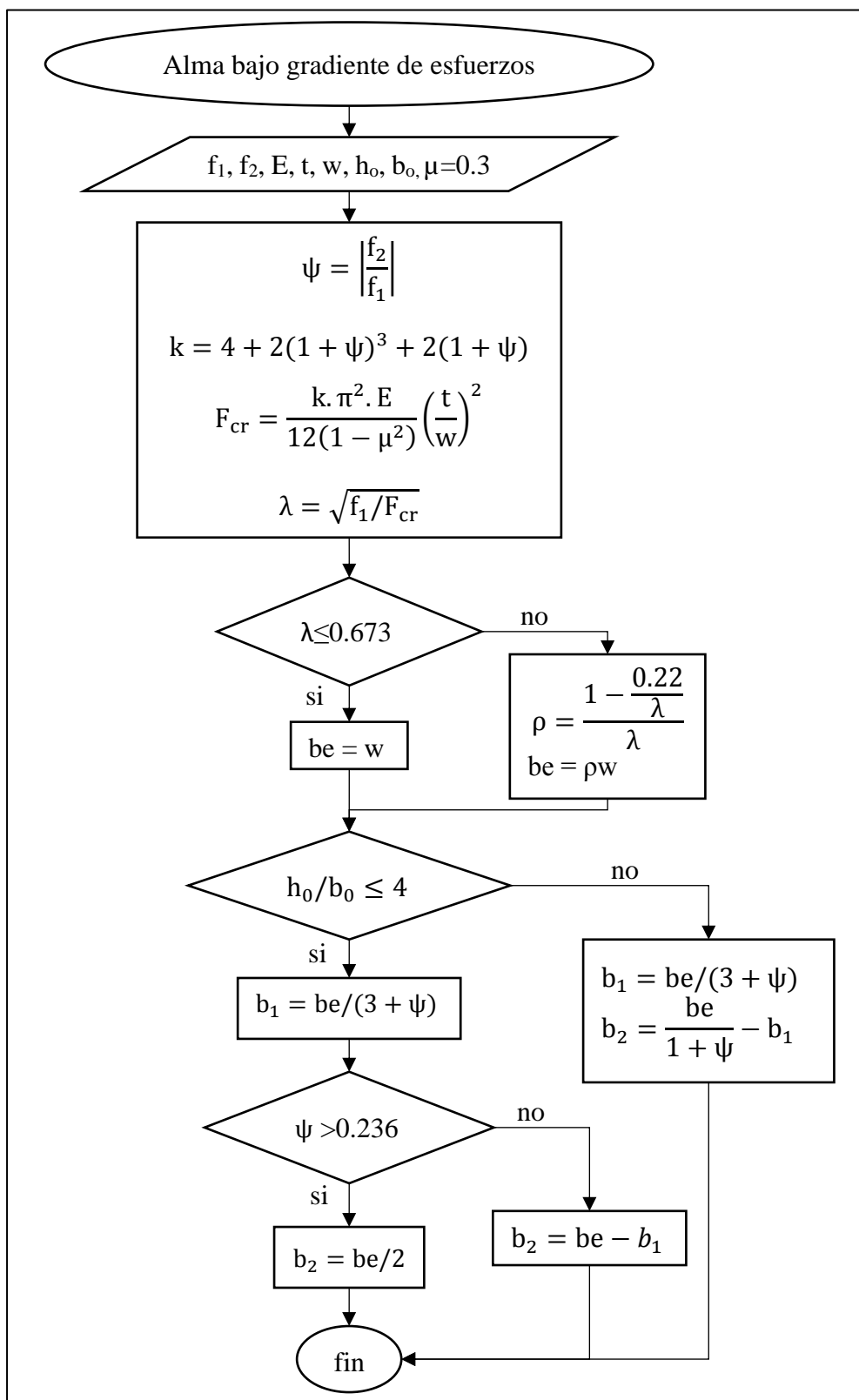
- Para el procedimiento 1, Iniciación de la fluencia:
 - ✓ Cuando la fluencia inicial es en compresión en el elemento en consideración, $f = F_y$.
 - ✓ Cuando la fluencia inicial es en tensión, f debe ser determinado con base en la sección efectiva para el momento M_y (momento que causa la fluencia inicial)
- Para determinar la resistencia al pandeo lateral torsional de miembros de secciones abiertas: f es el esfuerzo F_c .

Figura 21: Elemento rigidizado bajo compresión uniforme.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22: Ancho efectivo de alma bajo gradiente de esfuerzos.



Fuente: Elaboración propia.

ρ : factor de reducción local.

k : coeficiente de pandeo de placa.

f_1 : esfuerzo en compresión. (MPa)

f_2 : esfuerzo en tensión. (MPa)

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

t : espesor del alma. (mm, in)

w : ancho plano del alma. (mm, in)

h_o : altura del alma medida entre bordes exteriores. (mm, in)

b_o : ancho del patín en compresión entre bordes externos. (mm, in)

μ : relación de Poisson del acero.

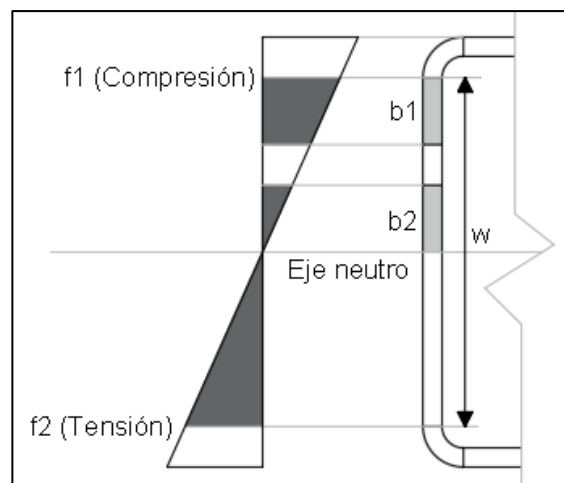
λ : factor de esbeltez.

b_e : ancho efectivo del alma. (mm, in)

b_1 : ancho efectivo 1. (mm, in)

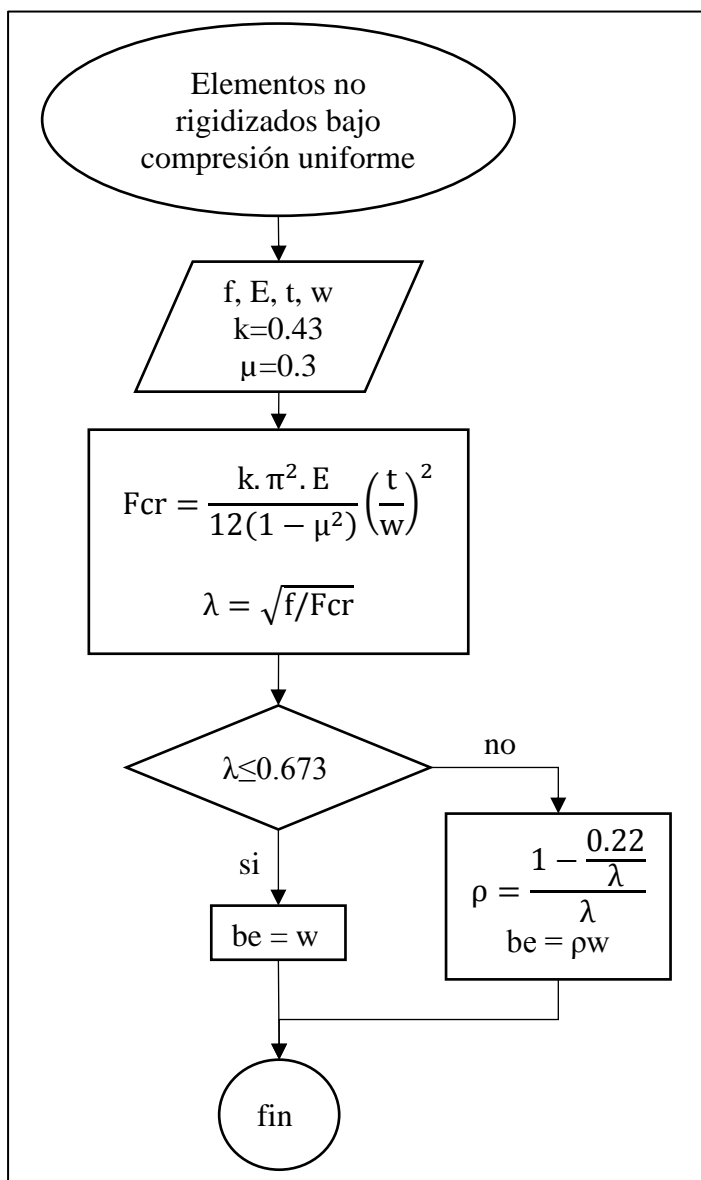
b_2 : ancho efectivo 2. (mm, in)

Figura 23: Alma bajo gradiente de esfuerzos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Ancho efectivo de un elemento no rigidizado bajo compresión uniforme.



Fuente: Elaboración propia.

ρ : factor de reducción local.

k : coeficiente de pandeo de placa.

f : esfuerzo en compresión. (MPa)

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

t : espesor del elemento no rigidizado. (mm, in)

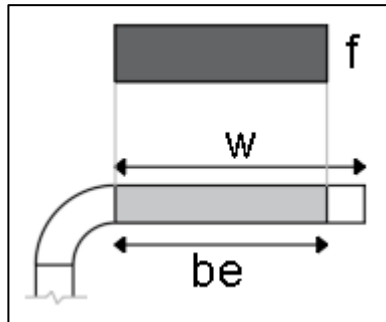
w : ancho plano del elemento no rigidizado. (mm, in)

μ : relación de Poisson del acero.

λ : factor de esbeltez.

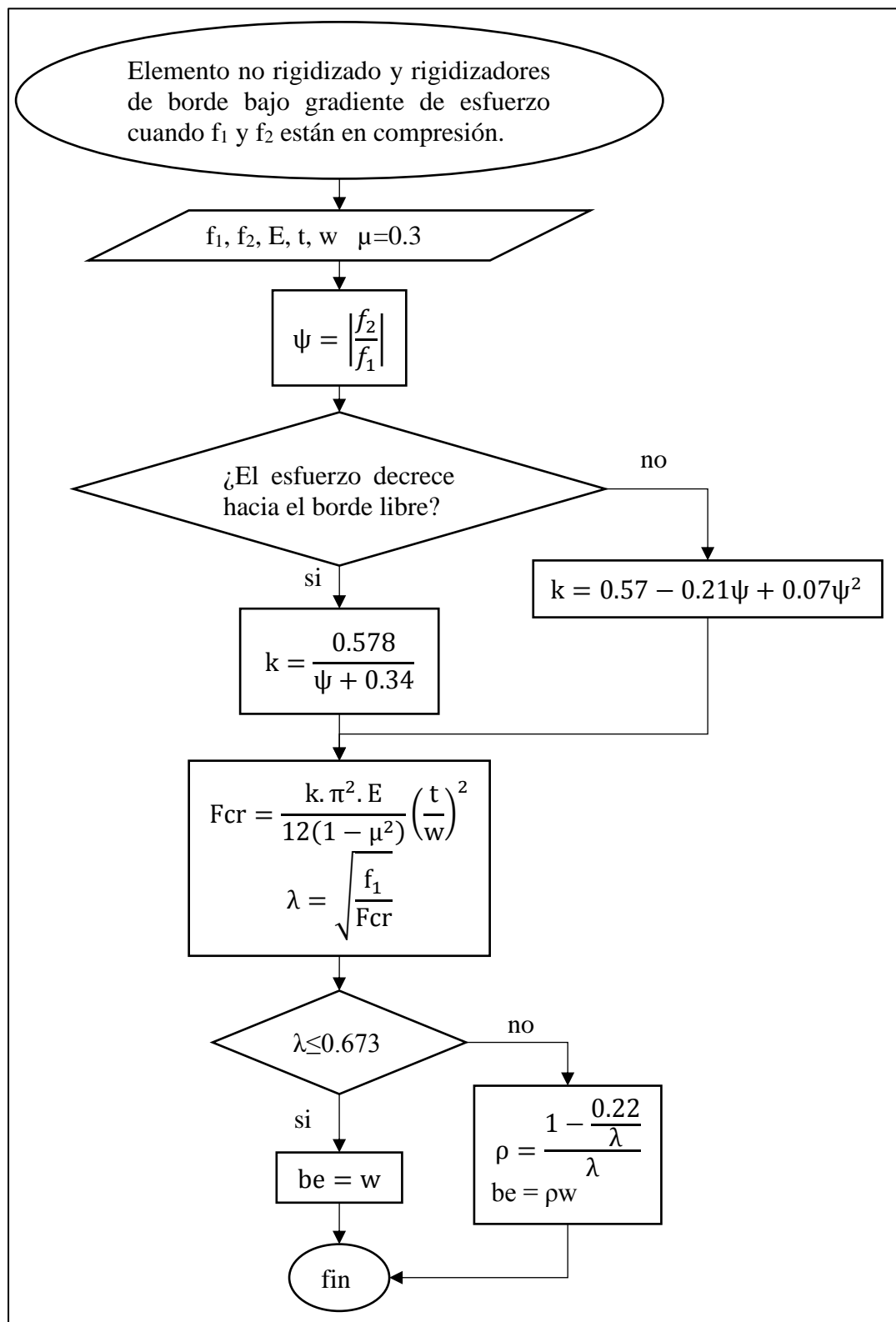
b_e : ancho efectivo del elemento no rigidizado. (mm, in)

Figura 25: Elemento no rigidizado bajo compresión uniforme



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Ancho efectivo de un elemento no rigidizado y rigidizadores de borde bajo gradiente de esfuerzo cuando f_1 y f_2 están en compresión.



Fuente: Elaboración propia.

f_1 y f_2 : esfuerzos en compresión. (MPa)

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

t : espesor del elemento. (mm, in)

w : ancho plano del elemento. (mm, in)

μ : relación de Poisson del acero.

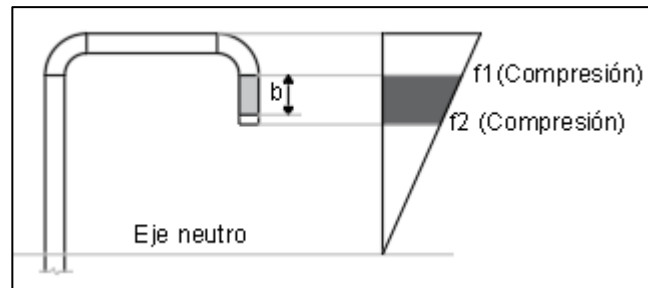
λ : factor de esbeltez.

b_e : ancho efectivo del elemento. (mm, in)

ρ : factor de reducción local.

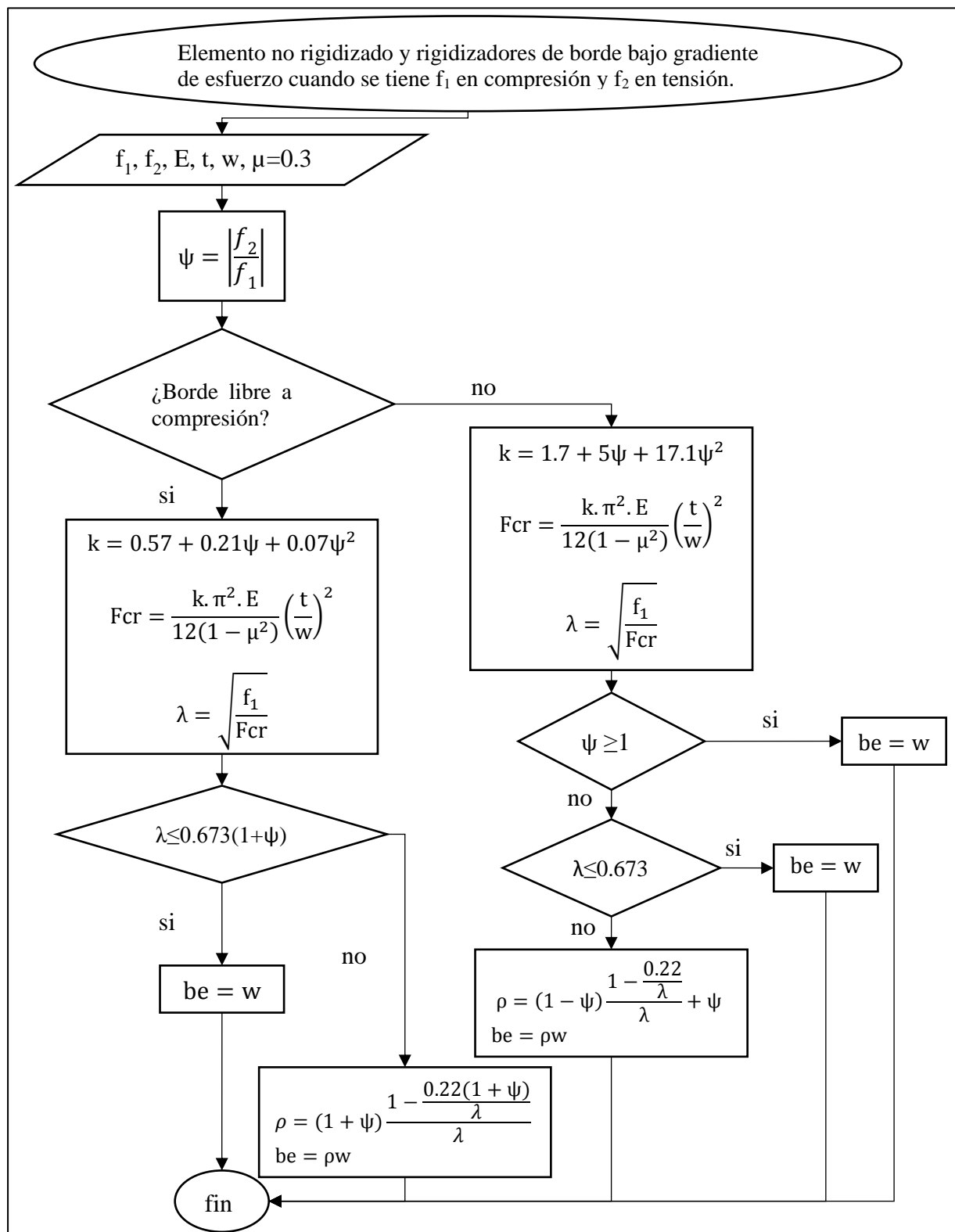
k : coeficiente de pandeo de placa.

Figura 27: Elemento no rigidizado o rigidizador de borde bajo gradiente de esfuerzos con f_1 y f_2 en compresión.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28: Ancho efectivo para elemento no rigidizado y rigidizadores de borde bajo gradiente de esfuerzo con f_1 en compresión y f_2 en tensión.



Fuente: Elaboración propia.

f_1 : esfuerzo en compresión. (MPa)

f_2 : esfuerzo en tensión. (MPa)

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

t : espesor del elemento. (mm, in)

w : ancho plano del elemento. (mm, in)

μ : relación de Poisson del acero.

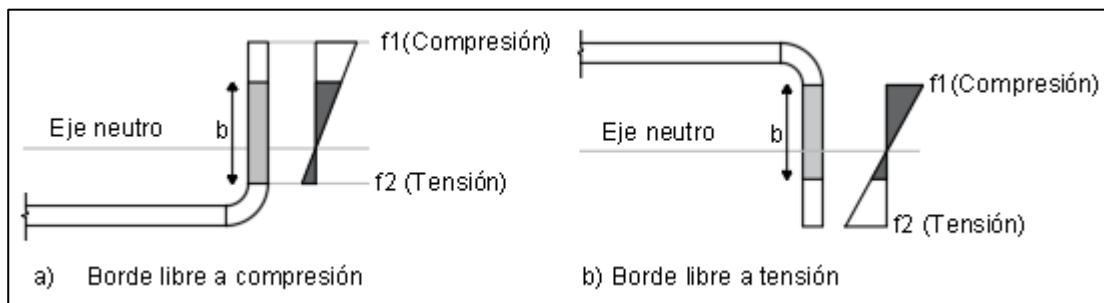
λ : factor de esbeltez.

b_e : ancho efectivo del elemento. (mm, in)

ρ : factor de reducción local.

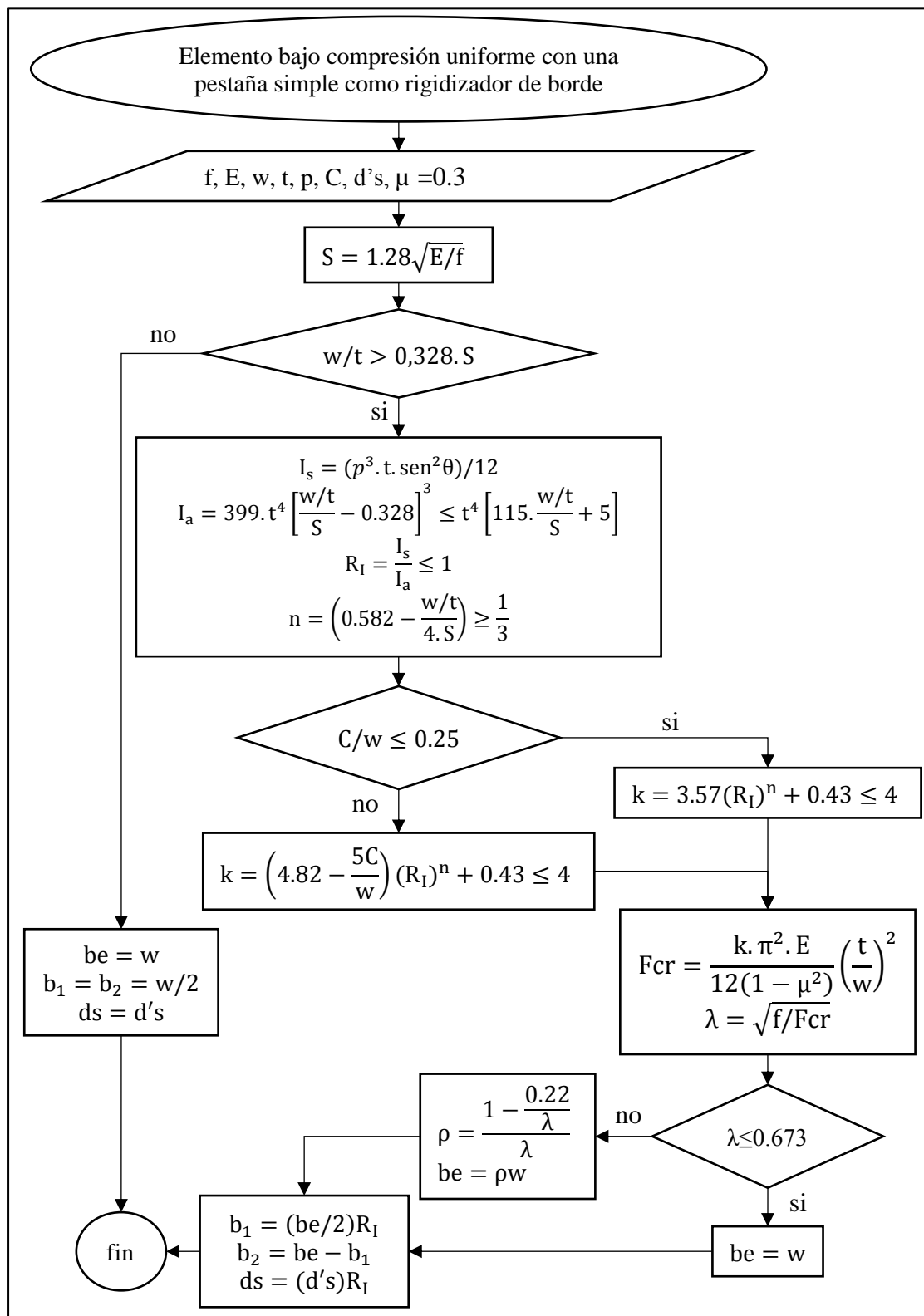
k : coeficiente de pandeo de placa.

Figura 29: Elemento no rigidizado y rigidizadores de borde bajo gradiente de esfuerzo con f_1 en compresión y f_2 en tensión.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30: Ancho efectivo para elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.



Fuente: Elaboración propia.

f : esfuerzo en compresión del elemento. (MPa)

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

t : espesor del elemento. (mm, in)

w : ancho plano del elemento. (mm, in)

μ : relación de Poisson del acero.

λ : factor de esbeltez.

k : coeficiente de pandeo de placa.

ρ : factor de reducción local.

d_s : ancho efectivo reducido del rigidizador. (mm, in)

$d's$: ancho efectivo del rigidizador. (mm, in)

I_a : momento de inercia adecuado del rigidizador de tal forma que cada elemento componente se comporte como un elemento rigidizado. (mm^4 , in^4)

I_s : momento de inercia de la sección completa del rigidizador alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser rigidizado. Para rigidizadores de borde, la esquina redondeada entre el rigidizador y el elemento a ser rigidizado no será considerada como parte del rigidizador. (mm^4 , in^4)

b_e : ancho efectivo del elemento. (mm, in)

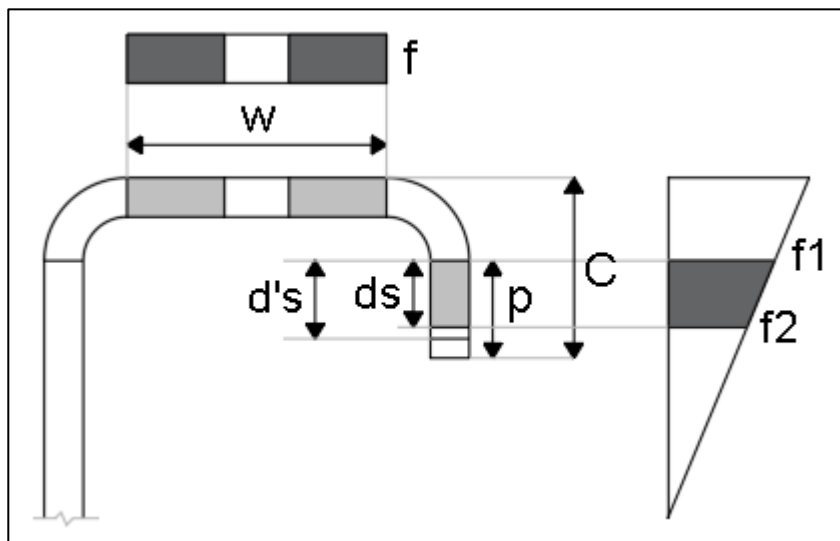
b_1 y b_2 : porciones del ancho efectivo de diseño. (mm, in)

C : dimensión real entre bordes externos de la pestaña. (mm, in)

p : es el ancho plano real de la pestaña. (mm, in)

θ : ángulo de doblez del rigidizador respecto al elemento rigidizado. ($^\circ$)

Figura 31: Elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.



Fuente: Elaboración propia.

Rigidizador

Se considera como borde rígido aquel que tiene suficiente rigidez a la flexión, tal que la resistencia última del patín, sea la resistencia del mismo patín pero rigidizado por almas en ambos bordes longitudinales. Un elemento en compresión está parcialmente rigidizado, si la rigidez a la flexión del rigidizador es insuficiente para permitir que el patín en compresión tenga la misma resistencia que el mismo patín pero rigidizado por almas en ambos bordes longitudinales (Baque Jiménez, 2015).

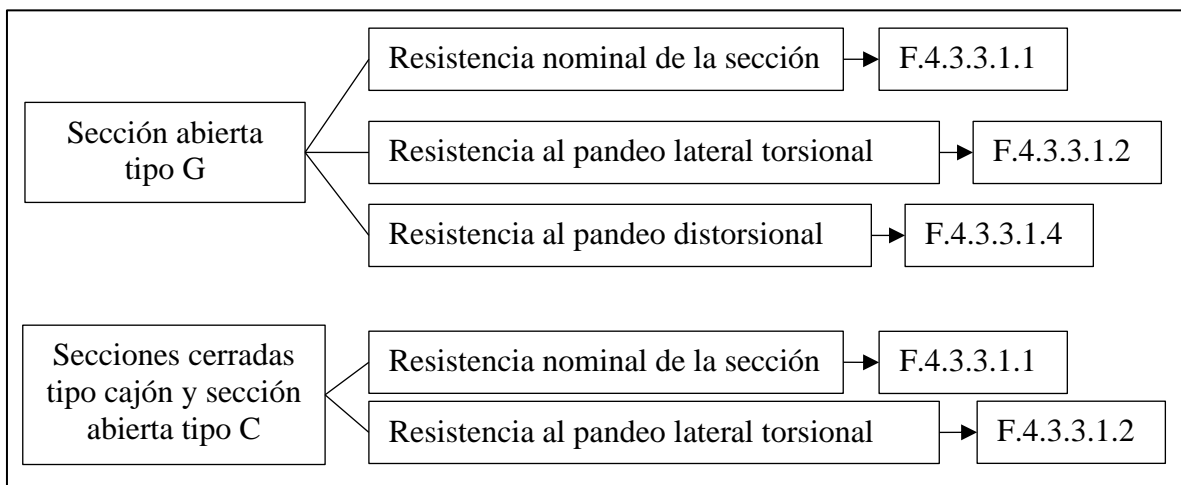
Rigidizador inadecuado: $I_s < I_a$

Rigidizador adecuado: $I_s \geq I_a$

Diagramas de flujo para el diseño a flexión

Para determinar la resistencia a la flexión de las secciones objeto de estudio, se presenta el siguiente esquema que resume los capítulos de la NSR10 que aplica para cada una de ellas:

Figura 32: Artículos de la NSR10 para resistencia a flexión que aplican a los perfiles conformados en frío considerados en AIRO correas.



Fuente: Elaboración propia.

La resistencia nominal a la flexión corresponde a la menor resistencia obtenida entre: la resistencia nominal de la sección, resistencia al pandeo lateral torsional y resistencia al pandeo distorsional, si aplica.

Resistencia nominal de la sección

La resistencia nominal de la sección aplica para secciones en C, G y doble G.

La resistencia nominal de la sección basada en la iniciación de la fluencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_n = S_e \cdot F_y$$

$$S_e = I_x / Y_{cg} \quad \text{flexión alrededor del eje X. (mm}^3, \text{in}^3)$$

$$S_e = I_y / X_{cg} \quad \text{flexión alrededor del eje Y. (mm}^3, \text{in}^3)$$

S_e : módulo elástico de la sección efectiva calculado respecto a la fibra extrema en compresión o tensión al alcanzar F_y . (mm³, in³)

$\phi_b=0.95$ para secciones con patín a compresión rigidizado o parcialmente rigidizado.

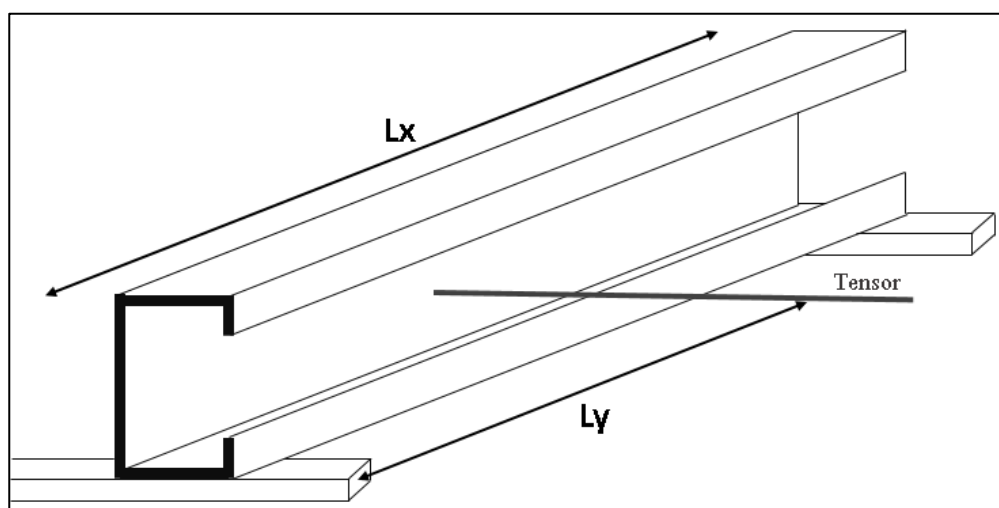
$\phi_b=0.90$ para secciones con patín a compresión no rigidizado.

Resistencia al pandeo lateral torsional

La resistencia a pandeo lateral torsional es más crítica en secciones abiertas debido a que el centro de cortante no coincide con el centroide de la sección. Sin embargo, para los perfiles conformados en frío tipo cajón la resistencia a pandeo lateral torsional depende de la longitud entre arriostramientos laterales, por ello la norma define una longitud crítica, L_u . Cuando se supera esta longitud se puede presentar deformación lateral y torsión al mismo tiempo, aunque el perfil tenga dos almas y el centro de cortante coincida con el centroide de la sección.

$$\phi_b = 0.90$$

Figura 33: Esquema que presenta las longitudes L_x y L_y usadas en el cálculo de la resistencia a pandeo lateral torsional.



Fuente: Elaboración propia.

Resistencia al pandeo lateral torsional de miembros de secciones abiertas: C y G.

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2}$$

r_o : radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de corte. (mm, in)

r_x, r_y : radio de giro de la sección transversal alrededor de los ejes centroidales principales.
(mm, in)

x_o : distancia desde el centro de cortante al centroide, medida a lo largo del eje principal X, se toma como negativo. (mm, in)

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2}$$

E: módulo de elasticidad del acero. (MPa)

K_y : factor de longitud efectiva para flexión alrededor del eje Y.

L_y : longitud no arriostrada del miembro para flexión alrededor del eje Y. (mm, in)

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

A: área transversal completa, no reducida. (mm², in²)

G: módulo de cortante. (MPa)

J: constante de torsión de la sección transversal de Saint-Venant. (mm⁴, in⁴)

C_w : constante de alabeo torsional de la sección transversal. (mm⁶, in⁶)

K_t : factor de longitud efectiva para torsión.

L_t : longitud no arriostrada del miembro para torsión. (mm, in)

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}$$

En este programa L_t es igual a L_y , es decir la longitud no arriostrada para flexión alrededor del eje fuerte.

K_x : factor de longitud efectiva para flexión alrededor del eje X.

L_x : longitud no arriostrada del miembro para flexión alrededor del eje X. (mm in)

$$C_{TF} = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$$

M_1 es el momento menor y M_2 es el momento mayor en los extremos de la longitud no arriostrada en el plano de flexión. Donde M_1 / M_2 es la relación de momentos en el extremo, es positiva cuando M_1 y M_2 tienen el mismo signo (flexión en curvatura doble) y negativa cuando tienen signos opuestos (flexión en curvatura sencilla). C_{TF} será igual a 1, cuando el momento

flector en cualquier punto dentro de la longitud no arriostrada es más grande que los momentos en ambos extremos de dicha longitud.

El parámetro usado en la determinación del momento elástico crítico, j , se determina mediante la siguiente ecuación:

$$j = \frac{1}{2I_y} [\beta_w + \beta_f + \beta_l] - x_o$$

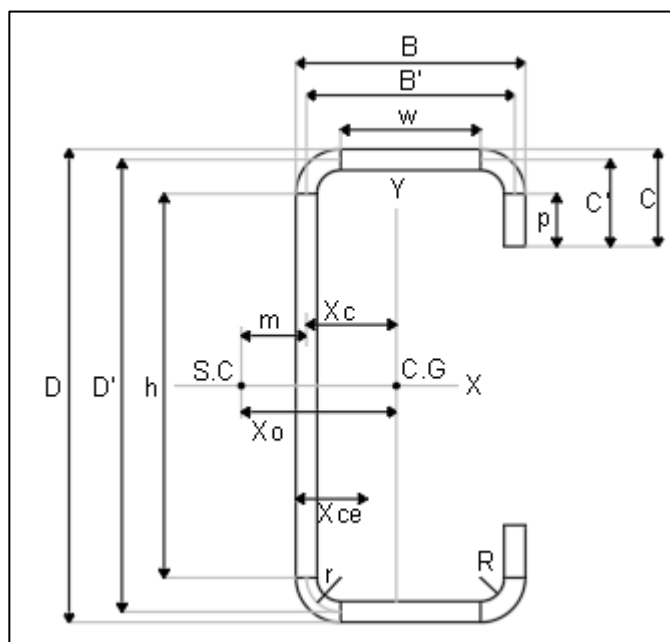
$$\beta_w = - \left(\frac{t \cdot X_c \cdot D'^3}{12} + t \cdot X_c^3 \cdot D' \right)$$

$$\beta_f = \frac{t}{2} ((B' - X_c)^4 - X_c^4) + \frac{t \cdot D'^2}{4} ((B' - X_c)^2 - X_c^2)$$

$$\beta_l = \alpha \left[2C't(B' - X_c)^3 + \frac{2}{3}t(B' - X_c) \left(\left(\frac{D'}{2} \right)^3 - \left(\frac{D'}{2} - C' \right)^3 \right) \right]$$

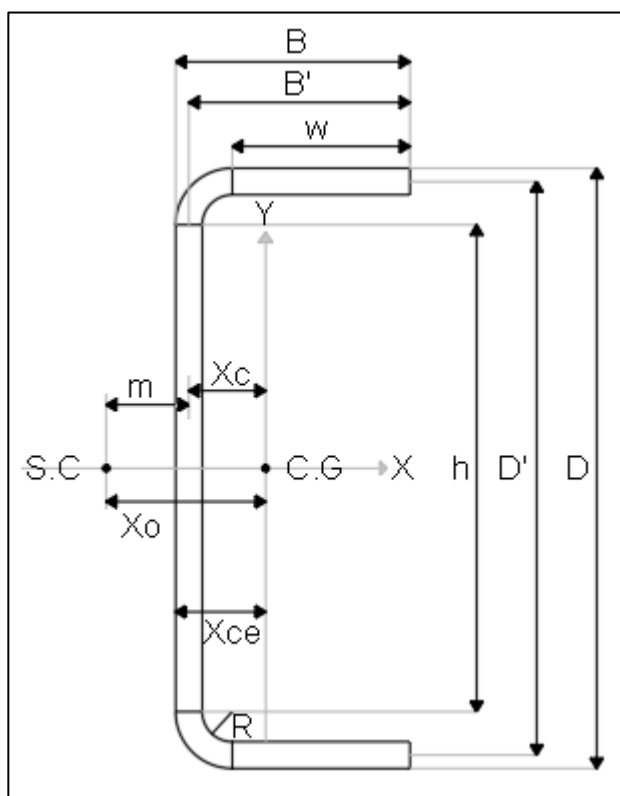
α : para secciones con pestañas igual a 1. Para secciones sin pestañas igual a 0.

Figura 34: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C.



Fuente: Elaboración propia.

M_n : resistencia nominal a la flexión. (KN.m)

F_y : esfuerzo de fluencia. (MPa)

F_e : esfuerzo crítico elástico de pandeo lateral torsional. (MPa)

S_c : módulo elástico de la sección efectiva calculado con respecto a la fibra extrema en compresión sometida a un esfuerzo F_c . (mm^3 , in^3)

S_f : módulo elástico de la sección completa no reducida respecto a la fibra extrema en compresión. (mm^3 , in^3)

I_f : momento de inercia de la sección completa no reducida alrededor de su eje centroidal paralelo al alma. (mm^4 , in^4)

Para secciones de simetría sencilla, el eje X es el eje de simetría orientado de tal forma que el centro de cortante tenga una coordenada X negativa.

M_n RNS: resistencia a la flexión determinada con las ecuaciones de resistencia nominal de la sección. Se aplica el factor de resistencia que corresponda según lo dispuesto en dicha sección.

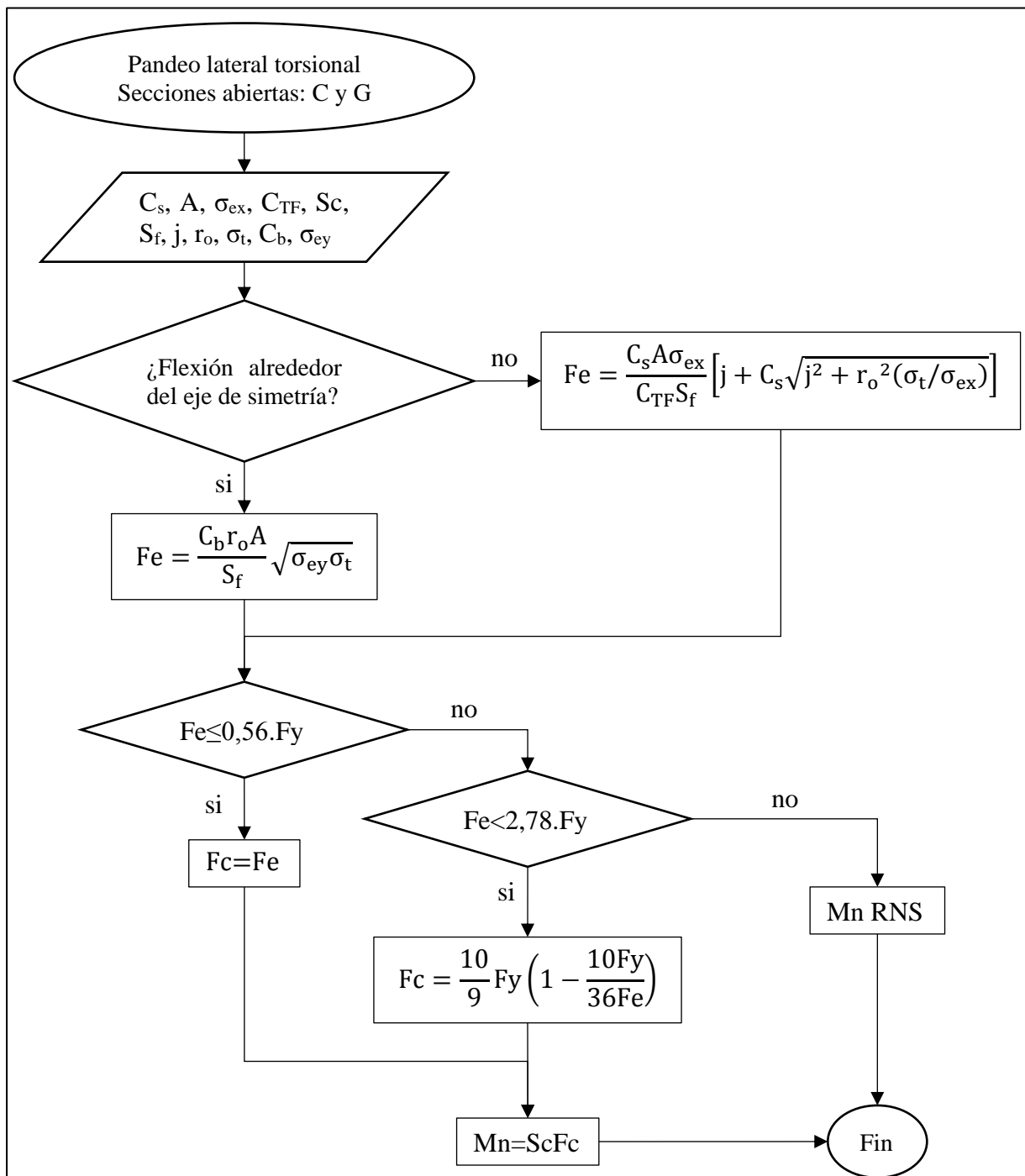
Nota: los factores de longitud efectiva k_y , k_t y k_x en pandeo lateral torsional conservadoramente se pueden tomar igual a 1 (Galambos, 2016).

Para secciones de simetría sencilla con flexión alrededor del eje centroidal perpendicular al eje de simetría:

$C_s = +1$ para momento que produzca compresión en el lado del centro de corte, medido desde el centroide.

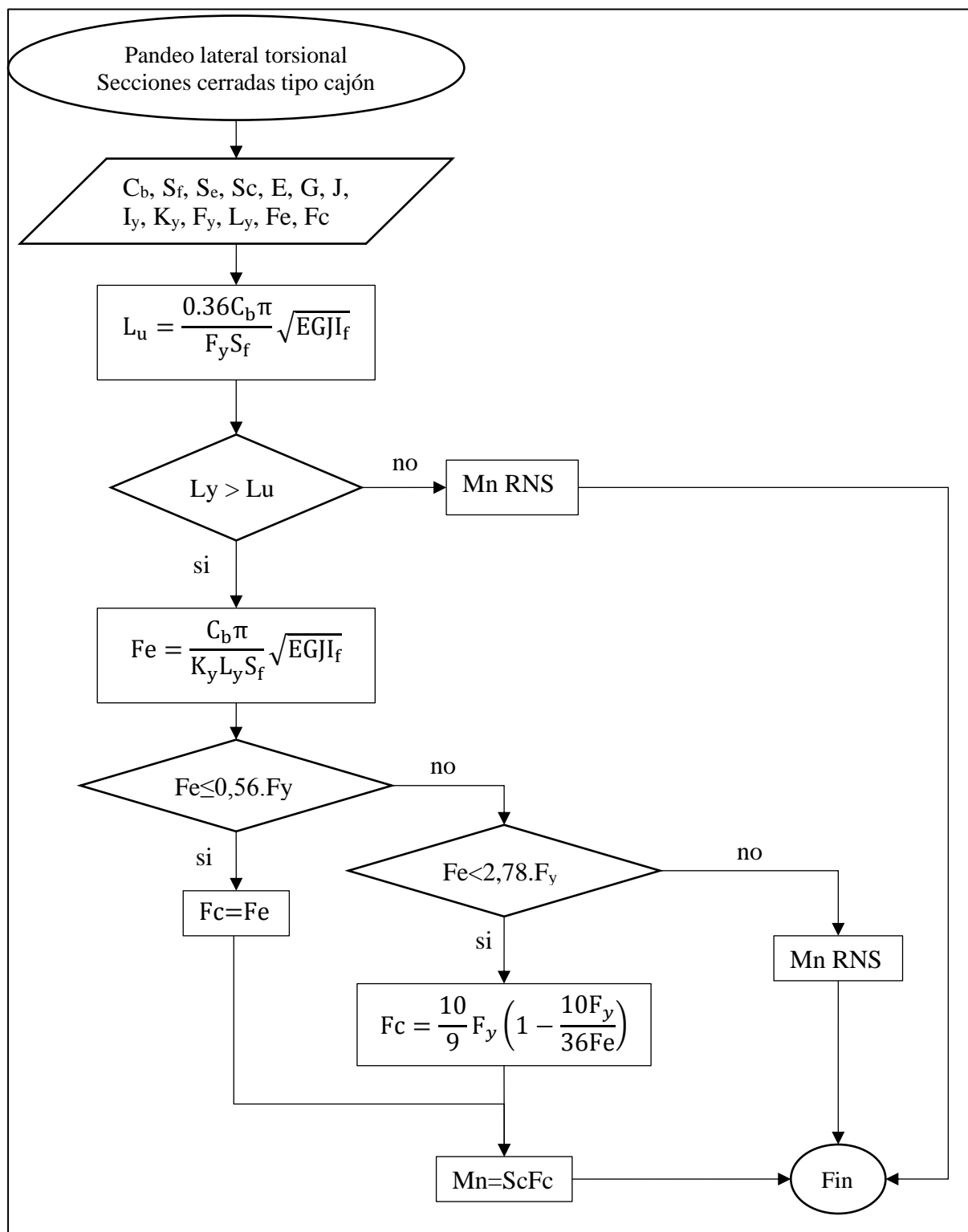
$C_s = -1$ para momento que produzca tensión en el lado del centro de corte, medido desde el centroide.

Figura 36: Pandeo lateral torsional en secciones abiertas C y G.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37: Pandeo lateral torsional en secciones cerradas tipo cajón.



Fuente: Elaboración propia.

Pandeo distorsional

El pandeo distorsional se presenta en los perfiles tipo G como consecuencia de la flexión de secciones abiertas con bordes rígidos, que produce pandeo local en el alma y desplazamiento del patín en compresión más el rigidizador de borde simultáneamente. Por ello no se determina esta resistencia en perfiles C o tipo cajón.

$$\phi_b = 0.90$$

Disposiciones para cualquier sección abierta con alma sencilla y con un patín en compresión rigidizado que se extiende hacia un lado del alma donde el rigidizador es una pestaña simple.

$$\beta = 1$$

L: valor mínimo entre L_{cr} y L_m

L_m: distancia entre puntos de restricción contra el pandeo distorsional. Para miembros restringidos en forma continua L_m = L_{cr}

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

Donde:

h_o: altura entre bordes externos del alma. (in, mm)

μ: relación de Poisson.

t: espesor del acero base. (in, mm)

I_{xf}: momento de inercia del patín alrededor del eje X. (in⁴, mm⁴)

x_o: distancia en x a partir de la unión aleta-alma al centroide de la aleta. (in, mm)

h_x: distancia en x a partir del centroide del patín hasta el centro de cortante del patín.

C_{wf}: constante de torsión de alabeo del patín. (in⁶, mm⁶)

I_{xyf}: producto del momento de inercia del patín. (in⁴, mm⁴)

I_{yf}: momento de inercia del patín alrededor del eje Y. (in⁴, mm⁴)

I_{xf} , I_{yf} , I_{xyf} , C_{wf} , x_o , y h_x son las propiedades del patín en compresión más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín, con el eje X positivo medido hacia la derecha y con el eje Y positivo medido hacia abajo del centroide.

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

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

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

$$k_{\phi wg} = \frac{h_o t \pi^2}{13440} \left(\frac{[45360(1 - \xi) + 62160] \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 448\pi^2 + \left(\frac{h_o}{L}\right)^2 [53 + 3(1 - \xi)]\pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 420 \left(\frac{L}{h_o}\right)^4} \right)$$

$$\xi = \frac{f_1 - (-f_2)}{f_1} = 2$$

ξ : gradiente de esfuerzo en el alma, donde f_1 y f_2 son los esfuerzos en los extremos opuestos del alma, $f_1 > f_2$. (En compresión es positiva y en tensión es negativa). Los esfuerzos se calculan sobre la sección completa, no reducida. Para secciones con flexión simétrica pura, $f_1 = -f_2$.

$k_{\phi fe}$: rigidez elástica rotacional provista por el patín a la unión patín – alma.

$k_{\phi we}$: rigidez elástica rotacional provista por el alma a la unión patín – alma.

$k_{\phi fg}$: rigidez geométrica rotacional (dividida por el esfuerzo F_d) demandada por el patín a partir de la unión patín – alma.

$k_{\phi wg}$: rigidez geométrica rotacional (dividida por el esfuerzo F_d) demandada por el alma a partir de la unión patín – alma.

k_{ϕ} : rigidez rotacional provista por un elemento de restricción (riostra, panel, tablero de cerramiento) a la unión patín – alma de un miembro ($k_{\phi} = 0$, si el patín en compresión no está restringido)

E: módulo de elasticidad del acero.

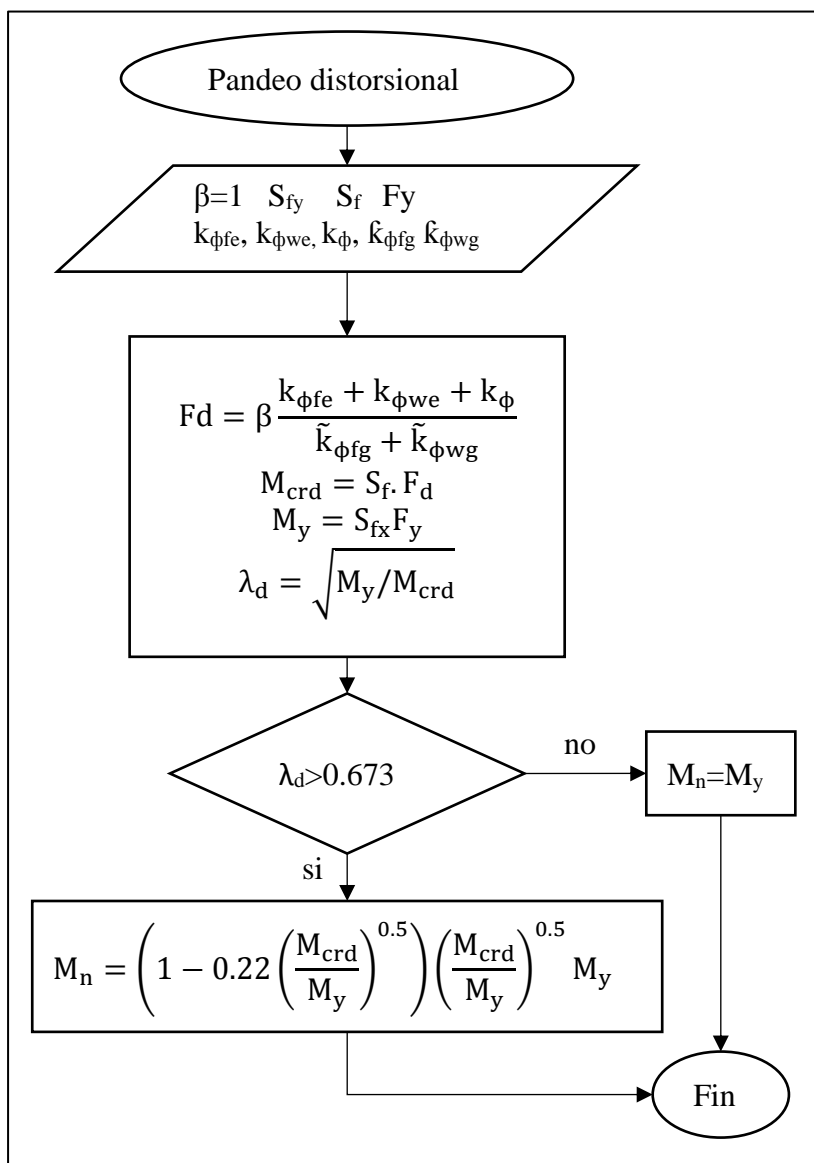
G: módulo de corte.

J_r : constante de torsión de Saint Venant del patín en compresión, más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín, con el eje X positivo medido hacia la derecha y con el eje Y positivo medido hacia abajo del centroide.

A_f : área de la sección transversal del patín en compresión más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín, con el eje X positivo medido hacia la derecha y con el eje Y positivo medido hacia abajo del centroide.

y_o : distancia en Y a partir de la unión patín – alma hasta el centroide del patín.

Figura 38: Pandeo distorsional.



Fuente: Elaboración propia.

Ecuaciones para determinar las propiedades geométricas del patín en compresión más el rigidizador de borde en el cálculo de la resistencia a pandeo distorsional

$$A_f = t(B + C)$$

$$J_f = \frac{1}{3}B \cdot t^3 + \frac{1}{3}C \cdot t^3$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2 \cdot B^2 + 4 \cdot B \cdot C^3 - 4 \cdot B \cdot C^3 \cdot \cos(\theta)^2 + t^2 \cdot B \cdot C + C^4 - C^4 \cdot \cos(\theta)^2)}{12(B + C)}$$

$$I_{yf} = \frac{t(B^4 + 4 \cdot C \cdot B^3 + 6 \cdot B^2 \cdot C^2 \cdot \cos(\theta) + 4 \cdot C^3 \cdot B \cdot \cos(\theta)^2 + C^4 \cdot \cos(\theta)^2)}{12(B + C)}$$

$$I_{xyf} = \frac{t \cdot B \cdot C^2 \cdot \sin(\theta) \cdot (B + C \cdot \cos(\theta))}{4 \cdot (B + C)}$$

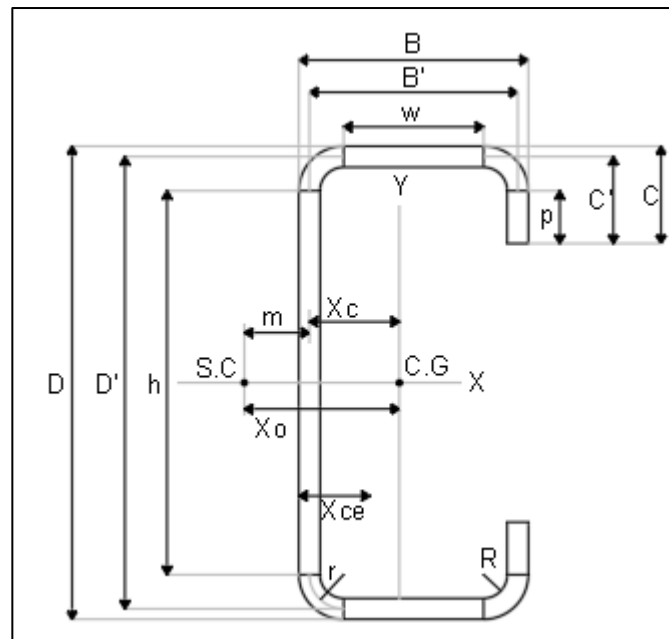
$$x_o = \frac{B^2 - C^2 \cdot \cos(\theta)}{2 \cdot (B + C)}$$

$$y_o = \frac{-C^2 \cdot \sin(\theta)}{2 \cdot (B + C)}$$

$$h_x = \frac{-(B^2 + 2 \cdot C \cdot B + C^2 \cdot \cos(\theta))}{2 \cdot (B + C)}$$

$$C_{wf} = 0$$

Figura 39: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, para el cálculo de la resistencia a pandeo distorsional.



Fuente: Elaboración propia.

Diagramas de flujo para el diseño a cortante

Resistencia al corte de almas sin huecos

Para determinar la Resistencia al corte de almas sin huecos de acuerdo al capítulo F.4.3.3.2.1 de la norma NSR 10, V_n se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_n = A_w \cdot F_v$$

$$\Phi_v = 0.95$$

El coeficiente de pandeo al corte, k_v para almas no reforzadas es 5.34. Este programa no realiza el chequeo de rigidizadores, para ello el usuario debe dirigirse al capítulo F.4.3.3.7 de la norma NSR 10 y verificar que los rigidizadores satisfacen los requisitos de dicha sección. De ser así, el valor de k_v se determina con las siguientes ecuaciones:

Cuando $a / h \leq 1$

$$k_v = 4 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}$$

Cuando $a / h > 1$

$$k_v = 5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}$$

Donde a / h debe ser menor o igual que 3.

Este programa asume un valor conservador de coeficiente de pandeo al corte, despreciando cualquier aporte a la resistencia debido a rigidizadores; $k_v = 5.34$.

A_w : área del alma (h.t). (mm^2 , in^2)

h : altura de la porción plana del alma medida a lo largo de su plano. (mm, in)

t : espesor del alma. (mm, in)

F_v : esfuerzo nominal de corte. (MPa)

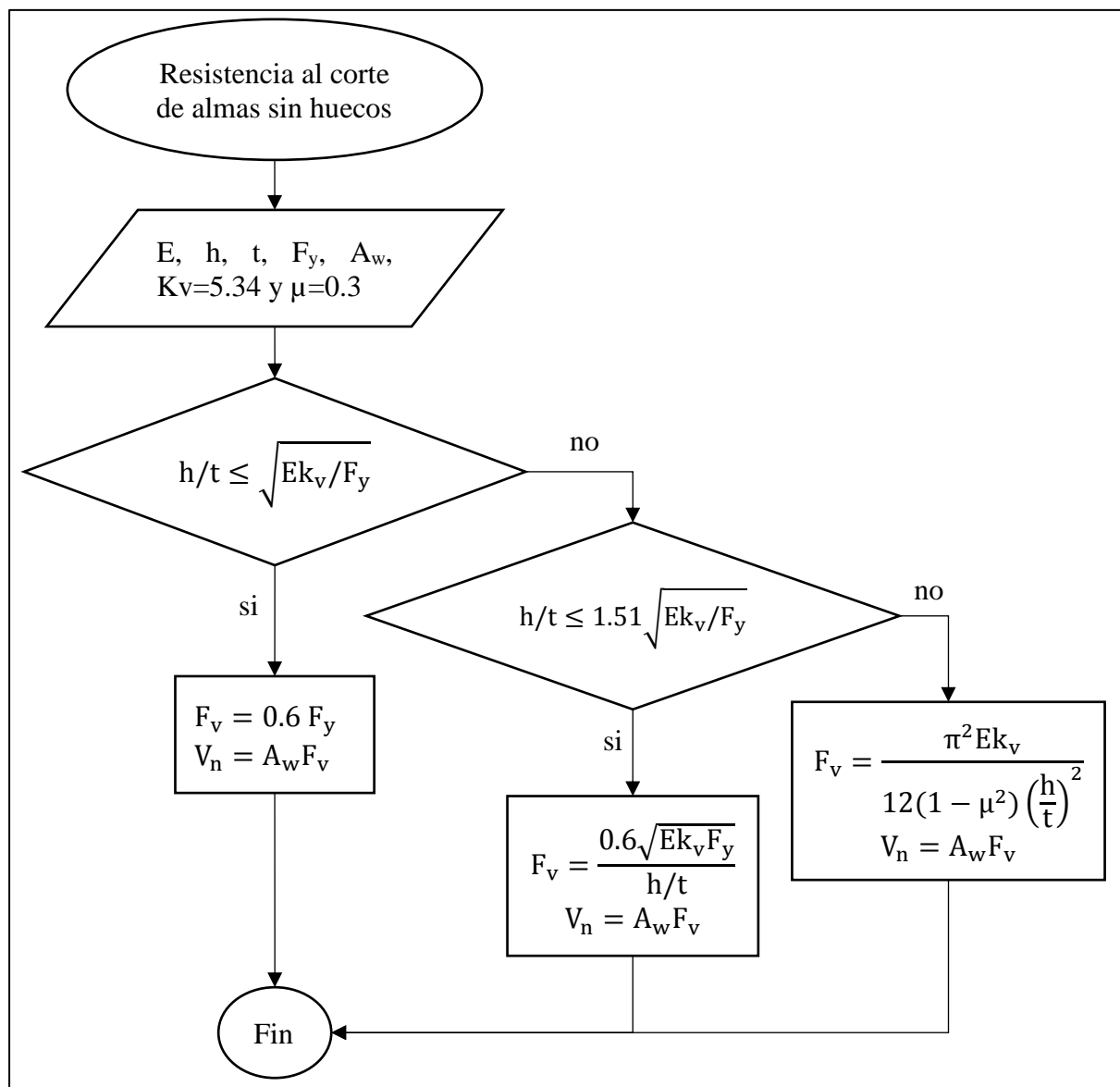
E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

F_y : esfuerzo de fluencia de diseño. (MPa)

μ : relación de Poisson.

a: longitud del panel de corte para el elemento alma no reforzado. Distancia libre entre rigidizadores transversales en almas reforzadas. (mm, in)

Figura 40: Resistencia al corte de almas sin huecos para perfiles conformados en frío.



Fuente: Elaboración propia.

Flexión y corte combinados

Para vigas con almas no reforzadas, la resistencia requerida a flexión y la resistencia requerida al corte deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\left(\frac{M_r}{\phi_b M_n}\right)^2 + \left(\frac{V_r}{\phi_v V_n}\right)^2} \leq 1$$

M_r : resistencia requerida a flexión. (KN.m)

V_r : resistencia requerida a cortante. (KN)

ϕ_b : factor de resistencia para flexión.

ϕ_v : factor de resistencia para cortante.

M_n : resistencia nominal a flexión. (KN.m)

V_n : resistencia nominal a cortante. (KN)

Arrugamiento del alma

La resistencia nominal al arrugamiento del alma, P_n , se determina mediante la siguiente expresión:

$$R_n = C \cdot t^2 \cdot F_y \cdot \text{sen}\theta \cdot \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}}\right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}}\right)$$

C: coeficiente de arrugamiento del alma.

t: espesor del alma. (mm, in)

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

θ : ángulo entre el plano del alma y el plano de la superficie de soporte, $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

C_R : coeficiente de radio de doblez interno.

R: radio de doblez interno. (mm, in)

C_N : coeficiente de longitud de apoyo de la carga.

N: longitud de apoyo de la carga (mínimo 19 mm). (mm, in)

C_h : coeficiente de esbeltez del alma.

h: dimensión plana del alma, medida en su mismo plano. (mm, in)

Las secciones C y G deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{h}{t} \leq 200$$

$$\frac{N}{t} \leq 210$$

$$\frac{N}{h} \leq 2$$

$$\theta = 90^\circ$$

Tabla 1: Factores de resistencia y coeficientes para secciones C y G.

Condiciones de Apoyo y Aleta		Casos de carga		C	C_R	C_N	C_h	ϕ_w	Límites
Sujeta al apoyo	Aletas rigidizadas o parcialmente rigidizadas	Carga sobre una aleta o reacción	Extremo	4	0.14	0.35	0.02	0.85	$R/t \leq 9$
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	0.90	$R/t \leq 5$
		Carga sobre las dos aletas o reacción	Extremo	7.5	0.08	0.12	0.048	0.85	$R/t \leq 12$
			Interior	20	0.10	0.08	0.031	0.85	$R/t \leq 12$
No sujeta	Aletas rigidizadas o parcialmente rigidizadas	Carga sobre una aleta o reacción	Extremo	4	0.14	0.35	0.02	0.80	$R/t \leq 5$
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	0.90	
		Carga sobre las dos aletas o reacción	Extremo	13	0.32	0.05	0.04	0.90	$R/t \leq 3$
			Interior	24	0.52	0.15	0.001	0.80	
	Aletas no rigidizadas	Carga sobre una aleta o reacción	Extremo	4	0.40	0.60	0.03	0.85	$R/t \leq 2$
			Interior	13	0.32	0.10	0.01	0.85	$R/t \leq 1$
		Carga sobre las dos aletas o reacción	Extremo	2	0.11	0.37	0.01	0.75	$R/t \leq 1$
			Interior	13	0.47	0.25	0.04	0.80	

Fuente: Tabla F.4.3.3-2 de la NSR10.

Se asume que las aletas no están sujetas al apoyo por obtenerse valores de resistencia más críticos.

Las secciones G se consideran perfiles con aletas rigidizadas o parcialmente rigidizadas. Las secciones C o canal se consideran como perfiles con aletas no rigidizadas.

Nota: para perfiles conformados por dos o más almas, como es el caso del perfil doble G o tipo cajón, P_n debe calcularse para cada alma individual y los resultados se sumarán para obtener la resistencia nominal de la sección completa. Las constantes se toman de la tabla para perfiles de sección G.

Flexión y arrugamiento del alma combinados

Para secciones con almas sencillas no reforzadas, sujetas a la combinación de flexión y carga concentrada o reacción se debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$0.91 \left(\frac{P_r}{P_n} \right) + \left(\frac{M_r}{M_n} \right) \leq 1.33\phi$$

$\phi: 0.9$

M_r : resistencia requerida a flexión. (KN.m)

P_r : resistencia requerida al arrugamiento del alma (carga concentrada o reacción). (KN)

M_n : resistencia nominal a flexión. (KN.m)

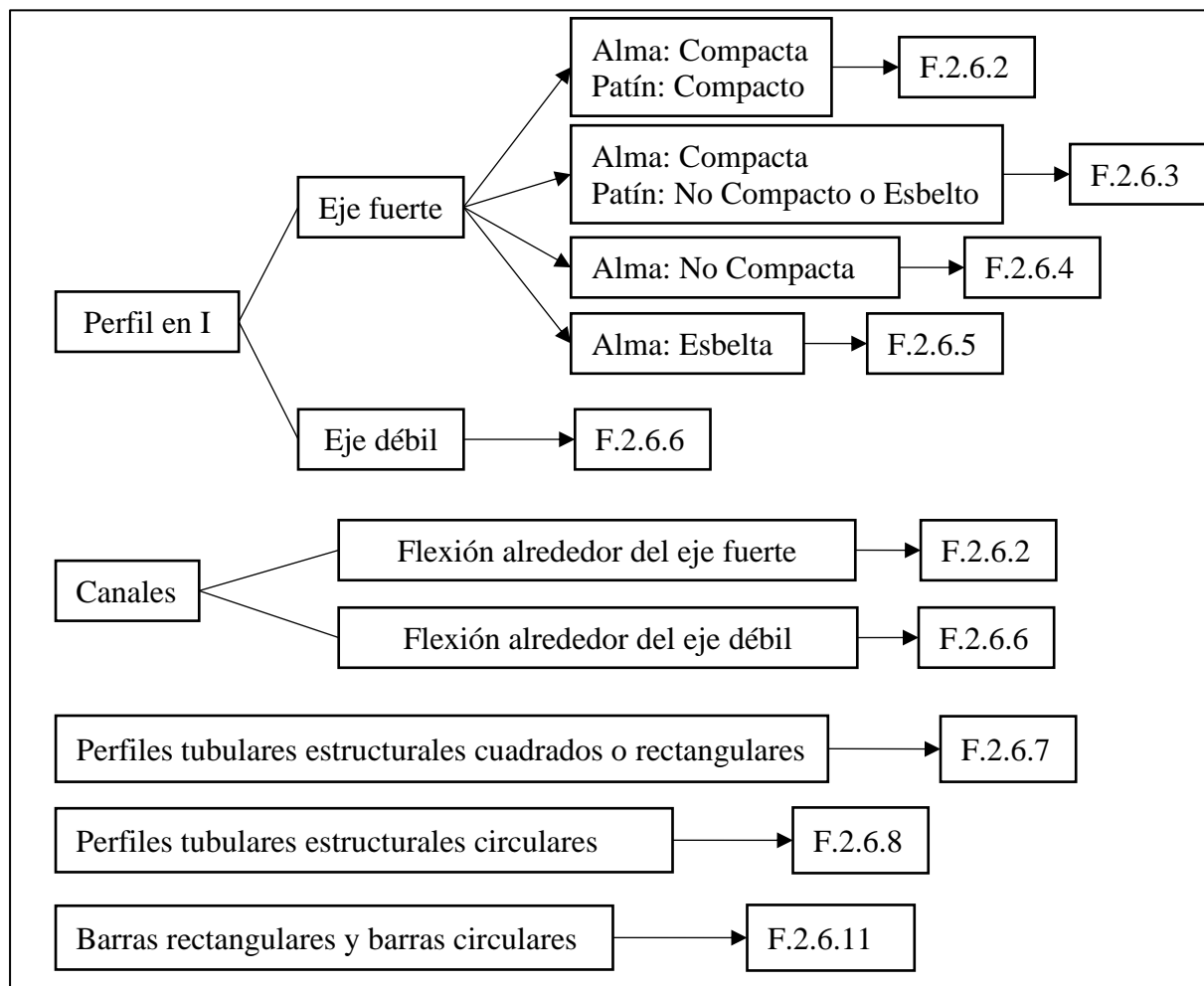
P_n : resistencia nominal al arrugamiento del alma. (KN)

Resistencia a flexión de perfiles laminados en caliente

Nota: La teoría relacionada a la resistencia de los perfiles laminados en caliente que se presenta a continuación fue tomada de la norma NSR10 y la AISC 360-16.

Para determinar la resistencia a flexión de las secciones objeto de diseño, se presenta el siguiente esquema que resume los capítulos de la norma NSR 10 que aplican para cada una de ellas.

Figura 41: Artículos de la NSR10 para resistencia a flexión que aplican a los perfiles laminados en caliente considerados en AIRO correas.



Fuente: Elaboración propia.

Diagramas de flujo para el diseño a flexión

$$\phi_b = 0.90$$

Perfil en I con simetría doble, con alma compacta y patín compacto solicitado por flexión alrededor de su eje mayor, y canales solicitados por flexión alrededor de su eje mayor. F.2.6.2

La resistencia nominal a flexión corresponde al menor entre los valores de momento plástico y pandeo lateral torsional.

El término radical de la siguiente ecuación puede tomarse conservadoramente igual a 1.

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{(L_b/r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J \cdot c}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$$

C_b : factor de modificación para pandeo lateral torsional. Se permite tomar conservadoramente un valor de $C_b = 1$.

L_b : longitud comprendida entre dos puntos que están arriostrados ya sea contra el desplazamiento lateral del patín a compresión o contra la torsión de la sección transversal. (mm, in)

E : módulo de elasticidad del acero. (MPa)

J : constante torsional. (mm^4 , in^4)

S_x : módulo elástico de sección alrededor del eje X. (mm^3 , in^3)

h_o : distancia entre centroides de patines. (mm, in)

I_y : Inercia alrededor del eje Y. (mm^4 , in^4)

Z_x : módulo plástico de la sección alrededor del eje X. (mm^3 , in^3)

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

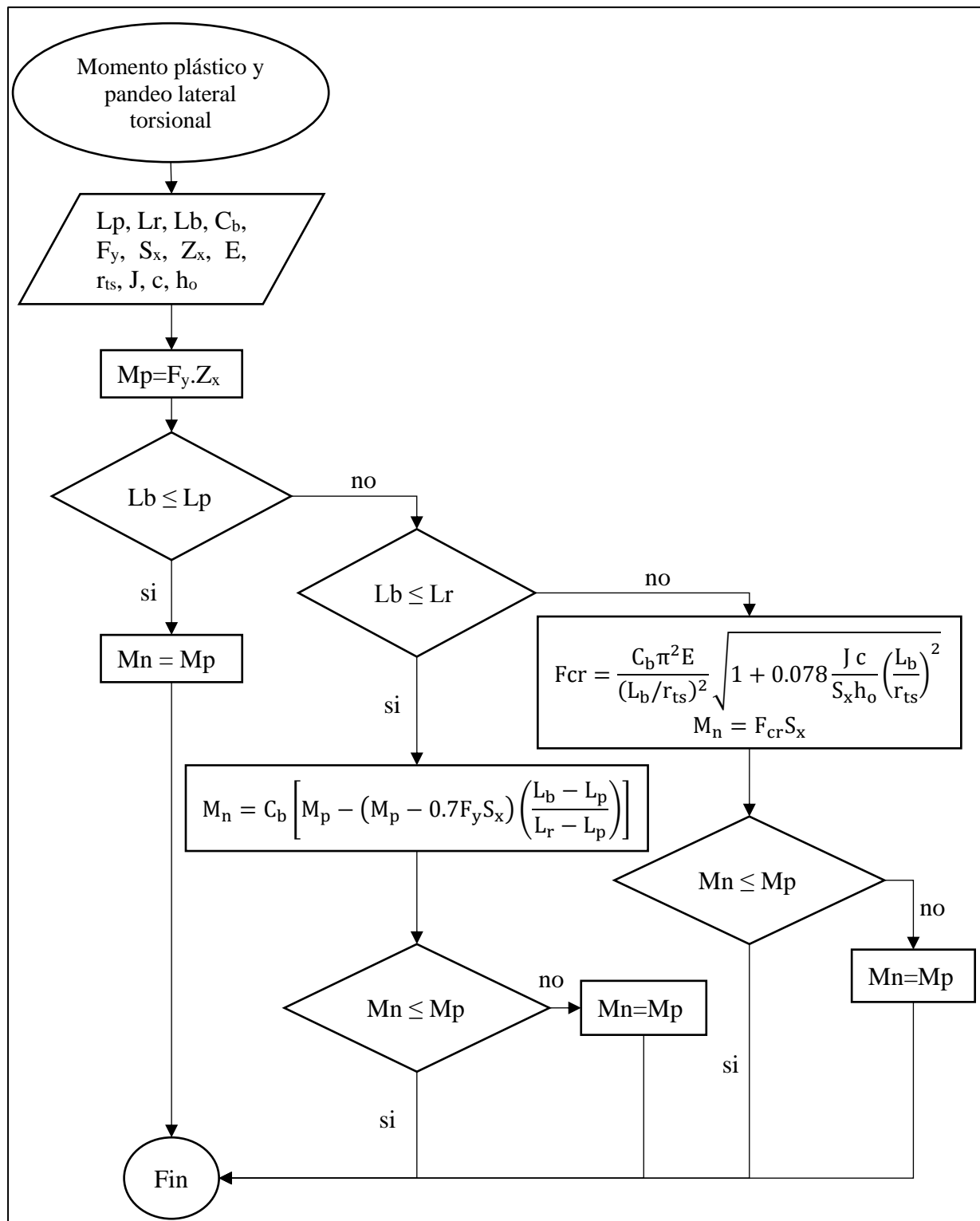
$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E}\right)^2}}$$

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}$$

Para perfiles en I: $c = 1$

Para canales: $c = \frac{h_o}{2} \sqrt{\frac{I_y}{C_w}}$

Figura 42: Momento plástico y pandeo lateral torsional para el perfil en I con simetría doble, alma compacta y patín compacto, solicitado por flexión alrededor de su eje mayor, y canales solicitados por flexión alrededor de su eje mayor.



Fuente: Elaboración propia.

Perfil en I con simetría doble con alma compacta y patín no compacto o esbelto solicitado por flexión alrededor del eje mayor. F.2.6.3

La resistencia nominal a la flexión M_n corresponde al menor valor obtenido del análisis de pandeo lateral torsional y pandeo local del patín a compresión.

Para pandeo lateral torsional aplica las ecuaciones presentadas en: perfil en I con simetría doble, con alma compacta y patín compacto solicitado por flexión alrededor de su eje mayor, y canales solicitados por flexión alrededor de su eje mayor.

Para el pandeo local del patín a compresión se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

$$\lambda_p = \lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = \lambda_{rf} = 1.0 \sqrt{E/F_y}$$

λ_{pf} : límite de esbeltez para un patín compacto.

λ_{rf} : límite de esbeltez para un patín no compacto.

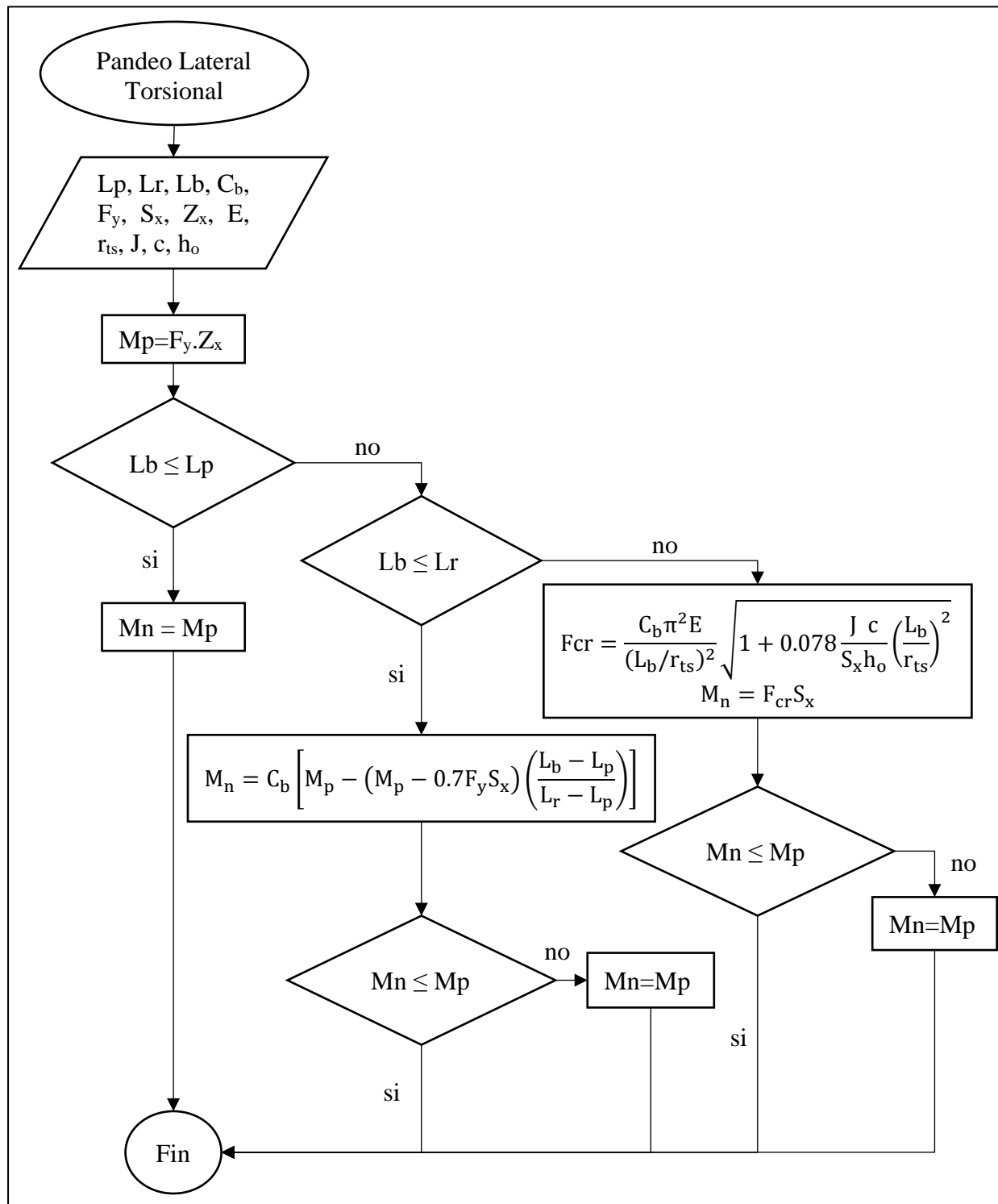
$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$$

k_c : debe ser mayor que 0.35 y menor que 0.76.

h : distancia libre entre patines, menos el filete o radio de la esquina en cada patín. (mm, in)

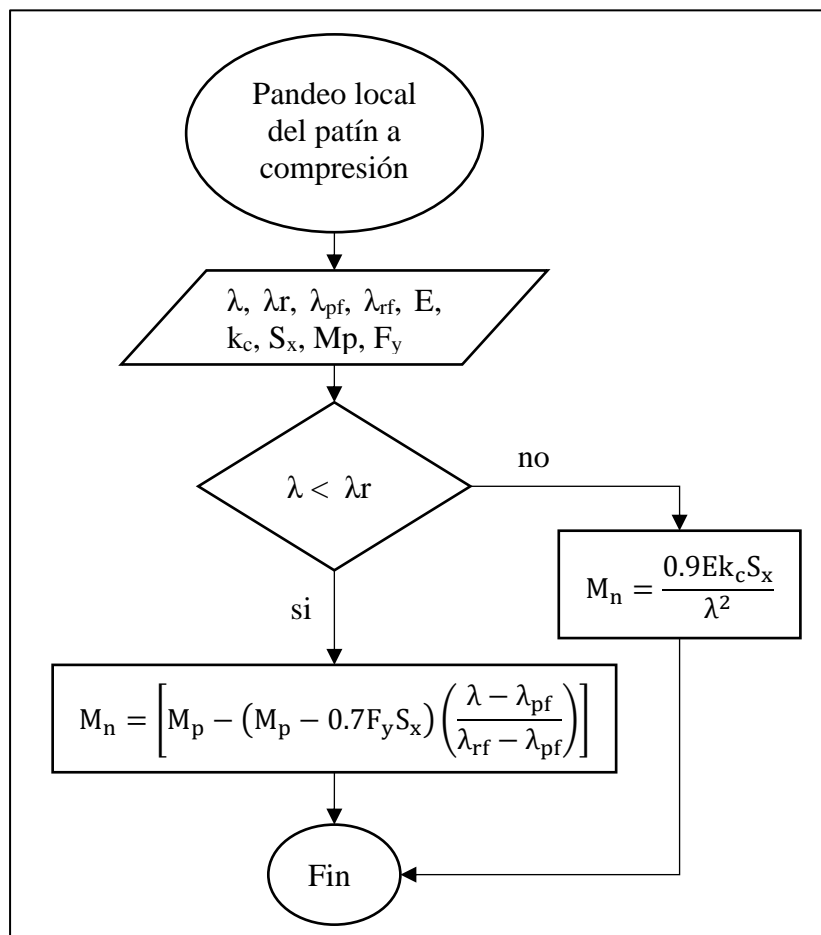
t_w : espesor del alma. (mm, in)

Figura 43: Pandeo lateral torsional para perfil en I con simetría doble con alma compacta y patín no compacto o esbelto solicitado por flexión alrededor del eje mayor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44: Pandeo local del patín a compresión para perfil en I de simetría doble, alma compacta y patín no compacto o esbelto solicitado por flexión alrededor del eje mayor.



Fuente: Elaboración propia.

Perfil en I con simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor. F.2.6.4

La resistencia nominal a la flexión corresponde al menor valor entre: fluencia en el patín a compresión, fluencia en el patín a tensión, pandeo lateral torsional y pandeo local en el patín a compresión.

El estado límite de fluencia en el patín a compresión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M_n = R_{pc}M_{yc} = R_{pc}F_yS_{xc}$$

Para pandeo lateral torsional debe tenerse en cuenta las siguientes ecuaciones:

J se tomará igual a cero cuando:

$$\frac{I_{yc}}{I_y} \leq 0.23$$

I_{yc} : momento de inercia del patín a compresión respecto al eje Y. (mm^4 , in^4)

El esfuerzo F_L se calcula así:

$$\text{Para } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.7 \quad \rightarrow \quad F_L = 0.7F_y$$

$$\text{Para } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} < 0.7 \quad \rightarrow \quad F_L = F_y \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.5F_y$$

L_p : límite de la longitud no arriostrada para el estado límite de fluencia en el patín a compresión. (mm, in)

$$L_p = 1.1r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

L_r : límite de la longitud no arriostrada para el estado límite de pandeo lateral torsional en el rango inelástico. (mm, in)

$$L_r = 1.95r_t \frac{E}{F_L} \sqrt{\frac{J}{S_{xc}h_o} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc}h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{F_L}{E}\right)^2}}$$

El factor de plastificación del alma, R_{pc} , se calcula así:

Cuando $I_{yc} / I_y > 0.23$

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw} \quad \rightarrow \quad R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}}$$

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw} \quad \rightarrow \quad R_{pc} = \left[\frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_{yc}}$$

Cuando $I_{yc} / I_y \leq 0.23$

$$R_{pc} = 1$$

$$M_p = Z_x F_y \leq 1.6 S_{xc} F_y$$

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w}$$

S_{xt} , S_{xc} : módulo elástico de la sección referido a los patines en tensión y a compresión respectivamente. (mm^3 , in^3)

$$\lambda_p = \lambda_{pw} = 3.76 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = \lambda_{rw} = 5.70 \sqrt{E/F_y}$$

λ_{pw} : límite de esbeltez para un alma compacta.

λ_{rw} : límite de esbeltez para un alma no compacta.

h_c : dos veces la distancia entre el centroide de la sección y la cara interna del patín a compresión menos el radio de la esquina. (mm, in)

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} a_w\right)}}$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}}$$

b_{fc} : ancho del patín a compresión. (mm, in)

t_{fc} : espesor del patín a compresión. (mm, in)

E: módulo de elasticidad del acero. (MPa)

r_t : radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional. (mm, in)

J: constante torsional. (mm^4 , in^4)

h_o : distancia entre centroides de patines. (mm, in)

Para pandeo local del patín a compresión se debe tener en cuenta:

$$\text{Para } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.7 \quad \rightarrow \quad F_L = 0.7F_y$$

$$\text{Para } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} < 0.7 \quad \rightarrow \quad F_L = F_y \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.5F_y$$

El factor de plastificación del alma, R_{pc} , se calcula así:

Cuando $I_{yc} / I_y > 0.23$

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw} \quad \rightarrow \quad R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}}$$

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw} \quad \rightarrow \quad R_{pc} = \left[\frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_{yc}}$$

Cuando $I_{yc} / I_y \leq 0.23$

$$R_{pc} = 1$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$$

k_c : debe ser mayor que 0.35 y menor que 0.76.

$$\lambda = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$$

$$\lambda_p = \lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = \lambda_{rf} = 1.0 \sqrt{E/F_y}$$

λ_{pf} : límite de esbeltez para un patín compacto.

λ_{rf} : límite de esbeltez para un patín no compacto.

Para fluencia del patín a tensión se debe tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$M_{yt} = F_y S_{xt}$$

El factor de plastificación del alma correspondiente al estado límite de fluencia del patín a tensión, R_{pt} se determina así:

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw} \rightarrow R_{pt} = \frac{M_p}{M_{yt}}$$

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw} \rightarrow R_{pt} = \left[\frac{M_p}{M_{yt}} - \left(\frac{M_p}{M_{yt}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_{yt}}$$

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w}$$

$$\lambda_p = \lambda_{pw} = 3.76 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = \lambda_{rw} = 5.70 \sqrt{E/F_y}$$

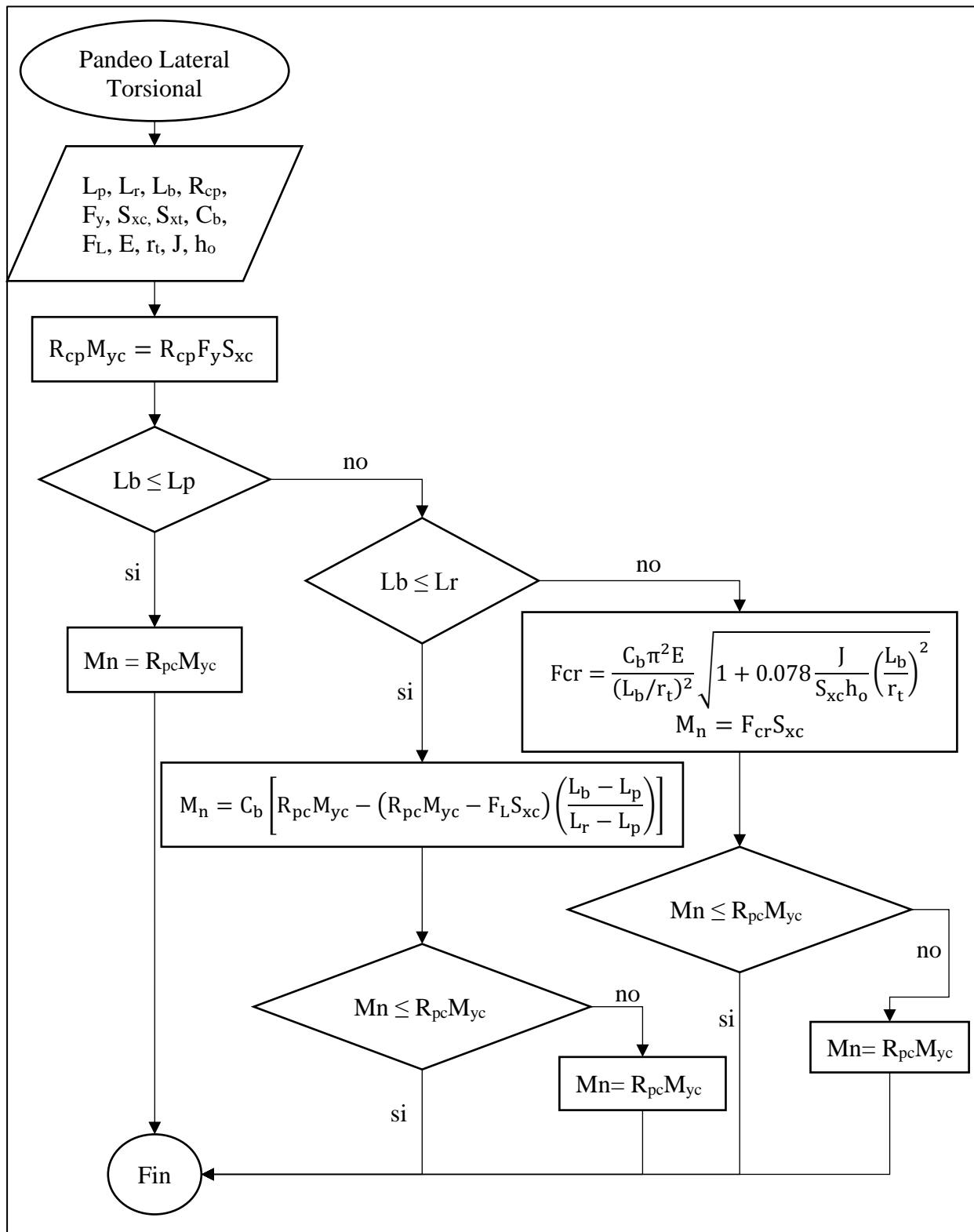
λ_{pw} : límite de esbeltez para un alma compacta.

λ_{rw} : límite de esbeltez para un alma no compacta.

h_c : dos veces la distancia entre el centroide de la sección y la cara interna del patín a compresión menos el radio de la esquina. (mm, in)

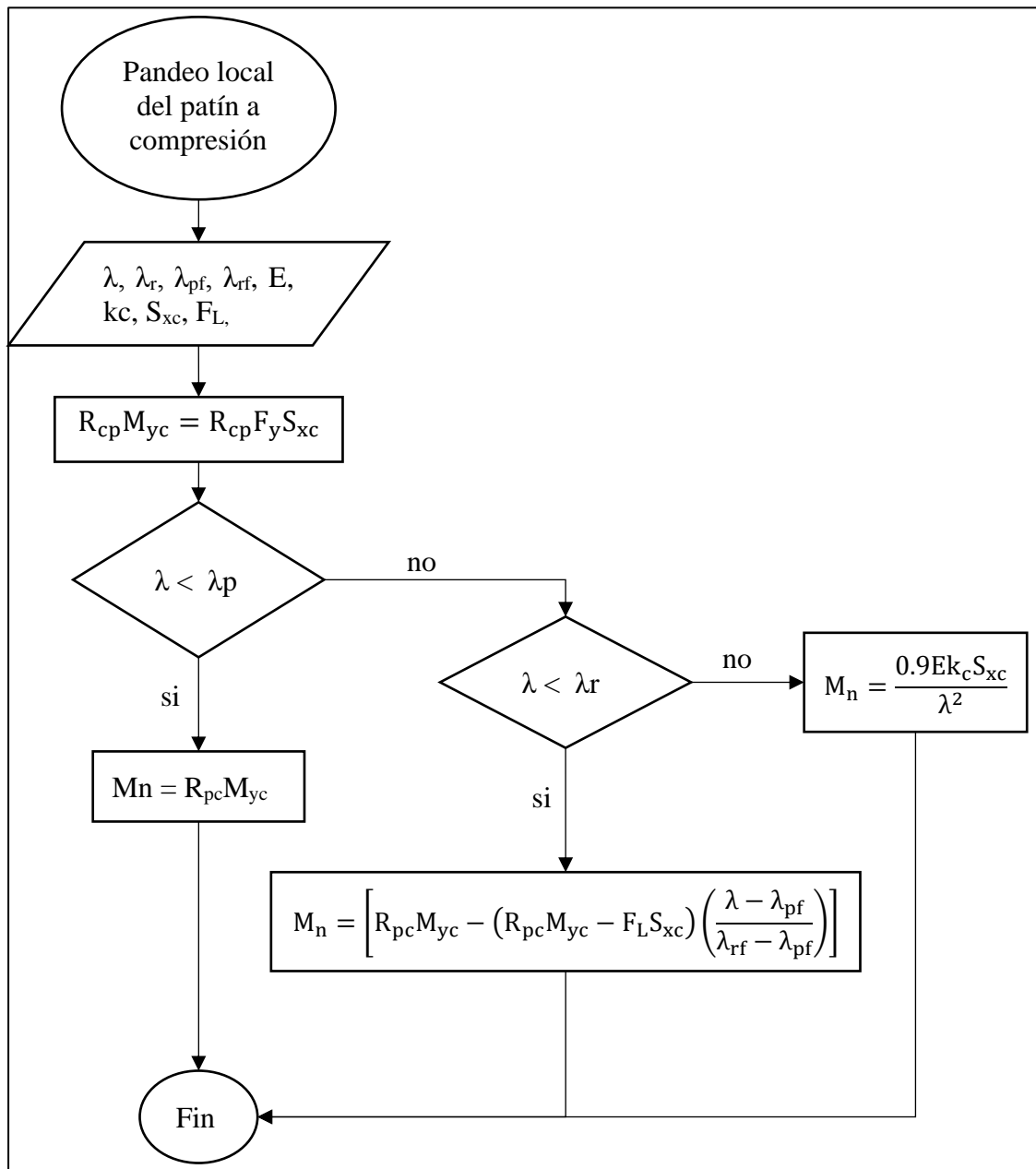
S_{xt} , S_{xc} : módulo elástico de la sección referido a los patines en tensión y a compresión respectivamente. (mm^3 , in^3)

Figura 45: Pandeo lateral torsional del perfil en I de simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor.



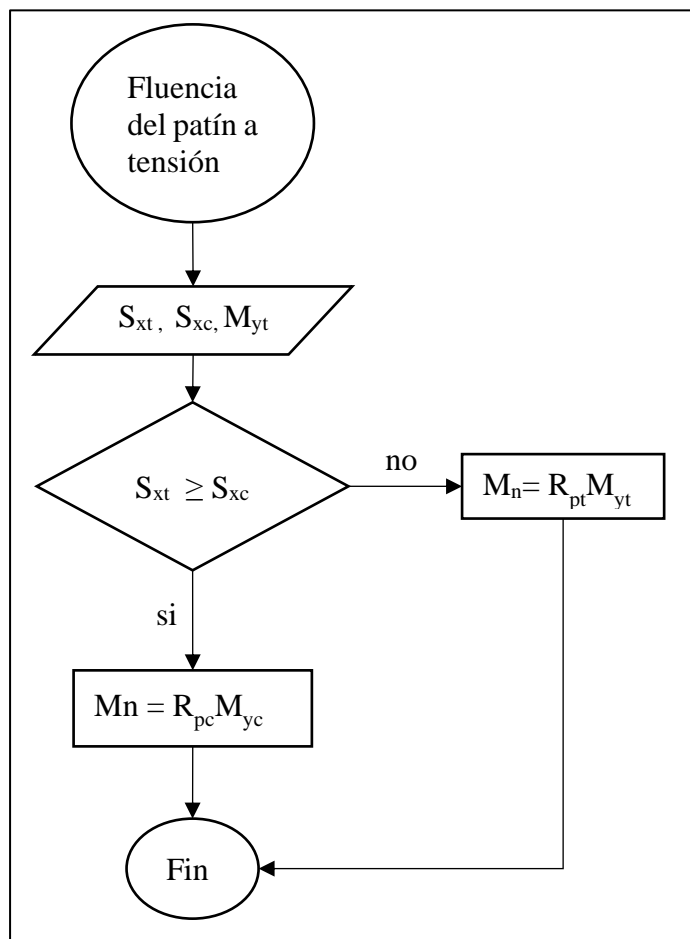
Fuente: Elaboración propia.

Figura 46: Pandeo local del patín a compresión del perfil en I de simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47: Fluencia del patín a tensión del perfil en I de simetría doble con alma no compacta cuando es solicitado por flexión alrededor del eje mayor.



Fuente: Elaboración propia.

Perfil en I con simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor. F.2.6.5

La resistencia nominal a la flexión M_n , corresponde al menor entre los valores obtenidos por: estado límite de fluencia en el patín a compresión, estado límite de fluencia del patín a tensión, pandeo lateral torsional y pandeo local del patín a compresión.

Fluencia en el patín a compresión:

$$M_n = R_{pg} F_y S_{xc}$$

Pandeo lateral torsional:

$$L_r = \pi r_t \sqrt{\frac{E}{0.7F_y}}$$

$$L_p = 1.1r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \leq 1$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 10$$

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} a_w \right)}}$$

R_{pg} : factor de reducción de la resistencia a flexión.

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

S_{xc} : módulo elástico de la sección en compresión. (mm³, in³)

L_p y L_r : límites de longitud no arriostrada. (mm, in)

a_w : relación entre el doble del área de la zona del alma que trabaja a compresión cuando se aplica únicamente un momento flector alrededor del eje mayor y el área de los componentes del patín a compresión.

r_t : radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional. (mm, in)

h_c : dos veces la distancia entre el centroide de la sección y la cara interna del patín a compresión menos el radio de la esquina. (mm, in)

b_{fc} : ancho del patín a compresión (mm, in)

t_{fc} : espesor del patín a compresión (mm, in)

Pandeo local del patín a compresión:

$$M_n = R_{pg} F_{cr} S_{xc}$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$$

k_c : debe ser mayor que 0.35 y menor que 0.76.

$$\lambda = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$$

$$\lambda_p = \lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = \lambda_{rf} = 1.0 \sqrt{E/F_y}$$

λ_{pf} : límite de esbeltez para un patín compacto.

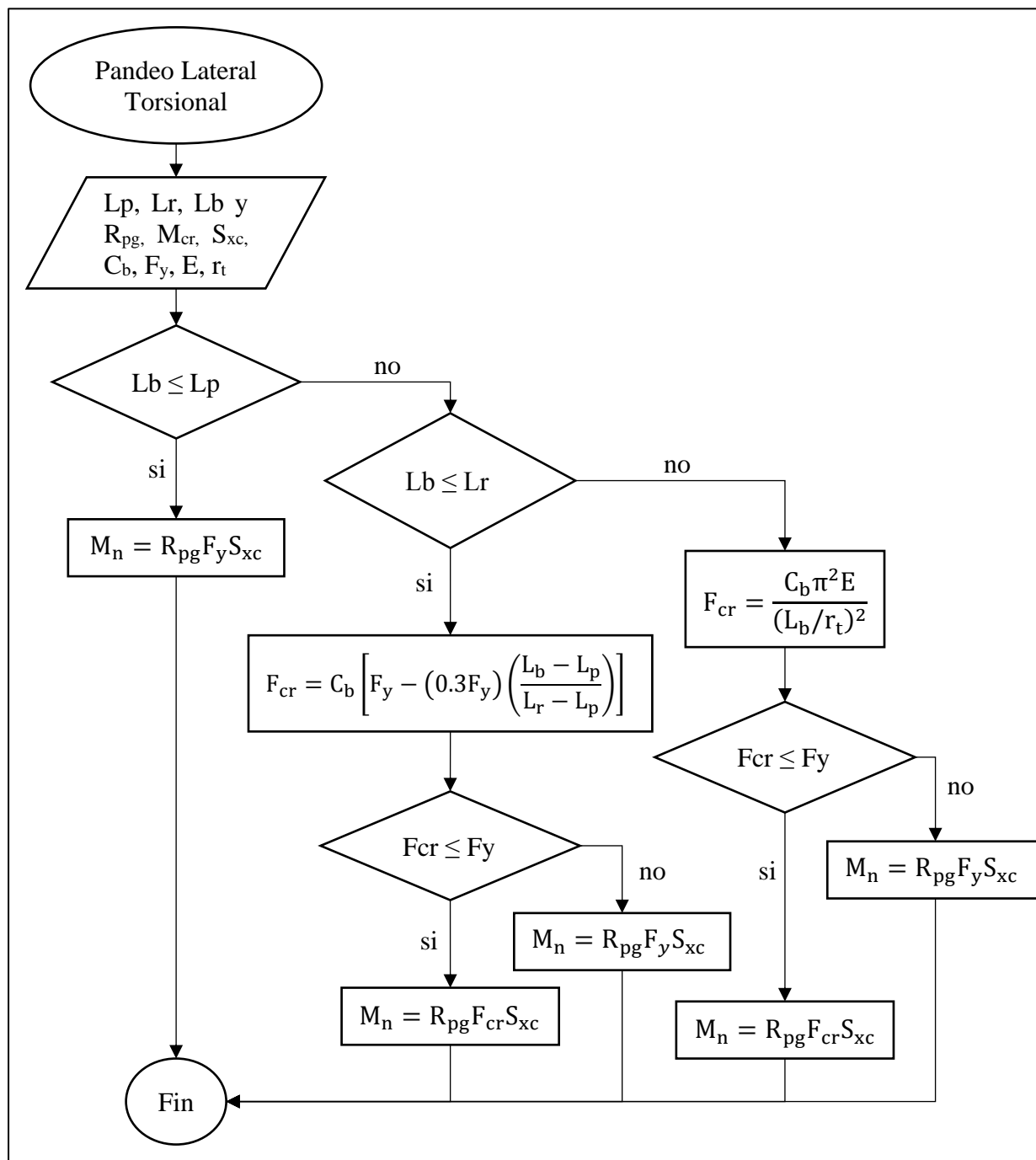
λ_{rf} : límite de esbeltez para un patín no compacto.

Fluencia del patín a tensión:

$$M_n = F_y S_{xt}$$

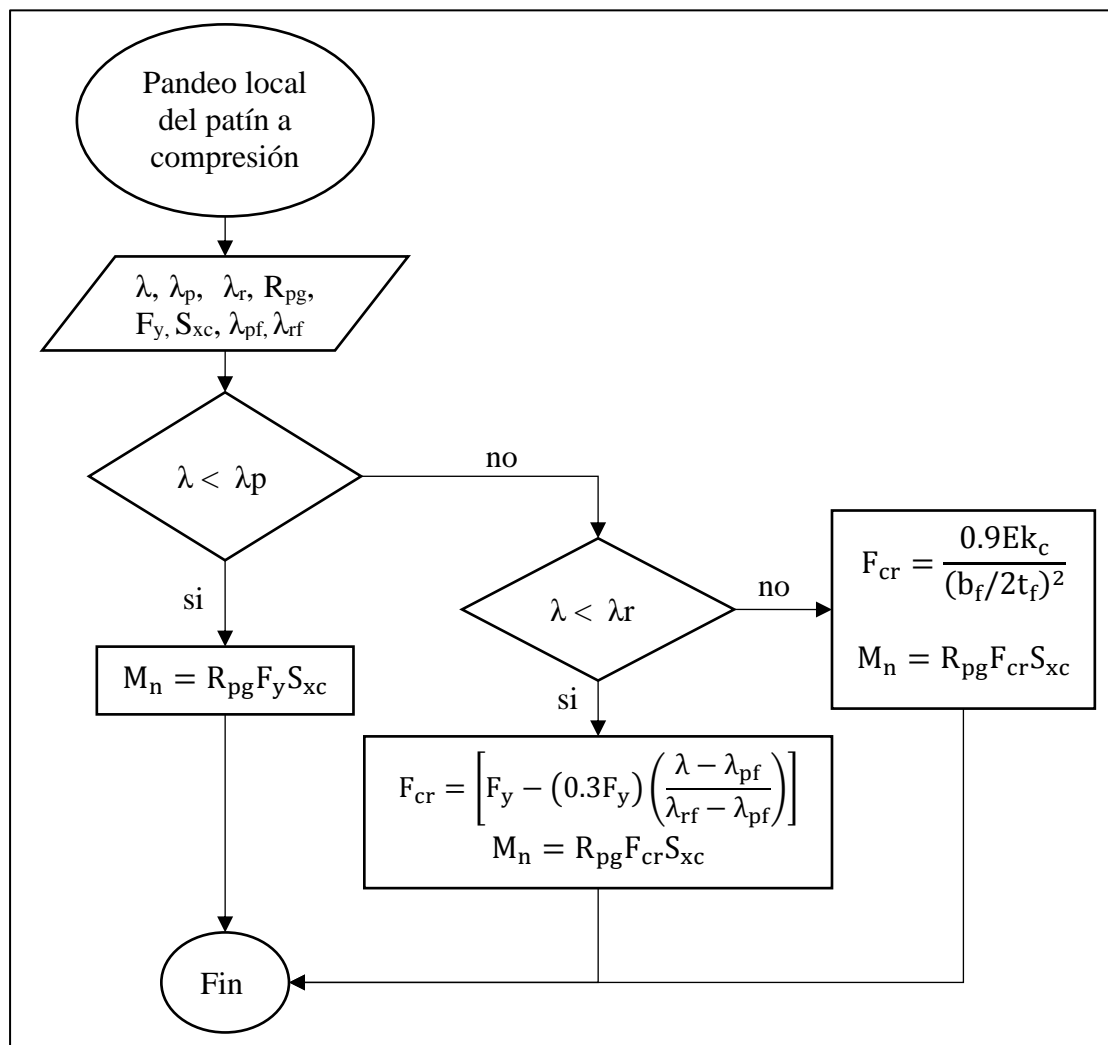
S_{xt} : módulo elástico de la sección en tensión. (mm^3 , in^3)

Figura 48: Pandeo lateral torsional del perfil en I de simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor.



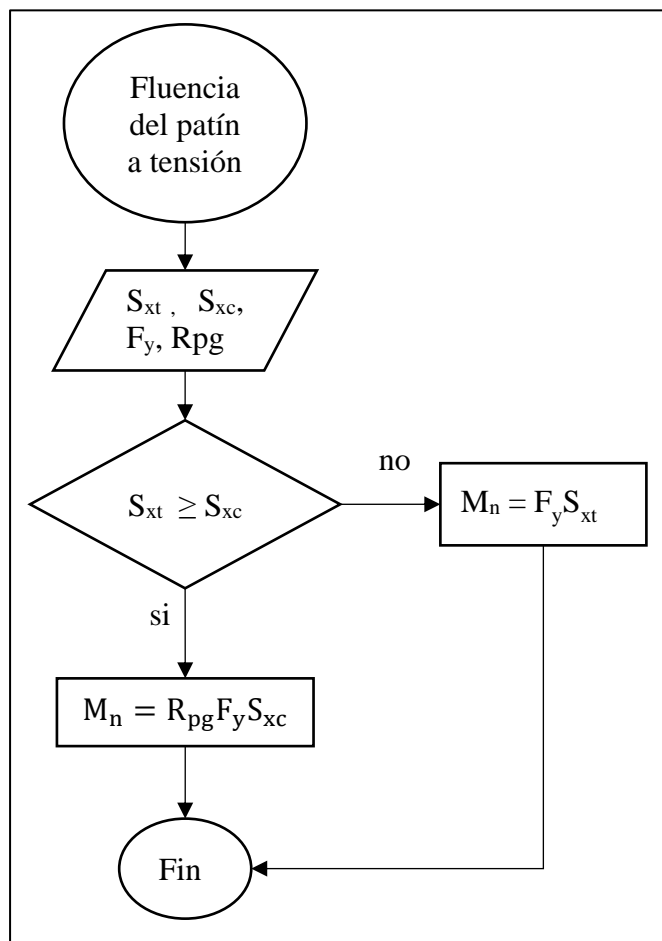
Fuente: Elaboración propia.

Figura 49: Pandeo local del patín a compresión del perfil en I de simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50: Fluencia del patín a tensión del perfil en I de simetría doble con alma esbelta cuando es solicitado a flexión alrededor de su eje mayor.



Fuente: Elaboración propia.

Perfil en I con simetría doble y canales solicitados por flexión alrededor de su eje menor. F.2.6.6

La resistencia nominal a la flexión, cuando esta ocurre alrededor del eje menor, corresponde al menor entre los estados límite de momento plástico y pandeo local del patín.

$$\lambda = \frac{b}{t_f}$$

$$\lambda_p = \lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{E/F_y}$$

$$\lambda_r = \lambda_{rf} = 1.0 \sqrt{E/F_y}$$

λ_{pf} : límite de esbeltez para un patín compacto.

λ_{rf} : límite de esbeltez para un patín no compacto.

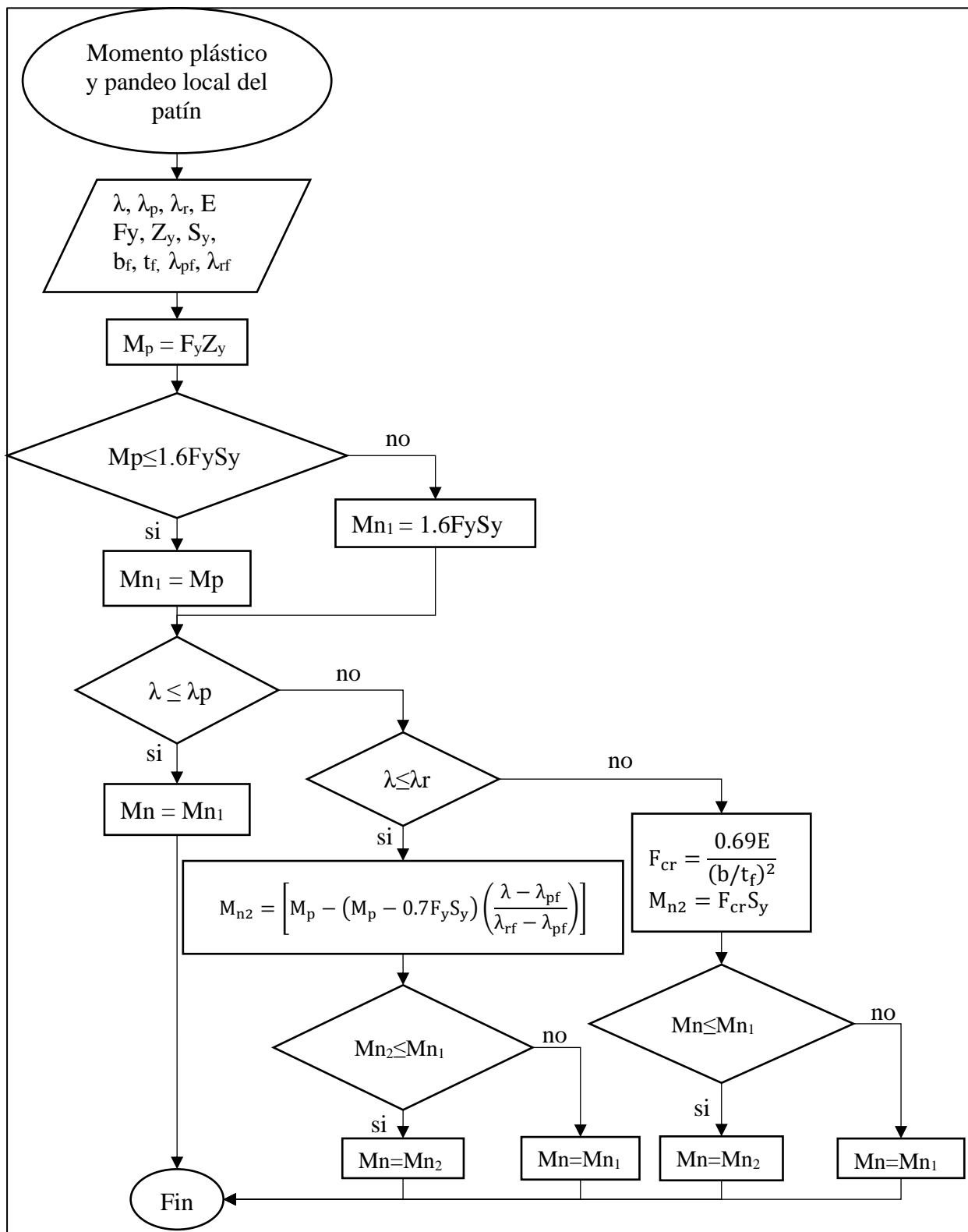
b : para patines de perfiles en I, la mitad del ancho total del patín. b_f para canales corresponde al ancho total del patín (mm, in).

t_f : espesor del patín (mm, in).

S_y : módulo de sección elástico respecto al eje Y. Para canales se tomará como el módulo de sección mínimo. (mm^3 , in^3)

Z_y : módulo plástico de la sección alrededor del eje Y. (mm^3 , in^3)

Figura 51: Momento plástico y pandeo local del patín del perfil en I con simetría doble y canales solicitados por flexión alrededor de su eje menor.



Fuente: Elaboración propia.

Perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares F.2.6.7

La resistencia nominal a la flexión corresponde al menor entre los valores obtenidos para el estado límite de momento plástico, pandeo local del patín y pandeo local del alma bajo flexión pura. La norma NSR 10 no aborda el pandeo lateral torsional porque para perfiles de gran longitud generalmente controla la deflexión de la viga.

En la norma AISC 360 - 16 si se presenta las ecuaciones para determinar el estado límite para pandeo lateral torsional. Las ecuaciones para determinar momento plástico, pandeo local del patín y pandeo local del alma son iguales en las dos normas (NSR 10 y AISC 360-16). A continuación, se presenta las ecuaciones y diagramas de flujo para determinar la resistencia nominal a la flexión de perfiles tubulares estructurales cuadrados y rectangulares.

Plastificación de la sección: el momento plástico se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M_n = M_p = F_y Z$$

Z: módulo plástico sobre el eje de flexión. (mm³, in³)

Pandeo local del patín

S: módulo elástico de la sección alrededor del eje de flexión (mm³, in³)

Se: módulo de la sección efectiva, calculado con el ancho efectivo del patín a compresión. (mm³, in³)

b: ancho del patín en compresión. (mm, in)

b_e: ancho efectivo del patín a compresión. (mm, in)

t: espesor de pared de diseño. (mm, in)

$$b_e = 1.92 \cdot t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left(1 - \frac{0.38}{b/t} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \leq b$$

Relación ancho - espesor y valores límite para aletas de PTE y perfiles en cajón de sección rectangular y espesor uniforme.

$$\lambda = b/t$$

$$\lambda_p = 1.12\sqrt{E/F_y} \quad \lambda_r = 1.4\sqrt{E/F_y}$$

Relación ancho - espesor y valores límite para almas de PTE y perfiles en cajón de sección rectangular

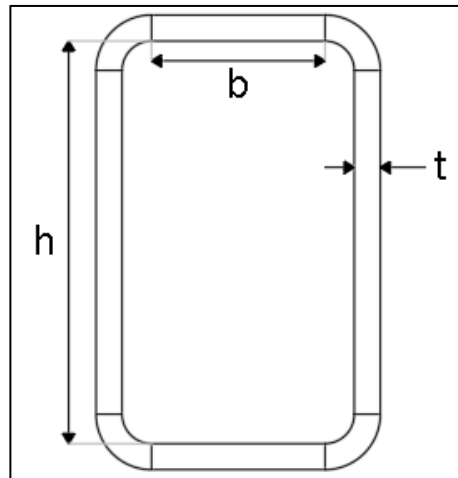
$$\lambda = h/t$$

$$\lambda_p = 2.42\sqrt{E/F_y} \quad \lambda_r = 5.7\sqrt{E/F_y}$$

h: distancia libre entre patines, menos el filete o radio de la esquina. (mm, in)

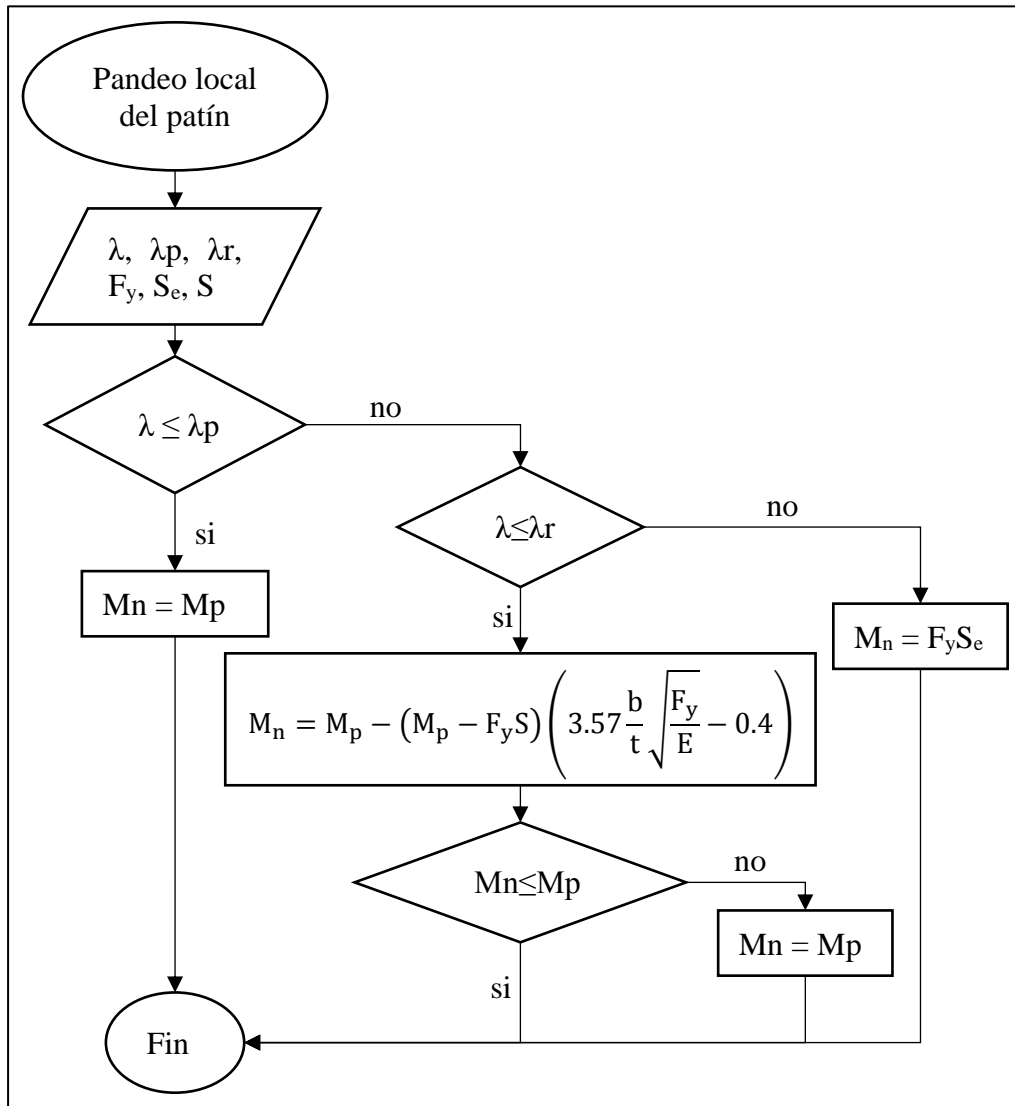
t: espesor del alma. (mm, in)

Figura 52: Sección transversal de un perfil laminado tubular estructural rectangular.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53: Pandeo local del patín para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.



Fuente: Elaboración propia.

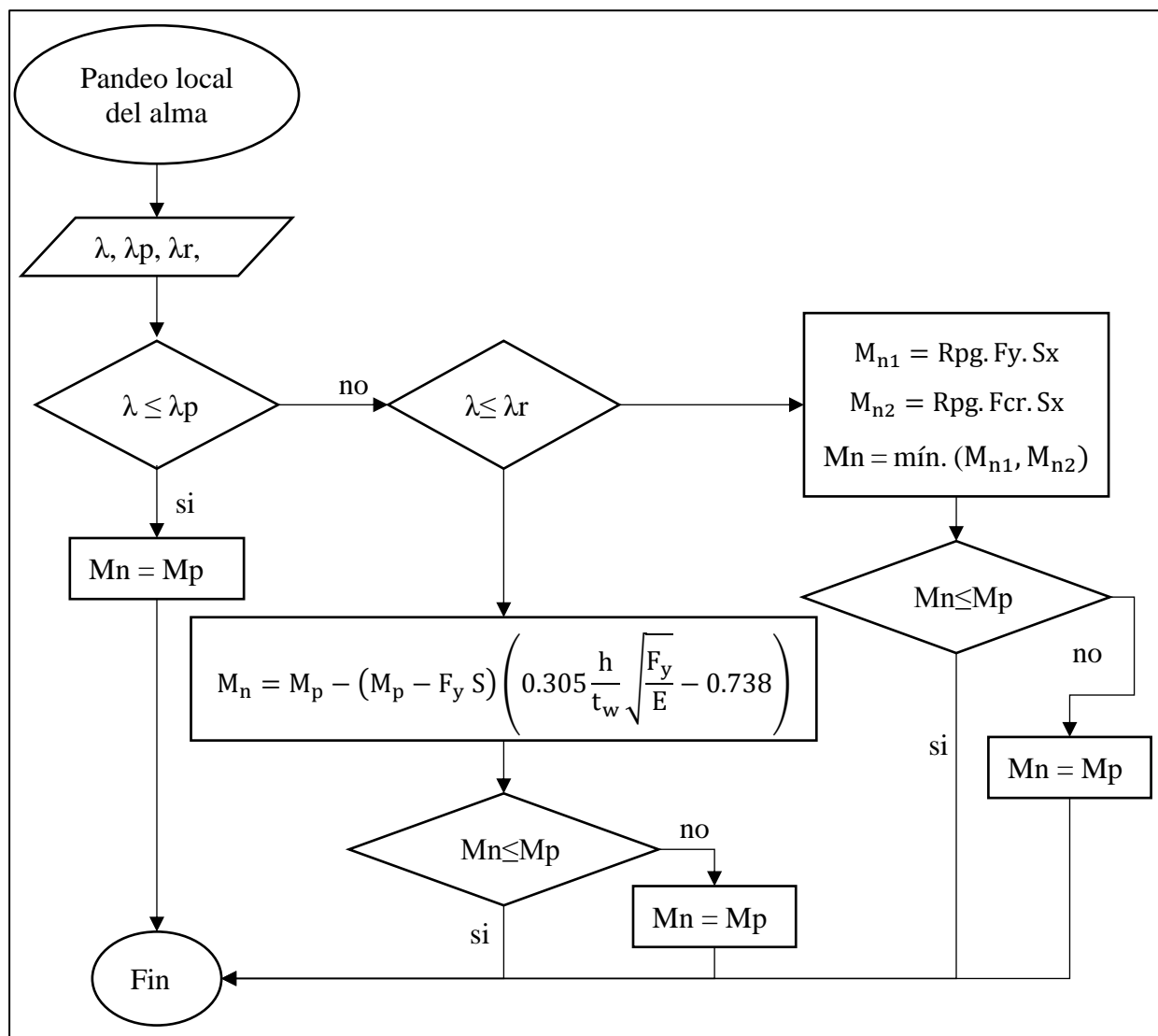
Pandeo local del alma:

$$aw = \frac{2 \cdot h \cdot tw}{b \cdot tf}$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{aw}{1200 + 300aw} \left(\frac{h}{tw} - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \leq 1$$

$$F_{cr} = \frac{0.9 \cdot E \cdot k_c}{\left(\frac{b}{t_f}\right)^2}$$

Figura 54: Pandeo local del alma para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.



Fuente: Elaboración propia.

Pandeo lateral torsional:

El pandeo lateral torsional no se presenta en perfiles tubulares estructurales cuadrados. Tampoco en perfiles rectangulares cuando la flexión es alrededor del eje débil. En los perfiles tubulares estructurales normalmente la deflexión ocurre antes de que se supere el límite de pandeo lateral torsional. Sin embargo, es conveniente analizar el pandeo lateral torsional para secciones

rectangulares con relaciones alto- ancho muy elevada. En este programa se calcula siempre el pandeo lateral torsional para secciones rectangulares cuando la flexión es alrededor del eje fuerte.

$$L_p = 0.13E_r y \frac{\sqrt{J A_g}}{M_p}$$

$$L_r = 2E_r y \frac{\sqrt{J A_g}}{0.7F_y S_x}$$

A_g : área de la sección transversal. (mm^2 , in^2)

L_b : longitud comprendida entre dos puntos que están arriostrados ya sea contra el desplazamiento lateral del patín a compresión o contra la torsión de la sección transversal (mm, in)

E : Módulo de elasticidad del acero: (MPa)

C_b : factor de modificación para pandeo lateral torsional. Se permite tomar conservadoramente un valor de $C_b = 1$.

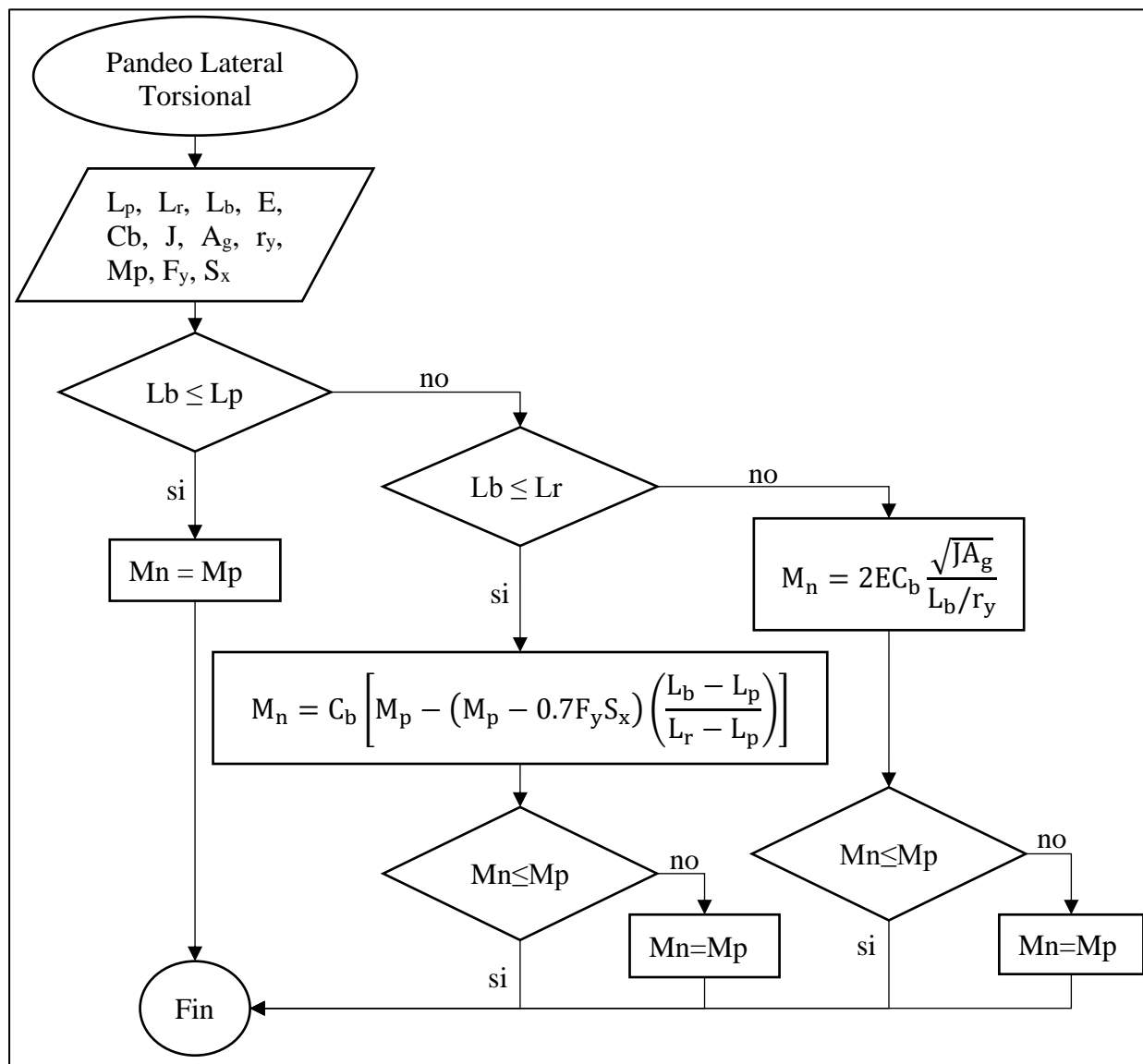
J : constante torsional. (mm^4 , in^4)

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

S_x : módulo elástico de sección alrededor del eje X (mm^3 , in^3)

r_y : radio de giro alrededor del eje Y. (mm, in)

Figura 55: Pandeo lateral torsional para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.



Fuente: Elaboración propia.

Perfiles tubulares estructurales circulares. F.2.6.8

La resistencia nominal a la flexión de perfiles tubulares estructurales circulares corresponde al menor valor entre el momento plástico y pandeo local.

Las ecuaciones que se presentan a continuación solo aplican para perfiles con relación diámetro- espesor (D/t) menores a $0.45E/F_y$.

Plastificación de la sección: el momento plástico se determina con la siguiente ecuación:

$$M_n = M_p = F_y Z$$

$$\lambda = D/t$$

$$\lambda_p = 0.07E/F_y$$

$$\lambda_r = 0.31E/F_y$$

Z: módulo plástico de la sección sobre el eje de flexión X y Y. (mm^3 , in^3)

S: módulo de sección elástico. (mm^3 , in^3)

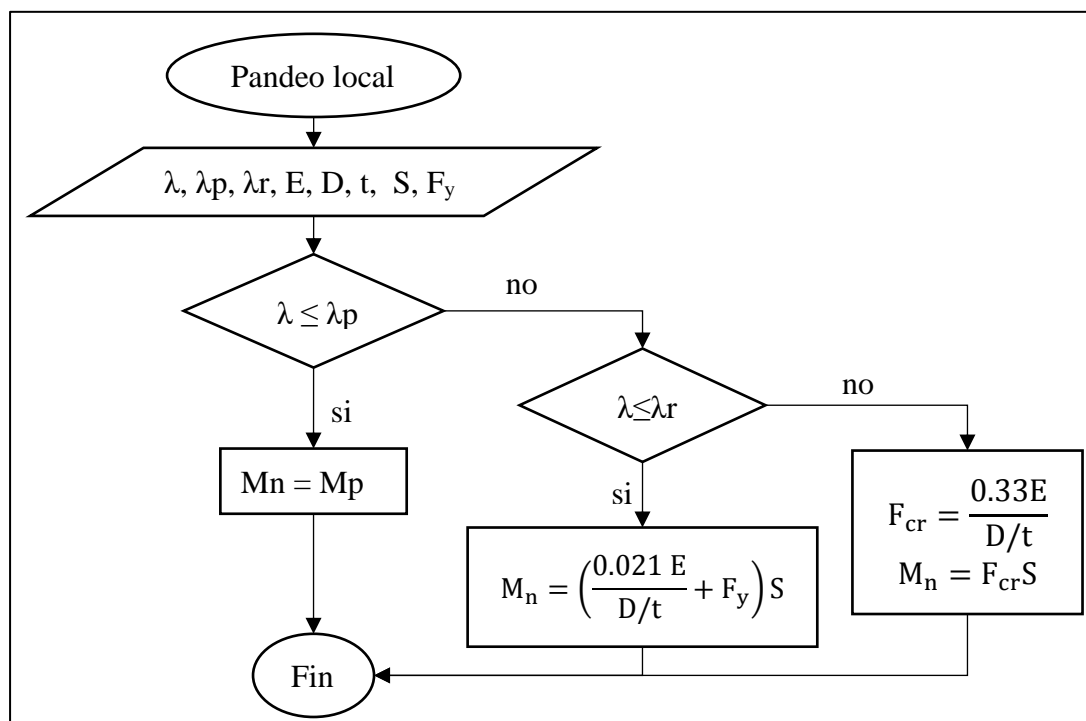
D: diámetro exterior. (mm, in)

t: espesor de la pared. (mm, in)

E: módulo de elasticidad del acero. (MPa)

λ_p y λ_r : valores límite de relación ancho - espesor.

Figura 56: Pandeo local de perfiles tubulares estructurales circulares.



Fuente: Elaboración propia.

Barras rectangulares y barras circulares. F.2.6.11

Momento plástico: para barras rectangulares con $\frac{L_b d}{t^2} \leq \frac{0.08E}{F_y}$ solicitadas por flexión alrededor de su eje mayor, barras rectangulares solicitadas por flexión alrededor de su eje menor y barras circulares:

$$M_n = M_p = F_y \cdot Z \leq 1.6 F_y S$$

Para barras rectangulares solicitadas por flexión alrededor de su eje mayor la resistencia nominal a la flexión corresponde al menor entre los valores de momento plástico y pandeo lateral torsional.

t: ancho de la barra rectangular (dimensión paralela al eje de flexión). (mm, in)

d: peralte de la barra rectangular. (mm, in)

L_b : longitud entre puntos que están arriostrados contra desplazamiento lateral de la zona a compresión o arriostrados contra torsión de la sección transversal. (mm, in)

E: módulo de elasticidad del acero. (MPa)

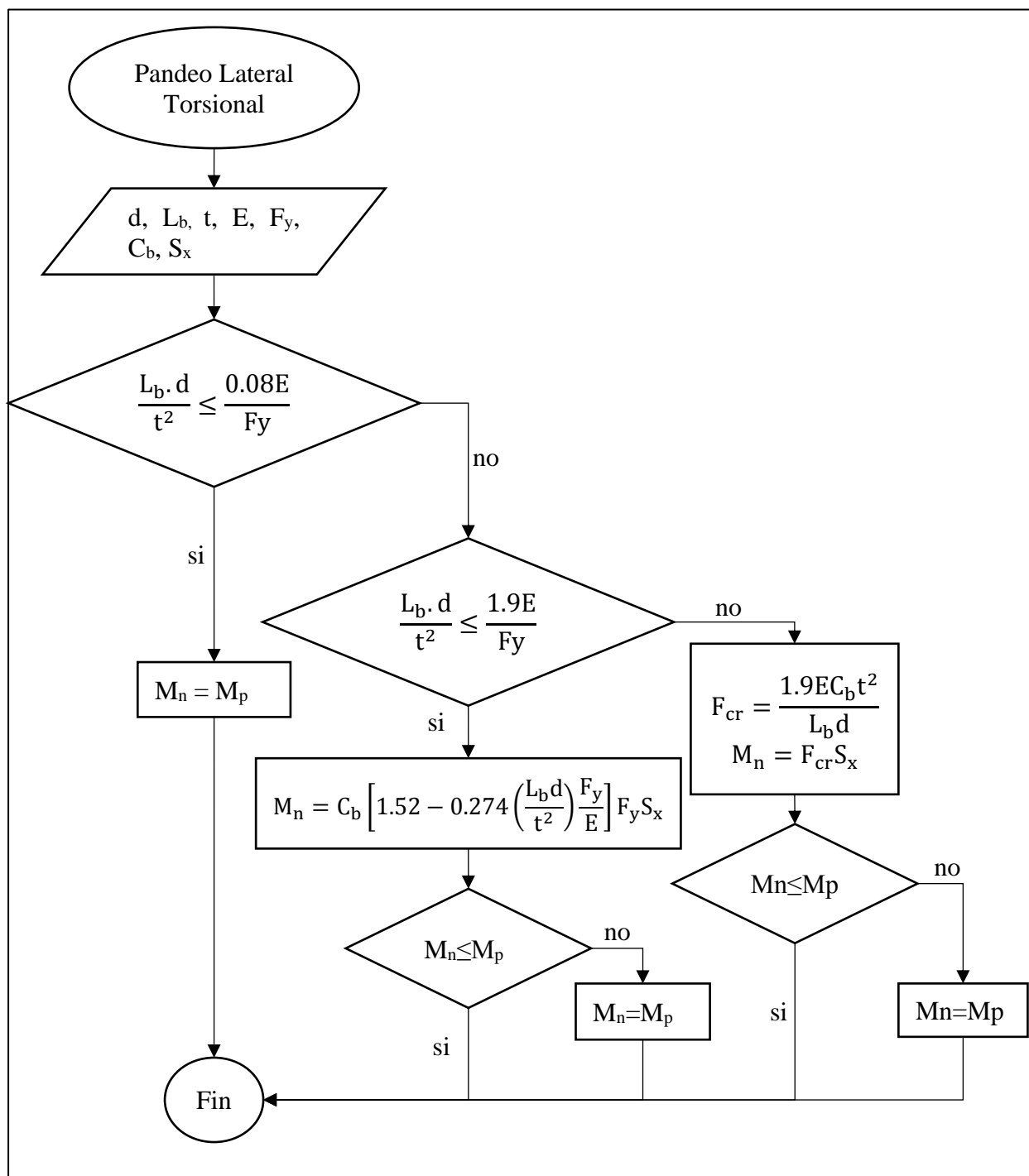
C_b : factor de modificación para pandeo lateral torsional. Se permite tomar conservadoramente un valor de $C_b = 1$.

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

S: módulo elástico de sección alrededor del eje de flexión. (mm^3 , in^3)

Z: módulo plástico de la sección alrededor del eje de flexión. (mm^3 , in^3)

Figura 57: Pandeo lateral torsional de barras rectangulares.

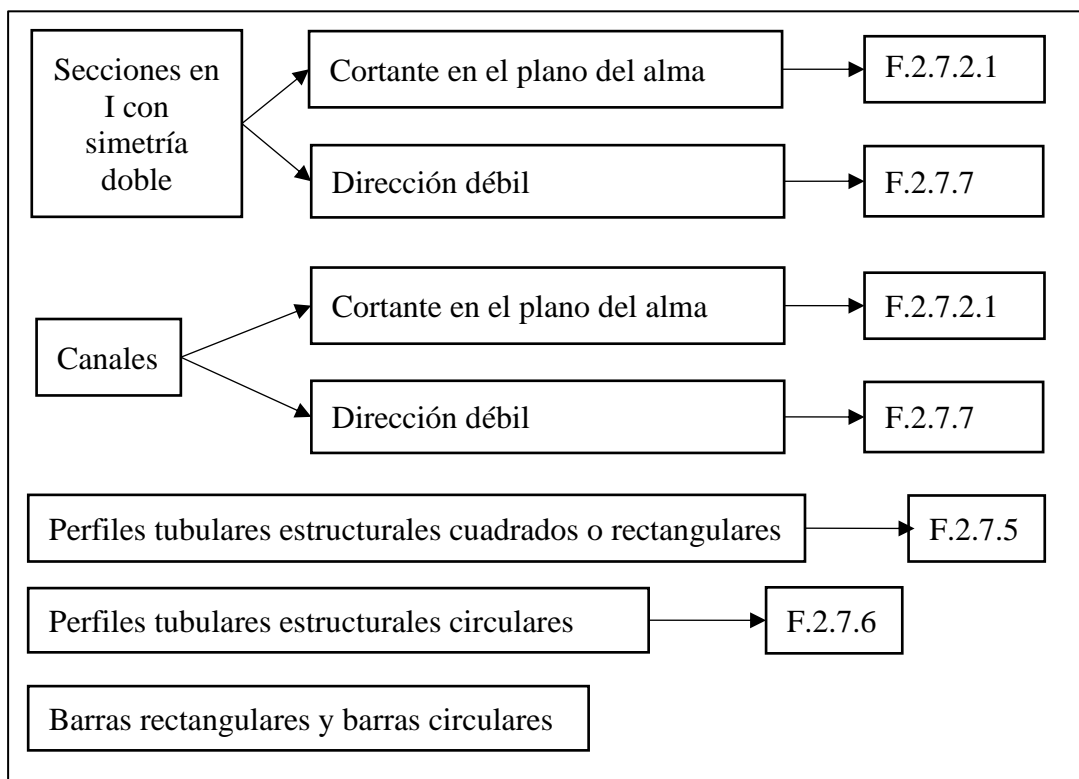


Fuente: Elaboración propia.

Diagramas de flujo para el diseño a cortante

Para determinar la resistencia a cortante de las secciones objeto de diseño, se presenta el siguiente esquema que resume los numerales de diseño aplicables a cada una de ellas.

Figura 58: Artículos de la NSR10 que aplican para el cálculo de la resistencia a cortante de los perfiles laminados en caliente presentados en AIRO correas.



Fuente: Elaboración propia.

E: módulo de elasticidad del acero. (MPa)

t_w : espesor del alma. (mm, in)

h: para perfiles en I y canales, es el peralte del alma, es decir, la distancia libre entre patines menos el radio de la unión alma - patín. Para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares, h corresponde al ancho de la cara que resiste la fuerza cortante, tomado como la distancia libre entre las aletas menos el radio interior de la esquina en cada extremo. Si no se conoce el radio de la esquina, h se tomará como la dimensión exterior correspondiente menos 3 veces el espesor. (mm, in)

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

k_v : coeficiente de pandeo del alma.

C_v : coeficiente de cortante del alma.

ϕ_v : coeficiente de reducción de resistencia para cortante.

A_w : área del alma, producto del peralte de la sección por el espesor del alma. (mm^2 , in^2)

d : peralte de la sección. (mm, in)

a : distancia libre entre rigidizadores transversales. (mm, in)

b_f : para patines de perfiles en I, es la mitad del ancho total del patín. Para canales corresponde a la dimensión total del patín. (mm, in)

t_f : espesor del patín (mm, in)

A_f : área bruta de la sección transversal de un patín. (mm^2 , in^2)

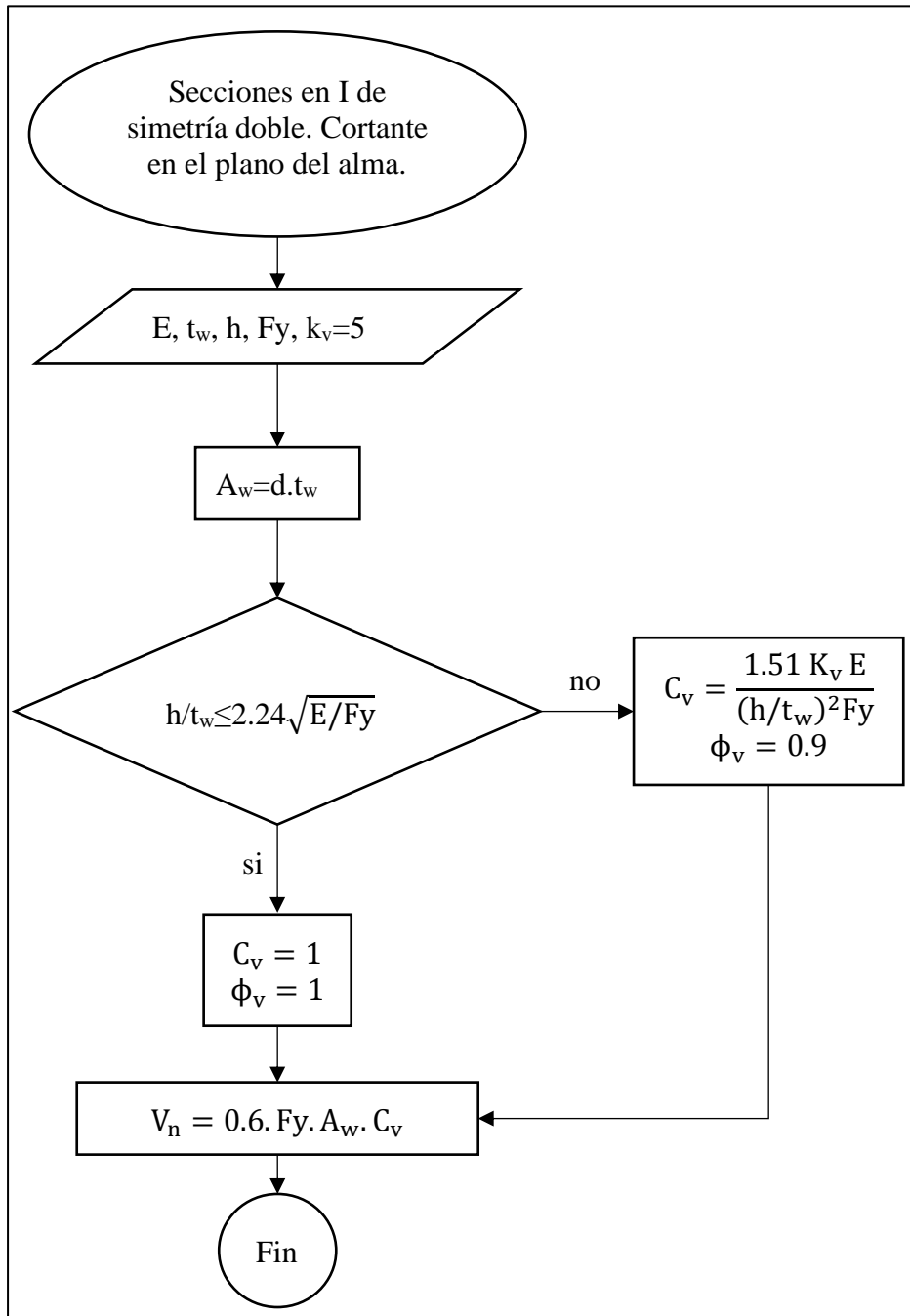
t : espesor de diseño de la pared. (mm, in).

A_g : área bruta de la sección transversal. (mm^2 , in^2)

D : diámetro exterior. (mm, in)

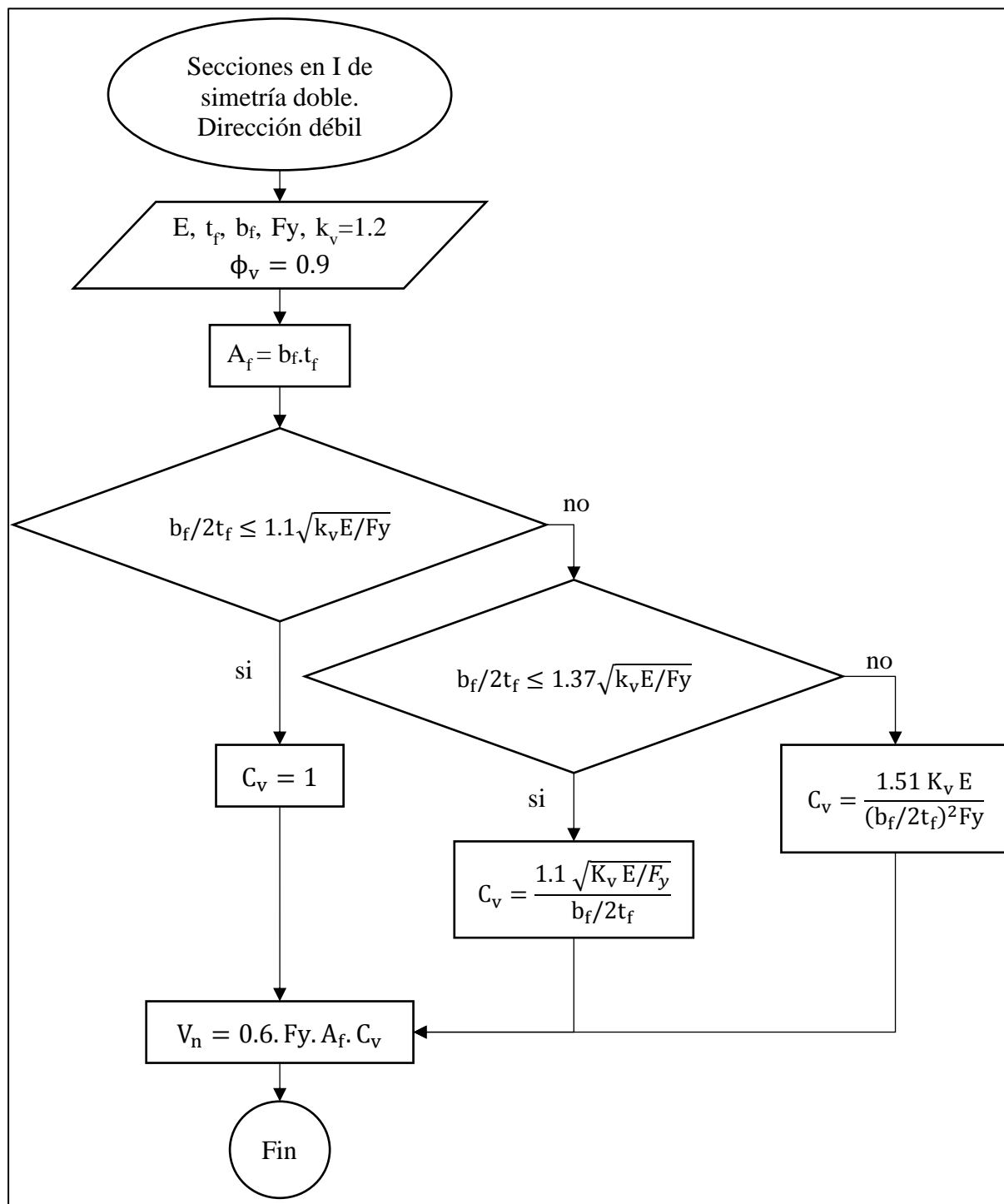
L_v : distancia entre los puntos de fuerza cortante máxima y cortante cero. (mm, in)

Figura 59: Resistencia a cortante de secciones en I de simetría doble, para cortante en el plano del alma.



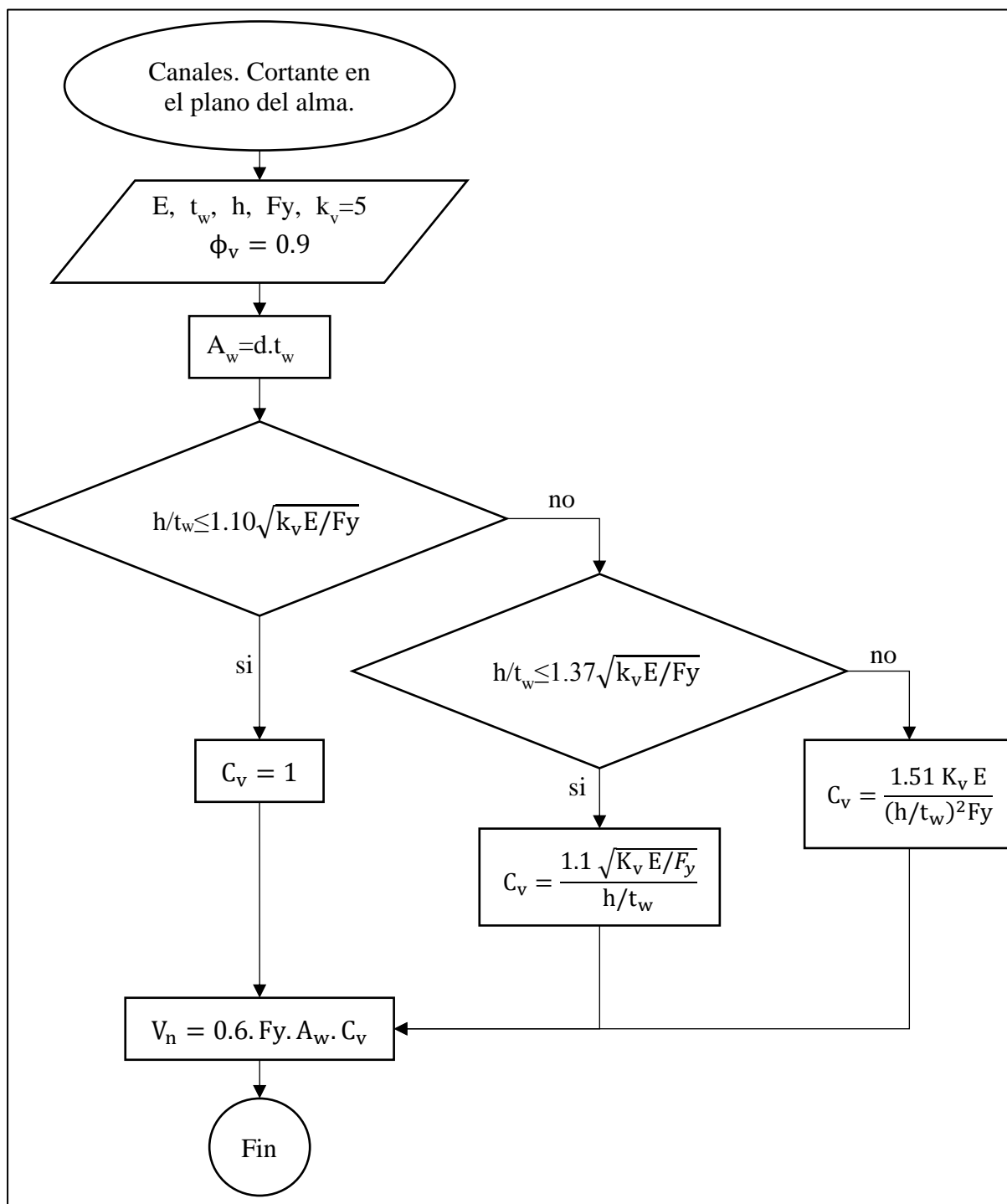
Fuente: Elaboración propia.

Figura 60: Resistencia a cortante de secciones en I de simetría doble, para cortante en la dirección débil.



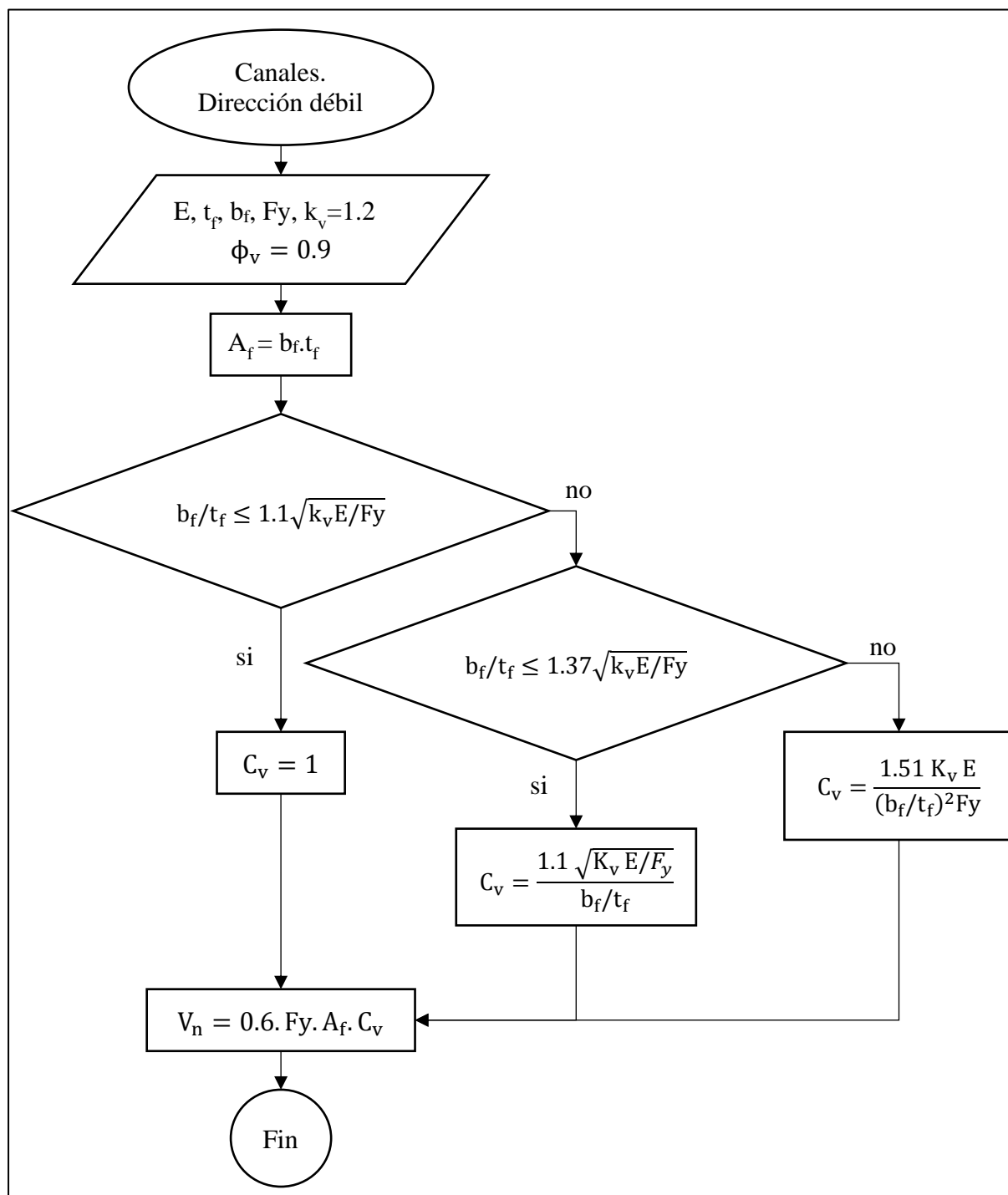
Fuente: Elaboración propia.

Figura 61: Resistencia a cortante de secciones tipo C, para cortante en el plano del alma.



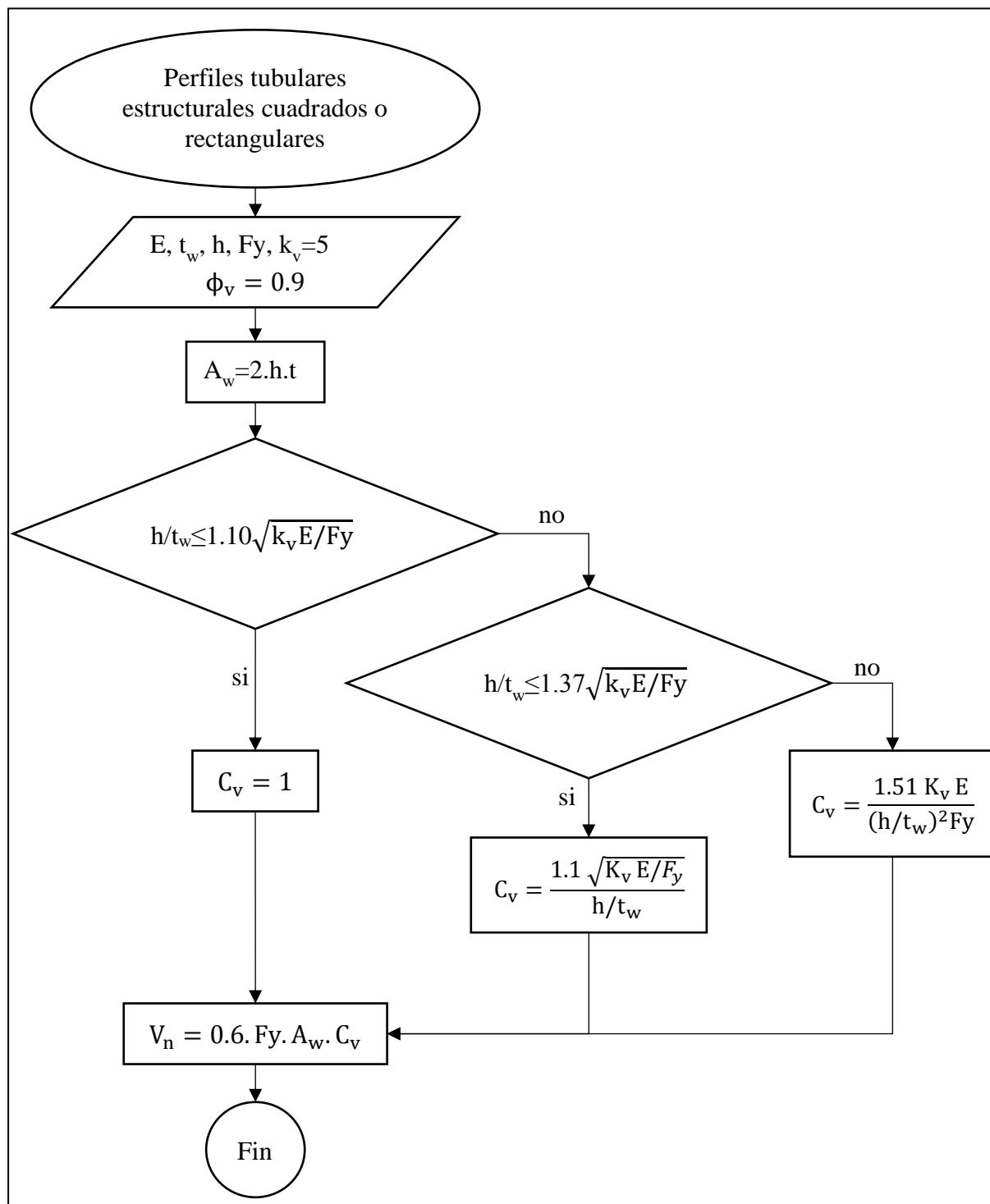
Fuente: Elaboración propia.

Figura 62: Resistencia a cortante de secciones tipo C, para cortante en la dirección débil.



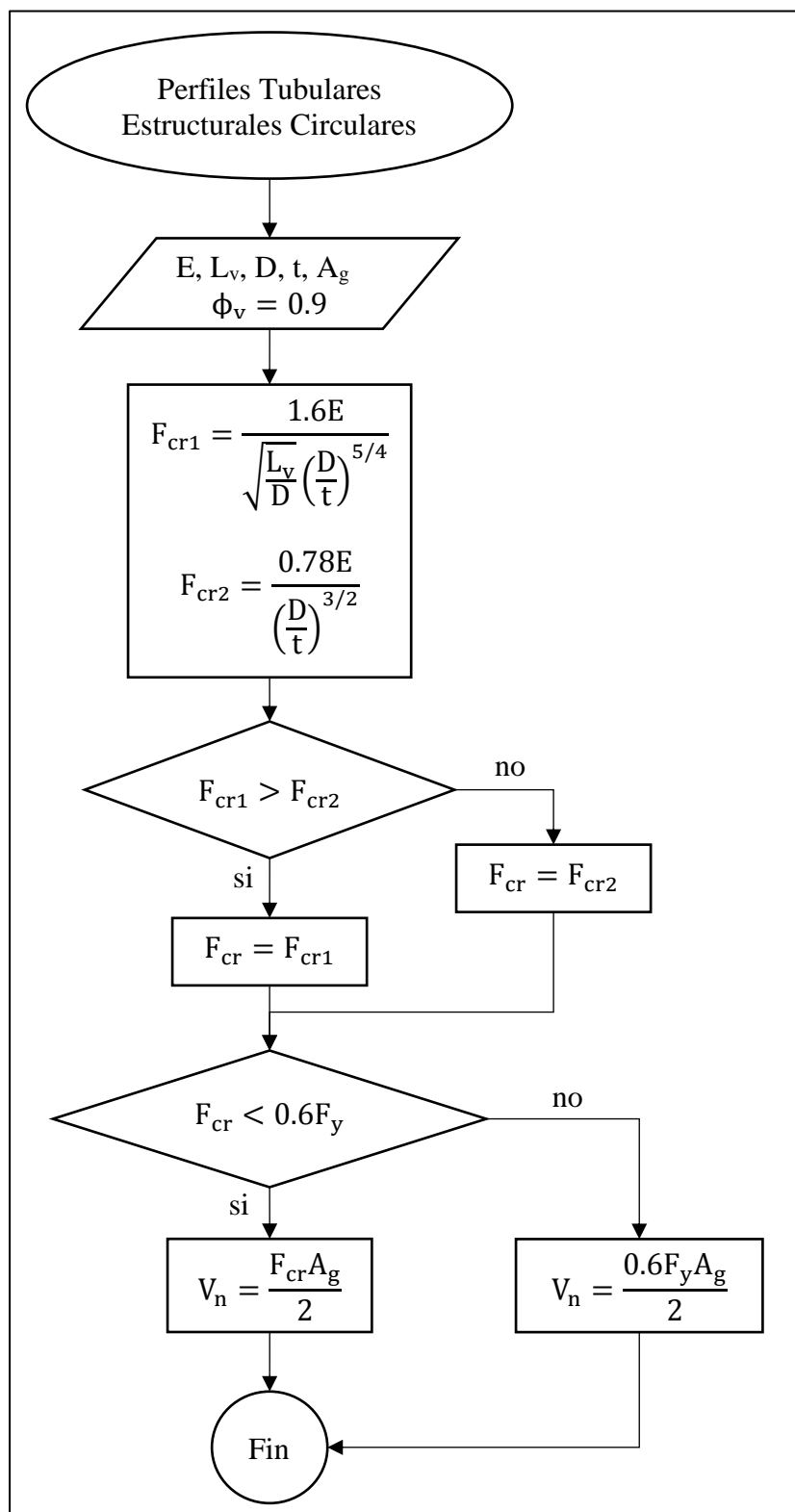
Fuente: Elaboración propia.

Figura 63: Resistencia a cortante para perfiles tubulares estructurales cuadrados o rectangulares.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 64: Resistencia a cortante de perfiles tubulares estructurales circulares.



Fuente: Elaboración propia.

Barras rectangulares y barras circulares:

La resistencia a cortante de las barras rectangulares y circulares se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_v = 0.9$$

$$V_n = 0.6 A_w \cdot F_y$$

Chequeos adicionales

Para miembros de simetría doble o simple solicitados por flexión, la interacción de la flexión alrededor de los ejes geométricos X y Y está limitada por la siguiente expresión matemática:

$$\left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1$$

Donde:

M_{ux}: resistencia requerida a la flexión alrededor del eje X.

M_{uy}: resistencia requerida a la flexión alrededor del eje Y.

M_{nx}: resistencia nominal a la flexión alrededor del eje X.

M_{ny}: resistencia nominal a la flexión alrededor del eje Y.

φ_b: coeficiente de reducción de resistencia para flexión = 0.9

Aplastamiento del alma

Las ecuaciones para el cálculo de la resistencia al arrugamiento del alma se encuentran en F.2.10.10.3 de la NSR10.

Φ:0.75

Cuando $N \geq d/2$

$$R_n = 0.8 * t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot F_y \cdot t_f}{t_w}}$$

Cuando $N < d/2$

Para $N/d \leq 0.2$

$$R_n = 0.4 * t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot F_y \cdot t_f}{t_w}}$$

Para $N/d > 0.2$

$$R_n = 0.4 * t_w^2 \left[1 + \left(4 \frac{N}{d} - 0.2 \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot F_y \cdot t_f}{t_w}}$$

N: ancho del apoyo. (mm, in)

d: peralte del perfil. (mm, in)

t_w : espesor del alma. (mm, in)

t_f : espesor del patín. (mm, in)

E: módulo de elasticidad del acero. (MPa)

F_y : esfuerzo de fluencia del acero. (MPa)

Nota: En los perfiles conformados en frío se realiza el chequeo de flexión y arrugamiento del alma combinados. Para los perfiles laminados en caliente, se desprecia la flexión. Es decir que el chequeo se realiza únicamente para el arrugamiento, como se presenta en el libro “Diseño de estructuras de acero” de Jack Mc.Cormac & Stephen Csernak.

$$\frac{R_u}{\phi R_n} \leq 1$$

Límites de deflexión

Las deflexiones máximas permitidas para miembros de techo, de acuerdo a la Tabla 1604.3 del IBC, son:

Tabla 2: Límites de deflexión.

Miembros	Condiciones de carga		
	L	D + L	W
Miembros de techo que soportan plafón de yeso	$\frac{Lc}{360}$	$\frac{Lc}{240}$	$\frac{Lc}{360}$
Miembros de techo que soportan plafón de un material diferente al yeso	$\frac{Lc}{240}$	$\frac{Lc}{180}$	$\frac{Lc}{240}$
Miembros de techo que no soportan plafones	$\frac{Lc}{180}$	$\frac{Lc}{120}$	$\frac{Lc}{180}$

Fuente: (IBC, 2009)

Lc: longitud de la luz.

L: carga viva.

D: carga muerta.

W: carga de viento.

Nota: Para los perfiles laminados en caliente y para los perfiles conformados en frío, se verifica el cumplimiento de las siguientes expresiones:

$$\frac{V_{uy}}{\phi V_{ny}} \leq 1 \quad \frac{V_{ux}}{\phi V_{nx}} \leq 1$$

V_{uy} : cortante ultimo para flexión alrededor del eje fuerte.

ϕV_{ny} : resistencia a cortante para flexión alrededor del eje fuerte.

V_{ux} : cortante ultimo para flexión alrededor del eje débil.

ϕV_{nx} : resistencia a cortante para flexión alrededor del eje débil.

Fuerza de viento

Nota: La teoría relacionada a la carga de viento para correas que se presenta a continuación fue tomada de la norma NSR10 y la ASCE-7-10.

Se determina la carga de viento mediante el procedimiento analítico. Para aplicar este método se debe cumplir las siguientes condiciones:

- a. La estructura debe ser de forma regular como se define en B.6.2 del título B de la NSR 10.
- b. La estructura no debe tener características de respuesta que den lugar a cargas transversales de viento, generación de vórtices, inestabilidad debida a golpeteo o aleteo
- c. Debido a su ubicación, tampoco deben merecer consideración especial los efectos de canalización o sacudimiento por la estela producida por las obstrucciones a barlovento.

Carga de viento mínima

La carga de viento mínima debe ser de 0.4 kN/m^2 de área de la edificación proyectada a un plano vertical normal a la dirección del viento para cualquier estructura de acuerdo a B.6.1.3.1 del título B de la NSR 10.

Velocidad básica de viento

La velocidad básica de viento se puede tomar de la Figura B.6.4-1 de título B de la NSR10. Excepto en regiones especiales para viento o cuando se estime la velocidad a partir de información climática regional.

Tabla 3: Velocidad de viento básica.

Región	Velocidad del viento			
	Combinaciones de carga de			
	B.2.3		B.2.4	
	m/s	km/h	m/s	km/h
1	17	60	22	75
2	22	80	28	100
3	28	100	35	125
4	33	120	42	150
5	36	130	46	165

Fuente: Título B de la NSR10.

Factor de dirección de viento

Se debe usar este factor únicamente cuando se utilicen las combinaciones B.2.3 y B.2.4 del título B de la NSR 10.

Tabla 4: Factor de direccionalidad del viento K_d .

Tipo de estructura	Factor de direccionalidad del viento K_d
Edificios:	
Sistema principal de resistencia de cargas de viento	0.85
Componentes y recubrimientos	0.85
Cubiertas abovedadas	0.85
Chimeneas, tanques y estructuras similares:	
Cuadradas	0.9
Hexagonales	0.95
Redondas	0.95
Avisos sólidos	0.85
Avisos abiertos y estructura rectangular	0.85
Torres en celosía:	
Triangular, cuadrada y rectangular	0.85
Todas las otras secciones transversales	0.95

Fuente: Adaptado del título B de la NSR10.

Factor de importancia

El factor de importancia debe elegirse de la tabla B.6.5-1 del título B de la NSR10 de acuerdo al grupo de uso de la edificación.

Tabla 5: Factor de importancia.

Categoría	Regiones no propensas a huracanes y regiones con posibilidad de huracanes de $V = 40 - 45$ m/s	Regiones con posibilidad de huracanes y $V > 45$ m/s
I	0.87	0.77
II	1	1
III	1.15	1.15
IV	1.15	1.15

Fuente: Adaptado del título B de la NSR10.

Categoría de exposición

Rugosidad de terreno B: áreas urbanas y sub urbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones del tamaño, iguales o mayores al de una vivienda unifamiliar y con poca separación entre ellas.

Rugosidad de terreno C: terreno abierto con pocas obstrucciones y con alturas inferiores a 9m. Esta categoría incluye campos planos abiertos, praderas y todas las superficies acuáticas en zonas propensas a huracanes.

Rugosidad de terreno D: áreas planas y no obstruidas y superficies acuáticas por fuera de regiones propensas a huracanes. Esta categoría incluye pantanos, salinas y superficies de hielo.

Exposición B

Aplica cuando la rugosidad del terreno B prevalece por una distancia de al menos 800m o 20 veces la altura del edificio, la que sea mayor, en la dirección al viento. Excepto para edificios cuya altura media sea menor o igual a 9m, la distancia de viento arriba puede reducirse a 460 m.

Exposición C

La categoría de exposición C aplicará para todos los casos donde no apliquen las categorías B y D.

Exposición D

La categoría de exposición D aplica cuando la rugosidad del terreno D, prevalece por una distancia mayor a 1500m o 20 veces la altura del edificio, la que sea mayor, en la dirección de barlovento. La categoría de exposición D se extenderá hacia las áreas viento debajo de las rugosidades de terreno B o C por una distancia de 200m o 20 veces la altura de la edificación, la que sea mayor.

Para una edificación que se ubique en una zona de transición entre categorías, se usará la categoría que produzca mayores fuerzas de diseño. Se permite usar una categoría de exposición intermedia entre las categorías anteriores en una zona de transición, siempre y cuando esta se determine con un proceso analítico definido en la literatura reconocida.

Coefficiente de exposición

El coeficiente de exposición K_z , se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para } Z < 4 \text{ m} \quad K_z = 2.01(4/Z_g)^{2/\alpha}$$

$$\text{Para } 4 \text{ m} \leq Z < Z_g \quad K_z = 2.01(Z/Z_g)^{2/\alpha}$$

Z debe ser mayor que 9 m para exposición B.

α y Z_g se deben tomar de la tabla B.6.5-2 del título B de la NSR10.

Para edificios con h menor o igual a Z_{\min} , Z debe tomarse como Z_{\min} .

h : altura media de la estructura (m). Se debe usar la altura a la cornisa si el ángulo de inclinación es menor o igual a 10° .

Z_{\min} : altura mínima de exposición.

Z_g : altura nominal de la capa atmosférica límite.

α : exponente para la ley potencial de la velocidad de ráfaga de 3 seg.

Tabla 6: Constantes de exposición del terreno.

Exposición	α	Z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	l (m)	$\bar{\epsilon}$	Z_{\min}^* (m)
B	7.0	365.8	1/7.0	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.5	1/3	9.0
C	9.5	274.3	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5	4.5
D	11.5	213.4	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.1	1/8	2.0

Fuente: Tabla B.6.5-2 de la NSR10.

Factor topográfico

Aumento de velocidad sobre colinas o escarpes: se debe considerar los efectos de velocidad del viento sobre colinas aisladas o escarpes si se cumplen todas las condiciones siguientes:

- Que la colina o escarpe esté aislada y sin obstrucciones en barlovento, por otros accidentes topográficos de altura cercana a 100 veces su altura ($100H$) o 3 km, la que sea menor. La distancia se debe medir horizontalmente del punto desde el cual la altura H de la loma, colina o escarpe se mide.
- Que la colina o escarpe sobresalga por encima del terreno viento arriba por un factor de 2 o más, dentro de un radio de 3 km.
- Que la estructura esté localizada en la mitad superior de la colina o cerca de la cresta del escarpe como se muestra en la figura B.6.5-1 del título B de la NSR10.
- Que $H/L_h \geq 0.2$
- H es mayor o igual a 4.5m para la exposición C y D. H es mayor o igual a 18 m para la exposición B

$$K_{zt} = (1 + K1. K2. K3)^2$$

Donde K1, K2 Y K3 se determinan como sigue:

Tabla 7: Parámetros para aumento de la velocidad sobre colinas y escarpes.

Forma de la Colina	K ₁ / (H / L _h)			γ	μ	
	Exposición				Hacia barlovento o desde la cresta	Hacia sotavento o desde la cresta
	B	C	D			
Lomas bidimensionales (2D) o valles con H negativa en K ₁ / (H / L _h)	1.30	1.45	1.55	3	1.5	1.5
Escarpes bidimensionales (2D)	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
Colina tridimensional axialsimétrica	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

Fuente: Figura B.6.5-1 de la NSR10.

$$K2 = 1 - \frac{|x|}{\mu L_h}$$

$$K3 = e^{-\gamma z / L_h}$$

Para $H/L_h > 0.5$, suponer que $H/L_h = 0.5$ para la evaluación de K1, y sustituir L_h por $2H$ para la evaluación de K2 y K3.

H: altura de la colina o escarpe referida al terreno ubicado en barlovento (m).

L_h: distancia hacia barlovento medida desde la cresta hasta que la diferencia de elevación del terreno es H/2 (m)

K1: factor que tiene en cuenta las características topográficas y el efecto de máximo aumento de velocidad.

K2: factor que tiene en cuenta la reducción en el aumento de la velocidad con la distancia desde la cresta, a barlovento o sotavento.

K3: factor que tiene en cuenta la reducción en el aumento de velocidad con la altura sobre el terreno local.

x: distancia (a barlovento o sotavento) desde la cresta hasta el lugar del edificio (m).

z: altura sobre el nivel del terreno local (m).

μ : factor de atenuación horizontal.

γ : factor de atenuación en altura

Nota: Si no se cumplen todas las condiciones para considerar el efecto del aumento de velocidad sobre colinas o escarpes: $K_{zt} = 1$

Factor de efecto ráfaga

Estructura rígida

Estructura con frecuencia fundamental mayor o igual a 1 Hz.

$$G = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7 g_Q I_{\bar{z}} Q}{1 + 1.7 g_v I_{\bar{z}}} \right)$$

$$g_Q = g_v = 3.4$$

$$I_{\bar{z}} = c \left(\frac{10}{\bar{z}} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.63 \left(\frac{B + h}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.63}}}$$

$$L_{\bar{z}} = \ell \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}}$$

$I_{\bar{z}}$: intensidad de turbulencia a la altura \bar{z} , donde \bar{z} es la altura equivalente de la estructura definida como $0.6h$, pero no menor a Z_{\min} .

Q : respuesta del entorno.

h : altura media de un edificio o altura de cualquier otra estructura. Se debe usar la altura a la cornisa si el ángulo de inclinación es menor o igual a 10° (m).

B : dimensión horizontal del edificio medido en dirección normal a la dirección del viento, m.

$L_{\bar{z}}$: longitud integral a escala de la turbulencia.

Z_{\min} , c , ℓ y $\bar{\epsilon}$ se toman de la tabla B.6.5-2 del título B de la NSR10.

Estructuras flexibles o dinámicamente sensibles

Estructura esbelta con frecuencia fundamental menor a 1 Hz.

$$G_f = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7 I_z \sqrt{g_Q^2 \cdot Q^2 + g_R^2 \cdot R^2}}{1 + 1.7 g_v I_z} \right)$$

$$g_Q = g_v = 3.4$$

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600 n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600 n_1)}}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)}$$

$$R_n = \frac{7.47 N_1}{(1 + 10.3 N_1)^{5/3}}$$

$$N_1 = \frac{n_1 L_z}{\bar{V}_z}$$

$$\bar{V}_z = \bar{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} \cdot V$$

R_h se calcula así:

$$n = \frac{4.6 n_1 h}{\bar{V}_z}$$

Cuando $n > 0$

$$R_h = \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} (1 - e^{-2n})$$

Cuando $n = 0$

$$R_h = 1$$

R_B se calcula así:

$$n = \frac{4.6 n_1 B}{\bar{V}_z}$$

Cuando $n > 0$

$$R_B = \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} (1 - e^{-2n})$$

Cuando $n = 0$

$$R_B = 1$$

R_L se calcula así:

$$n = \frac{15.4 n_1 L}{\bar{V}_z}$$

Cuando $n > 0$

$$R_L = \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} (1 - e^{-2n})$$

Cuando $n = 0$

$$R_L = 1$$

n_1 : frecuencia natural del edificio.

R: factor de respuesta de resonancia.

β : porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura (0.05).

\bar{V}_z : velocidad de viento promedia por hora a una altura \bar{z} .

V: velocidad básica del viento (m/s).

\bar{b} y $\bar{\alpha}$ son constantes que se encuentran en la tabla B.6.5-2 del título B de la NSR10.

Clasificación del cerramiento

Edificio abierto:

Se define edificio abierto aquella estructura que tiene aberturas de al menos el 80% del área en cada una de las paredes que conforman el cerramiento del edificio (fachadas y cubiertas).

Ao: área total de aberturas en una pared que reciba presión positiva externa, en m².

Ag: área total de la pared que reciba presión positiva externa, en m².

$$A_o \geq 0.8A_g$$

Edificio parcialmente cerrado:

Se deben cumplir las siguientes condiciones:

- a. El área total de aberturas en la pared que recibe presión externa positiva excede por más de 10% a la suma de las áreas de aberturas en el área restante del revestimiento del edificio (paredes y cubierta).

$$A_o > 1.1A_{oi}$$

- b. El área total de aberturas en una pared que soporta cargas positivas, excede de 0.37m^2 o 1% del área de esa pared (la que sea menor) y el porcentaje de aberturas en el área restante del revestimiento del edificio no excede 20%.

$$A_o > 0.37\text{m}^2 \quad \text{o} \quad A_o > 0.01A_g$$

$$A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$$

A_{oi} : la suma de las áreas de aberturas, sin incluir A_o , en el revestimiento del edificio (paredes y cubierta), en m^2 .

A_{gi} : la suma de las áreas brutas, sin incluir A_g , del revestimiento del edificio (paredes y cubierta), en m^2 .

Si por definición un edificio cumple con los parámetros de edificio “abierto” y “parcialmente cerrado”, se clasifica como un edificio “abierto”. Un edificio que no cumpla con las definiciones de edificio “abierto” o “parcialmente cerrado” se clasifica como un edificio “cerrado”.

Presión por velocidad

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I$$

q_z : presión por velocidad (N/m^2)

K_z : coeficiente de exposición.

K_{zt} : factor topográfico.

Kd: factor de direccionalidad de viento.

V: velocidad básica de viento.

I: factor de importancia.

Coefficiente de presión interna

El coeficiente de presión interna GC_{pi} , se determina de la figura B.6.5-2 del título B de la NSR 10 de acuerdo a la clasificación del cerramiento.

Tabla 8: Coeficientes de presión interna.

Clasificación del Cerramiento	GC_{pi}
Edificios Abiertos	0.00
Edificios Parcialmente Cerrados	0.55 -0.55
Edificios Cerrados	0.18 -0.18

Fuente: Figura B.6.5-2.

Nota:

1. El signo positivo y negativo significa presión y succión actuando sobre la superficie interna, respectivamente.
2. Se debe considerar dos casos para determinar los requerimientos de la carga crítica para la condición apropiada:
 - Un valor positivo de GC_{pi} aplicado sobre todas las superficies internas.
 - Un valor negativo de GC_{pi} aplicado sobre todas las superficies internas.

Factor de reducción para edificios de gran volumen: para un edificio parcialmente cerrado que contenga un solo espacio sin particiones, el coeficiente de presión interna, GC_{pi} , se multiplicará por el siguiente factor de reducción, R_i .

$$R_i = 0.5 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_i}{11000A_{og}}}} \right) \leq 1$$

A_{og} : área total de aberturas en el cerramiento del edificio (paredes y cubiertas) (m^2).

V_i : volumen interno sin particiones. (m^3).

Coefficiente de presión externa o coeficiente de fuerza

Las correas hacen parte de los componentes y revestimientos, por tanto, las combinaciones entre coeficientes de presión externa y los factores de efecto ráfaga GC_p para elementos de revestimiento y componentes se presentan en las figuras B.6.5- 8B a B.6.5-13 del título B de la NSR10.

Carga de viento de diseño

Fuerzas de viento de diseño en edificios cerrados o parcialmente cerrados

$$p = q_z \cdot (GC_p - GC_{pi})$$

p : presión de viento de diseño (N/m^2).

q_z : presión por velocidad (N/m^2).

GC_{pi} : coeficiente de presión interna en las figuras B.6.5-2 del título B de la NSR10.

- Edificios bajos y edificios con $h < 18$ m.

GC_p : coeficientes de presión externa especificados en las figuras B.6.5-8 a B.6.5-13 del título B de la NSR10.

- Edificios con $h > 18$ m.

GC_p : coeficientes de presión externa, figura B.6.5-14 del título B de la NSR10.

Edificio bajo: edificio cerrado o parcialmente cerrado que cumpla con las siguientes condiciones:

- a. Altura media de la cubierta (h) menor o igual a 18m.

- b. Altura media de la cubierta (h) no excede la menor dimensión horizontal del edificio.

Cargas de viento de diseño en edificios abiertos con cubierta a una, dos y aguas en artesa

$$p = q_z \cdot G \cdot C_N$$

q_z : presión por velocidad (N/m^2).

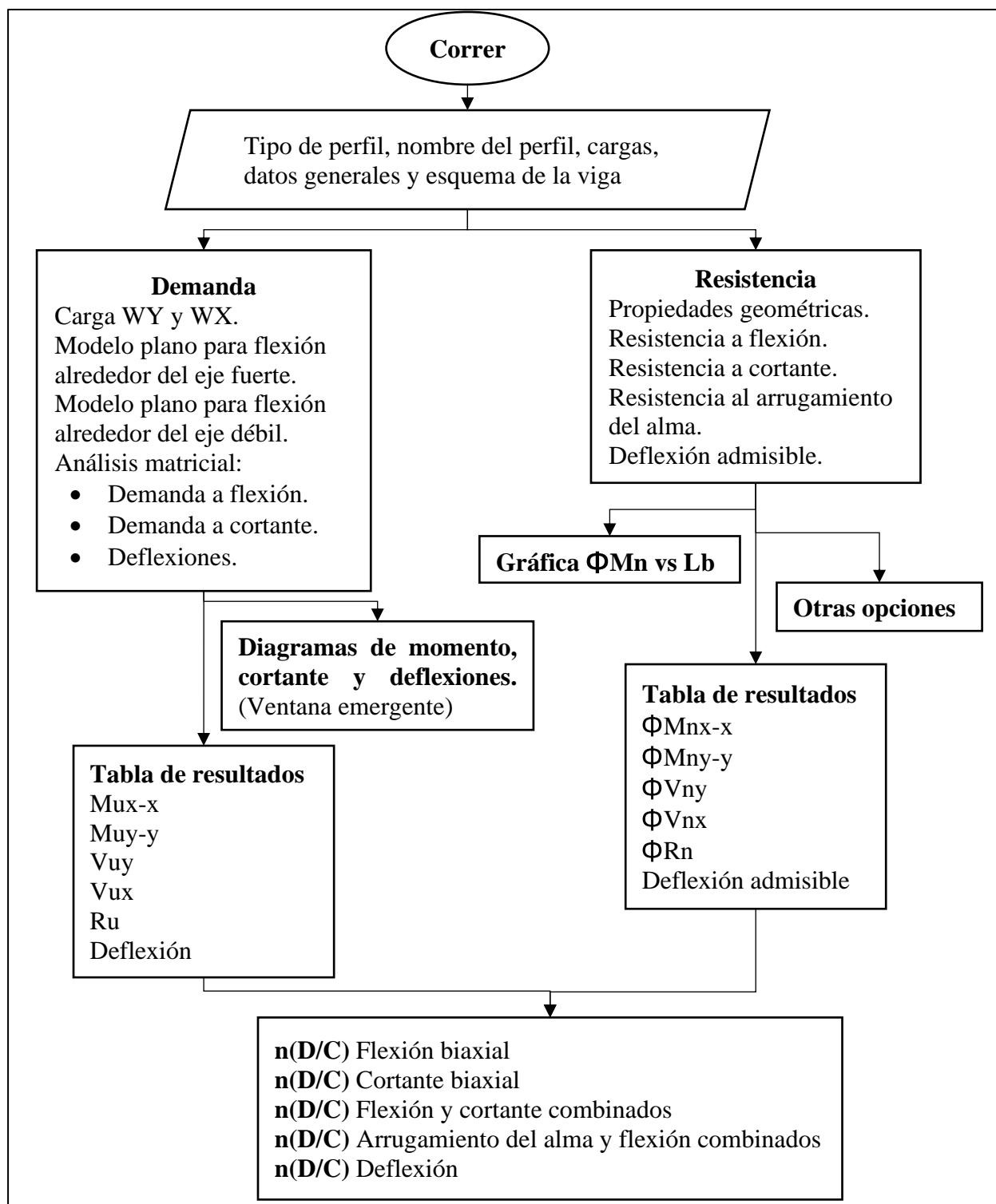
G: factor de efecto ráfaga.

C_N : coeficiente de presión neta determinado de las figuras B.6.5-16A a B.6.5-16C del título B de la NSR10.

FUNCIONES DE AIRO CORREAS

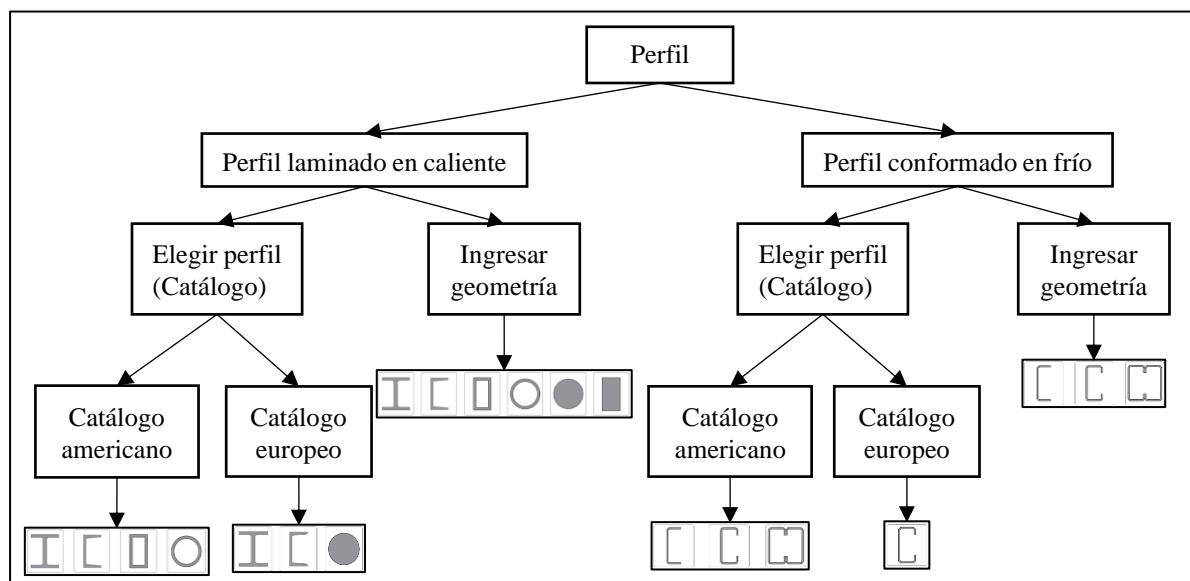
Diagramas de flujo de funciones de AIRO correas

Figura 65: Diagrama de flujo de la función correr en AIRO correas.



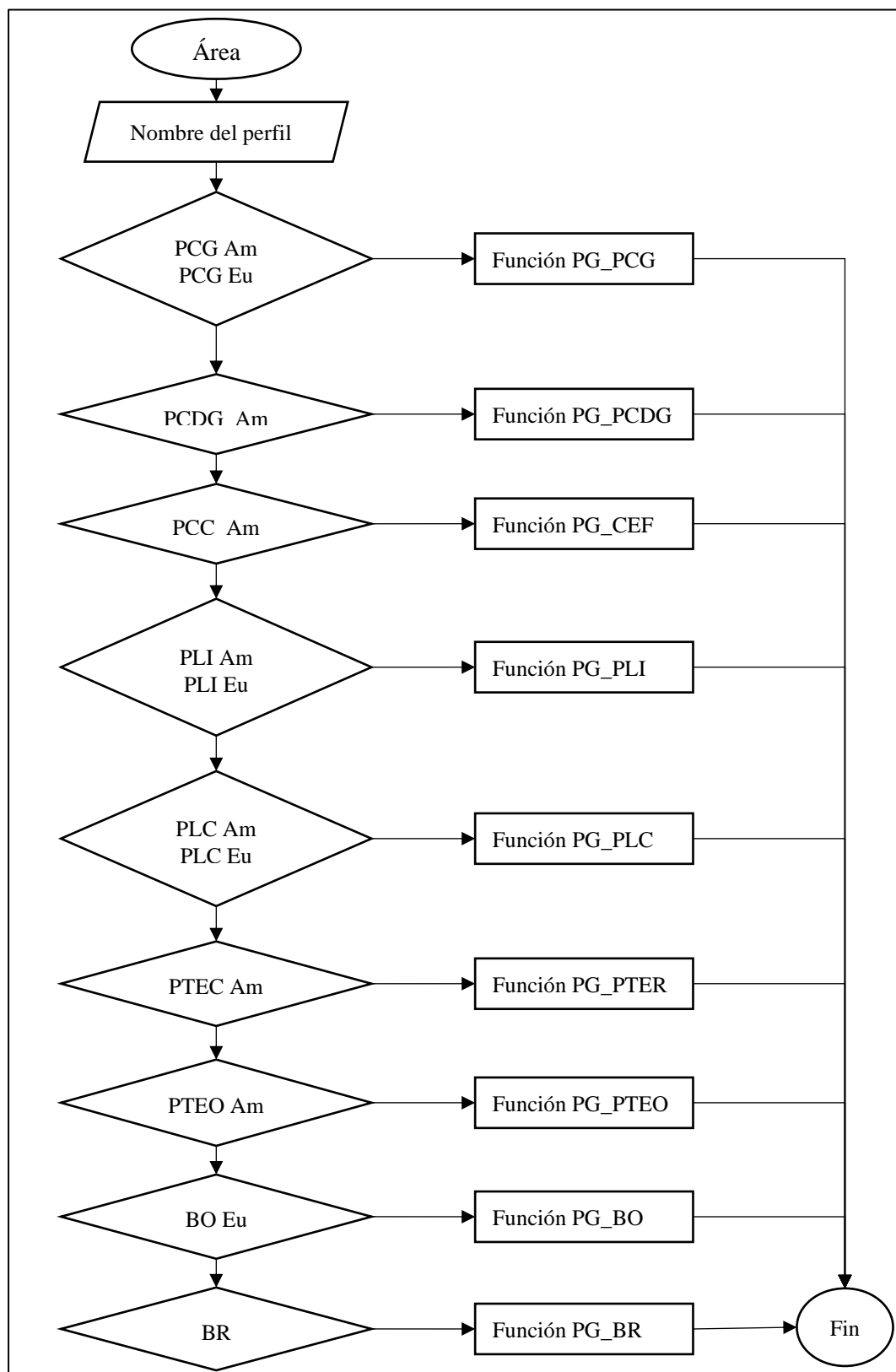
Fuente: Elaboración propia.

Figura 66: Diagrama de flujo de la función perfil en AIRO correas.



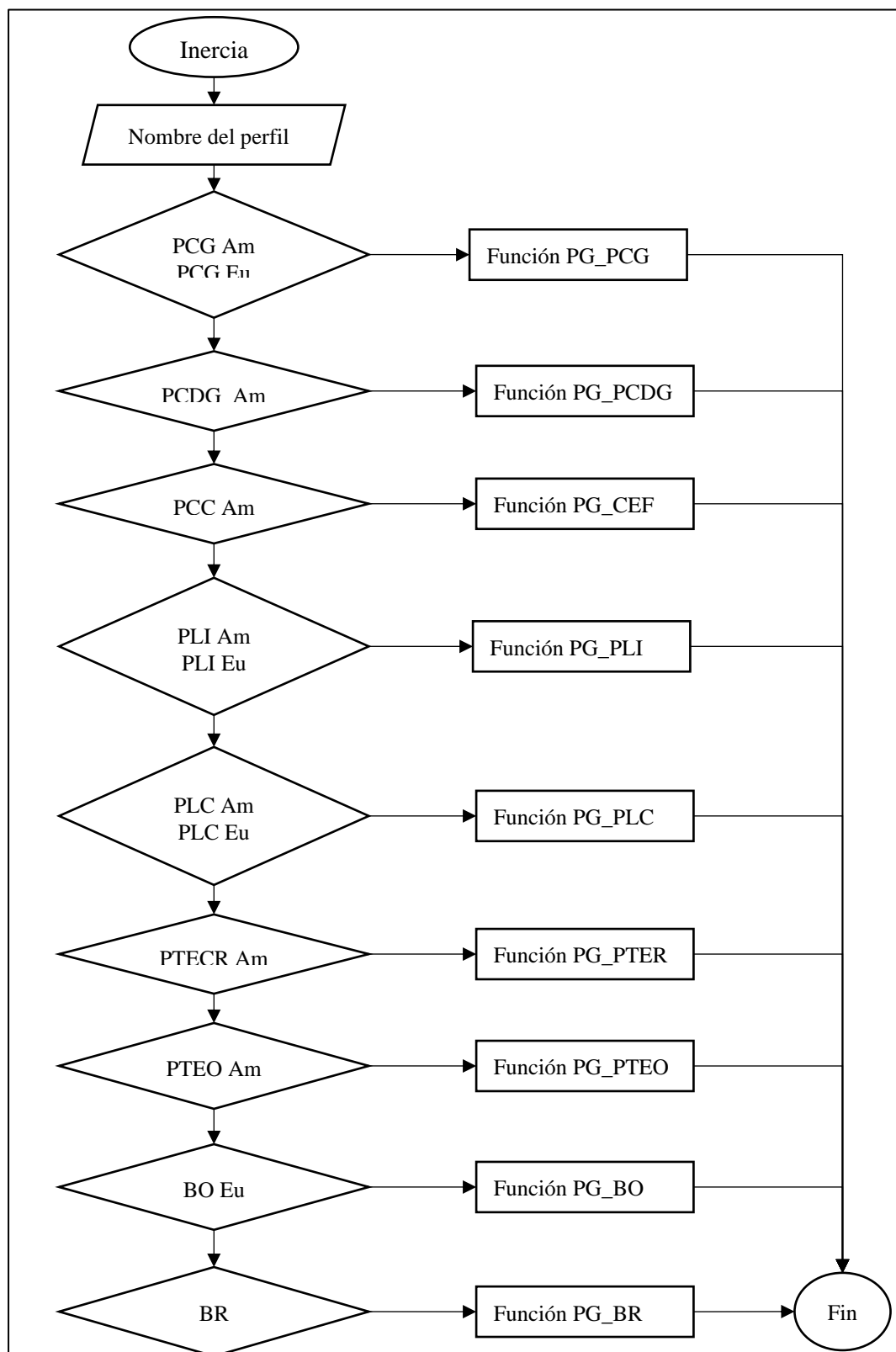
Fuente: Elaboración propia.

Figura 67: Diagrama de flujo de la función Área.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 68: Diagrama de flujo para la función Inercia.



Fuente: Elaboración propia.

PCG Am: perfil conformado en frío tipo G americano.

PCG Eu: perfil conformado en frío tipo G europeo.

PCDG Am: perfil conformado en frío tipo doble G americano.

PCC Am: perfil conformado en frío tipo C americano.

PLI Am: perfil laminado en caliente en I americano.

PLI Eu: perfil laminado en caliente en I europeo.

PLC Am: perfil laminado en caliente en C americano.

PLC Eu: perfil laminado en caliente en C europeo.

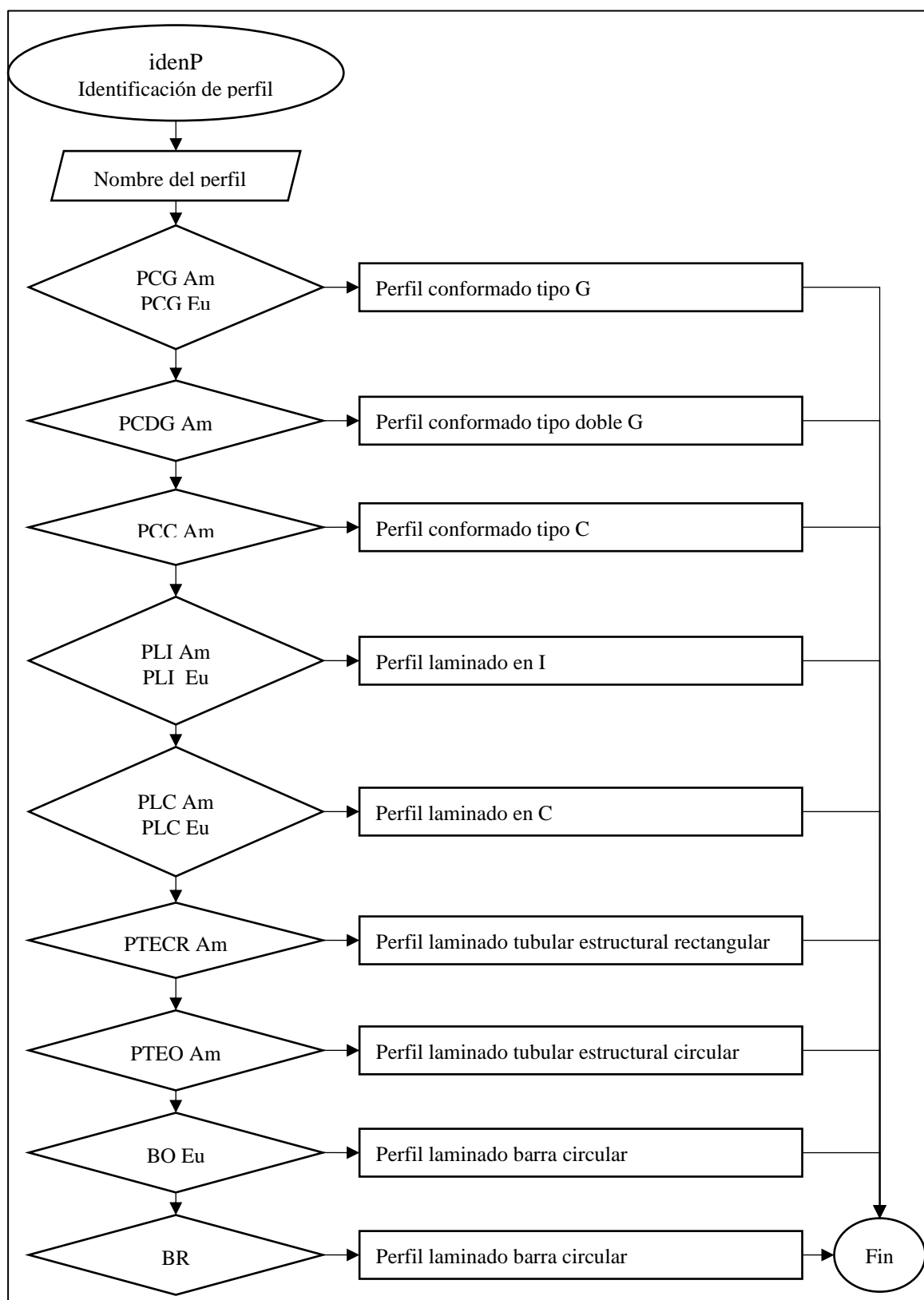
PTECR Am: perfil laminado en caliente tubular estructural cuadrado o rectangular americano.

PTEO Am: perfil laminado en caliente tubular estructural circular americano.

BO Eu: perfil laminado en caliente tipo barra circular europeo.

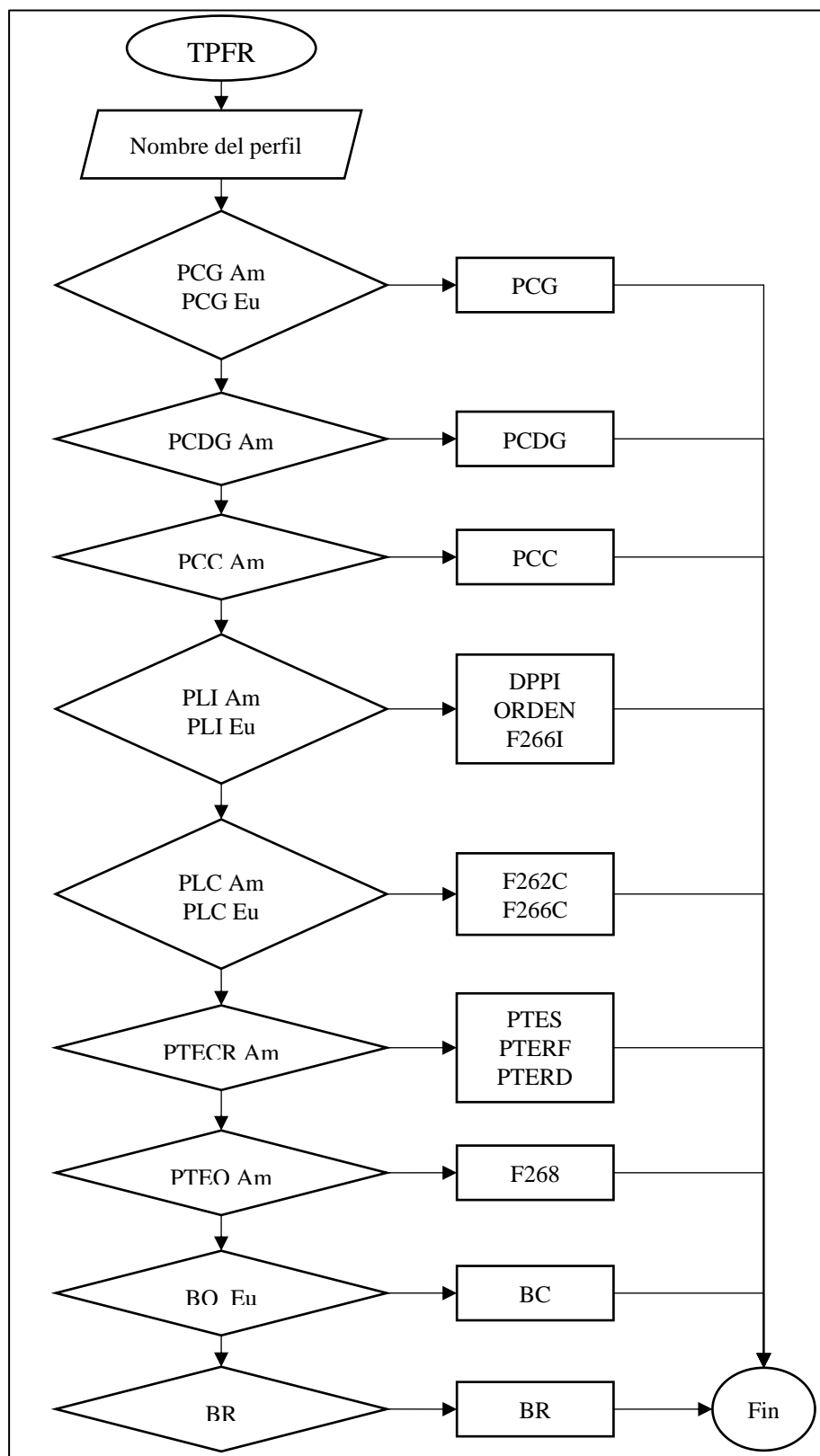
BR: perfil laminado en caliente tipo barra rectangular.

Figura 69: Diagrama de flujo de la función idenP.



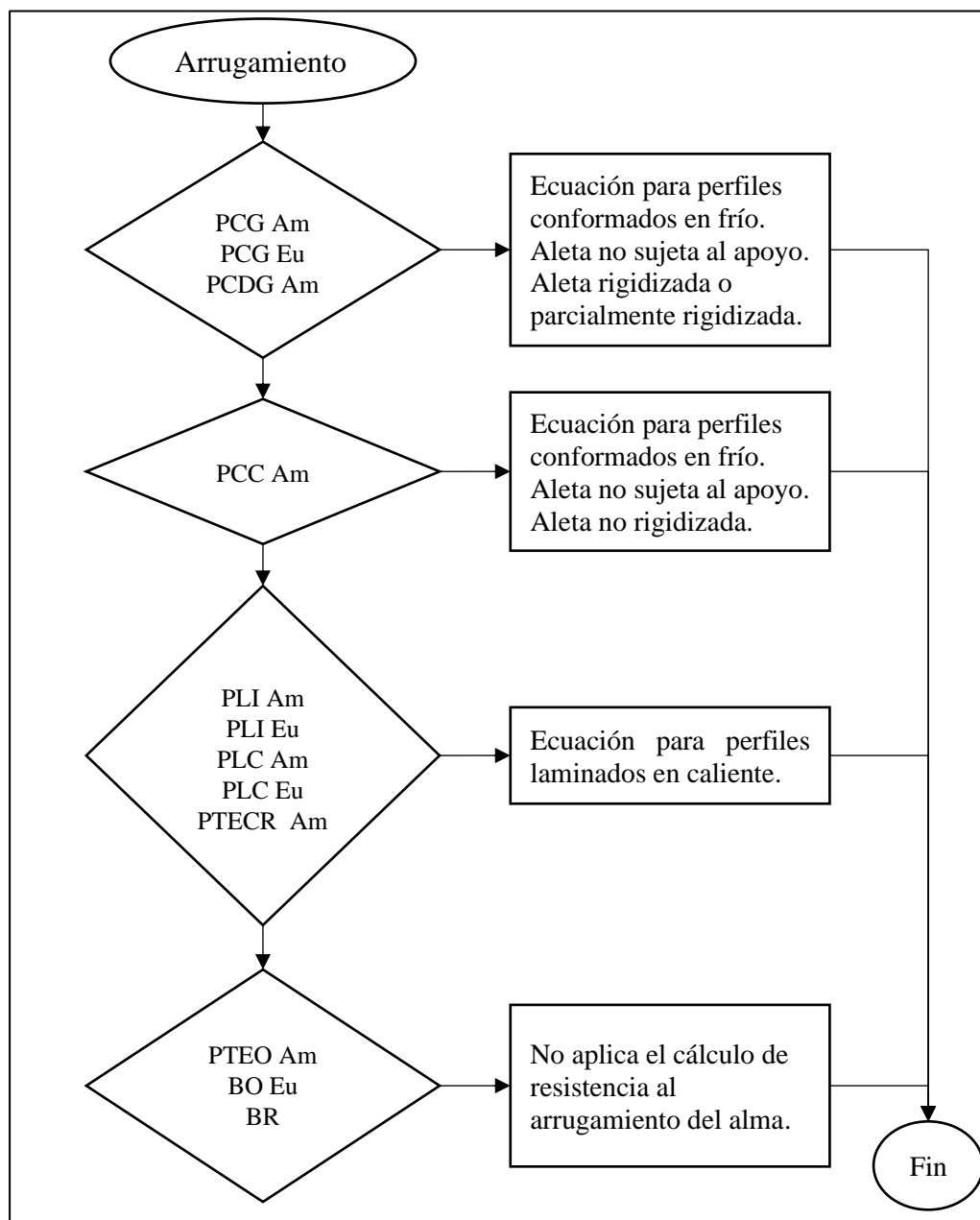
Fuente: Elaboración propia.

Figura 70: Diagrama de flujo de la función TPFER



Fuente: Elaboración propia.

Figura 71: Diagrama de flujo de la función Arrugamiento



Fuente: Elaboración propia.

Glosario de funciones de AIRO correas

AIRO_CORREAS: app principal del software.

ANALISIS: función para realizar el ensamblaje de la matriz total en coordenadas globales, determinar las reacciones en los nudos, los desplazamientos totales, las fuerzas cortantes y los momentos.

Área: esta función asigna a cada label en la app.Nperfil el nombre de la variable geométrica y su valor.

Arrugamiento: función para determinar la resistencia al arrugamiento del alma, tanto para los perfiles conformados en frío como para los laminados en caliente.

ayuda: app del software que se muestra al dar clic en el botón ayuda de la ventana principal.

BC: función para determinar la resistencia a flexión y a cortante de una barra cuadrada.

BRD: función para determinar la resistencia a flexión alrededor del eje débil y la resistencia a cortante de una barra rectangular.

BRF: función para determinar la resistencia a flexión alrededor del eje fuerte y la resistencia a cortante de una barra rectangular.

CEF: función para calcular la resistencia a flexión y la resistencia a cortante alrededor del eje débil y fuerte del perfil conformado en frío tipo C.

CREAR_FTOTALR: función para crear un vector de fuerzas resultantes, asignándolas a cada apoyo.

DatosVigaXY: función para determinar los datos correspondientes al esquema de la viga, por ejemplo: el número y la longitud de las luces, el número y tipo de apoyos, existencia y posición de tensores. Esta función tiene los siguientes elementos de salida: número de barras, número de nudos, número de divisiones, número de grados de libertad totales, matriz de conectividades, matriz con condiciones de apoyo, vector de inercias, vector de coordenadas en X de los nudos, vector de coordenadas en Y de los nudos, vector de cargas y vector de módulo de elasticidad.

DatosVigaXY_cb: función para determinar los datos correspondientes al esquema de la viga, de la misma manera que *DatosVigaXY* pero específicamente para el cálculo de Cb.

DPPI: función para definir qué caso aplicar para calcular la resistencia a la flexión alrededor del eje fuerte de los perfiles en I laminados en caliente.

F262C: función para determinar la resistencia a la flexión y a cortante alrededor del eje fuerte de los perfiles en C según F.2.6.2 de la NSR10.

F262I: función para determinar la resistencia a la flexión y cortante alrededor del eje fuerte de los perfiles en I según F.2.6.2 de la NSR10.

F263: función para determinar la resistencia a la flexión y cortante alrededor del eje fuerte de los perfiles en I según F.2.6.3 de la NSR10.

F264: función para determinar la resistencia a la flexión y cortante alrededor del eje fuerte de los perfiles en I según F.2.6.4 de la NSR10.

F265: función para calcular la resistencia a la flexión y cortante alrededor del eje fuerte de los perfiles en I según F.2.6.5 de la NSR10.

F266I: función para determinar la resistencia a la flexión y cortante alrededor del eje débil de los perfiles en I según F.2.6.6 de la NSR10.

F266C: función para calcular la resistencia a la flexión y cortante alrededor del eje débil de los perfiles en C según F.2.6.6 de la NSR10.

F.2.6.8 función para calcular la resistencia a la flexión y cortante de los perfiles tubulares estructurales circulares laminados en caliente.

FAC: función auxiliar para perfil conformado tipo C. Permite calcular la resistencia del perfil siempre que cumpla con los límites dimensionales.

FADG: función auxiliar para perfil conformado tipo doble G. Permite calcular la resistencia del perfil siempre que cumpla con los límites dimensionales.

FAG: función auxiliar para perfil conformado tipo G. Permite calcular la resistencia del perfil siempre que cumpla con los límites dimensionales.

Fequ: función para establecer el vector de fuerzas equivalentes.

Flabel: función para asignar a cada label en la app.Nperfil el nombre de la variable geométrica y su valor.

idenP: función para identificar el tipo de perfil seleccionado por el usuario.

ImagenP: función para determinar la imagen que representa la forma del perfil de acuerdo al perfil seleccionado.

Inercia: función para asignar a cada label en la app.Nperfil el nombre de la variable geométrica y su valor.

LDPC: función para cacular los límites dimensionales para el perfil conformado tipo C.

LDPDG: función para determinar los límites dimensionales para el perfil conformado tipo doble G.

LDPG: función para determinar los límites dimensionales para el perfil conformado tipo G.

Lista: app de la lista de perfiles que se muestra de acuerdo al tipo de perfil seleccionado.

MEV: función para determinar la matriz elemental de la viga.

Nperfil: app que se presenta como ventana emergente al dar clic en el botón *Mostrar perfil*. Contiene información relacionada con el perfil de diseño, como: forma, tipo, nombre, dimensiones y propiedades geométricas.

Nuevo1: app que se presenta como ventana emergente al dar clic en *Seleccionar perfil*. Contiene 2 opciones: perfil laminado en caliente o perfil conformado en frío.

Nuevo2: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Perfil laminado en caliente* en la ventana *Nuevo 1*. Presenta 2 opciones: Elegir perfil (Catálogo) o Ingresar geometría

Nuevo3: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar *Elegir perfil (Catálogo)* en la ventana *Nuevo 2*. En esta ventana se muestra 2 opciones: Catálogo americano o Catálogo europeo.

Nuevo4: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Catálogo americano* en la app *Nuevo 3*. Muestra la forma de los perfiles laminados en caliente disponibles en el catálogo americano.

Nuevo5: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Catálogo europeo* en la app *Nuevo 3*. Muestra la forma de los perfiles laminados en caliente disponibles en el catálogo europeo.

Nuevo6: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar *Ingresar geometría* en la ventana *Nuevo 2*. En esta app se presentan las formas de los perfiles de los cuales el usuario puede ingresar la geometría para el diseño.

Nuevo7: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Perfil conformado en frío* en la ventana *Nuevo 1*. En esta ventana se presentan dos opciones: Elegir perfil (Catálogo) o Ingresar geometría.

Nuevo8: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar *Elegir perfil (Catálogo)* en la ventana *Nuevo 7*. En esta ventana se muestra 2 opciones: Catálogo americano o Catálogo europeo.

Nuevo9: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Catálogo americano* en la app *Nuevo 8*. Se presentan las formas de los perfiles conformados en frío del catálogo americano disponibles.

Nuevo11: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Ingresar geometría* en la ventana *Nuevo 7*. Se presenta las formas de las cuales el usuario puede ingresar la geometría para el diseño.

Nuevo12: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la opción *Catálogo europeo* en la app *Nuevo 8*. Se presentan las formas de los perfiles conformados en frío disponibles en el catálogo europeo.

NuevoBO: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de una barra circular en la app *Nuevo 6*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil laminado denominado *barra circular*.

NuevoBR: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de una barra rectangular en la app *Nuevo 6*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil laminado denominado *barra rectangular*.

NuevoPCC: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tipo C en la app *Nuevo 11*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil conformado en frío tipo C.

NuevoPCDG: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tipo doble G en la app *Nuevo 11*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil conformado en frío tipo doble G.

NuevoPCG: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tipo G en la app *Nuevo 11*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil conformado en frío tipo G.

NuevoPLC: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tipo C en la app *Nuevo 6*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil laminado *tipo C*.

NuevoPLI: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tipo I en la app *Nuevo 6*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil laminado *tipo I*.

NuevoPLO: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tubular estructural circular en la app *Nuevo 6*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil laminado *tubular estructural circular*.

NuevoPLS: app que se presenta como ventana emergente al seleccionar la forma de un perfil tubular estructural rectangular en la app *Nuevo 6*. En esta ventana el usuario debe ingresar las dimensiones de un perfil laminado *tubular estructural rectangular*.

ORDEN: esta función toma el resultado de “caso” y lo usa para calcular la resistencia a la flexión y a cortante alrededor del eje fuerte del perfil en I.

PCDG: perfil conformado en frío tipo doble G.

PCG: perfil conformado en frío tipo G.

PG_BO: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil laminado barra circular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_BO_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil laminado barra circular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_BR: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil laminado barra rectangular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_BR_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil laminado barra rectangular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_CEF: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil conformado en frío tipo C y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_CEF_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil conformado en frío tipo C y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PCDG: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil conformado en frío tipo doble G y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PCDG_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil conformado en frío tipo doble G y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PCG: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil conformado en frío tipo G y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PCG_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil conformado en frío tipo G y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PLC: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil laminado tipo C y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PLC_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil laminado tipo C y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PLI: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil laminado tipo I y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PLI_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil laminado tipo I y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PTEO: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil laminado tubular estructural circular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PTEO_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil laminado tubular estructural circular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PTER: función para calcular las propiedades geométricas (m^2) del perfil laminado tubular estructural rectangular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PG_PTER_2: función para calcular las propiedades geométricas (in^2) del perfil laminado tubular estructural rectangular y conformar el vector con la información para presentarse en la app Nperfil.

PTERD: función para determinar la resistencia a flexión alrededor del eje débil y la resistencia a cortante de un perfil tubular estructural rectangular laminado en caliente.

PTERF: función para determinar la resistencia a flexión alrededor del eje fuerte y la resistencia a cortante de un perfil tubular estructural rectangular laminado en caliente.

PTES: función para determinar la resistencia a flexión y cortante de un perfil tubular estructural cuadrado.

TPFR: función de casos que asigna el código que se debe usar para calcular la resistencia a flexión y a cortante del tipo de perfil elegido.

VariablesGP: función que genera el vector VGP, donde se encuentran las dimensiones del perfil de diseño.

XnuevoC: función auxiliar para determinar la coordenada en X se la sección efectiva en el cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje fuerte del perfil conformado en frío tipo C.

XnuevoDG: función auxiliar para determinar la coordenada en X se la sección efectiva en el cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje fuerte del perfil conformado en frío tipo doble G.

XnuevoG: función auxiliar para determinar la coordenada en X se la sección efectiva en el cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje fuerte del perfil conformado en frío tipo G.

YnuevoC: función auxiliar para determinar la coordenada en Y se la sección efectiva en el cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje débil del perfil conformado en frío tipo C.

YnuevoDG: función auxiliar para determinar la coordenada en Y se la sección efectiva en el cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje débil del perfil conformado en frío tipo doble G.

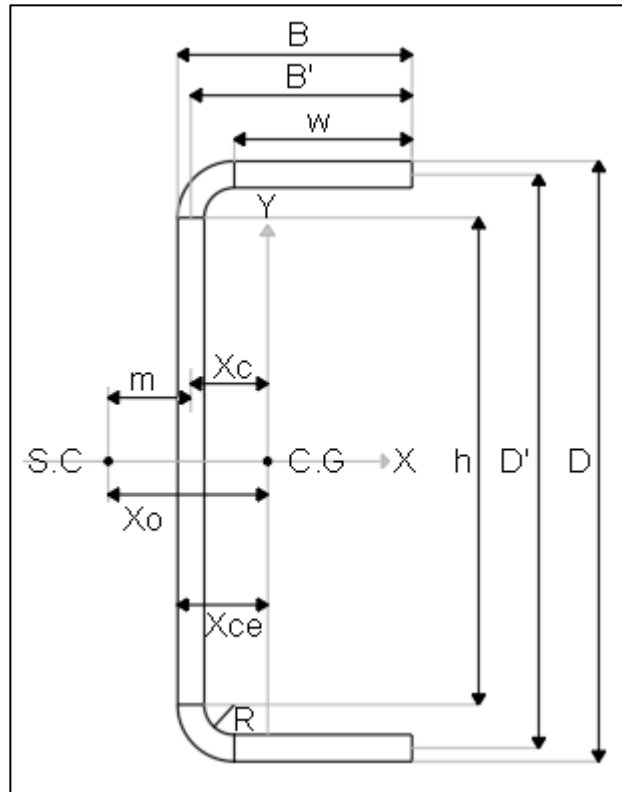
YnuevoG: función auxiliar para determinar la coordenada en Y se la sección efectiva en el cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje débil del perfil conformado en frío tipo G.

EJEMPLOS

Ejemplos de cálculo de resistencia para perfiles conformados en frío

Perfil C

Figura 72: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C del ejemplo de cálculo de resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Perfil 550T125-54 (AISI Manual Cold-Formed Steel Design 2002 Edition, pág. 33)

$$D := 5.698 \text{ in}$$

$$B := 1.25 \text{ in}$$

$$t := 0.0566 \text{ in}$$

$$R := 0.0849 \text{ in}$$

$$F_y := 340 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$G := 77200 \text{ MPa}$$

Parámetros básicos

$$r := R + \frac{t}{2} = 0.113 \text{ in}$$

$$h := D - (2 \cdot r + t) = 5.415 \text{ in}$$

$$D' := D - t = 5.641 \text{ in}$$

$$w := B - \left(r + \frac{t}{2} \right) = 1.109 \text{ in}$$

$$B' := B - \frac{t}{2} = 1.222 \text{ in}$$

$$u := \pi \cdot \frac{r}{2} = 0.178 \text{ in}$$

$$c := 0.637 \cdot r = 0.072 \text{ in}$$

$$A := t \cdot (h + 2 \cdot w + 2 \cdot u) = 0.452 \text{ in}^2$$

$$I_x := 2 \cdot t \cdot \left(0.0417 \cdot h^3 + w \cdot \left(\frac{h}{2} + r \right)^2 + u \cdot \left(\frac{h}{2} + c \right)^2 + 0.149 \cdot r^3 \right) = 1.903 \text{ in}^4$$

$$X_c := \frac{2 \cdot t}{A} \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right) + 0.363 \cdot u \cdot r \right) = 0.187 \text{ in}$$

$$X_{ce} := X_c + \frac{t}{2} = 0.215 \text{ in}$$

$$I_y := 2 \cdot t \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right)^2 + \frac{w^3}{12} + 0.356 \cdot r^3 \right) - A \cdot X_c^2 = 0.053 \text{ in}^4$$

$$m := B' \cdot \left(\frac{3 \cdot D'^2 \cdot B'}{D'^3 + 6 \cdot D'^2 \cdot B'} \right) = 0.345 \text{ in}$$

$$X_o := -(X_c + m) = -0.532 \text{ in}$$

$$J := \frac{t^3}{3} \cdot (h + 2 \cdot w + 2 \cdot u) = 0.00048 \text{ in}^4$$

$$C_w := \frac{D'^2 \cdot B'^2 \cdot t}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot D'^3 \cdot B' + 3 \cdot D'^2 \cdot B'^2}{6 D'^2 \cdot B' + D'^3} \right) = 0.315 \text{ in}^6$$

$$\beta_w := - \left(\frac{t \cdot X_c \cdot D'^3}{12} + t \cdot X_c^3 \cdot D' \right) = -0.161 \text{ in}^5$$

$$\beta_f := \frac{t}{2} \cdot \left((B' - X_c)^4 - X_c^4 \right) + \frac{t \cdot D'^2}{4} \cdot \left((B' - X_c)^2 - X_c^2 \right) = 0.499 \text{ in}^5$$

$$\beta_l := 0$$

$$j := \frac{1}{2 \cdot I_y} \cdot (\beta_w + \beta_f + \beta_l) - X_o = 3.723 \text{ in}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 0.342 \text{ in}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 2.052 \text{ in}$$

$$r_o := \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + X_o^2} = 2.147 \text{ in}$$

$$S_{f_x} := \frac{I_x}{\frac{D}{2}} = 0.668 \text{ in}^3$$

r: radio hasta el eje longitudinal de la esquina o dobléz.

h: ancho plano del alma.

w: ancho plano del patín.

u: longitud efectiva de una esquina. Las esquinas o dobleces se consideran 100% efectivas.

c: distancia desde el punto de origen hasta el centro de gravedad de la esquina.

A: área de la sección transversal.

I_x : momento de inercia alrededor del eje X.

X_c : distancia entre el centroide y el eje del alma.

X_{ce} : distancia entre el centroide de la sección transversal y el lado exterior más alejado del alma.

I_y : momento de inercia alrededor del eje Y.

m: distancia entre el centro de cortante y el eje del alma. Toma un valor negativo para indicar que se encuentra al lado izquierdo del eje del alma.

X_o : distancia entre el centroide y el centro de cortante.

J: constante torsional de St. Venant.

C_w : constante de torsión o alabeo.

j: parámetro usado en la determinación del momento elástico crítico.

r_y : radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal Y.

r_x : radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal X.

r_o : radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de cortante.

S_{fx} : módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión, para flexión alrededor del eje X.

Límites y consideraciones dimensionales

Relación máxima ancho plano - espesor del patín

El patín es un elemento a compresión no rigidizado, por tanto, la relación w/t debe ser menor o igual que 60.

$$\frac{w}{t} = 19.58$$

$$\frac{w}{t} \leq 60$$

Cumple

Relación altura - espesor del alma

El alma no está reforzada, por tanto, la relación h/t debe ser menor o igual que 200.

$$\frac{h}{t} = 95.67$$

$$\frac{h}{t} \leq 200$$

Cumple

Anchos efectivos para flexión alrededor del eje X

Ancho efectivo del patín

El ancho efectivo del patín se determina de acuerdo al diagrama de flujo para elementos no rigidizados bajo compresión uniforme.

f: esfuerzo en el patín a compresión. En la primera iteración se considera el alma totalmente efectiva, por tanto, el eje neutro coincide con el C.G. lo que permite asumir f igual a Fy.

k: coeficiente de pandeo de placa.

μ : relación de Poisson del acero.

λ : factor de esbeltez.

ρ : factor de reducción.

be: ancho efectivo del patín.

$$f := Fy = 340 \text{ MPa}$$

$$k := 0.43$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2 = 202.65 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 1.3$$

Como λ es mayor que 0.673

$$\rho := \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} = 0.641$$

$$be := \rho \cdot w = 0.71 \text{ in}$$

Ancho efectivo del alma

El alma es un elemento sometido a gradiente de esfuerzos. Por ello se usa el diagrama de flujo para alma bajo gradiente de esfuerzos. En la primera iteración se considera el alma como totalmente efectiva, por tanto, el eje neutro coincide con el C.G. lo cual permite asumir que f_1 y f_2 son iguales.

Para determinar los esfuerzos f_1 y f_2 se realiza una semejanza de triángulos

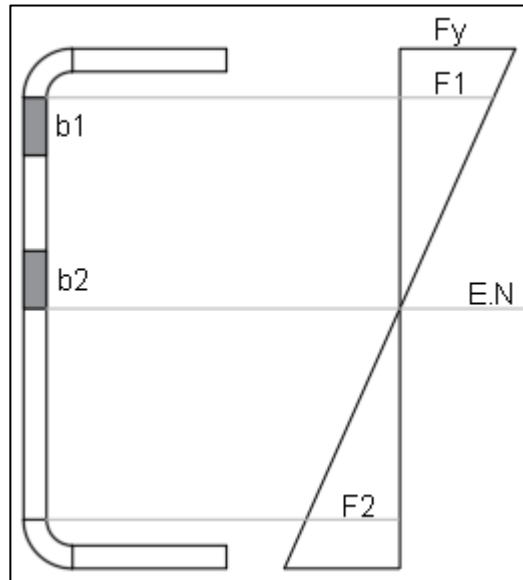
$$f_1 := \frac{F_y \cdot \frac{h}{2}}{\frac{D}{2}} = 323.11 \text{ MPa}$$

$$f_2 := f_1$$

f_1 : esfuerzo en compresión.

f_2 : esfuerzo en tensión.

Figura 73: Ancho efectivo del alma del ejemplo de perfil conformado en frío tipo C.



Fuente: Elaboración propia.

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 473.97 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.83$$

Como λ es mayor que 0.673

$$\rho := \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} = 0.888$$

$$b_e := \rho \cdot h = 4.81 \text{ in}$$

$$h_o := D = 5.698 \text{ in}$$

$$b_o := B = 1.25 \text{ in}$$

be: ancho efectivo del alma.

ho: altura del alma medida entre bordes exteriores.

bo: ancho del patín en compresión medido entre bordes externos.

$$\frac{h_o}{b_o} = 4.56$$

Como la relación ho/bo es mayor que 4

$$b1 := \frac{be}{3 + \Psi} = 1.203 \text{ in}$$

$$b2 := \frac{be}{1 + \Psi} - b1 = 1.203 \text{ in}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de b1 y b2

$$b1 + b2 = 2.405 \text{ in}$$

Ancho a compresión disponible del alma

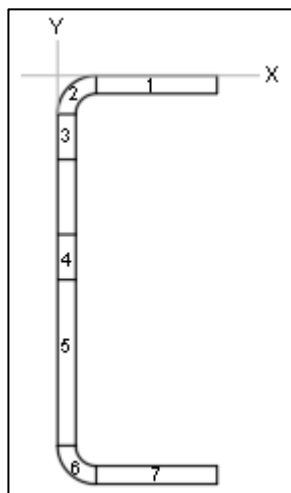
$$\frac{h}{2} = 2.708 \text{ in}$$

$$2.405 \text{ in} < 2.708 \text{ in}$$

Posición del eje neutro

Una vez calculados los anchos efectivos del patín y el alma, se procede a determinar la nueva posición del eje neutro. Para ello se divide la sección transversal del perfil, así:

Figura 74: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Coordenada en Y del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.

Elemento	L (in)	y (in)	L.y (in ²)	L.y ² (in ³)	I _{xx} (in ³)
1	0.710	0.028	0.0201	0.00057	
2	0.178	0.070	0.0124	0.00086	0.0002
3	1.203	0.743	0.8934	0.66368	0.1450
4	1.203	2.25	2.70	6.08	0.1450
5	2.707	4.20	11.38	47.82	1.6530
6	0.178	5.63	1.00	5.64	0.0002
7	1.11	5.67	6.29	35.65	
	7.29		22.30	95.85	1.94

Se desprecia la inercia alrededor del eje X que aportan las secciones 1 y 6.

$$Y_{cg} := \frac{22.3 \text{ in}^2}{7.29 \text{ in}} = 3.059 \text{ in}$$

L: longitud efectiva del elemento.

y: distancia desde el eje de referencia hasta el centro geométrico de cada elemento.

Y_{cg}: coordenada en Y del centroide, respecto al eje de referencia.

Con esta posición del eje neutro se determina nuevamente los anchos efectivos del alma.

$$f1 := \frac{2.917 \cdot Fy}{3.059} = 324.22 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{2.4975 \cdot Fy}{3.059} = 277.59 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.856$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 20.5$$

$$\mu := 0.3$$

$$Fcr := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 404.91 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{Fcr}} = 0.89$$

Como λ es mayor que 0.673

$$\rho := \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} = 0.843$$

$$be := \rho \cdot h = 4.56 \text{ in}$$

$$h_o := D = 5.698 \text{ in}$$

$$b_o := B = 1.25 \text{ in}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 4.56$$

Como la relación h_o/b_o es mayor que 4

$$b1 := \frac{be}{3 + \Psi} = 1.183 \text{ in}$$

$$b2 := \frac{be}{1 + \Psi} - b1 = 1.275 \text{ in}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de b1 y b2

$$b1 + b2 = 2.459 \text{ in}$$

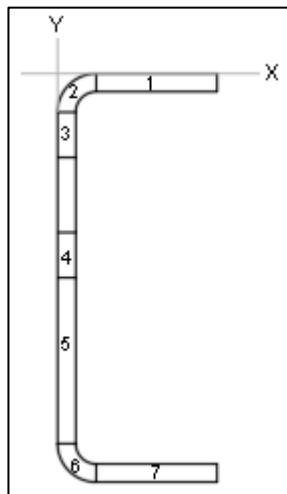
Ancho a compresión disponible del alma

$$Y_{cg} - t - R = 2.917 \text{ in}$$

$$2.459 \text{ in} < 2.917$$

Posición del eje neutro

Figura 75: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (segunda iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$Y_{cg} := \frac{22.04 \text{ in}^2}{7.13 \text{ in}} = 3.091 \text{ in}$$

Posición del eje neutro anterior: 3.059 in

$$\frac{(3.091 - 3.059) \cdot 100}{3.091} = 1.04$$

Tabla 10: Coordenada en Y del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.

Elemento	L (in)	y (in)	L.y (in ²)	L.y ² (in ³)	Ixx (in ³)
1	0.710	0.028	0.0201	0.00057	
2	0.178	0.070	0.0124	0.00086	0.0002
3	1.184	0.734	0.8681	0.63675	0.1381
4	1.275	2.42	3.09	7.48	0.1728
5	2.498	4.31	10.76	46.35	1.2982
6	0.178	5.63	1.00	5.64	0.0002
7	1.11	5.67	6.29	35.65	
	7.13		22.04	95.75	1.61

Como la diferencia es menor al 2% el proceso iterativo termina. Se asume la posición del eje neutro de acuerdo a la última iteración.

$$I_{ex} := t \cdot (1.61 \text{ in}^3 + 95.75 \text{ in}^3 - Y_{cg}^2 \cdot 7.13 \text{ in}) = 1.65 \text{ in}^4$$

$$S_{ex} := \frac{I_{ex}}{Y_{cg}} = 0.54 \text{ in}^3$$

I_{ex} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje X.

S_{ex} : módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y .

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$M_n := S_{ex} \cdot F_y = 2.98 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

ϕ_b : Para secciones con patín no rigidizado.

$$\phi_b \cdot M_n = 2.68 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al pandeo lateral torsional

$$\phi b := 0.9$$

$$C_b := 1$$

$$k_y := 1$$

$$L_y := 80 \text{ in}$$

$$\sigma_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 36.15 \text{ MPa}$$

$$k_t := 1$$

$$L_t := 80 \text{ in}$$

$$\sigma_t := \frac{1}{A \cdot r_o^2} \cdot \left(G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right) = 64.55 \text{ MPa}$$

$$F_e := \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_{fx}} \cdot \sqrt{\sigma_{ey} \cdot \sigma_t} = 70.19 \text{ MPa}$$

$$0.56 \cdot F_y = 190.4 \text{ MPa}$$

Como F_e es menor que $0.56F_y$, la resistencia al pandeo lateral torsional se determina mediante la siguiente ecuación:

$$S_c := S_{ex} = 0.535 \text{ in}^3$$

$$F_c := F_e = 70.19 \text{ MPa}$$

$$M_n := S_c \cdot F_c = 0.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

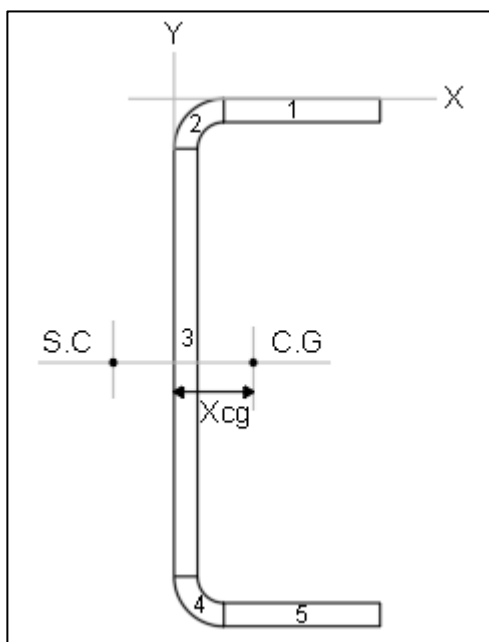
$$\phi b \cdot M_n = 0.55 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

La resistencia nominal a la flexión corresponde a la menor entre: la resistencia nominal y la resistencia al pandeo lateral torsional.

$$\phi b \cdot Mn = 0.55 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Coordenada en X del centroide de la sección completa.

Figura 76: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del centroide de la sección completa.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Coordenada en X del centroide de la sección completa, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.

Elemento	L (in)	x (in)	L.x (in ²)	L.x ² (in ³)	Iyy (in ³)
1	1.109	0.696	0.7715	0.5370	0.1135
2	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
3	5.415	0.0283	0.1532	0.00434	
4	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
5	1.109	0.696	0.7715	0.5370	0.1135
	7.99		1.72	1.08	0.23

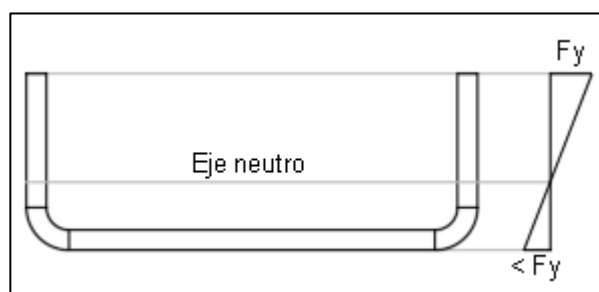
$$X_{cg} := \frac{1.72 \text{ in}^2}{7.99 \text{ in}} = 0.215 \text{ in}$$

$$S_{fy} := \frac{I_y}{B - X_{cg}} = (5.12 \cdot 10^{-2}) \text{ in}^3$$

Anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y

Para flexión alrededor del eje débil el alma del perfil se encuentra sometida a esfuerzos de tensión, por lo cual es 100% efectiva. Para los patines aplica el diagrama de flujo para elemento no rigidizado bajo gradiente de esfuerzos cuando se tiene el borde libre a compresión.

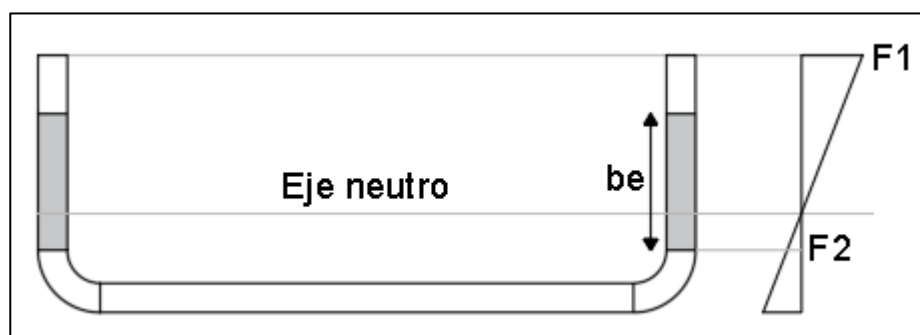
Figura 77: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C en la determinación de anchos efectivos.



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar f_1 y f_2 se realiza una semejanza de triángulos teniendo en cuenta que la fluencia inicial es en compresión.

Figura 78: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar el ancho efectivo de los patines.



Fuente: Elaboración propia.

f_1 : esfuerzo en compresión.

f2: esfuerzo en tensión.

$$f1 := Fy = 340 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{(Xcg - R - t) \cdot Fy}{B - Xcg} = 24.24 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.071$$

$$k := 0.57 + 0.21 \cdot \Psi + 0.07 \cdot \Psi^2 = 0.585$$

$$\mu := 0.3$$

$$Fcr := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w} \right)^2 = 275.85 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{Fcr}} = 1.11$$

$$0.673 \cdot (1 + \Psi) = 0.721$$

$$1.11 > 0.721$$

Como λ es mayor que 0.721

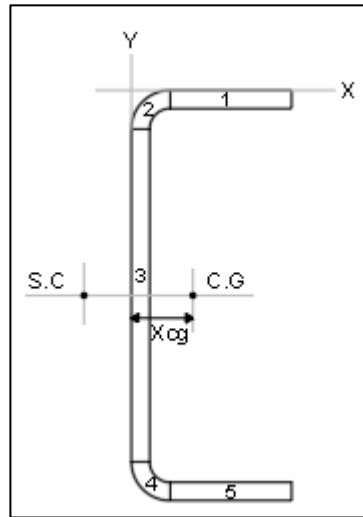
$$\rho := (1 + \Psi) \cdot \frac{1 - \frac{0.22 \cdot (1 + \Psi)}{\lambda}}{\lambda} = 0.76$$

El ancho efectivo del patín es:

$$be := \rho \cdot w = 0.843 \text{ in}$$

Coordenada en X del centroide de la sección efectiva.

Figura 79: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del centroide de la sección efectiva.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Coordenada en X del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.

Elemento	L (in)	x (in)	L.x (in ²)	L.x ² (in ³)	Iyy (in ³)
1	0.842	0.563	0.4736	0.266	0.0497
2	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
3	5.415	0.0283	0.1532	0.00434	
4	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
5	0.842	0.563	0.4736	0.266	0.0497
	7.46		1.13	0.54	0.10

$$X_{cg} := \frac{1.13 \text{ in}^2}{7.46 \text{ in}} = 0.151 \text{ in}$$

Se calcula el ancho efectivo con la nueva posición del eje neutro

$$f1 := Fy = 340 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{(X_{cg} - R - t) \cdot Fy}{B - X_{cg}} = 3.09 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.009$$

$$k := 0.57 + 0.21 \cdot \Psi + 0.07 \cdot \Psi^2 = 0.572$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2 = 269.52 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 1.123$$

$$0.673 \cdot (1 + \Psi) = 0.679$$

$$1.123 > 0.679$$

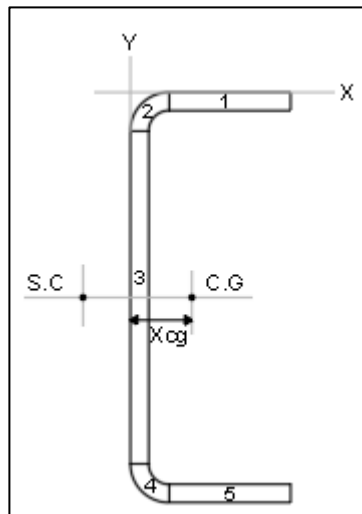
Como λ es mayor que 0.679

$$\rho := (1 + \Psi) \cdot \frac{1 - \frac{0.22 \cdot (1 + \Psi)}{\lambda}}{\lambda} = 0.721$$

$$be := \rho \cdot w = 0.799 \text{ in}$$

Coordenada en X del centroide de la sección efectiva.

Figura 80: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del eje neutro (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Coordenada en X del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.

Elemento	L (in)	x (in)	L·x (in ²)	L·x ² (in ³)	I _{yy} (in ³)
1	0.799	0.563	0.4494	0.253	0.0425
2	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
3	5.415	0.0283	0.1532	0.0043	
4	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
5	0.799	0.563	0.4494	0.253	0.0425
	7.37		1.08	0.51	0.09

$$X_{cg} := \frac{1.08 \text{ in}^2}{7.37 \text{ in}} = 0.147 \text{ in}$$

Con la nueva posición del centroide, se determina una vez más el ancho efectivo de los elementos.

$$f1 := F_y = 340 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{(X_{cg} - R - t) \cdot F_y}{B - X_{cg}} = 1.55 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.005$$

$$k := 0.57 + 0.21 \cdot \Psi + 0.07 \cdot \Psi^2 = 0.571$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w} \right)^2 = 269.08 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 1.124$$

$$0.673 \cdot (1 + \Psi) = 0.676$$

$$1.124 > 0.676$$

Como λ es mayor que 0.676

$$\rho := (1 + \Psi) \cdot \frac{1 - \frac{0.22 \cdot (1 + \Psi)}{\lambda}}{\lambda} = 0.718$$

Ancho efectivo de los patines

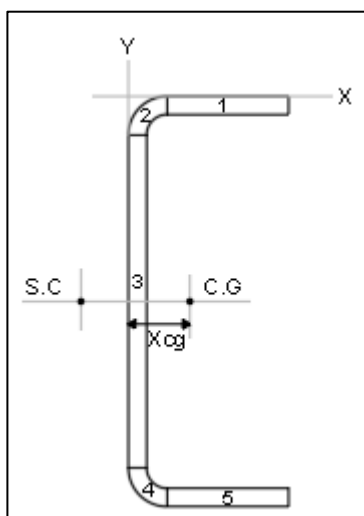
$$b_e := \rho \cdot w = 0.796 \text{ in}$$

Coordenada en X del centroide de la sección efectiva.

Tabla 14: Coordenada en X del eje neutro, tercera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo C.

Elemento	L (in)	x (in)	L.x (in ²)	L.x ² (in ³)	Iyy (in ³)
1	0.796	0.563	0.4478	0.2519	0.0420
2	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
3	5.415	0.0283	0.1532	0.00434	
4	0.178	0.0695	0.0124	0.00086	0.0002
5	0.796	0.563	0.4478	0.2519	0.0420
	7.36		1.07	0.51	0.084

Figura 81: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo C, para determinar la coordenada en X del eje neutro (segunda iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$X_{cg} := \frac{1.07 \text{ in}^2}{7.36 \text{ in}} = 0.145 \text{ in}$$

Posición del eje neutro anterior: 0.147 in

$$\frac{(0.147 - 0.145) \cdot 100}{0.147} = 1.36$$

Como la diferencia es menor al 2%, se detiene el proceso iterativo y se define los anchos efectivos definitivos.

$$I_{ey} := t \cdot (0.51 \text{ in}^3 + 0.084 \text{ in}^3 - (7.36 \text{ in} \cdot X_{cg}^2)) = (2.48 \cdot 10^{-2}) \text{ in}^4$$

$$S_{ey} := \frac{I_{ey}}{B - X_{cg}} = 0.0225 \text{ in}^3$$

I_{ey} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje Y.

S_{ey} : módulo elástico de la sección efectiva respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje Y.

Resistencia nominal de la sección

$$M_n := S_{ey} \cdot F_y = 125.17 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

ϕ_b : Para secciones con patín no rigidizado

$$\phi_b \cdot M_n = 112.65 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Resistencia al pandeo lateral torsional

$$C_s := -1$$

$$k_x := 1$$

$$L_x := 80 \text{ in}$$

$$C_{TF} := 1$$

$$\sigma_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{k_x \cdot L_x}{r_x}\right)^2} = 1298.53 \text{ MPa}$$

$$F_e := \frac{C_s \cdot A \cdot \sigma_{ex}}{C_{TF} \cdot S_{fy}} \left(j + C_s \cdot \sqrt{j^2 + r_o^2 \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{ex}}\right)} \right) = 351.42 \text{ MPa}$$

Sfy: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje Y.

Cs = -1 Para momento que produzca compresión en el lado del centro de corte, medido desde el centroide.

$$0.56 \cdot F_y = 190.4 \text{ MPa}$$

$$2.78 \cdot F_y = 945.2 \text{ MPa}$$

Como Fe es menor que 945.2 MPa y mayor que 190.4 MPa, Fc se determina mediante la siguiente ecuación:

$$F_c := \frac{10}{9} \cdot F_y \cdot \left(1 - \frac{10 \cdot F_y}{36 \cdot F_e} \right) = 276.25 \text{ MPa}$$

$$M_n := S_{ey} \cdot F_c = 101.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_n = 91.53 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La resistencia de la sección efectiva para flexión alrededor del eje Y, corresponde al menor de los valores obtenidos para resistencia nominal de la sección y resistencia al pandeo lateral torsional, por tanto:

$$\phi_b \cdot M_n = 91.53 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Resistencia al corte para flexión alrededor del eje X

Se determina mediante la teoría de resistencia al corte de almas sin huecos.

$$\phi v := 0.95$$

$$k v := 5.34$$

$$A w := h \cdot t = 0.306 \text{ in}^2$$

$$\mu := 0.3$$

$$1.51 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k v}{F_y}} = 84.63$$

$$\frac{h}{t} = 95.67$$

$$h/t > 84.63$$

$$F_v := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k v}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(\frac{h}{t}\right)^2} = 105.46 \text{ MPa}$$

F_v : esfuerzo nominal de corte.

$$V_n := A w \cdot F_v = 20.85 \text{ kN}$$

$$\phi v \cdot V_n = 19.81 \text{ kN}$$

Resistencia al corte para flexión alrededor del eje Y

$$\phi v := 0.95$$

$$k v := 5.34$$

$$A w := 2 \cdot w \cdot t = 0.125 \text{ in}^2$$

$$\mu := 0.3$$

$$\frac{w}{t} = 19.58$$

$$\sqrt{\frac{E \cdot kv}{F_y}} = 56.05$$

$$w/t < 56.05$$

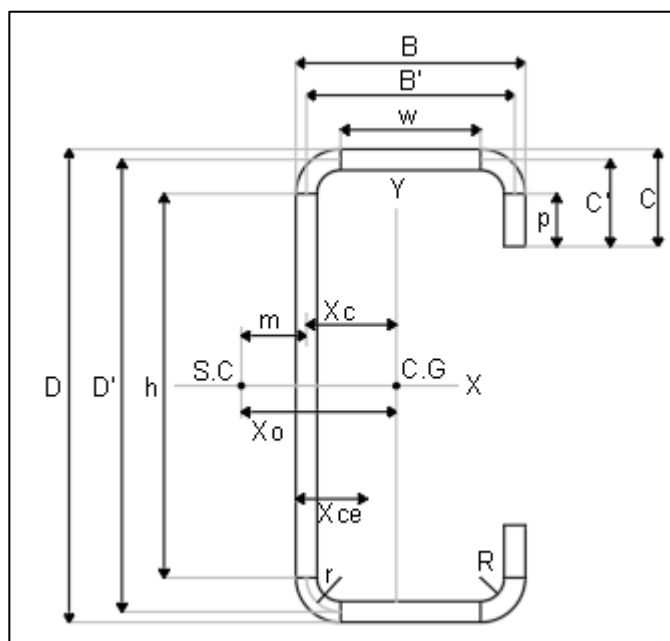
$$F_v := 0.6 \cdot F_y = 204 \text{ MPa}$$

$$V_n := A_w \cdot F_v = 16.52 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 15.69 \text{ kN}$$

Perfil G

Figura 82: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G del ejemplo de cálculo de resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

PHR C 120 X 60 - 2 mm (Manual Técnico de ACESCO, Julio 2016, pág. 25)

$$D := 120 \text{ mm}$$

$$B := 60 \text{ mm}$$

$$C := 15 \text{ mm}$$

$$t := 2 \text{ mm}$$

$$R := 5 \text{ mm}$$

$$F_y := 340 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$G := 77200 \text{ MPa}$$

$$\mu := 0.3$$

Parámetros básicos

$$r := R + \frac{t}{2} = 6 \text{ mm}$$

$$h := D - (2 \cdot r + t) = 106 \text{ mm}$$

$$D' := D - t = 118 \text{ mm}$$

$$w := B - 2 \cdot \left(r + \frac{t}{2} \right) = 46 \text{ mm}$$

$$B' := B - t = 58 \text{ mm}$$

$$C' := C - \frac{t}{2} = 14 \text{ mm}$$

$$p := C - \left(r + \frac{t}{2} \right) = 8 \text{ mm}$$

$$u := \pi \cdot \frac{r}{2} = 9.42 \text{ mm}$$

$$c := 0.637 \cdot r = 3.82 \text{ mm}$$

$$A := t \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 503.4 \text{ mm}^2$$

$$I_x := 2 \cdot t \cdot \left(0.0417 \cdot h^3 + w \cdot \left(\frac{h}{2} + r \right)^2 + 2 \cdot u \cdot \left(\frac{h}{2} + 0.637 \cdot r \right)^2 + 2 \cdot 0.149 \cdot r^3 + 0.0833 \cdot p^3 + \frac{p}{4} \cdot (h - p)^2 \right) = 1159867 \text{ mm}^4$$

$$X_c := \frac{2 \cdot t}{A} \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right) + 0.363 \cdot u \cdot r + u \cdot (w + 1.637 \cdot r) + p \cdot (w + 2 \cdot r) \right) = 18.63 \text{ mm}$$

$$X_{ce} := X_c + \frac{t}{2} = 19.63 \text{ mm}$$

$$I_y := 2 \cdot t \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right)^2 + \frac{w^3}{12} + 0.356 \cdot r^3 + p \cdot (w + 2 \cdot r)^2 + u \cdot (w + 1.637 \cdot r)^2 + 0.149 \cdot r^3 \right) - A \cdot X_c^2 = 238021 \text{ mm}^4$$

$$m := B' \cdot \left(\frac{3 \cdot D'^2 \cdot B' + C' \cdot (6 \cdot D'^2 - 8 \cdot C'^2)}{D'^3 + 6 \cdot D'^2 \cdot B' + C' \cdot (8 \cdot C'^2 - 12 \cdot D' \cdot C' + 6 \cdot D'^2)} \right) = 27.97 \text{ mm}$$

$$X_o := -(X_c + m) = -46.61 \text{ mm}$$

$$J := \frac{t^3}{3} \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 671.2 \text{ mm}^4$$

$$C_w := \frac{D^2 \cdot B^2 \cdot t}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot D^3 \cdot B' + 3 \cdot D^2 \cdot B^2 + 48 \cdot C'^4 + 112 \cdot B' \cdot C'^3 + 8 \cdot D' \cdot C'^3 + 48 \cdot D' \cdot B' \cdot C'^2 + 12 \cdot D^2 \cdot C'^2 + 12 \cdot D^2 \cdot B' \cdot C' + 6 \cdot D^3 \cdot C'}{6 \cdot D^2 \cdot B' + (D' + 2 \cdot C')^3 - 24 \cdot D' \cdot C'^2} \right) = 763733649 \text{ mm}^6$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 21.7 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 48 \text{ mm}$$

$$r_o := \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + X_o^2} = 70.35 \text{ mm}$$

$$S_{f_x} := \frac{I_x}{\frac{D}{2}} = 19331 \text{ mm}^3$$

$$\beta_w := -\left(\frac{t \cdot X_c \cdot D'^3}{12} + t \cdot X_c^3 \cdot D'\right) = -6.63 \cdot 10^6 \text{ mm}^5$$

$$\beta_f := \frac{t}{2} \cdot ((B' - X_c)^4 - X_c^4) + \frac{t \cdot D'^2}{4} \cdot ((B' - X_c)^2 - X_c^2) = (1.07 \cdot 10^7) \text{ mm}^5$$

$$\beta_l := 2 \cdot C' \cdot t \cdot (B' - X_c)^3 + \frac{2}{3} \cdot t \cdot (B' - X_c) \cdot \left(\left(\frac{D'}{2} \right)^3 - \left(\frac{D'}{2} - C' \right)^3 \right) = (9.41 \cdot 10^6) \text{ mm}^5$$

$$j := \frac{1}{2 \cdot I_y} \cdot (\beta_w + \beta_f + \beta_l) - X_o = 74.84 \text{ mm}$$

r: radio hasta el eje longitudinal de la esquina o dobléz.

h: ancho plano del alma.

w: ancho plano del patín.

p: ancho plano de la pestaña.

u: longitud efectiva de una esquina. Las esquinas o dobleces se consideran 100% efectivas.

c: distancia desde el punto de origen hasta el centro de gravedad de la esquina.

A: área de la sección transversal.

I_x: momento de inercia alrededor del eje X.

X_c: distancia entre el centroide y el eje del alma.

X_{ce}: distancia entre el centroide de la sección transversal y el lado exterior más alejado del alma.

I_y: momento de inercia alrededor del eje Y.

m: distancia entre el centro de cortante y el eje del alma. Tiene signo negativo para indicar que se encuentra al lado izquierdo del eje del alma.

Xo: distancia entre el centroide y el centro de cortante.

J: constante torsional de St. Venant.

Cw: constante de torsión o alabeo.

ry: radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal Y.

rx: radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal X.

ro: radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de cortante.

Sfx: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje X.

j: parámetro usado en la determinación del momento elástico crítico.

Límites y consideraciones dimensionales

Relación máxima ancho plano - espesor del patín

El patín es un elemento a compresión rigidizado con un borde longitudinal conectado al alma y el otro borde longitudinal conectado a una pestaña sencilla, por tanto, la relación w/t debe ser menor o igual que 60.

$$\frac{w}{t} = 23$$

$$\frac{w}{t} \leq 60$$

Cumple

Relación altura - espesor del alma

El alma no está reforzada, por tanto, la relación h/t debe ser menor o igual que 200.

$$\frac{h}{t} = 53$$

$$\frac{h}{t} \leq 200$$

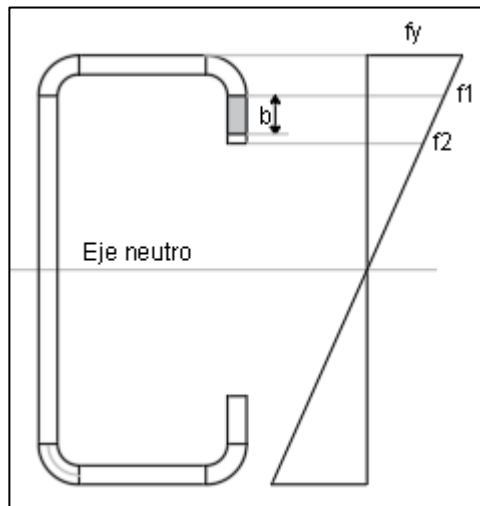
Cumple

Anchos efectivos para flexión alrededor del eje X

Ancho efectivo de la pestaña superior

Para determinar el ancho efectivo de la pestaña superior se usa el diagrama de flujo correspondiente a elemento no rigidizado bajo gradiente de esfuerzo cuando f_1 y f_2 están en compresión. La compresión decrece hacia el extremo libre.

Figura 83: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de f_1 y f_2 se obtienen mediante una semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro pasa por el centroide del perfil y que los esfuerzos tienen una distribución lineal.

$$f_1 = \frac{\left(\frac{D}{2} - R - t\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 300.33 \text{ MPa}$$

$$f_2 := \frac{\left(\frac{D}{2} - C\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 255 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 0.849$$

Como el esfuerzo decrece hacia el borde libre, k se calcula mediante la siguiente expresión.

$$k := \frac{0.578}{\Psi + 0.34} = 0.486$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{p} \right)^2 = 5492 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = 0.234$$

Como λ es menor que 0.673 el ancho efectivo de la pestaña o rigidizador es:

$$b_e := p = 8 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del patín superior

Aplica el diagrama de flujo para elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.

$$f := F_y = 340 \text{ MPa}$$

$$S := 1.28 \cdot \sqrt{\frac{E}{f}} = 31.04$$

$$\frac{w}{t} = 23$$

$$0.328 \cdot S = 10.18$$

La relación w/t es mayor que 0.328. Esto significa que se requiere rigidizador de borde. De acuerdo al diagrama de flujo, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\theta := 90^\circ$$

$$I_s := \frac{p^3 \cdot t \cdot (\sin(\theta))^2}{12} = 85.33 \text{ mm}^4$$

$$I_a := 399 \cdot t^4 \cdot \left(\frac{w}{S \cdot t} - 0.328 \right)^3 = 449.3 \text{ mm}^4$$

$$t^4 \cdot \left(115 \cdot \frac{w}{S \cdot t} + 5 \right) = 1443 \text{ mm}^4$$

$$I_a < 1443 \text{ mm}^4$$

$$R_I := \frac{I_s}{I_a} = 0.19$$

$$R_I \leq 1$$

Cumple

$$n := 0.582 - \frac{w}{4 \cdot t \cdot S} = 0.397$$

$$n \geq 0.33$$

Cumple

$$\frac{C}{w} = 0.326$$

La relación C/w es mayor que 0.25, por ello k y F_{cr} se calculan como sigue.

$$k := \left(4.82 - \frac{5 \cdot C}{w} \right) \cdot R_I^n + 0.43 = 2.08$$

$$k \leq 4$$

Cumple

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 = 710.75 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.692$$

λ es mayor que 0.673, por tanto:

$$\rho := \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} = 0.986$$

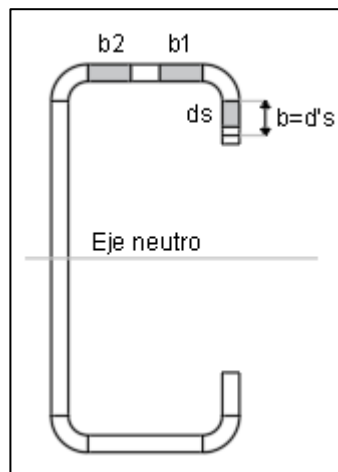
Ancho efectivo del patín

$$b_e := \rho \cdot w = 45.35 \text{ mm}$$

$$b_1 := \left(\frac{b_e}{2} \right) \cdot R_f = 4.31 \text{ mm}$$

$$b_2 := b_e - b_1 = 41.05 \text{ mm}$$

Figura 84: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo del patín.



Fuente: Elaboración propia.

$$b_1 + b_2 = 45.35 \text{ mm}$$

$$d's := 8 \text{ mm}$$

Ancho efectivo reducido de la pestaña

$$ds := d's \cdot R_f = 1.52 \text{ mm}$$

f: esfuerzo de compresión en el patín superior

θ : ángulo de doblez de la pestaña respecto al patín.

d's: Ancho efectivo de la pestaña o rigidizador.

ds: Ancho efectivo reducido de la pestaña o rigidizador.

b1 y b2: porciones del ancho efectivo del patín.

be: ancho efectivo del elemento.

λ : factor de esbeltez.

k: coeficiente de pandeo de placa.

ρ : factor de reducción local.

μ : relación de Poisson del acero.

Ia: momento de inercia adecuado del rigidizador de tal forma que cada elemento componente se comporte como un elemento rigidizado.

Is: momento de inercia de la sección completa del rigidizador alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser rigidizado.

C: longitud entre bordes externos de la pestaña.

p: ancho plano de la pestaña o rigidizador.

Ancho efectivo del alma

El alma es un elemento sometido a un gradiente de esfuerzos, por ello se usa el diagrama de flujo para alma bajo gradiente de esfuerzos. En la primera iteración se considera el alma como totalmente efectiva, por tanto, el eje neutro coincide con el C.G y por ello f_1 y f_2 son iguales.

Para determinar los esfuerzos f_1 y f_2 se realiza una semejanza de triángulos.

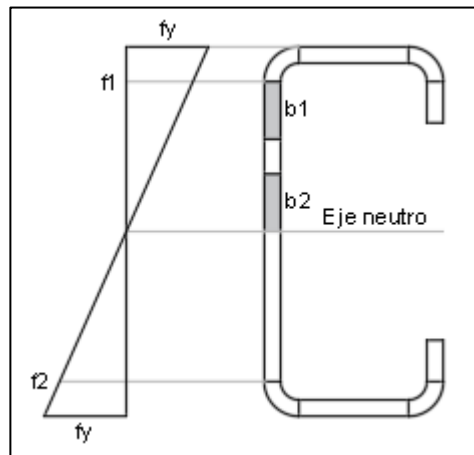
$$f_1 := \frac{F_y \cdot \frac{h}{2}}{\frac{D}{2}} = 300.33 \text{ MPa}$$

$$f_2 := f_1$$

f_1 : esfuerzo en compresión.

f_2 : esfuerzo en tensión.

Figura 85: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo del alma (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 1$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 = 1544.42 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.44$$

Como λ es menor que 0.673

$$b_e := h = 106 \text{ mm}$$

$$h_o := D = 120 \text{ mm}$$

$$b_o := B = 60 \text{ mm}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 2$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b1 := \frac{b_e}{3 + \Psi} = 26.5 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de $b2$ es:

$$b2 := \frac{b_e}{2} = 53 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de $b1$ y $b2$.

$$b1 + b2 = 79.5 \text{ mm}$$

Zona a compresión del alma disponible

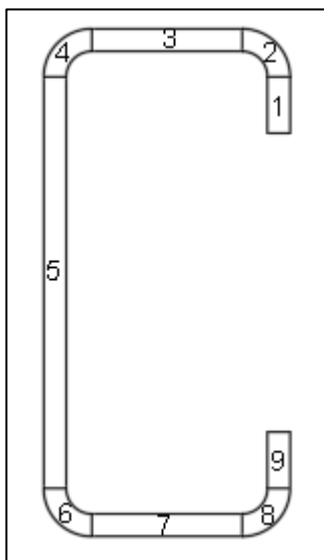
$$\frac{h}{2} = 53 \text{ mm}$$

Como la suma de $b_1 + b_2$ es mayor que el ancho plano disponible a compresión se concluye que el alma es 100% efectiva.

Posición del eje neutro

Una vez calculados los anchos efectivos se procede a determinar la nueva posición del eje neutro. Para ello se divide la sección transversal del perfil en partes, así:

Figura 86: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Coordenada en Y del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo G.

	Elemento	L (mm)	y (mm)	$L \cdot y$ (mm ²)	$L \cdot y^2$ (mm ³)	I_{xx} (mm ³)
Pestaña	1	1.52	7.76	11.8	91.5	0.29
	2	9.42	3.18	30.0	95.3	32.18
Patín	3	45.35	1	45.4	45.4	
	4	9.42	3.18	30.0	95.3	32.18
Alma	5	106.00	60	6360	381600	99251
	6	9.42	116.82	1100.4	128553.9	32.18
Patín	7	46.00	119	5474	651406	
	8	9.42	116.82	1100.4	128553.9	32.18
Pestaña	9	8.00	109	872	95048	42.67
		244.55		15023.95	1385489.23	99423.03

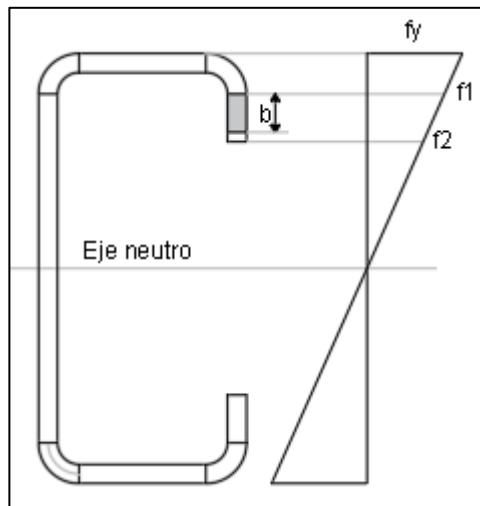
$$Y_{cg} := \frac{15023.95 \text{ mm}^2}{244.55 \text{ mm}} = 61.44 \text{ mm}$$

Con el último valor de Y_{cg} se calcula nuevamente los anchos efectivos de los elementos

Acho efectivo de la pestaña superior

Los valores de f_1 y f_2 se obtienen mediante una semejanza de triángulos.

Figura 87: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (segunda iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$f_1 := \frac{(Y_{cg} - R - t) \cdot F_y}{Y_{cg}} = 301.26 \text{ MPa}$$

$$f_2 := \frac{(Y_{cg} - C) \cdot F_y}{Y_{cg}} = 256.99 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 0.853$$

Como el esfuerzo decrece hacia el borde libre, k se calcula mediante la siguiente expresión.

$$k := \frac{0.578}{\Psi + 0.34} = 0.484$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{p} \right)^2 = 5473.45 \text{ MPa}$$

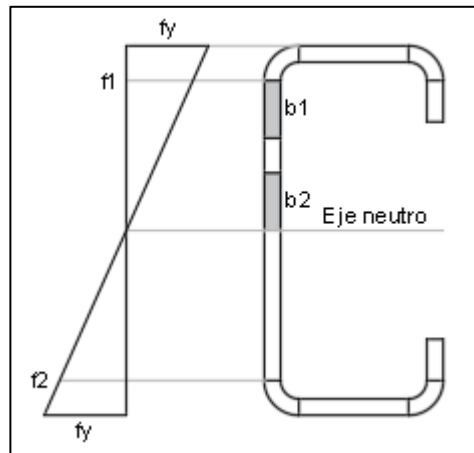
$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.235$$

Como λ es menor que 0.673 el ancho efectivo de la pestaña o rigidizador es:

$$b_e := p = 8 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del alma

Figura 88: Sección transversal del perfil conformado tipo G para cálculo del ancho efectivo del alma (segunda iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$f1 := \frac{(Y_{cg} - R - t) \cdot Fy}{Y_{cg}} = 301.26 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{(D - Y_{cg} - R - t) \cdot Fy}{Y_{cg}} = 285.38 \text{ MPa}$$

f1: esfuerzo en compresión.

f2: esfuerzo en tensión.

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.947$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 22.66$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 = 1458.33 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.45$$

Como λ es menor que 0.673

$$b_e := h = 106 \text{ mm}$$

$$h_o := D = 120 \text{ mm}$$

$$b_o := B = 60 \text{ mm}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 2$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b1 := \frac{b_e}{3 + \Psi} = 26.85 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.947$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de $b2$ es:

$$b2 := \frac{b_e}{2} = 53 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de $b1$ y $b2$.

$$b1 + b2 = 79.85 \text{ mm}$$

Ancho del alma a compresión disponible

$$\frac{h}{2} = 53 \text{ mm}$$

Como la suma de $b_1 + b_2$ es mayor que el ancho plano disponible a compresión se concluye que el alma es 100% efectiva.

Los anchos efectivos son iguales a los calculados inicialmente, por tanto, el eje neutro no cambia de posición y termina el proceso iterativo.

Ancho efectivo de la pestaña: 1.52 mm

Ancho efectivo del patín: 45.35 mm

Ancho efectivo del alma (alma 100% efectiva): 53 mm

Tabla 16: Coordenada en Y del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo G.

	Elemento	L (mm)	y (mm)	L.y (mm ²)	L.y ² (mm ³)	I _{xx} (mm ³)
Pestaña	1	1.52	7.76	11.8	91.5	0.29
	2	9.42	3.18	30.0	95.3	32.18
Patín	3	45.35	1	45.4	45.4	
	4	9.42	3.18	30.0	95.3	32.18
Alma	5	106.00	60	6360	381600	99251
	6	9.42	116.82	1100.4	128553.9	32.18
Patín	7	46.00	119	5474	651406	
	8	9.42	116.82	1100.4	128553.9	32.18
Pestaña	9	8.00	109	872	95048	42.67
		244.55		15023.95	1385489.23	99423.03

$$I_{ex} := t \cdot (99423.03 \text{ mm}^3 + 1385489.23 \text{ mm}^3 - Y_{cg}^2 \cdot 244.55 \text{ mm}) = 1123829 \text{ mm}^4$$

$$S_{ex} := \frac{I_{ex}}{Y_{cg}} = 18293 \text{ mm}^3$$

$$Y_{cg} = 61.435 \text{ mm}$$

I_{ex} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje X.

Sex: módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y .

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$RNS := Sex \cdot Fy = 6.22 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Is = 85.33 \text{ mm}^4$$

$$Ia = 449.3 \text{ mm}^4$$

$$Is < Ia$$

Dado de Is es menor que Ia el rigidizador es inadecuado, es decir que el patín a compresión está parcialmente rigidizado. Por tanto, ϕ_b es igual a 0.95.

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot RNS = 5.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al pandeo lateral torsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$C_b := 1$$

$$k_y := 1$$

$$L_y := 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 933.33 \text{ MPa}$$

$$k_t := 1$$

$$L_t := 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma_t := \frac{1}{A \cdot r_o^2} \cdot \left(G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right) = 625.93 \text{ MPa}$$

$$F_e := \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_{fx}} \cdot \sqrt{\sigma_{ey} \cdot \sigma_t} = 1400.2 \text{ MPa}$$

$$2.78 \cdot F_y = 945.2 \text{ MPa}$$

$$F_e > 945.2 \text{ MPa}$$

Como F_e es mayor que $2.78F_y$, la resistencia al pandeo lateral torsional se determina mediante la siguiente ecuación:

$$PLT := 0.95 S_{ex} \cdot F_y = 5.91 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo distorsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$\beta := 1$$

$$k_\phi := 0$$

$$\xi := 2$$

$$A_f := t \cdot (B + C) = 150 \text{ mm}^2$$

$$J_f := \frac{1}{3} \cdot B \cdot t^3 + \frac{1}{3} \cdot C \cdot t^3 = 200 \text{ mm}^4$$

$$I_{xf} := \frac{t \cdot \left(t^2 \cdot B^2 + 4 \cdot B \cdot C^3 - 4 \cdot B \cdot C^3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + t^2 \cdot B \cdot C + C^4 - C^4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right)}{12 \cdot (B + C)} = 1952.5 \text{ mm}^4$$

$$I_{yf} := \frac{t \cdot \left(B^4 + 4 \cdot C \cdot B^3 + 6 \cdot B^2 \cdot C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + 4 \cdot C^3 \cdot B \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + C^4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right)}{12 \cdot (B+C)} = 57600 \text{ mm}^4$$

$$I_{xyf} := \frac{t \cdot B \cdot C^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(B + C \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right)}{4 \cdot (B+C)} = 5400 \text{ mm}^4$$

$$x_o := \frac{B^2 - C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot (B+C)} = 24 \text{ mm}$$

$$y_o := \frac{-C^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot (B+C)} = -1.5 \text{ mm}$$

$$h_x := \frac{-\left(B^2 + 2 \cdot C \cdot B + C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right)}{2 \cdot (B+C)} = -36 \text{ mm}$$

$$C_{wf} := 0 \text{ mm}^6$$

$$L_{cr} := \left(\frac{4 \cdot \pi^4 \cdot h_o \cdot (1 - \mu^2)}{t^3} \cdot \left(I_{xf} \cdot (x_o - h_x)^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} \cdot (x_o - h_x)^2 \right) + \frac{\pi^4 \cdot h_o^4}{720} \right)^{0.25} = 408 \text{ mm}$$

$$L_m := 1000 \text{ mm}$$

L: el menor entre Lcr y Lm.

$$L := L_{cr} = 408 \text{ mm}$$

$$k_{\phi fe} := \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \left(E \cdot I_{xf} \cdot (x_o - h_x)^2 + E \cdot C_{wf} - E \cdot \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} \cdot (x_o - h_x)^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot G \cdot J_f = 4.57 \text{ kN}$$

$$k_{\phi we} := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{3}{h_o} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot \frac{19 \cdot h_o}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \frac{h_o^3}{240} \right) = 4 \text{ kN}$$

$$k_{\phi fg} := \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \cdot \left(A_f \cdot \left((x_o - h_x)^2 \cdot \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right)^2 - 2 \cdot y_o \cdot (x_o - h_x) \cdot \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right) + h_x^2 + y_o^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right) = 15.5 \text{ mm}^2$$

$$k_{\phi wg} := \frac{h_o \cdot t \cdot \pi^2}{13440} \cdot \left(\frac{(45360 \cdot (1 - \xi) + 62160) \cdot \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 448 \cdot \pi^2 + \left(\frac{h_o}{L}\right)^2 \cdot (53 + 3 \cdot (1 - \xi)) \cdot \pi^4}{\pi^4 + 28 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 420 \cdot \left(\frac{L}{h_o}\right)^4} \right) = 0.59 \text{ mm}^2$$

$$Fd := \beta \cdot \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}} = 532.5 \text{ MPa}$$

$$M_y := S_{fx} \cdot Fy = 6.57 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{crd} := S_{fx} \cdot Fd = 10.29 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_d := \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} = 0.799$$

Como λ_d es mayor que 0.673, Mn se calcula así:

$$PD := \left(1 - 0.22 \cdot \left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5} \right) \cdot \left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5} \cdot M_y = 5.96 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi b \cdot PD = 5.36 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

La resistencia nominal a la flexión corresponde a la menor entre: resistencia nominal de la sección, resistencia al pandeo lateral torsional y resistencia al pandeo distorsional.

Por tanto, la resistencia del perfil para la flexión alrededor del eje X es: 5.36 kN.m

Af: área de la sección transversal del patín en compresión más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín.

Jf: constante de torsión de Saint Venant del patín en compresión, más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín.

Ixf: inercia alrededor del eje X de patín más el rigidizador de borde.

I_{yf} : inercia alrededor del eje Y de patín más el rigidizador de borde.

I_{xyf} : producto del momento de inercia del patín más el rigidizador de borde.

x_o : distancia en X a partir de la unión aleta – alma al centroide de la aleta.

y_o : distancia en Y a partir de la unión patín – alma hasta el centroide del patín.

C_{wf} : constante de torsión o alabeo del patín más el rigidizador de borde.

h_x : distancia en x a partir del centroide hasta el centro de cortante del patín.

k_{ϕ} : rigidez rotacional provista por un elemento de restricción.

ξ : gradiente de esfuerzo en el alma.

$k_{\phi e}$: rigidez elástica rotacional provista por el patín a la unión patín-alma.

$k_{\phi we}$: rigidez elástica rotacional provista por el alma a la unión patín-alma

$k_{\phi fg}$: rigidez geométrica rotacional demandada por el patín a partir de la unión patín-alma

$k_{\phi wg}$: rigidez geométrica rotacional demandada por el alma a partir de la unión patín – alma.

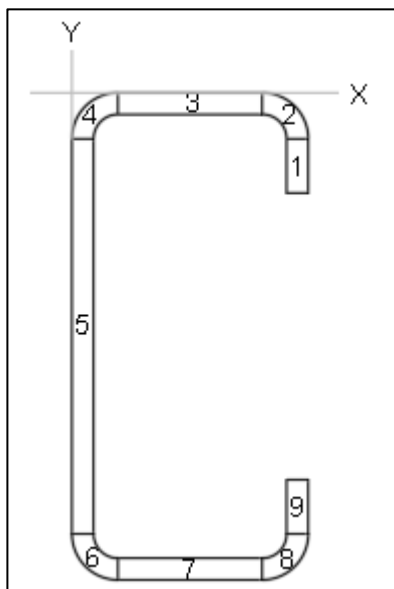
F_d : esfuerzo de pandeo elástico distorsional.

λ_d : factor de esbeltez para pandeo distorsional.

PD: pandeo distorsional.

Coordenada en X del centroide de la sección completa.

Figura 89: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, para determinar la coordenada en X del centroide de la sección completa.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: Coordenada en X del centroide de la sección completa, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo G.

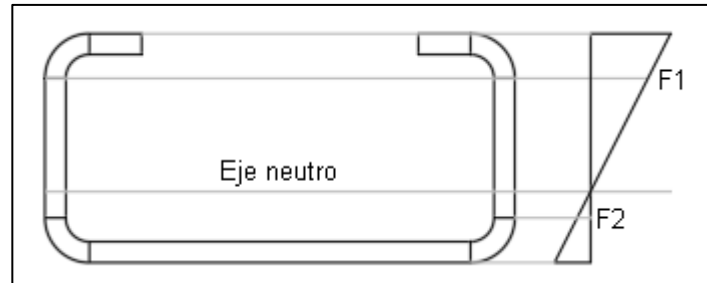
	Elemento	L (mm)	x (mm)	L.x (mm ²)	L.x ² (mm ³)	Iyy (mm ³)
Pestaña	1	8.00	59.00	472.0	27848.0	
	2	9.42	56.82	535.2	30412.6	32.18
Patín	3	46.00	30	1380.0	41400.0	8111
	4	9.42	3.18	30.0	95.3	32.18
Alma	7	106.00	1	106	106	
	8	9.42	3.18	30.0	95.3	32.18
Patín	9	46.00	30	1380	41400	8111
	10	9.42	56.82	535.2	30412.6	32.18
Pestaña	11	8.00	59	472	27848	
		251.68		4940.40	199617.69	16351.40

$$X_{cg} := \frac{4940.40 \text{ mm}^2}{251.68 \text{ mm}} = 19.63 \text{ mm}$$

$$S_{fy} := \frac{I_y}{B - X_{cg}} = 5896 \text{ mm}^3$$

Anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y

Figura 90: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G en la determinación de anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y.



Fuente: Elaboración propia.

Alma: esfuerzo de tensión. 100% Efectiva

Patín: Elemento sometido a gradiente de esfuerzos, donde el extremo superior está en compresión y el extremo inferior en tensión. Aplica el diagrama de flujo para alma bajo gradiente de esfuerzos.

Pestaña: elemento no rigidizado bajo compresión uniforme.

Ancho efectivo de la pestaña

$$f := F_y = 340 \text{ MPa}$$

$$k := 0.43$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{p}\right)^2 = 4858 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.265$$

$$\lambda < 0.673$$

$$b_e := p = 8 \text{ mm}$$

Elemento 100% efectivo

El ancho efectivo de la pestaña no varía, aunque el eje neutro cambie de posición, dado que siempre estará sometida a una compresión uniforme de F_y .

Ancho efectivo del patín

Se determina f_1 y f_2 a partir de una semejanza de triángulos. Inicialmente se supone que la toda la sección transversal es efectiva y que el centroide se encuentra a 19.63 mm respecto al eje de referencia.

$$f_1 := \frac{(B - X_{cg} - R - t) \cdot F_y}{B - X_{cg}} = 281.05 \text{ MPa}$$

$$f_2 := \frac{(X_{cg} - R - t) \cdot F_y}{B - X_{cg}} = 106.37 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 0.378$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 11.996$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w} \right)^2 = 4098.97 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = 0.262$$

$$\lambda < 0.673$$

$$b_e := w = 46 \text{ mm}$$

ho/bo: es la relación entre longitudes medidas entre bordes externos de quien hace las veces de alma y quien hace las veces de patín en compresión, respectivamente. Para este caso, se tiene:

$$\frac{B}{C + C} = 2$$

Como el resultado es menor que 4

$$b1 := \frac{be}{3 + \Psi} = 13.62 \text{ mm}$$

$$\Psi = 0.378$$

$$\Psi > 0.236$$

Como Ψ es mayor que 0.236 el valor de $b2$ es:

$$b2 := \frac{be}{2} = 23 \text{ mm}$$

$$b1 + b2 = 36.62 \text{ mm}$$

El ancho a compresión disponible es de:

$$B - X_{cg} - t - R = 33.37 \text{ mm}$$

$36.62 > 33.37$ Por tanto el elemento es 100% efectivo.

Es decir que nuevamente se tiene un X_{cg} de 19.63 mm. La sección es 100% efectiva para flexión alrededor de su eje débil.

$$S_{ey} := \frac{I_y}{B - X_{cg}} = 5895.9 \text{ mm}^3$$

S_{ey} : módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$M_n := S_{ey} \cdot F_y = 2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Se toma ϕ_b para secciones con aletas a compresión no rigidizadas porque las pestañas se encuentran bajo compresión uniforme y son elementos no rigidizados.

$$\phi_b := 0.90$$

$$\phi b \cdot Mn = 1.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al Pandeo Lateral Torsional

$$\phi b := 0.9$$

$$Cs := -1$$

$$k_x := 1$$

$$L_x := 1000 \text{ mm}$$

$$C_{TF} := 1$$

$$\sigma_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 4548.1 \text{ MPa}$$

$$S_{fy} := \frac{I_y}{(B - Xcg)} = 5896 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_t = 625.928 \text{ MPa}$$

$$Fe := \frac{Cs \cdot A \cdot \sigma_{ex}}{C_{TF} \cdot S_{fy}} \left(j + Cs \cdot \sqrt{j^2 + r_o^2} \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{ex}} \right) \right) = 1716.2 \text{ MPa}$$

Sfy: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión. Para flexión alrededor del eje Y.

Cs: -1 Para momento que produzca compresión en el lado del centro de corte, medido desde el centroide.

$$2.78 \cdot Fy = 945.2 \text{ MPa}$$

Como Fe es mayor que 945.2 MPa, la resistencia a flexión corresponde a la resistencia nominal de la sección, basada en la iniciación de la fluencia.

$$\phi b := 0.90$$

$$\phi b \cdot Mn = 1.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al corte para flexión alrededor del eje X

$$\phi v := 0.95$$

$$kv := 5.34$$

$$Aw := h \cdot t = 212 \text{ mm}^2$$

$$\mu := 0.3$$

$$\frac{h}{t} = 53$$

$$\sqrt{\frac{E \cdot kv}{Fy}} = 56$$

$$h/t < 56$$

$$Fv := 0.6 \cdot Fy = 204 \text{ MPa}$$

$$Vn := Aw \cdot Fv = 43.25 \text{ kN}$$

$$\phi v \cdot Vn = 41.1 \text{ kN}$$

Resistencia al corte para flexión alrededor del eje Y

$$\phi v := 0.95$$

$$kv := 5.34$$

$$Aw := 2 \cdot w \cdot t = 184 \text{ mm}^2$$

$$\mu := 0.3$$

$$\frac{w}{t} = 23$$

$$\sqrt{\frac{E \cdot kv}{F_y}} = 56$$

$$w/t < 56$$

$$F_v := 0.6 \cdot F_y = 204 \text{ MPa}$$

$$V_n := A_w \cdot F_v = 37.5 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 35.7 \text{ kN}$$

Tabla 18: Comparación de resistencias del ejemplo de perfil conformado en frío tipo C versus resistencia presentada en el manual de ACESCO.

Eje fuerte	AIRO	ACESCO	Diferencia
Resistencia a pandeo lateral torsional	5.91 KN.m	5.99 KN.m	1.34%
Resistencia a pandeo distorsional	5.36 KN.m	5.46 KN.m	1.83%
Resistencia a cortante	41.1 KN	41.66 KN	1.34%
Eje débil			
Resistencia a pandeo lateral torsional	1.8 KN.m	1.8 KN.m	0.00%
Resistencia a cortante	35.7 KN	36.16 KN	1.27%

Perfil doble G

Perfil conformado por dos perfiles PHR C 160 X 60 - 2mm. (Manual Técnico de ACESCO, Julio 2016, pág. 29)

$$D := 160 \text{ mm}$$

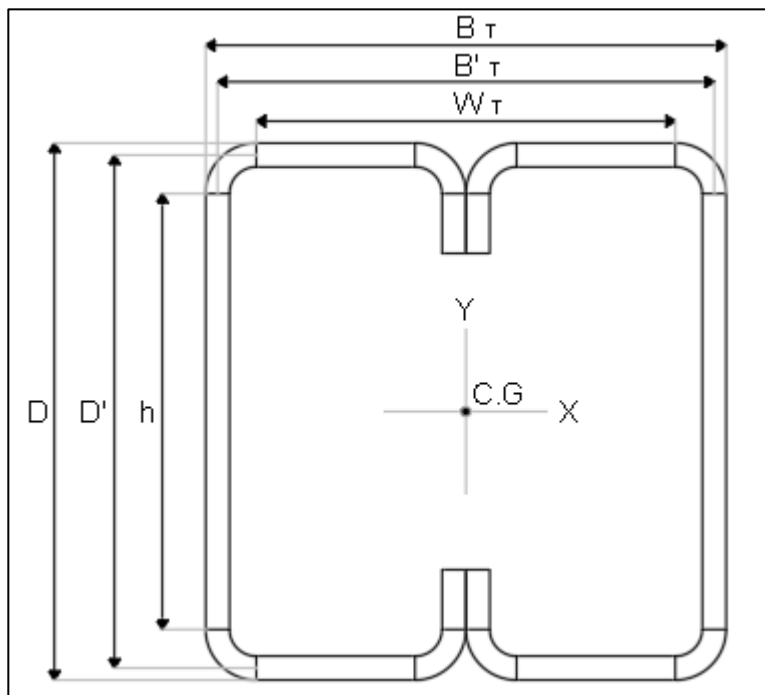
$$B := 60 \text{ mm}$$

$$C := 20 \text{ mm}$$

$$t := 2 \text{ mm}$$

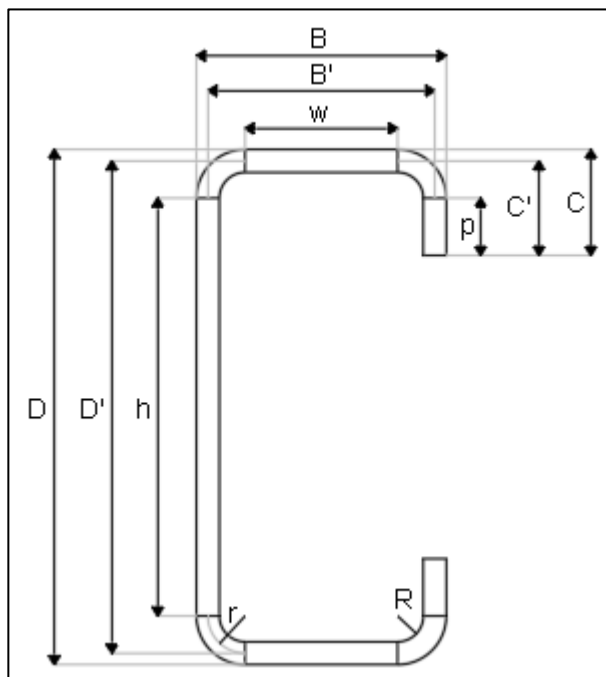
$$R := 5 \text{ mm}$$

Figura 91: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G del ejemplo de cálculo de resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 92: Sección transversal de un perfil conformado en frío tipo G, que conforma el perfil tipo cajón del ejemplo.



Fuente: Elaboración propia.

$$F_y := 340 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$G := 77200 \text{ MPa}$$

$$\mu := 0.3$$

Parámetros básicos

$$B_T := 2 \cdot B = 120 \text{ mm}$$

$$B'_T := B_T - t = 118 \text{ mm}$$

$$w_T := B_T - 2 \cdot (R + t) = 106 \text{ mm}$$

$$r := R + \frac{t}{2} = 6 \text{ mm}$$

$$h := D - (2 \cdot (R + t)) = 146 \text{ mm}$$

$$D' := D - t = 158 \text{ mm}$$

$$w := B - 2 \cdot (R + t) = 46 \text{ mm}$$

$$B' := B - t = 58 \text{ mm}$$

$$C' := C - \frac{t}{2} = 19 \text{ mm}$$

$$p := C - (R + t) = 13 \text{ mm}$$

$$u := \pi \cdot \frac{r}{2} = 9.425 \text{ mm}$$

$$c := 0.637 \cdot r = 3.822 \text{ mm}$$

$$I_u := 0.149 \cdot r^3 = 32.184 \text{ mm}^3$$

$$A := 2 \cdot t \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 1206.8 \text{ mm}^2$$

$$I_x := 4 \cdot t \cdot \left(0.0417 \cdot h^3 + w \cdot \left(\frac{h}{2} + r \right)^2 + 2 \cdot u \cdot \left(\frac{h}{2} + 0.637 \cdot r \right)^2 + 2 \cdot 0.149 \cdot r^3 + 0.0833 \cdot p^3 + \frac{p}{4} \cdot (h - p)^2 \right) = 4686733 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 4 \cdot t \cdot \left(p \cdot \left(\frac{t}{2} \right)^2 + 2 \cdot 0.149 \cdot r^3 + \pi \cdot \frac{r}{2} \cdot (R + t - 0.637 \cdot r)^2 + \left(\frac{w}{12} \right)^3 + w \cdot \left(\frac{w}{2} + R + t \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot r}{2} \right) \cdot (R + t + w + 0.637 \cdot r)^2 + \frac{h}{2} \cdot \left(B - \frac{t}{2} \right)^2 \right) = 2609376 \text{ mm}^4$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 62.32 \text{ mm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 46.5 \text{ mm}$$

$$J := \frac{2 \cdot (D' \cdot B'_T)^2}{\frac{D'}{t} + \frac{B'_T}{t}} = 5037663 \text{ mm}^4$$

$$X_{cg} := B = 60 \text{ mm}$$

$$Y_{cg} := \frac{D}{2} = 80 \text{ mm}$$

$$S_{fx} := \frac{I_x}{Y_{cg}} = 58584 \text{ mm}^3$$

$$S_{fy} := \frac{I_y}{X_{cg}} = 43490 \text{ mm}^3$$

w_T : ancho plano de la sección doble G.

r: radio hasta el eje longitudinal de la esquina o dobléz.

h: ancho plano del alma.

w: ancho plano del patín de uno de los perfiles que conforman la sección.

p: ancho plano de una pestaña.

u: longitud efectiva de una esquina. Las esquinas o dobleces se consideran 100% efectivas.

c: distancia desde el punto de origen hasta el centro de gravedad de la esquina.

Iu: inercia de la esquina o doblez para flexión en el eje X y Y.

A: área de la sección transversal.

Ix: momento de inercia alrededor del eje X.

Iy: momento de inercia alrededor del eje Y.

rx: radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal X.

ry: radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal Y.

J: constante torsional de St. Venant.

Xcg: coordenada en X del centro de gravedad.

Ycg: coordenada en Y del centro de gravedad.

Sfx: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje X.

Sfy: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje Y.

Límites y consideraciones dimensionales

Relación máxima ancho plano - espesor del patín

El patín es un elemento a compresión rigidizado con ambos bordes longitudinales conectados a otros elementos rigidizados

$$\frac{w_T}{t} = 53$$

$$\frac{w_T}{t} \leq 500$$

Cumple

Relación altura - espesor del alma

El alma no está reforzada, por tanto, la relación h/t debe ser menor o igual que 200

$$\frac{h}{t} = 73$$

$$\frac{h}{t} \leq 200$$

Cumple

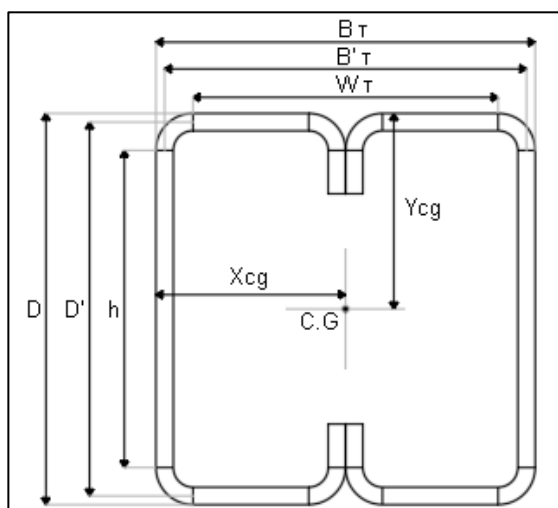
Anchos efectivos para flexión alrededor del eje X

Pestaña: elemento no rigidizado o rigidizador de borde bajo gradiente de esfuerzo cuando f_1 y f_2 están en compresión.

Patín: elemento rigidizado bajo compresión uniforme.

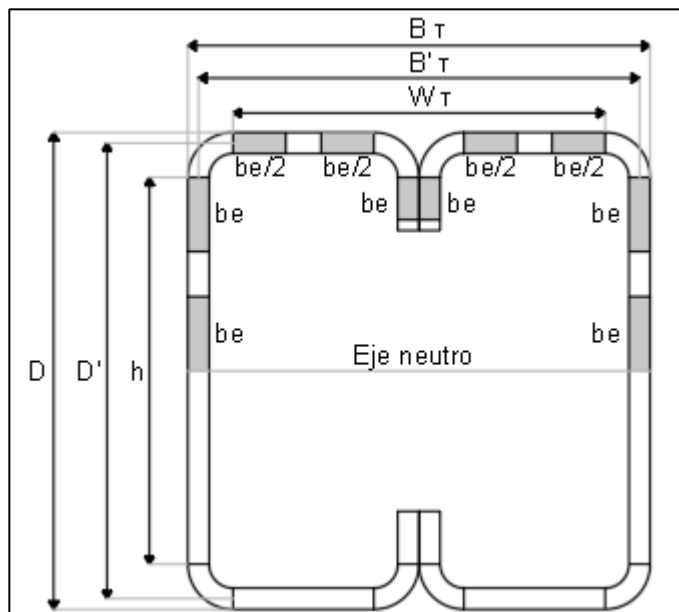
Alma: alma bajo gradiente de esfuerzos.

Figura 93: Posición del eje neutro de la sección completa del perfil conformado en frío tipo doble G.



Fuente: Elaboración propia.

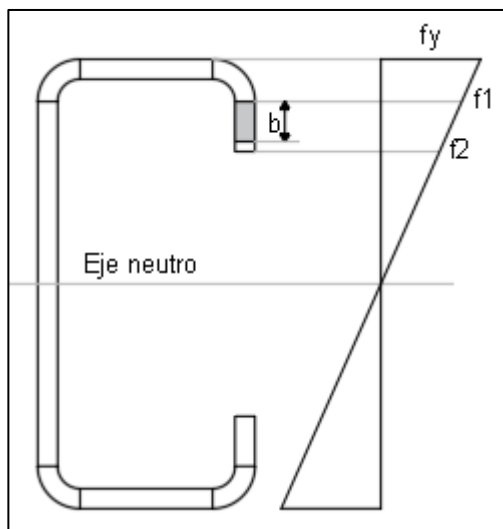
Figura 94: Anchos efectivos de la sección transversal del perfil conformado en frío tipo doble G.



Fuente: Elaboración propia.

Ancho efectivo de la pestaña

Figura 95: Sección transversal del perfil conformado tipo G que conforma el perfil en cajón, para el cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$f1 := \frac{\left(\frac{D}{2} - R - t\right) \cdot Fy}{\frac{D}{2}} = 310.3 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{\left(\frac{D}{2} - C\right) \cdot Fy}{\frac{D}{2}} = 255 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.822$$

Dado que el esfuerzo decrece hacia el borde libre, k se determina mediante la siguiente expresión:

$$k := \frac{0.578}{\Psi + 0.34} = 0.497$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{p}\right)^2 = 2128.3 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.382$$

$$\lambda < 0.673$$

$$be := p = 13 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del patín

$$f := Fy = 340 \text{ MPa}$$

$$k := 4$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2 = 1366.82 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.5$$

$$\lambda < 0.673$$

$$be := w = 46 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del alma

Se determina f_1 y f_2 mediante semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro coincide con el centroide de la sección.

$$f_1 := \frac{\left(\frac{D}{2} - R - t\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 310.25 \text{ MPa}$$

$$f_2 := f_1 = 310.25 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 1$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 = 814.09 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = 0.617$$

$$\lambda < 0.673$$

$$be := h = 146 \text{ mm}$$

$$h_o := D = 160 \text{ mm}$$

$$b_o := B_T = 120 \text{ mm}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 1.33$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b1 := \frac{b_e}{3 + \Psi} = 36.5 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

$$\Psi > 0.236$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de $b2$ es:

$$b2 := \frac{b_e}{2} = 73 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de $b1$ y $b2$

$$b1 + b2 = 109.5 \text{ mm}$$

Ancho disponible a compresión en el alma

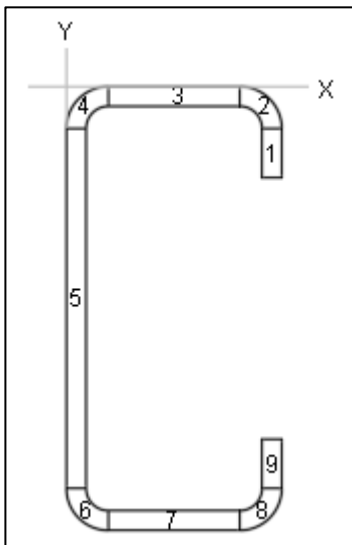
$$\frac{h}{2} = 73 \text{ mm}$$

$$109.5 \text{ mm} > h/2$$

Dado que la suma de $b1+b2$ es mayor al ancho plano del alma a compresión disponible, se concluye que el alma es 100% efectiva.

Posición del eje neutro

Figura 96: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo G, que conforma el perfil en cajón, para determinar la coordenada en Y del eje neutro (primera iteración).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Coordenada en Y del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo doble G.

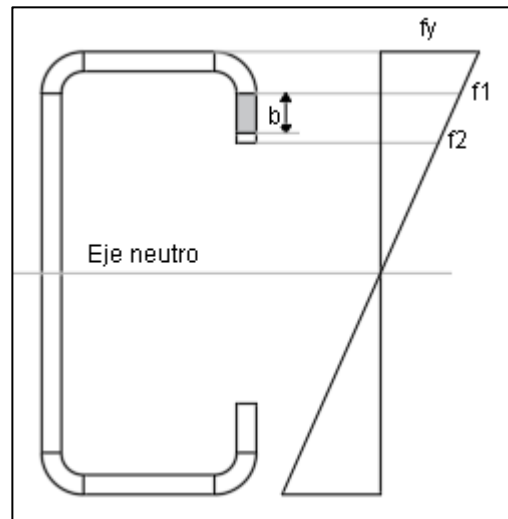
	Elemento	L (mm)	y (mm)	L.y (mm²)	L.y² (mm³)	I_{xx} (mm³)
Pestaña	1	13	13.50	175.5	2369.3	183.08
	2	9.43	3.18	30.0	95.2	32.18
Patín	3	46	1	46.0	46.0	
	4	9.43	3.18	30.0	95.3	32.18
Alma	5	146	80	11680	934400	259345
	6	9.43	156.82	1478.0	231790.3	32.18
Patín	7	46	159	7314	1162926	
	8	9.43	156.82	1478.0	231790.3	32.18
Pestaña	9	13	146.5	1905	279009	183.08
		301.70		24136.02	2842521.68	259839.57

$$Y_{cg} := \frac{24136.02 \text{ mm}^2}{301.7 \text{ mm}} = 80 \text{ mm}$$

Se determina los anchos efectivos con la nueva posición del eje neutro.

Ancho efectivo de la pestaña

Figura 97: Sección transversal del perfil conformado tipo G que conforma el perfil en cajón, para el cálculo del ancho efectivo de la pestaña superior (segunda iteración).



Fuente: Elaboración propia.

$$f1 := \frac{(Y_{cg} - R - t) \cdot Fy}{Y_{cg}} = 310.25 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{(Y_{cg} - C) \cdot Fy}{Y_{cg}} = 255 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.822$$

Dado que el esfuerzo decrece hacia el borde libre, k se determina mediante la siguiente expresión:

$$k := \frac{0.578}{\Psi + 0.34} = 0.497$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{p} \right)^2 = 2128.3 \text{ MPa}$$

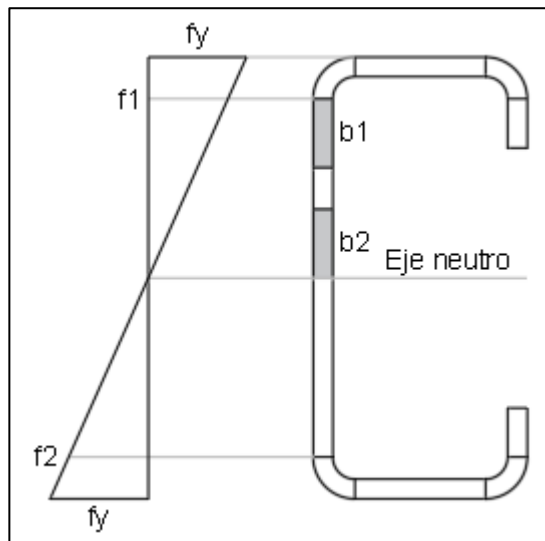
$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.382$$

$$\lambda < 0.673$$

$$b_e := p = 13 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del alma

Figura 98: Sección transversal del perfil conformado tipo G que conforma el perfil en cajón, para el cálculo del ancho efectivo del alma.



Fuente: Elaboración propia.

$$f1 := \frac{(Y_{cg} - R - t) \cdot Fy}{Y_{cg}} = 310.25 \text{ MPa}$$

$$f2 := \frac{(D - Y_{cg} - R - t) \cdot Fy}{Y_{cg}} = 310.25 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 814.09 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.617$$

$$\lambda < 0.673$$

$$b_e := h = 146 \text{ mm}$$

$$h_o := D = 160 \text{ mm}$$

$$b_o := B_T = 120 \text{ mm}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 1.33$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b1 := \frac{b_e}{3 + \Psi} = 36.5 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de $b2$ es:

$$b2 := \frac{b_e}{2} = 73 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de $b1$ y $b2$

$$b1 + b2 = 109.5 \text{ mm}$$

Ancho del alma a compresión disponible

$$Y_{cg} - R - t = 73 \text{ mm}$$

Dado que la suma de $b1+b2$ es mayor al ancho plano del alma a compresión disponible, se concluye que el alma es 100% efectiva.

Los anchos efectivos son los mismos determinados inicialmente, por tanto, la posición del eje neutro no cambia y se da por finalizado el proceso iterativo.

Tabla 20: Coordenada en Y del eje neutro, segunda iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo doble G.

	Elemento	L (mm)	y (mm)	L.y (mm ²)	L.y ² (mm ³)	Ixx (mm ³)
Pestaña	1	13	13.50	175.5	2369.3	183.08
	2	9.43	3.18	30.0	95.2	32.18
Patín	3	46	1	46.0	46.0	
	4	9.43	3.18	30.0	95.3	32.18
Alma	5	146	80	11680	934400	259345
	6	9.43	156.82	1478.0	231790.3	32.18
Patín	7	46	159	7314	1162926	
	8	9.43	156.82	1478.0	231790.3	32.18
Pestaña	9	13	146.5	1905	279009	183.08
		301.70		24136.02	2842521.68	259839.57

$$I_{ex} := 2 \cdot t \cdot (259839.57 \text{ mm}^3 + 2842521.68 \text{ mm}^3 - Y_{cg}^2 \cdot 301.7 \text{ mm}) = (4.7 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$S_{ex} := \frac{I_{ex}}{Y_{cg}} = 58574 \text{ mm}^3$$

I_{ex} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje X

S_{ex} : módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y .

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$M_n := S_{ex} \cdot F_y = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

ϕ_b : para aletas a compresión rigidizadas

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot M_n = 18.92 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al pandeo lateral torsional

$$\phi b := 0.9$$

$$C_b := 1$$

$$k_y := 1$$

$$L_y := 1000 \text{ mm}$$

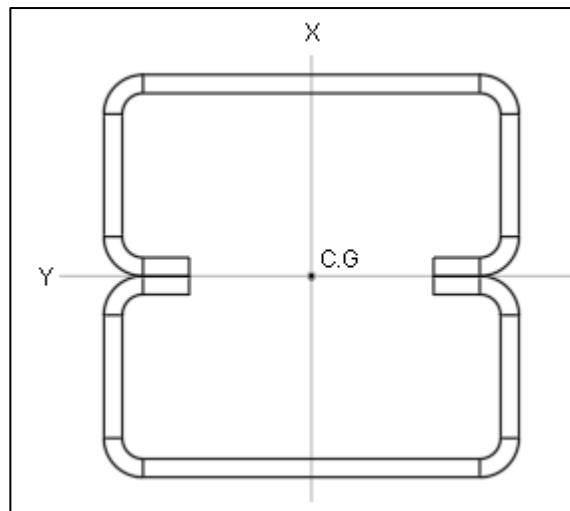
$$L_u := \frac{0.36 \cdot C_b \cdot \pi}{F_y \cdot S_{fx}} \cdot \sqrt{E \cdot G \cdot J \cdot I_y} = 25580 \text{ mm}$$

Como L_u es mayor a L_y la resistencia al pandeo lateral torsional se determina con la ecuación del Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

Por tanto, la resistencia nominal a la flexión alrededor del eje X es: 18.92 KN.m

Anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y

Figura 99: Anchos efectivos para flexión alrededor del eje Y del perfil conformado en frío doble G.



Fuente: Elaboración propia.

Pestaña: elemento no rigidizado bajo compresión uniforme.

Patín: hace las veces de alma, por ello se usa el diagrama de flujo para alma bajo gradiente de esfuerzos.

Alma: elemento rigidizado bajo compresión uniforme.

Ancho efectivo de la pestaña

f se determina mediante una semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro coincide con el centroide de la sección

$$f := \frac{\frac{t}{2} \cdot F_y}{\frac{B_T}{2}} = 5.67 \text{ MPa}$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{p}\right)^2 = 102681 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.007$$

$$\lambda < 0.673$$

Pestaña 100% efectiva

$$b_e := p = 13 \text{ mm}$$

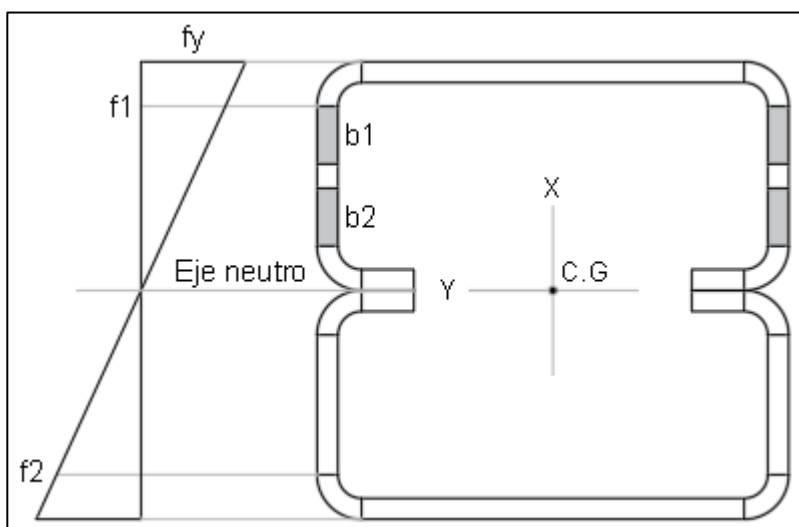
Ancho efectivo del Alma

Se determina f1 y f2 mediante semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro coincide con el centroide.

$$f_1 := \frac{\left(\frac{B_T}{2} - R - t\right) \cdot F_y}{\frac{B_T}{2}} = 300.33 \text{ MPa}$$

$$f_2 := f_1$$

Figura 100: Ancho efectivo del alma para el perfil conformado en frío tipo doble G.



Fuente: Elaboración propia.

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w_T} \right)^2 = 1544.4 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.441$$

$$\lambda < 0.673$$

$$b_e := 2 \cdot w = 92 \text{ mm}$$

$$h_o := B_T = 120 \text{ mm}$$

$$b_o := D = 160 \text{ mm}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 0.75$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b_1 := \frac{b_e}{3 + \Psi} = 23 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 1$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de b_2 es:

$$b_2 := \frac{b_e}{2} = 46 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de b_1 y b_2

$$b_1 + b_2 = 69 \text{ mm}$$

Dado que la suma de $b_1 + b_2$ es mayor al ancho plano del alma a compresión disponible, se concluye que el alma es 100% efectiva.

Ancho efectivo del patín

Aplica el diagrama de flujo para elemento rigidizado bajo compresión uniforme.

$$f := F_y = 340 \text{ MPa}$$

$$k := 4$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 135.68 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 1.58$$

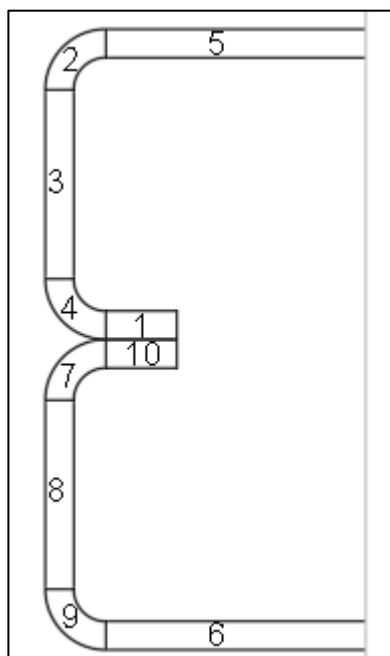
$$\lambda > 0.673$$

$$\rho := \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} = 0.544$$

$$b_e := \rho \cdot h = 79.41 \text{ mm}$$

Posición del eje neutro de la sección efectiva

Figura 101: Esquema para determinar la posición del eje neutro de la sección efectiva del perfil conformado en frío tipo doble G.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Coordenada en X del eje neutro, primera iteración, ejemplo de cálculo de la resistencia de perfil conformado en frío tipo doble G.

	Elemento	L (mm)	x (mm)	L.x (mm ²)	L.x ² (mm ³)	I _{yy} (mm ³)
Pestaña	1	13	59.000	767.000	45253	
	2	9.425	3.178	29.953	95	32.18
Patín C	3	46	30.000	1380.000	41400	8111.33
	4	9.425	56.822	535.547	30431	32.18
Alma C	5	39.705	0.100	3.971	0	
Alma T	6	73	119.000	8687.000	1033753	
	7	9.425	63.178	595.453	37620	32.18
Patín T	8	46	90.000	4140.000	372600	8111.33
	9	9.425	116.822	1101.047	128627	32.18
Pestaña	10	13	61.000	793.000	48373	
		268.41		18032.97	1738151.52	16351.40

$$X_{cg} := \frac{18032.97 \text{ mm}^2}{268.41 \cdot \text{mm}} = 67.18 \text{ mm}$$

Con la nueva posición del eje neutro se calcula los anchos efectivos

Ancho efectivo de la pestaña

f se determina mediante una semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro coincide con el centroide de la sección

$$f := \frac{\frac{t}{2} \cdot F_y}{X_{cg}} = 5.061 \text{ MPa}$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{p}\right)^2 = 17113.6 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.017$$

$$\lambda < 0.673$$

Pestaña 100% efectiva

$$b_e := p = 13 \text{ mm}$$

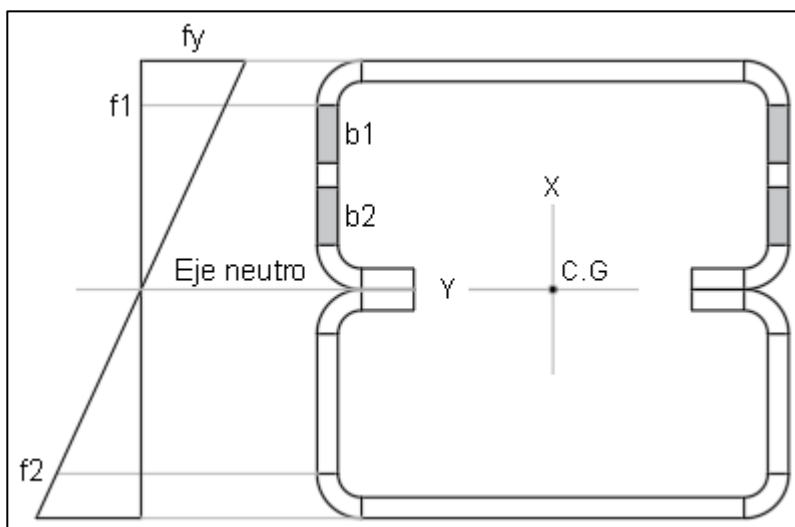
Ancho efectivo del Alma

Se determina f1 y f2 mediante semejanza de triángulos.

$$f_1 := \frac{(X_{cg} - R - t) \cdot F_y}{X_{cg}} = 304.58 \text{ MPa}$$

$$f_2 := \frac{(B_T - X_{cg} - R - t) \cdot F_y}{X_{cg}} = 231.86 \text{ MPa}$$

Figura 102: Sección transversal del perfil conformado en frío tipo cajón para determinar el acho efectivo del alma cuando la flexión es alrededor del eje Y.



Fuente: Elaboración propia.

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.761$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 18.45$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w_T} \right)^2 = 1187.24 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.506$$

$$\lambda < 0.673$$

$$b_e := 2 \cdot w = 92 \text{ mm}$$

$$h_o := B_T = 120 \text{ mm}$$

$$b_o := D = 160 \text{ mm}$$

$$\frac{h_o}{b_o} = 0.75$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b1 := \frac{be}{3 + \Psi} = 24.46 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 0.761$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de $b2$ es:

$$b2 := \frac{be}{2} = 46 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de $b1$ y $b2$

$$b1 + b2 = 70.46 \text{ mm}$$

Ancho plano del alma a compresión disponible

$$X_{cg} - 3 \cdot (R + t) = 46.18 \text{ mm}$$

Dado que la suma de $b1+b2$ es mayor al ancho plano del alma a compresión disponible, se concluye que el alma es 100% efectiva.

Ancho efectivo del patín

Aplica el diagrama de flujo para elemento rigidizado bajo compresión uniforme.

$$f := F_y = 340 \text{ MPa}$$

$$k := 4$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 135.68 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 1.583$$

$$\lambda > 0.673$$

$$\rho := \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} = 0.544$$

$$b_e := \rho \cdot h = 79.41 \text{ mm}$$

Los anchos efectivos son los mismos que los determinados en la primera iteración, por tanto, la posición del eje neutro se mantiene.

$$I_{ey} := 2 \cdot t \cdot (16351.40 \text{ mm}^3 + 1738151.52 \text{ mm}^3 - X_{cg}^2 \cdot 268.41 \text{ mm}) = 2171873 \text{ mm}^4$$

$$S_{ey} := \frac{I_{ey}}{X_{cg}} = 32327 \text{ mm}^3$$

I_{ey} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje Y.

S_{ey} : módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y .

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$M_n := S_{ey} \cdot F_y = 11 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

ϕ_b : para aletas a compresión rigidizadas.

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot M_n = 10 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al corte para flexión alrededor del eje X

$$\phi_v := 0.95$$

$$k_v := 5.34$$

$$A_w := 2 \cdot h \cdot t = 584 \text{ mm}^2$$

$$\mu := 0.3$$

$$\sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} = 56.05$$

$$\frac{h}{t} = 73$$

$$1.51 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} = 84.63$$

$$56.05 < h/t < 84.63$$

$$F_v := \frac{0.6 \cdot \sqrt{E \cdot k_v \cdot F_y}}{\frac{h}{t}} = 156.62 \text{ MPa}$$

$$V_n := A_w \cdot F_v = 91 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 87 \text{ kN}$$

Resistencia al corte para flexión alrededor del eje Y

$$\phi_v := 0.95$$

$$k_v := 5.34$$

$$A_w := 4 \cdot w \cdot t = 368 \text{ mm}^2$$

$$\mu := 0.3$$

$$\frac{w}{t} = 23$$

$$\sqrt{\frac{E \cdot kv}{F_y}} = 56.05$$

$$w/t < 56.05$$

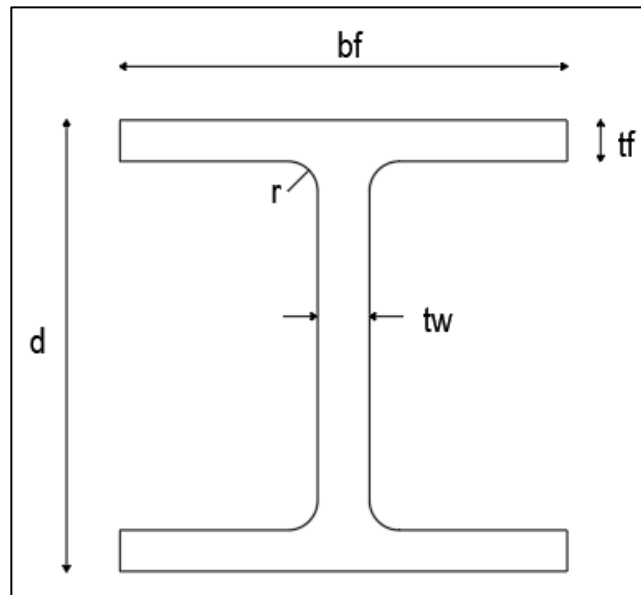
$$F_v := 0.6 \cdot F_y = 204 \text{ MPa}$$

$$V_n := A_w \cdot F_v = 75.07 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 71.32 \text{ kN}$$

Sección en I con simetría doble

Figura 103: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tipo I.



Fuente: Elaboración propia.

Perfil W12X65 (American Institute of Steel Construction, Shapes Database v15, noviembre 2017)

$$F_y := 350 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$L_b := 150 \text{ in}$$

Datos geométricos

$$b_f := 12 \text{ in}$$

$$t_f := 0.605 \text{ in}$$

$$d := 12.1 \text{ in}$$

$$t_w := 0.39 \text{ in}$$

$$k_{des} := 1.2 \text{ in}$$

$$r := k_{des} - t_f$$

Propiedades geométricas

$$A_{circ} := \pi \cdot (r)^2 = 1.11 \text{ in}^2$$

$$A_e := r \cdot r - \frac{A_{circ}}{4} = 0.076 \text{ in}^2$$

$$h1 := d - 2 \cdot t_f = 10.89 \text{ in}$$

$$h := d - 2 \cdot (t_f + r) = 9.7 \text{ in}$$

$$A := 2 \cdot (b_f \cdot t_f) + h1 \cdot t_w + A_e \cdot 4 = 19.07 \text{ in}^2$$

$$X_{cg} := \frac{b_f}{2} = 6 \text{ in}$$

$$Y_{cg} := \frac{d}{2} = 6.05 \text{ in}$$

$$I_x := 2 \cdot \left(\frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(Y_{cg} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{t_w \cdot h1^3}{12} \right) + 4 \cdot \left(\left(r \cdot \frac{r^3}{12} + r \cdot r \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \frac{r}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \cdot \frac{(r)^4}{16} + \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \left(r - \frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right)^2 \right) \right) = 530.6 \text{ in}^4$$

$$I_y := 2 \cdot \left(\frac{b_f^3 \cdot t_f}{12} \right) + \left(\frac{t_w^3 \cdot h_1}{12} \right) + 4 \left(\left(r \cdot \frac{r^3}{12} + r \cdot r \cdot \left(t_w + \frac{r}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \cdot \frac{(r)^4}{16} + \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(t_w + r - \left(\frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right)^2 \right) \right) = 174.3 \text{ in}^4$$

$$S_x := \frac{I_x}{d} = 87.7 \text{ in}^3$$

$$S_y := \frac{I_y}{\frac{b_f}{2}} = 29.05 \text{ in}^3$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 5.27 \text{ in}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 3.02 \text{ in}$$

$$Z_x := 2 \cdot \left(t_f \cdot b_f \cdot \left(Y_{cg} - \frac{t_f}{2} \right) + \frac{h_1^2}{8} \cdot t_w + 2 \cdot \left(r \cdot r \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \frac{r}{2} \right) - \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \left(r - \frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right) \right) \right) = 96.6 \text{ in}^3$$

$$Z_y := 4 \cdot \left(\frac{b_f^2}{8} \cdot t_f \right) + 2 \cdot h_1 \cdot \frac{t_w^2}{8} + 4 \cdot \left(r \cdot r \cdot \left(t_w + \frac{r}{2} \right) - \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(t_w + r - \left(\frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right) \right) = 44.13 \text{ in}^3$$

$$h_o := d - t_f = 11.5 \text{ in}$$

$$Leq := 2 \cdot r + t_w = 1.58 \text{ in}$$

$$Atot := 2 \cdot A_e + (2 \cdot r + t_w) \cdot t_f = 1.11 \text{ in}^2$$

$$tprom := \frac{Atot}{Leq} = 0.7 \text{ in}$$

$$J := \frac{1}{3} \left(2 \cdot \left((2 \cdot r + t_w) \cdot (tprom)^3 \right) + 2 \cdot \left((b_f - (2 \cdot r + t_w)) \cdot t_f^3 \right) + h_o \cdot t_w^3 \right) = 2.13 \text{ in}^4$$

$$C_w := \frac{h_o^2 \cdot I_y}{4} = 5758 \text{ in}^6$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}} = 3.38 \text{ in}$$

Fy: esfuerzo de fluencia del acero.

E: módulo de elasticidad del acero.

bf: ancho del patín.

tf: espesor del patín.

tw: espesor del alma.

d: peralte del perfil. Distancia paralela al alma medida entre bordes externos.

h: distancia libre entre patines, menos el filete o radio de la esquina en cada patín.

A: área de la sección transversal.

Xcg: coordenada en X del centro de gravedad de la sección completa.

Ycg: coordenada en Y del centro de gravedad de la sección completa.

Ix: inercia de la sección completa alrededor del eje X

Iy: inercia de la sección completa alrededor del eje Y.

Sx: módulo elástico de sección alrededor del eje X.

Sy: módulo elástico de sección alrededor del eje Y.

rx: radio de giro alrededor del eje X.

ry: radio de giro alrededor del eje Y.

Zx: módulo plástico de la sección alrededor del eje X.

Zy: módulo plástico de la sección alrededor del eje Y.

ho: distancia entre centroides de patines.

Cw: constante de alabeo de la sección.

rts: radio efectivo de giro usado en el cálculo de L_r para el estado límite de pandeo lateral torsional para flexión alrededor del eje mayor.

J: constante torsional.

Flexión alrededor del eje fuerte

Se requiere determinar la relación ancho - espesor del alma y del patín para compararlos con los valores límite y definir si el elemento es compacto, no compacto o esbelto.

Para el alma aplica el caso 15, almas de perfiles en I de simetría doble.

$$\lambda := \frac{h}{t_w} = 24.87$$

$$\lambda_p := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 89.88$$

$$\lambda < \lambda_p$$

Alma compacta

Para el patín aplica el caso 10, aletas de perfiles laminados en I.

$$\lambda := \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$\lambda_p := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.08$$

$$\lambda > \lambda_p$$

Patín no compacto

Resistencia a la flexión alrededor del eje X

El perfil tiene alma compacta y patín no compacto, aplica el capítulo F.2.6.3 de la norma NSR10. Se determina la resistencia siguiendo el diagrama de flujo para perfil en I con simetría doble, con alma compacta y patín no compacto o esbelto, solicitado por flexión alrededor del eje mayor.

Momento plástico

$$M_p := F_y \cdot Z_x = 554 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo lateral torsional

$$C_b := 1.3$$

C_b : factor de modificación para pandeo lateral torsional.

$$c := 1$$

$$L_p := 1.76 \cdot r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 127.19 \text{ in}$$

$$L_r := 1.95 \cdot r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 \cdot F_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o}\right)^2 + 6.76 \cdot \left(\frac{0.7 \cdot F_y}{E}\right)^2}} = 414.42 \text{ in}$$

Como L_b es mayor que L_p y menor que L_r , M_n se determina mediante la siguiente ecuación:

$$PLT := C_b \cdot \left(M_p - (M_p - 0.7 \cdot F_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right) = 700 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local del patín a compresión

$$\lambda := \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$\lambda_{pf} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.08$$

$$\lambda_{rf} := \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 23.9$$

$$\lambda_{pf} < \lambda < \lambda_{rf}$$

$$PLP := \left(M_p - (M_p - 0.7 \cdot F_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right) = 543 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

La resistencia nominal a la flexión corresponde al límite de pandeo lateral torsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot PLP = 489 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a la flexión alrededor débil

Aplica el diagrama de flujo para perfil en I con simetría doble y canales solicitados por flexión alrededor de su eje menor.

La resistencia nominal corresponde al menor entre los estados límite de momento plástico y pandeo local del patín.

Momento plástico

$$M_p := F_y \cdot Z_y = 253 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$1.6 \cdot F_y \cdot S_y = 267 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p < 267 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{n1} := M_p = 253 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda := \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$\lambda_{pf} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.08$$

$$\lambda_{rf} := \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 23.9$$

$$\lambda_{pf} < \lambda < \lambda_{rf}$$

$$Mn2 := \left(Mp - (Mp - 0.7 \cdot Fy \cdot Sy) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right) = 245 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Mn := Mn2 = 245 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot Mn = 220.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a cortante

Cortante para flexión alrededor del eje fuerte.

$$A_w := d \cdot t_w = 4.72 \text{ in}^2$$

$$\frac{h}{t_w} = 24.87$$

$$2.24 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} = 53.55$$

Como la relación h/tw es menor que 53.55, los valores de Cv y Φ_v son:

$$Cv := 1$$

$$\phi_v := 1$$

$$Vn := 0.6 \cdot Fy \cdot A_w \cdot Cv = 639 \text{ kN}$$

Cortante para flexión alrededor del eje débil

$$\phi_v := 0.9$$

$$k_v := 1.2$$

$$A_f := 2 \cdot b_f \cdot t_f = 14.52 \text{ in}^2$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$1.1 \cdot \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_y}} = 28.8$$

$$b_f / (2 \cdot t_f) < 28.8$$

$$C_v := 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot F_y \cdot A_f \cdot C_v = 1967.2 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 1770.5 \text{ kN}$$

k_v : coeficiente de pandeo del alma.

C_v : coeficiente de cortante del alma.

Φ_v : coeficiente de reducción de resistencia para cortante.

A_w : área del alma.

A_f : área de un patín.

Canal

Perfil C6X8.2 (American Institute of Steel Construction, Shapes Database v15, noviembre 2017)

Datos geométricos

$$b_f := 12 \text{ in}$$

$$t_f := 0.605 \text{ in}$$

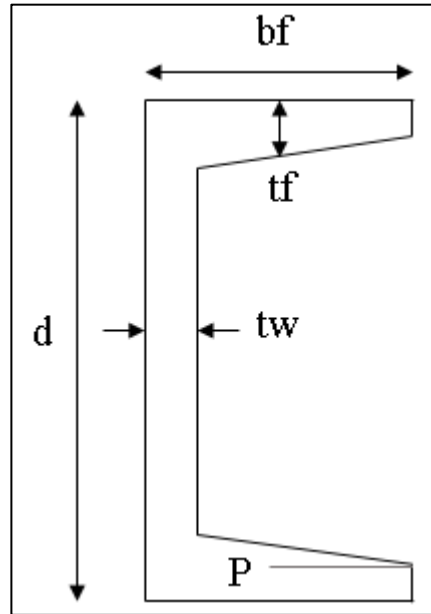
$$d := 12.1 \text{ in}$$

$$t_w := 0.39 \text{ in}$$

$$k_{des} := 1.2 \text{ in}$$

$$r := k_{des} - t_f$$

Figura 104: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tipo C.



Fuente: Elaboración propia.

$$F_y := 350 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$L_b := 150 \text{ in}$$

Propiedades geométricas

$$A_{circ} := \pi \cdot (r)^2 = 1.11 \text{ in}^2$$

$$A_e := r \cdot r - \frac{A_{circ}}{4} = 0.076 \text{ in}^2$$

$$h_1 := d - 2 \cdot t_f = 10.89 \text{ in}$$

$$h := d - 2 \cdot (t_f + r) = 9.7 \text{ in}$$

$$A := 2 \cdot (b_f \cdot t_f) + h1 \cdot t_w + A_e \cdot 4 = 19.07 \text{ in}^2$$

$$X_{cg} := \frac{b_f}{2} = 6 \text{ in}$$

$$Y_{cg} := \frac{d}{2} = 6.05 \text{ in}$$

$$I_x := 2 \cdot \left(\frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(Y_{cg} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{t_w \cdot h1^3}{12} \right) + 4 \cdot \left(\left(r \cdot \frac{r^3}{12} + r \cdot r \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \frac{r}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \cdot \frac{(r)^4}{16} + \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \left(r - \frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right)^2 \right) \right) = 530.6 \text{ in}^4$$

$$I_y := 2 \cdot \left(\frac{b_f^3 \cdot t_f}{12} \right) + \left(\frac{t_w^3 \cdot h1}{12} \right) + 4 \cdot \left(\left(r \cdot \frac{r^3}{12} + r \cdot r \cdot \left(t_w + \frac{r}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \cdot \frac{(r)^4}{16} + \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(t_w + r - \left(\frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right)^2 \right) \right) = 174.3 \text{ in}^4$$

$$S_x := \frac{I_x}{\frac{d}{2}} = 87.7 \text{ in}^3$$

$$S_y := \frac{I_y}{\frac{b_f}{2}} = 29.05 \text{ in}^3$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 5.27 \text{ in}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 3.02 \text{ in}$$

$$Z_x := 2 \cdot \left(t_f \cdot b_f \cdot \left(Y_{cg} - \frac{t_f}{2} \right) + \frac{h1^2}{8} \cdot t_w + 2 \cdot \left(r \cdot r \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \frac{r}{2} \right) - \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(Y_{cg} - t_f - \left(r - \frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right) \right) \right) = 96.6 \text{ in}^3$$

$$Z_y := 4 \cdot \left(\frac{b_f^2}{8} \cdot t_f \right) + 2 \cdot h1 \cdot \frac{t_w^2}{8} + 4 \cdot \left(r \cdot r \cdot \left(t_w + \frac{r}{2} \right) - \frac{A_{circ}}{4} \cdot \left(t_w + r - \left(\frac{4}{3} \frac{r}{\pi} \right) \right) \right) = 44.13 \text{ in}^3$$

$$h_o := d - t_f = 11.5 \text{ in}$$

$$L_{eq} := 2 \cdot r + t_w = 1.58 \text{ in}$$

$$A_{tot} := 2 \cdot A_e + (2 \cdot r + t_w) \cdot t_f = 1.11 \text{ in}^2$$

$$t_{prom} := \frac{A_{tot}}{L_{eq}} = 0.7 \text{ in}$$

$$J := \frac{1}{3} \left(2 \cdot \left((2 \cdot r + t_w) \cdot (t_{prom})^3 \right) + 2 \cdot \left((b_f - (2 \cdot r + t_w)) \cdot t_f^3 \right) + h_o \cdot t_w^3 \right) = 2.13 \text{ in}^4$$

$$C_w := \frac{h_o^2 \cdot I_y}{4} = 5758 \text{ in}^6$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}} = 3.38 \text{ in}$$

Fy: esfuerzo de fluencia del acero.

E: módulo de elasticidad del acero.

bf: ancho del patín.

tf: espesor del patín.

tw: espesor del alma.

d: peralte del perfil. Distancia paralela al alma medida entre bordes externos.

h: distancia libre entre patines, menos el filete o radio de la esquina en cada patín.

A: área de la sección transversal.

Xcg: coordenada en X del centro de gravedad de la sección completa.

Ycg: coordenada en Y del centro de gravedad de la sección completa.

Ix: inercia de la sección completa alrededor del eje X

Iy: inercia de la sección completa alrededor del eje Y.

Sx: módulo elástico de sección alrededor del eje X.

Sy: módulo elástico de sección alrededor del eje Y.

r_x : radio de giro alrededor del eje X.

r_y : radio de giro alrededor del eje Y.

Z_x : módulo plástico de la sección alrededor del eje X.

Z_y : módulo plástico de la sección alrededor del eje Y.

h_o : distancia entre centroides de patines.

C_w : constante de alabeo de la sección.

r_{ts} : radio efectivo de giro usado en el cálculo de L_r para el estado límite de pandeo lateral torsional bajo flexión alrededor del eje mayor.

J : constante torsional.

Resistencia a la flexión alrededor del eje X

Se requiere determinar la relación ancho - espesor del alma y del patín para compararlos con los valores límite y definir si el elemento es compacto, no compacto o esbelto.

Para el alma aplica el caso 15, almas de perfiles en I de simetría doble.

$$\lambda := \frac{h}{t_w} = 24.87$$

$$\lambda_p := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 89.88$$

$$\lambda < \lambda_p$$

Alma compacta

Para el patín aplica el caso 10, aletas de perfiles laminados en I.

$$\lambda := \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$\lambda_p := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.08$$

$$\lambda > \lambda_p$$

Patín no compacto

Resistencia a la flexión alrededor del eje X

El perfil tiene alma compacta y patín no compacto, aplica el capítulo F.2.6.3 de la norma NSR10. Se determina la resistencia siguiendo el diagrama de flujo para perfil en I con simetría doble, con alma compacta y patín no compacto o esbelto, solicitado por flexión alrededor del eje mayor.

Momento plástico

$$M_p := F_y \cdot Z_x = 554 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo lateral torsional

$$C_b := 1.3$$

C_b : factor de modificación para pandeo lateral torsional.

$$c := 1$$

$$L_p := 1.76 \cdot r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 127.19 \text{ in}$$

$$L_r := 1.95 \cdot r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 \cdot F_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o}\right)^2 + 6.76 \cdot \left(\frac{0.7 \cdot F_y}{E}\right)^2}} = 414.42 \text{ in}$$

Como L_b es mayor que L_p y menor que L_r , M_n se determina mediante la siguiente ecuación:

$$PLT := C_b \cdot \left(M_p - (M_p - 0.7 \cdot F_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right) = 700 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local del patín a compresión

$$\lambda := \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$\lambda_{pf} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.08$$

$$\lambda_{rf} := \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 23.9$$

$$\lambda_{pf} < \lambda < \lambda_{rf}$$

$$PLP := \left(M_p - (M_p - 0.7 \cdot F_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right) = 543 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

La resistencia nominal a la flexión corresponde al límite de pandeo lateral torsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot PLP = 489 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a la flexión alrededor del eje Y

Aplica el diagrama de flujo para perfil en I con simetría doble y canales solicitados por flexión alrededor de su eje menor.

La resistencia nominal corresponde al menor entre los estados límite de momento plástico y pandeo local del patín.

Momento plástico

$$M_p := F_y \cdot Z_y = 253 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$1.6 \cdot F_y \cdot S_y = 267 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p < 267 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{n1} := M_p = 253 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda := \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$\lambda_{pf} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.08$$

$$\lambda_{rf} := \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 23.9$$

$$\lambda_{pf} < \lambda < \lambda_{rf}$$

$$M_{n2} := \left(M_p - (M_p - 0.7 \cdot F_y \cdot S_y) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right) = 245 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_n := M_{n2} = 245 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_n = 220.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a cortante

Cortante para flexión alrededor del eje fuerte.

$$A_w := d \cdot t_w = 4.72 \text{ in}^2$$

$$\frac{h}{t_w} = 24.87$$

$$2.24 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 53.55$$

Como la relación h/t_w es menor que 53.55, los valores de C_v y Φ_v son:

$$C_v := 1$$

$$\phi_v := 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot F_y \cdot A_w \cdot C_v = 639 \text{ kN}$$

Cortante para flexión alrededor del eje débil

$$\phi_v := 0.9$$

$$k_v := 1.2$$

$$A_f := 2 \cdot b_f \cdot t_f = 14.52 \text{ in}^2$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 9.92$$

$$1.1 \cdot \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_y}} = 28.8$$

$$b_f / (2 \cdot t_f) < 28.8$$

$$C_v := 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot F_y \cdot A_f \cdot C_v = 1967.2 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 1770.5 \text{ kN}$$

k_v : coeficiente de pandeo del alma.

C_v : coeficiente de cortante del alma.

Φ_v : coeficiente de reducción de resistencia para cortante.

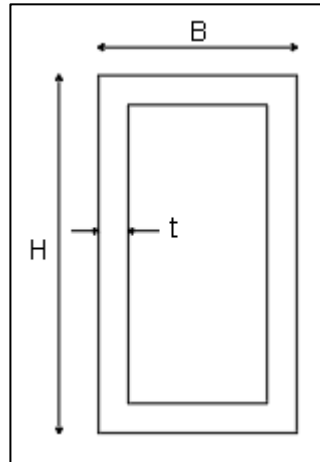
A_w : área del alma.

A_f : área de un patín.

Perfil tubular estructural rectangular

Perfil HSS7X5X0.250 (American Institute of Steel Construction, Shapes Database v15, noviembre 2017)

Figura 105: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tubular estructural rectangular.



Fuente: Elaboración propia.

$$F_y := 317.2 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

Datos geométricos

$$t := 0.233 \text{ in}$$

$$H := 7 \text{ in}$$

$$B := 5 \text{ in}$$

Propiedades geométricas

$$b := B - 2 \cdot t = 4.53 \text{ in}$$

$$h := H - 2 \cdot t = 6.53 \text{ in}$$

$$A := B \cdot H - b \cdot h = 5.37 \text{ in}^2$$

$$I_x := \frac{B \cdot H^3}{12} - \frac{b \cdot h^3}{12} = 37.52 \text{ in}^4$$

$$I_y := \frac{H \cdot B^3}{12} - \frac{h \cdot b^3}{12} = 22.17 \text{ in}^4$$

$$X_{cg} := \frac{B}{2} = 2.5 \text{ in}$$

$$Y_{cg} := \frac{H}{2} = 3.5 \text{ in}$$

$$S_x := \frac{I_x}{Y_{cg}} = 10.72 \text{ in}^3$$

$$S_y := \frac{I_y}{X_{cg}} = 8.87 \text{ in}^3$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 2.64 \text{ in}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 2.03 \text{ in}$$

$$Z_x := 2 \cdot \left(\left(B \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{H}{4} \right) - \left(b \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4} \right) \right) = 12.86 \text{ in}^3$$

$$Z_y := 2 \cdot \left(\left(H \cdot \frac{B}{2} \cdot \frac{B}{4} \right) - \left(h \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{b}{4} \right) \right) = 10.17 \text{ in}^3$$

$$J := 4 \cdot t \cdot \frac{((B-t) \cdot (H-t))^2}{2(B-2 \cdot t) + 2(H-2 \cdot t)} = 43.81 \text{ in}^4$$

F_y: esfuerzo de fluencia del acero.

E: módulo de elasticidad del acero.

t: espesor de pared de diseño.

H: peralte total del miembro.

B: ancho total del miembro.

b: ancho del patín en compresión.

h: distancia libre entre patines, menos el filete o radio de la esquina en cada patín.

A: área de la sección transversal.

I_x : inercia de la sección completa alrededor del eje X

I_y : inercia de la sección completa alrededor del eje Y.

X_{cg} : coordenada en X del centro de gravedad de la sección completa.

Y_{cg} : coordenada en Y del centro de gravedad de la sección completa.

S_x : módulo elástico de sección alrededor del eje X.

S_y : módulo elástico de sección alrededor del eje Y.

r_x : radio de giro alrededor del eje X.

r_y : radio de giro alrededor del eje Y.

Z_x : módulo plástico de la sección en el eje X.

Z_y : módulo plástico de la sección en el eje Y.

J: constante torsional.

Flexión alrededor del eje X

La resistencia nominal a la flexión alrededor del eje mayor, corresponde al menor entre los valores obtenidos para: estado límite de momento plástico, pandeo local del patín y pandeo local del alma bajo flexión pura.

Momento plástico

$$M_p := F_y \cdot Z_x = 66.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local del patín

Caso 17, aletas de PTE y perfiles en cajón de sección rectangular y espesor uniforme.

$$\lambda := \frac{b}{t} = 19.46$$

$$\lambda_p := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 28.12$$

$$\lambda < \lambda_p$$

Patín compacto

Para secciones compactas no aplica el estado límite de pandeo local de la aleta. Por tanto:

$$M_n := M_p = 66.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local del alma bajo flexión pura

Caso 19, almas de PTE y perfiles en cajón de sección rectangular.

$$\lambda := \frac{h}{t} = 28.04$$

$$\lambda_p := 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 60.77$$

Como λ es menor que λ_p la sección es compacta y por tanto, no aplica el estado límite de pandeo local del alma

$$M_n := M_p = 67 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo lateral torsional

$$L_b := 80 \text{ in}$$

$$L_p := 0.13 \cdot E \cdot r_y \cdot \frac{\sqrt{J \cdot A}}{M_p} = 198.7 \text{ in}$$

$$L_r := 2 \cdot E \cdot r_y \cdot \frac{\sqrt{J \cdot A}}{0.7 \cdot F_y \cdot S_x} = 5237.3 \text{ in}$$

$$M_n := M_p = 66.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por tanto, la resistencia nominal a la flexión alrededor del eje X es:

$$M_n := M_p = 66.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_n = 60.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Flexión alrededor del eje Y

Plastificación de la sección

$$M_p := F_y \cdot Z_y = 52.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local del patín

Caso 17, aletas de PTE y perfiles en cajón de sección rectangular y espesor uniforme

$$\lambda := \frac{h}{t} = 28.04$$

$$\lambda_p := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 28.12$$

$$\lambda < \lambda_p$$

Patín compacto

Para secciones compactas no aplica el estado límite de pandeo local de la aleta. Por tanto:

$$M_n := M_p = 52.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local del alma bajo flexión pura

Caso 19, almas de PTE y perfiles en cajón de sección rectangular.

$$\lambda := \frac{b}{t} = 19.46$$

$$\lambda_p := 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 60.77$$

Como λ es menor que λ_p la sección es compacta y por tanto, no aplica el estado límite de pandeo local del alma

$$M_n := M_p = 52.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Para flexión alrededor del eje débil no aplica pandeo lateral torsional.

La resistencia nominal a la flexión alrededor del eje Y es:

$$M_n := M_p = 52.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_n = 47.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a cortante

Flexión alrededor del eje fuerte

$$\phi_v := 0.9$$

$$k_v := 5$$

$$A_w := 2 \cdot h \cdot t = 3.04 \text{ in}^2$$

$$\frac{h}{t} = 28.04$$

$$1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} = 61.76$$

$$h / t < 61.76$$

$$C_v := 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot F_y \cdot A_w \cdot C_v$$

$$\phi_v \cdot V_n = 336.5 \text{ kN}$$

Flexión alrededor del eje débil

$$\phi_v := 0.9$$

$$k_v := 5$$

$$A_w := 2 \cdot b \cdot t = 2.11 \text{ in}^2$$

$$\frac{b}{t} = 19.46$$

$$1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} = 61.76$$

$$b/t < 61.76$$

$$C_v := 1$$

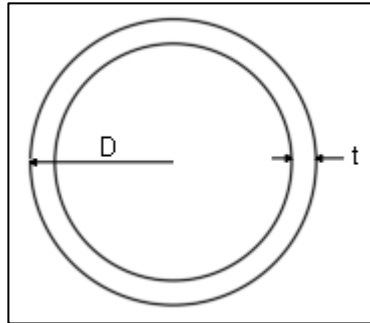
$$V_n := 0.6 \cdot F_y \cdot A_w \cdot C_v$$

$$\phi_v \cdot V_n = 233.5 \text{ kN}$$

Perfil tubular estructural circular

Pipe5SCH80 (American Institute of Steel Construction, Shapes Database v15, noviembre 2017)

Figura 106: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente tubular estructural circular.



Fuente: Elaboración propia.

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y := 241.32 \text{ MPa}$$

$$D := 5.563 \text{ in}$$

$$t := 0.349 \text{ in}$$

Propiedades geométricas

$$A := \left(\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right) - \left(\pi \cdot \left(\frac{D-t}{2} \right)^2 \right) = 5.72 \text{ in}^2$$

$$I := \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^4}{4} - \frac{\pi \cdot \left(\frac{D-t}{2} \right)^4}{4} = 19.51 \text{ in}^4$$

$$S := \frac{I}{\frac{D}{2}} = 7.02 \text{ in}^3$$

$$Z := \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^3 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{D-t}{2} \right)^3 = 9.5 \text{ in}^3$$

D: diámetro exterior.

t: espesor de diseño.

A: área bruta de la sección transversal.

I: inercia de la sección alrededor del eje X y Y.

S: módulo elástico de la sección alrededor del eje de flexión X y Y.

Z: módulo plástico de la sección sobre el eje de flexión X y Y.

Inicialmente se determina la relación diámetro - espesor para corroborar que sea menor que $0.45E/F_y$ y se pueda aplicar las ecuaciones que se presentan en las normas NSR10 y ASCE 360 – 16.

$$\frac{D}{t} = 15.94$$

$$0.45 \cdot \frac{E}{F_y} = 372.9$$

$$D / t < 372.9$$

Cumple

La resistencia nominal a la flexión corresponde al menor entre los límites de momento plástico y pandeo local.

Plastificación de la sección

$$M_p := F_y \cdot Z = 37.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo local

$$\lambda := \frac{D}{t} = 15.94$$

$$\lambda_p := 0.07 \frac{E}{F_y} = 58.01$$

Compacto

Como λ es menor que λ_p no aplica el estado límite de pandeo local, por tanto:

$$M_n := M_p = 37.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a flexión alrededor del eje X y del eje Y

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_n = 33.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a cortante

$$L_v := 50 \text{ in}$$

L_v : distancia entre los puntos de fuerza cortante máxima y cortante cero.

$$F_{cr1} := \frac{1.6 \cdot E}{\sqrt{\frac{L_v}{D}} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{5}{4}}} = 3351.31 \text{ MPa}$$

$$F_{cr2} := \frac{0.78 \cdot E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} = 2451.32 \text{ MPa}$$

F_{cr} se toma como el mayor entre F_{cr1} y F_{cr2}

$$F_{cr} := F_{cr1} = 3351.31 \text{ MPa}$$

$$0.6 \cdot F_y = 144.792 \text{ MPa}$$

Como F_{cr} es mayor que $0.6F_y$, la resistencia a cortante se determina así:

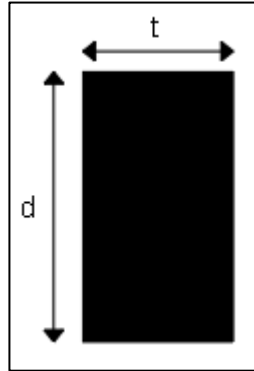
$$V_n := \frac{0.6 \cdot F_y \cdot A}{2} = 267 \text{ kN}$$

$$\phi_v := 0.9$$

$$\phi_v \cdot V_n = 240 \text{ kN}$$

Barra rectangular

Figura 107: Sección transversal para el ejemplo del perfil laminado en caliente barra rectangular.



Fuente: Elaboración propia.

Barra de 2X2.2

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y := 340 \text{ MPa}$$

$$d := 2.2 \text{ in}$$

$$t := 2 \text{ in}$$

$$L_b := 80 \text{ in}$$

$$C_b := 1$$

$$Z_x := \frac{t}{4} \cdot d^2 = 2.42 \text{ in}^3$$

$$Z_y := \frac{d}{4} \cdot t^2 = 2.2 \text{ in}^3$$

E: módulo de elasticidad del acero.

F_y: esfuerzo de fluencia del acero.

d: peralte de la barra rectangular.

t: ancho de la barra rectangular.

L_b : longitud entre puntos que están arriostrados contra desplazamiento lateral de la zona a compresión o arriostrados contra torsión de la sección transversal.

Z_x : módulo plástico de la sección para flexión alrededor del eje X.

Z_y : módulo plástico de la sección para flexión alrededor del eje Y.

Barra solicitada alrededor de su eje mayor

La resistencia nominal a la flexión corresponde al menor entre los valores de momento plástico y pandeo lateral torsional.

Momento plástico

$$M_p := F_y \cdot Z_x = 13.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo lateral torsional

$$\frac{L_b \cdot d}{t^2} = 44$$

$$0.08 \frac{E}{F_y} = 47.06$$

$$44 < 0.08E / F_y$$

De acuerdo al diagrama de flujo la resistencia nominal para este caso corresponde al momento plástico

$$M_n := M_p = 13.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por tanto, la resistencia nominal a flexión alrededor del eje X es:

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_n = 12.13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Barra solicitada alrededor de su eje menor

$$M_p := F_y \cdot Z_y = 12.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.9$$

$$\phi_b \cdot M_p = 11.03 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia a cortante

$$A_w := t \cdot d = 4.4 \text{ in}^2$$

$$\phi_v := 0.9$$

$$V_n := 0.6 \cdot A_w \cdot F_y = 579.1 \text{ kN}$$

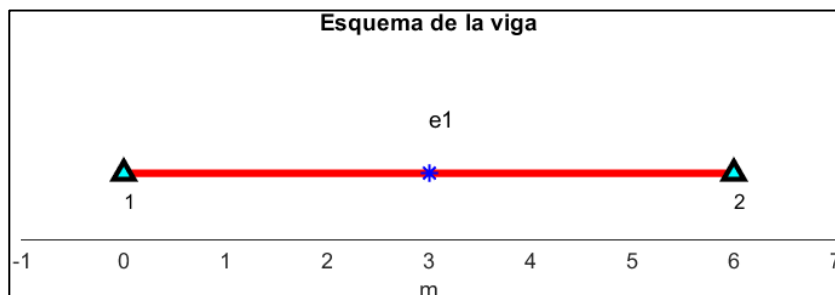
$$\phi_v \cdot V_n = 521.19 \text{ kN}$$

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Comparaciones de análisis

Modelo 1: viga simplemente apoyada.

Figura 108: Esquema de una viga simplemente apoyada en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje fuerte

Figura 109: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en Etabs.

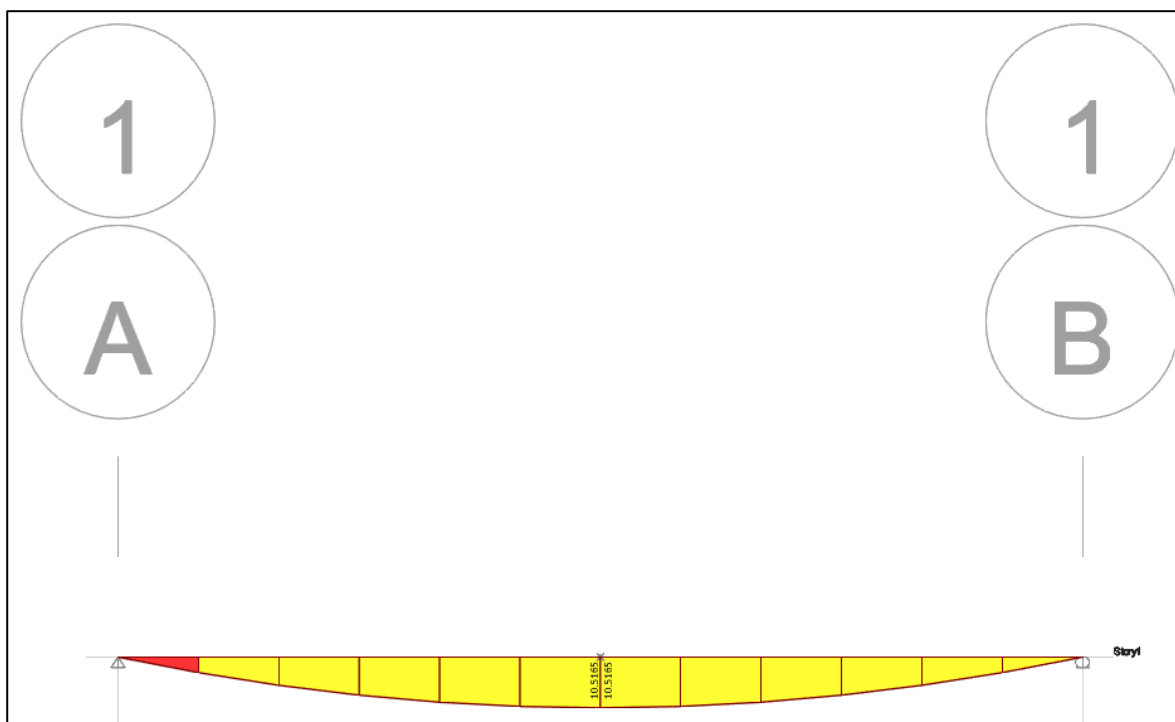


Figura 110: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.

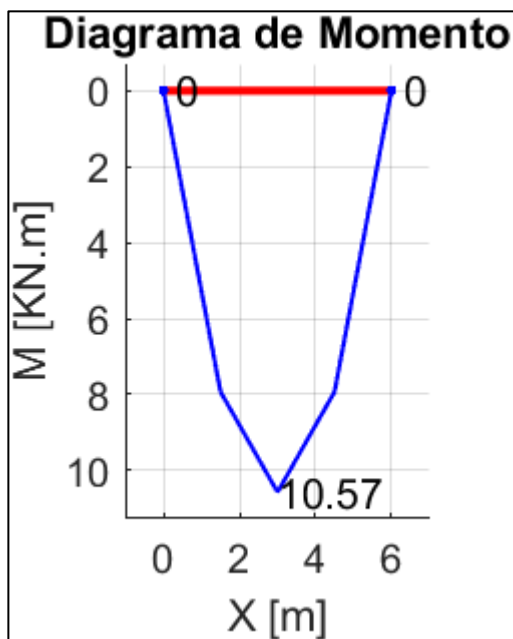


Figura 111: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en Etabs.

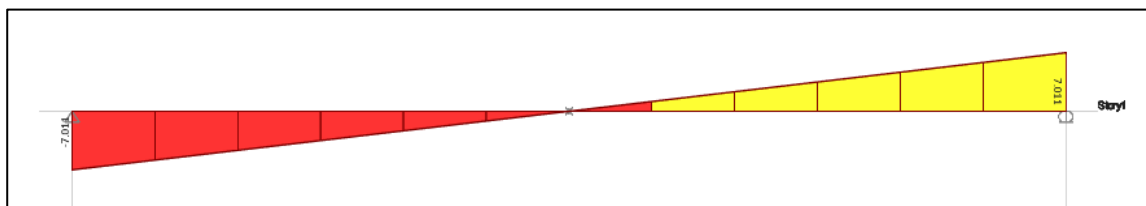


Figura 112: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.

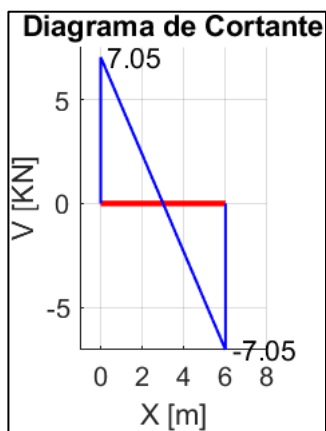


Figura 113: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en Etabs.

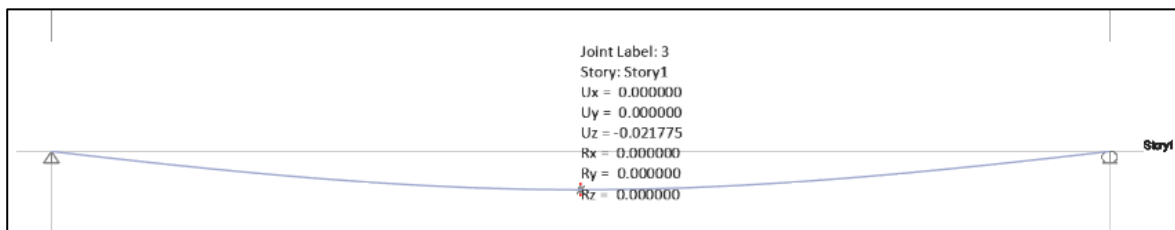
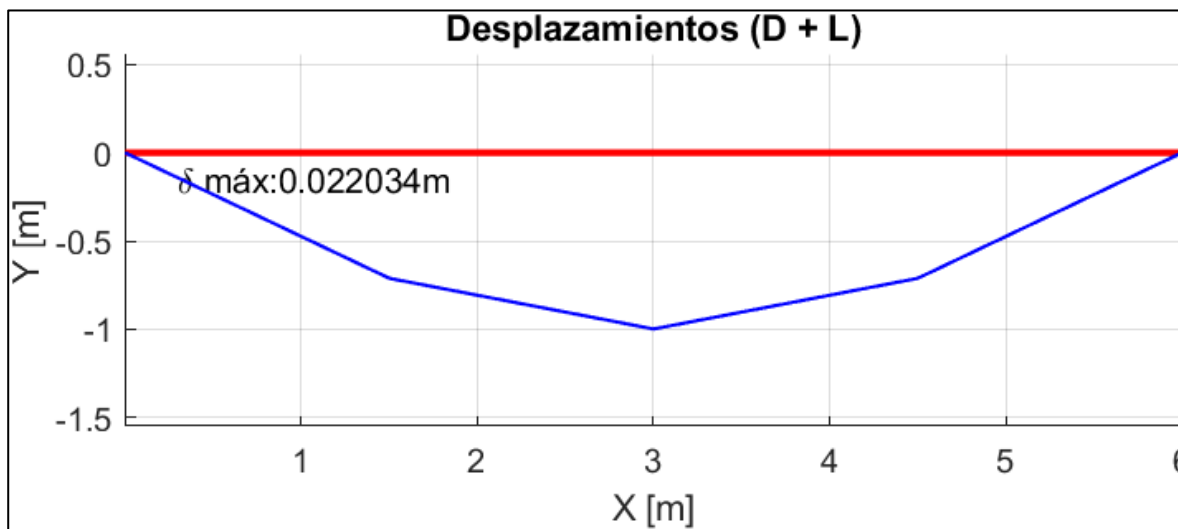


Figura 114: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje débil

Figura 115: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en Etabs.

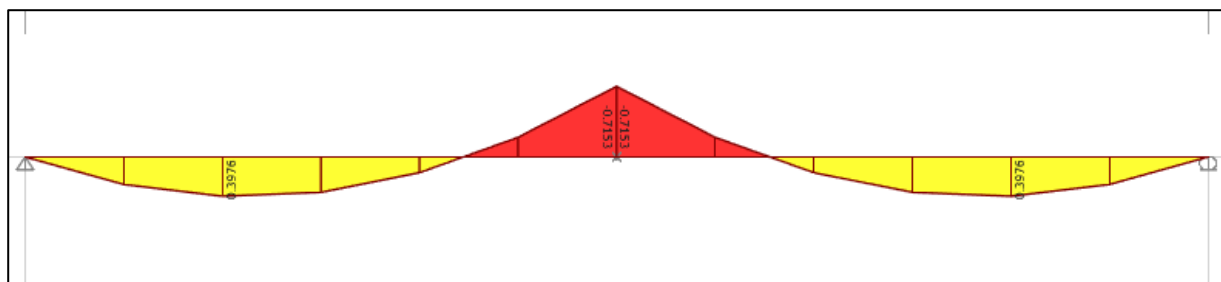


Figura 116: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.

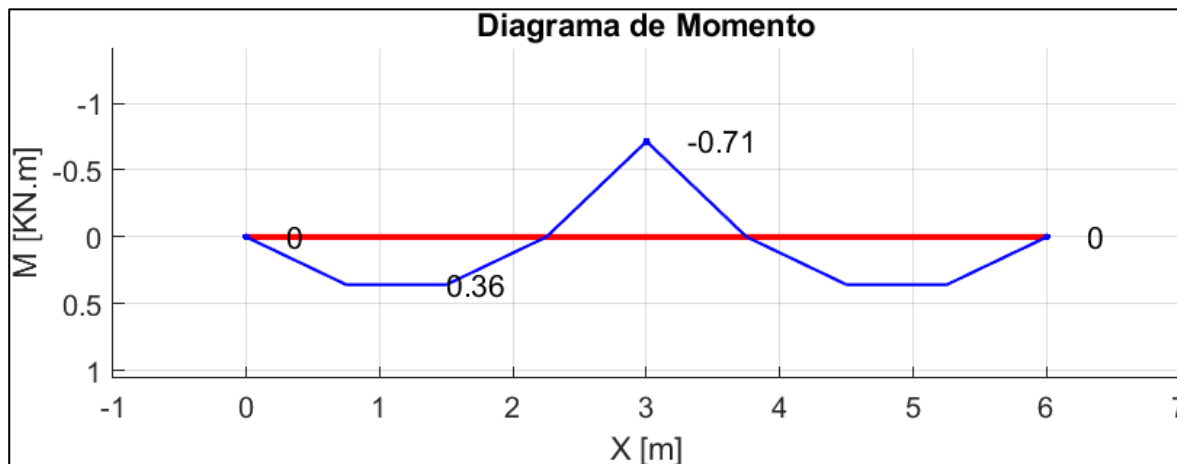


Figura 117: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en Etabs.

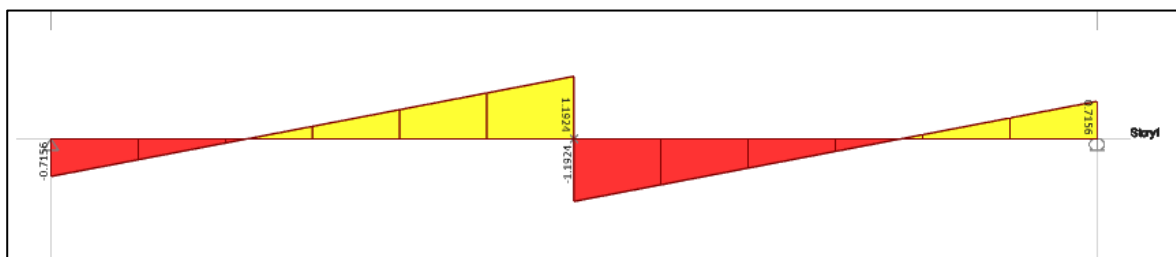


Figura 118: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.

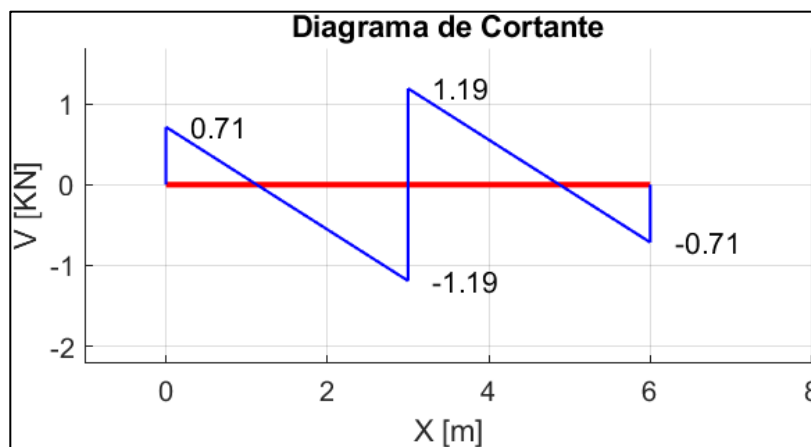


Figura 119: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en Etabs.

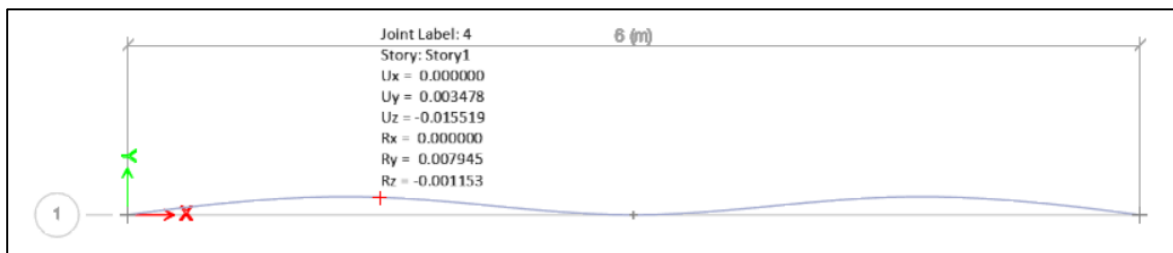
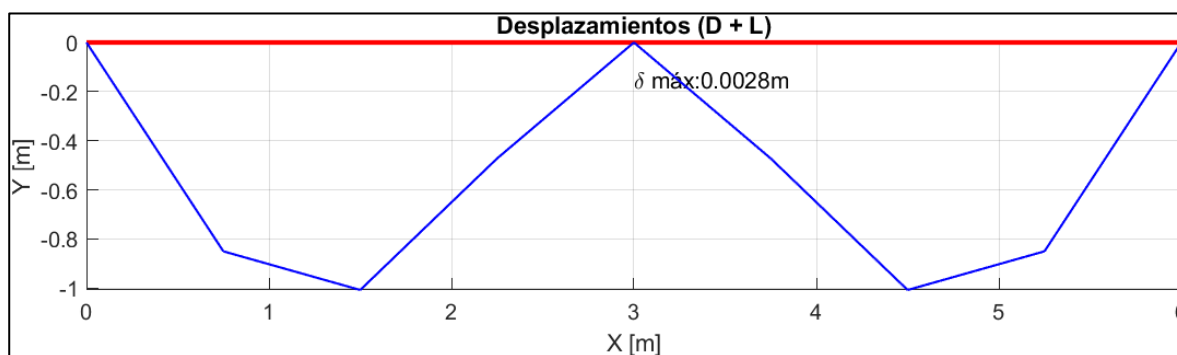


Figura 120: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga simplemente apoyada en AIRO correas.



Modelo 2: empotrado en un extremo, apoyo móvil y voladizo.

Figura 121: Esquema de una viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje fuerte

Figura 122: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.

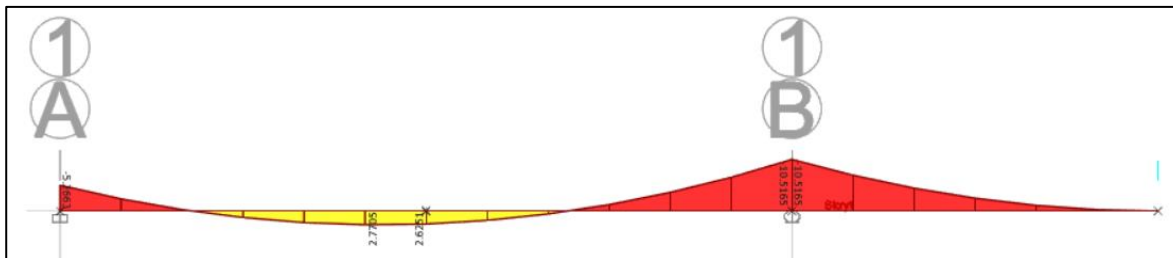


Figura 123: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.

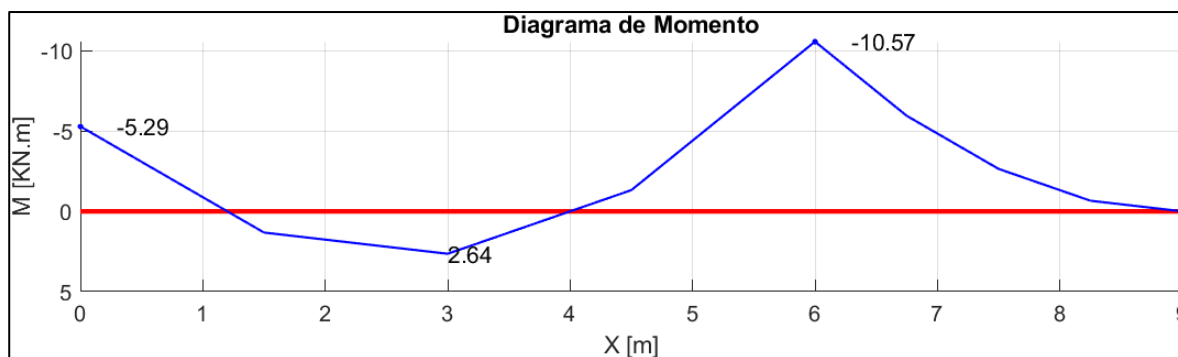


Figura 124: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.

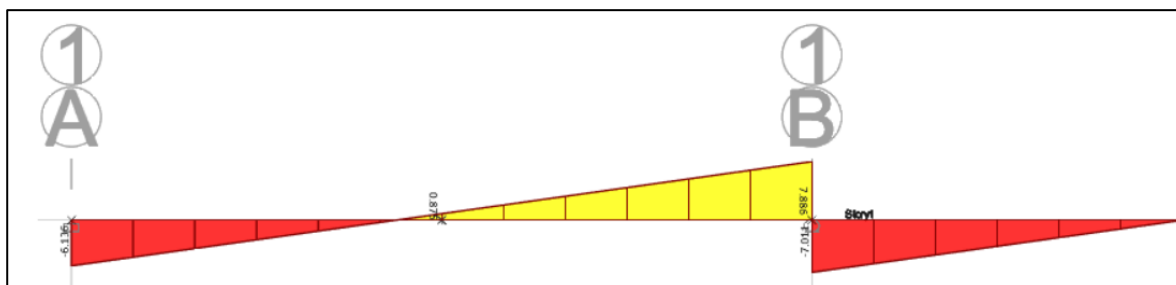


Figura 125: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.

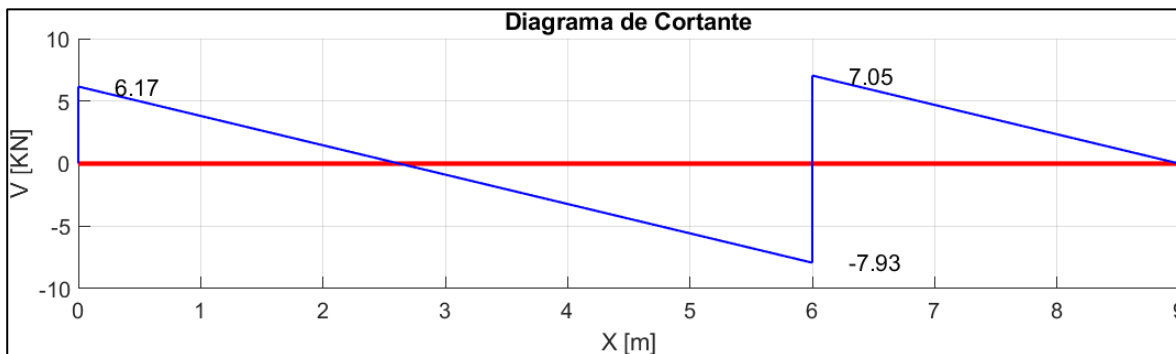


Figura 126: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.

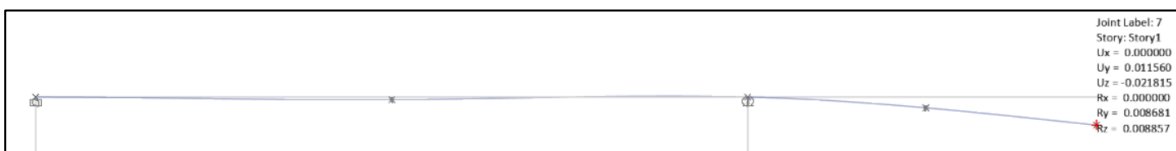
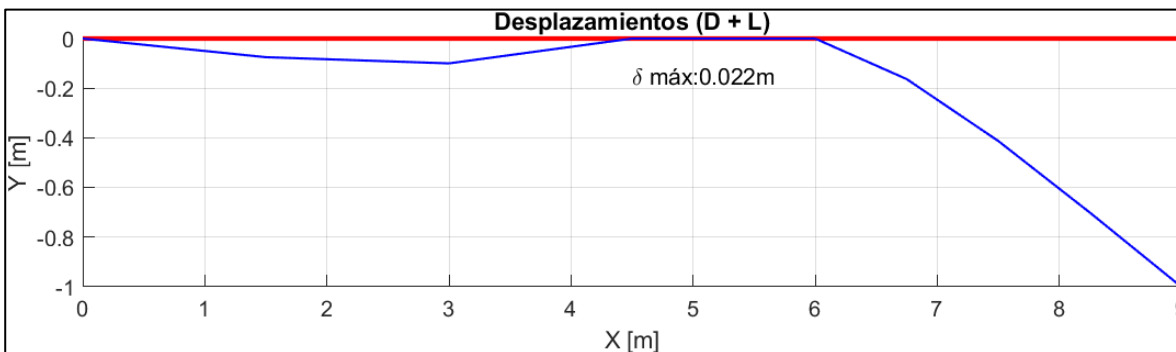


Figura 127: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje débil

Figura 128: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.

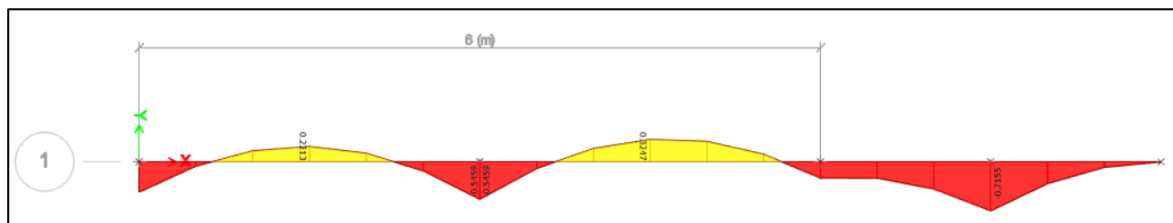


Figura 129: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.

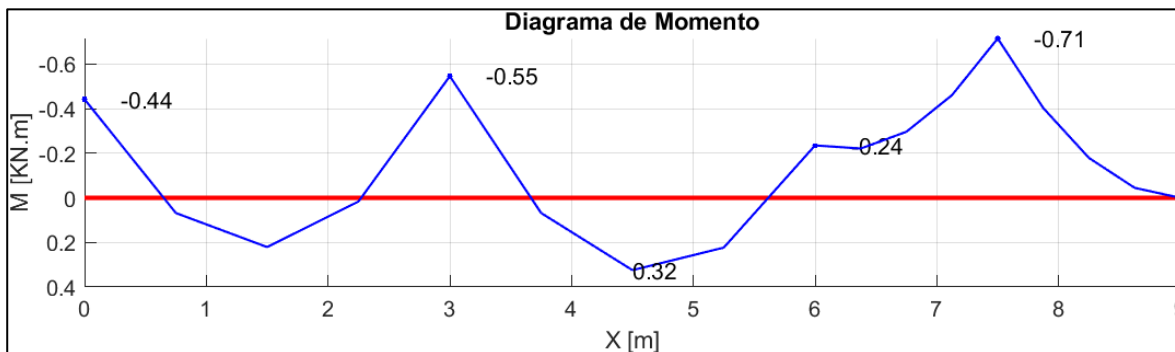


Figura 130: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.

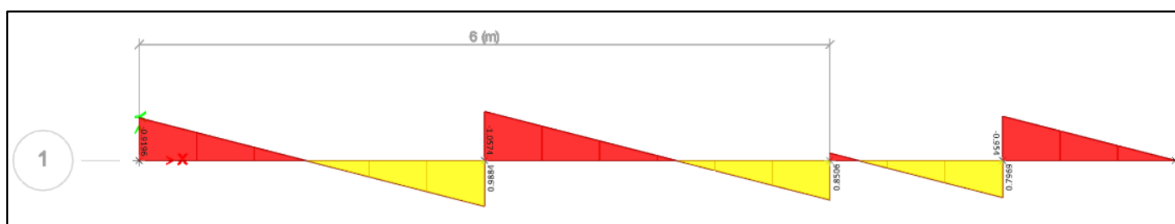


Figura 131: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.

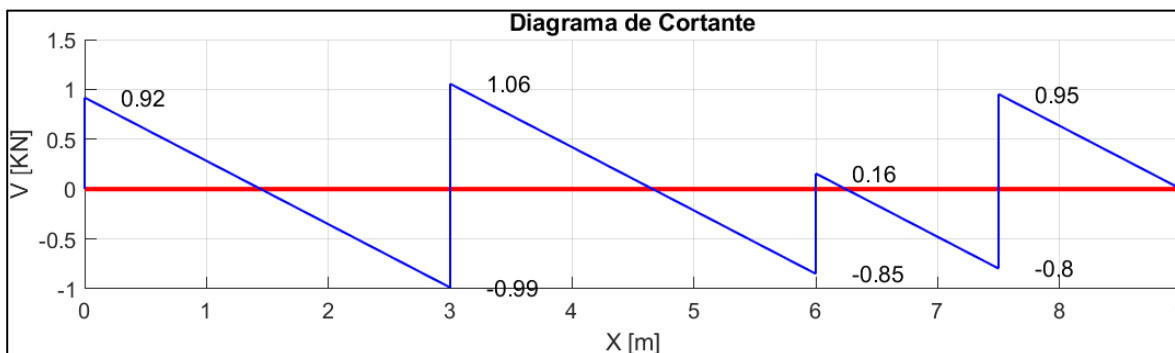
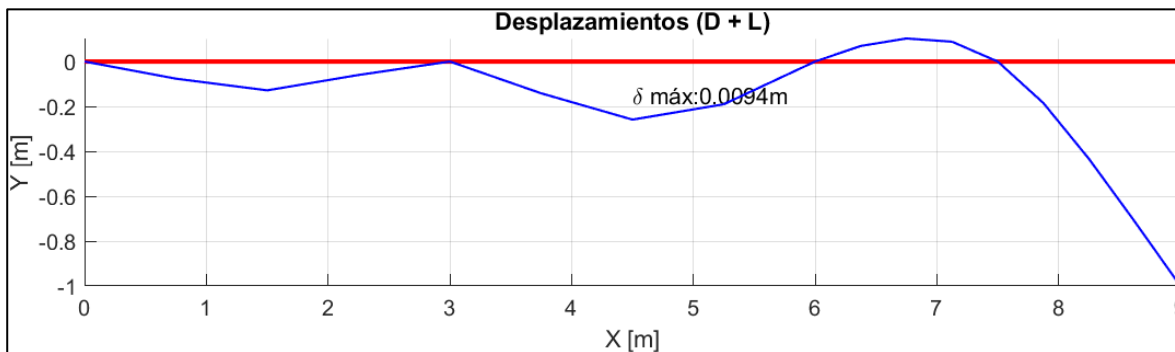


Figura 132: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en Etabs.

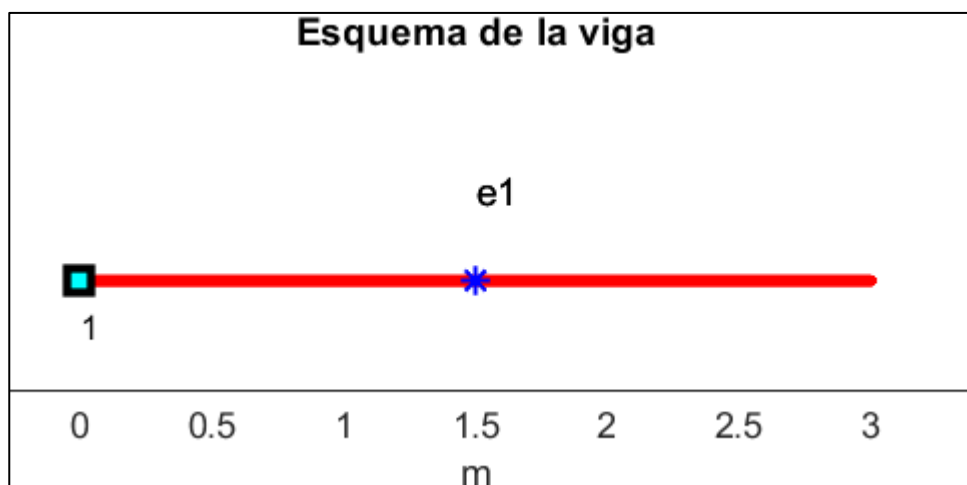


Figura 133: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada en un extremo, apoyo móvil y voladizo en AIRO correas.



Modelo 3: empotrado y voladizo.

Figura 134: Esquema de una viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje fuerte

Figura 135: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.

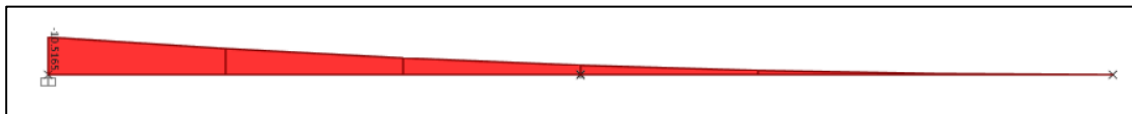


Figura 136: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.

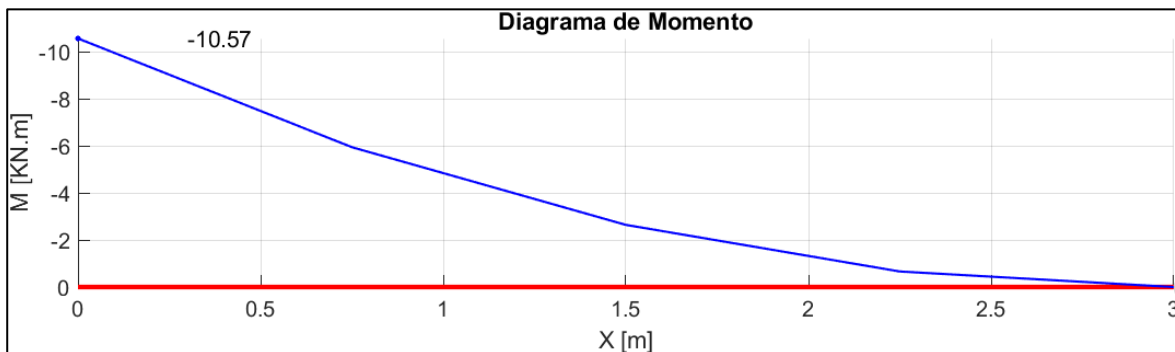


Figura 137: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.

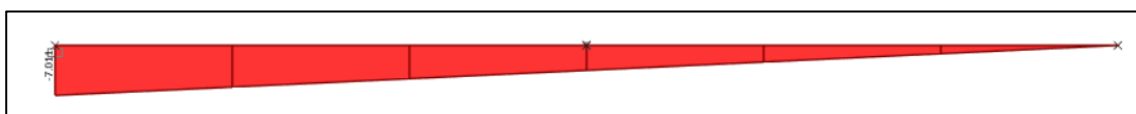


Figura 138: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.

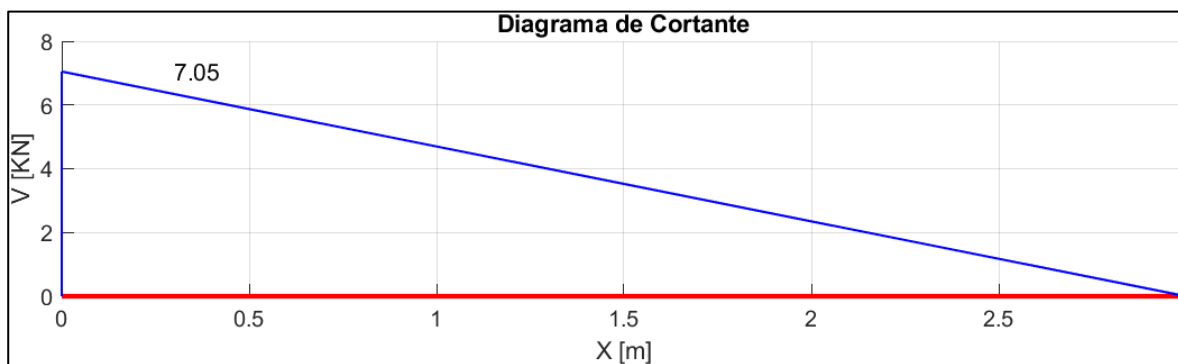


Figura 139: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.

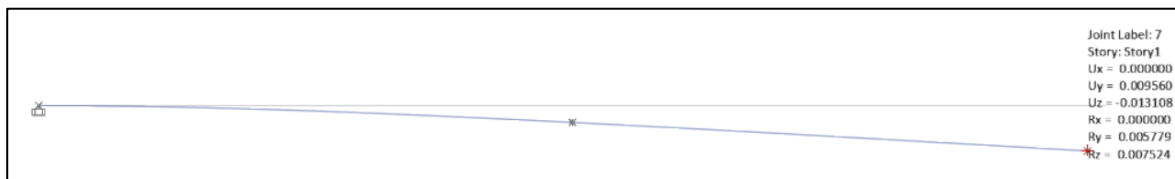
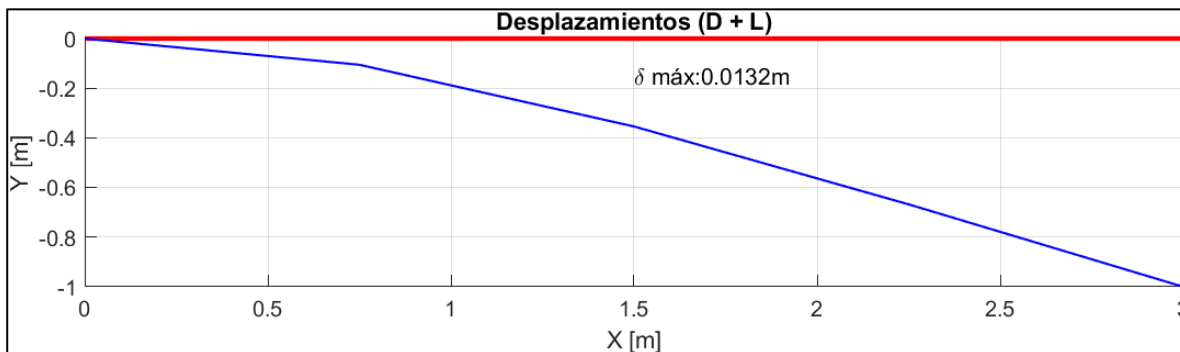


Figura 140: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje débil

Figura 141: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.

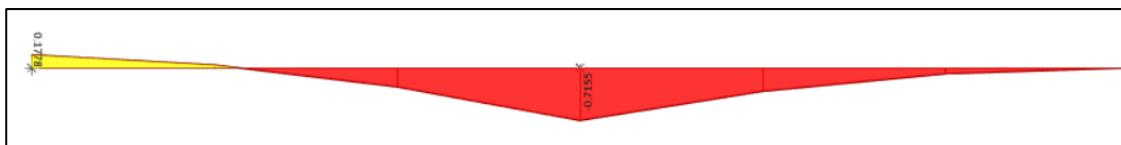


Figura 142: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.

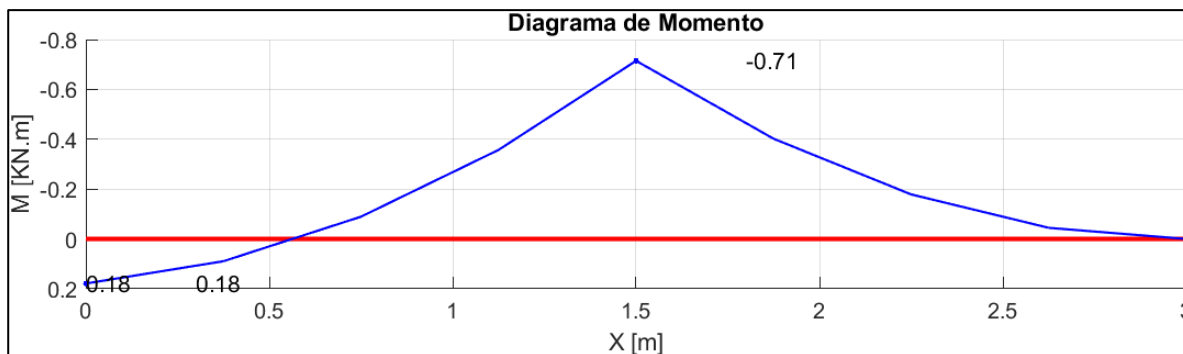


Figura 143: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.

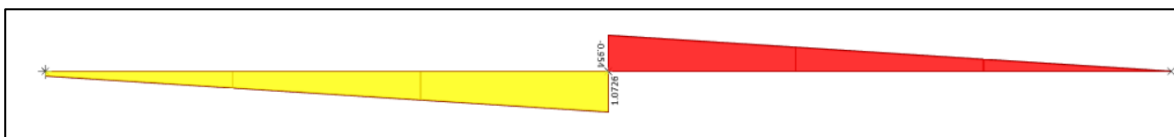


Figura 144: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.

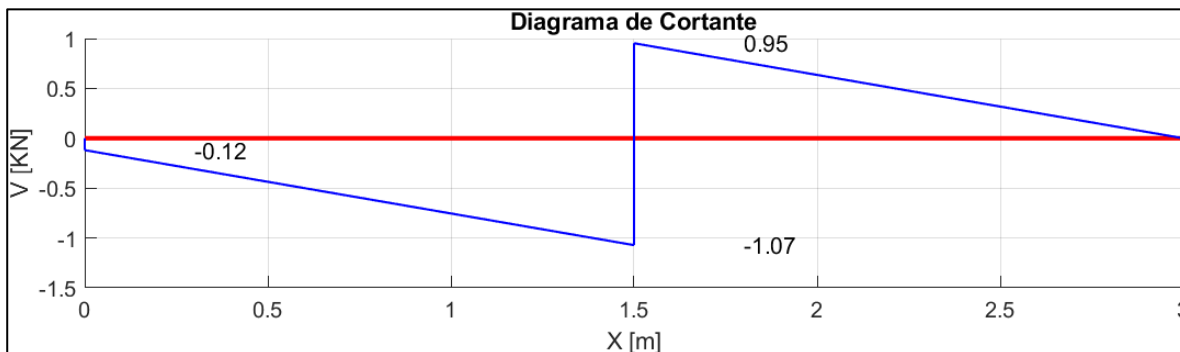


Figura 145: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en Etabs.

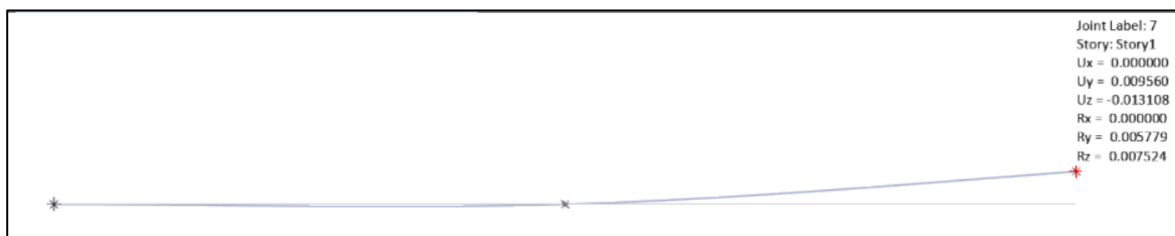
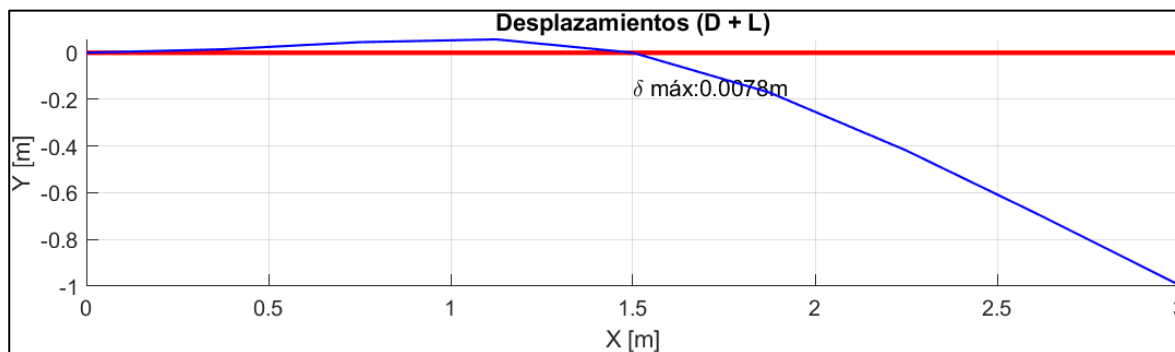
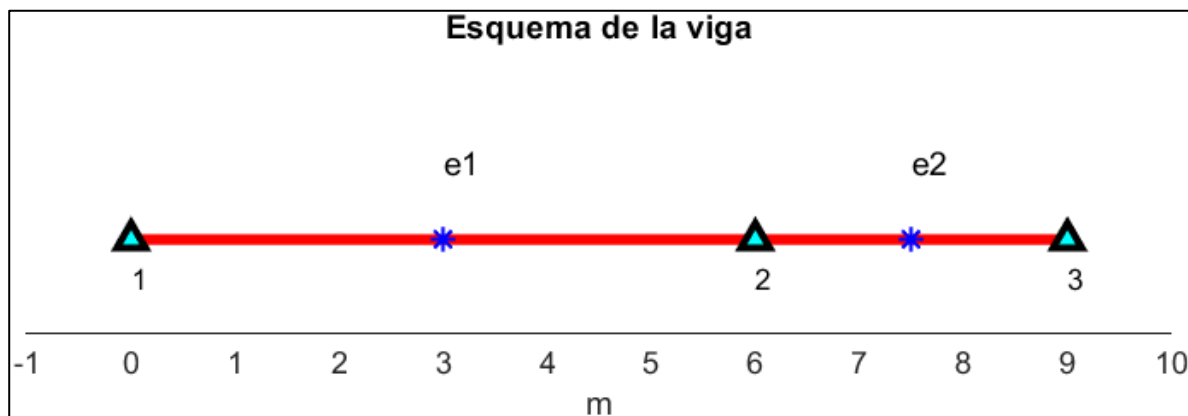


Figura 146: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga empotrada y en voladizo en AIRO correas.



Modelo 4: viga continua

Figura 147: Esquema de una viga continua en AIRO correas.



Flexión alrededor del eje fuerte

Figura 148: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en Etabs.

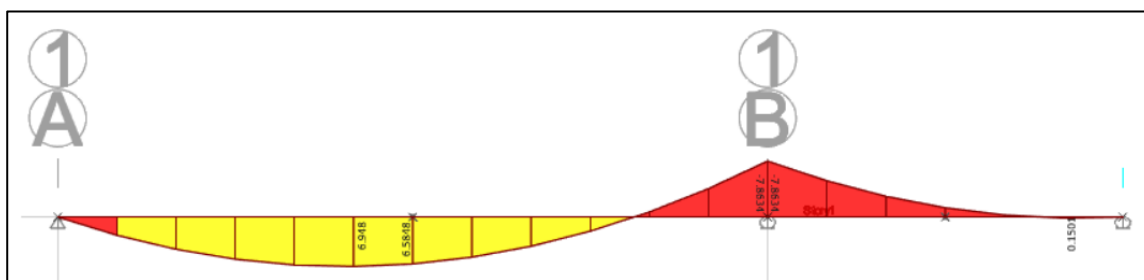


Figura 149: Diagrama de momento para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en AIRO correas.

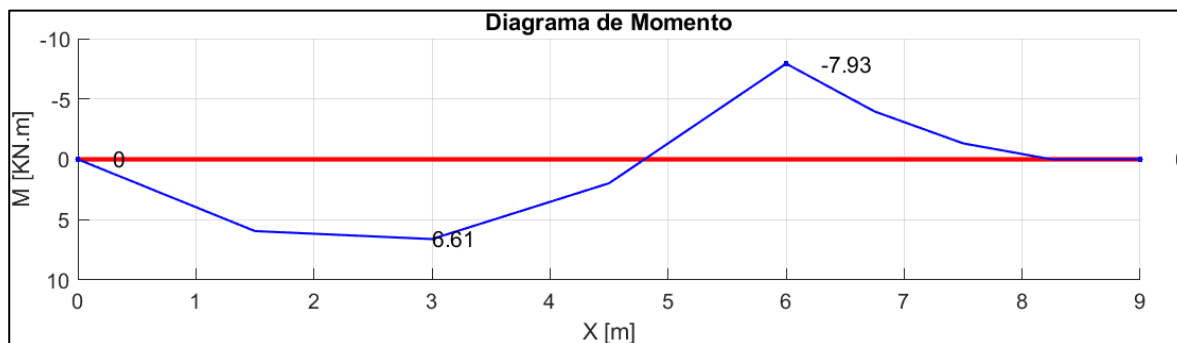


Figura 150: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en Etabs.

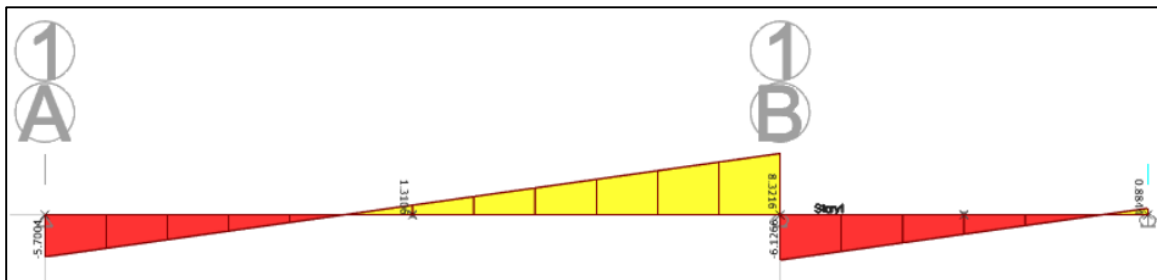


Figura 151: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en AIRO correas.

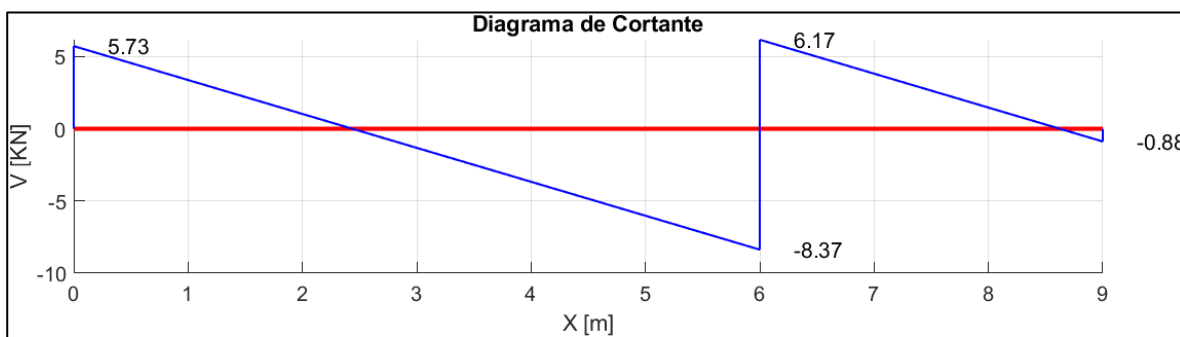


Figura 152: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje fuerte de la viga continua en Etabs.

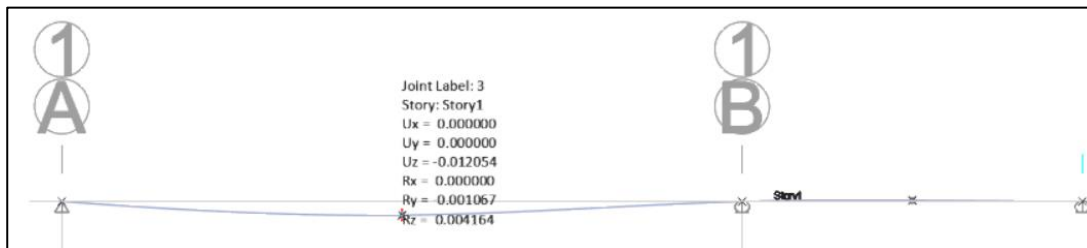


Figura 156: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en Etabs.

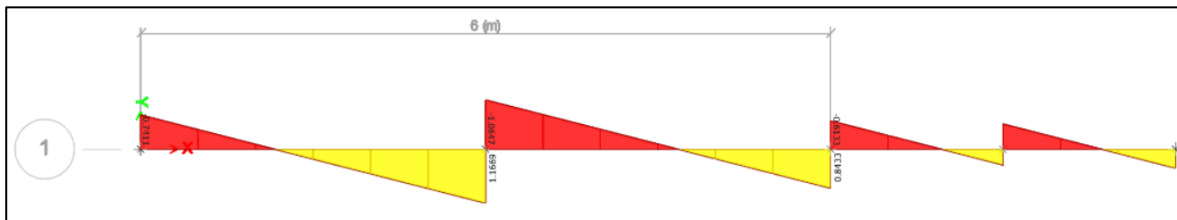


Figura 157: Diagrama de cortante para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en AIRO correas.

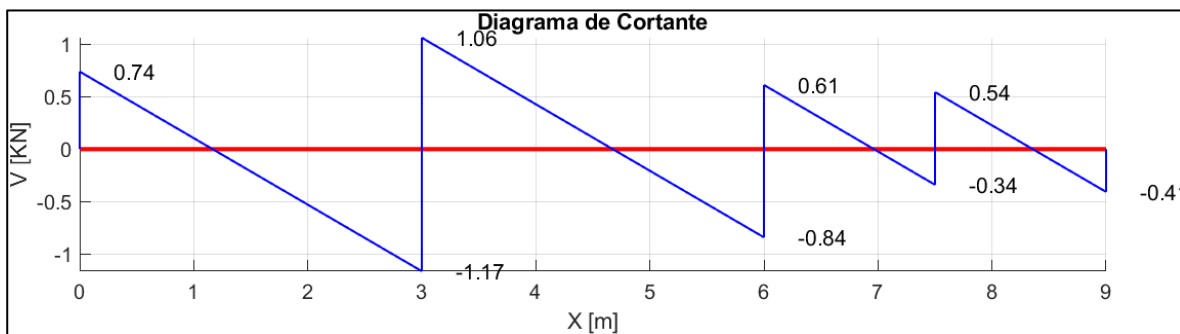


Figura 158: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en Etabs.

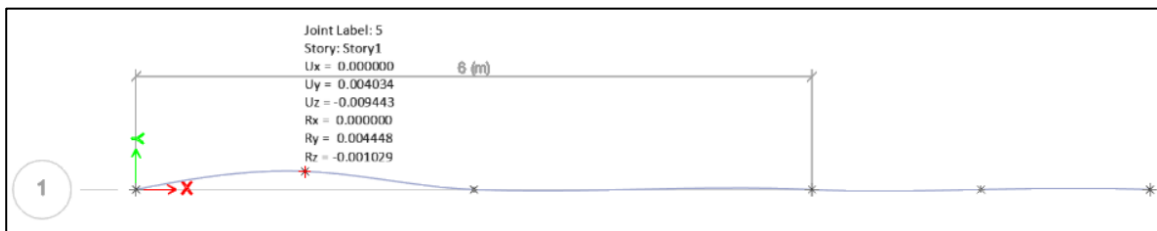
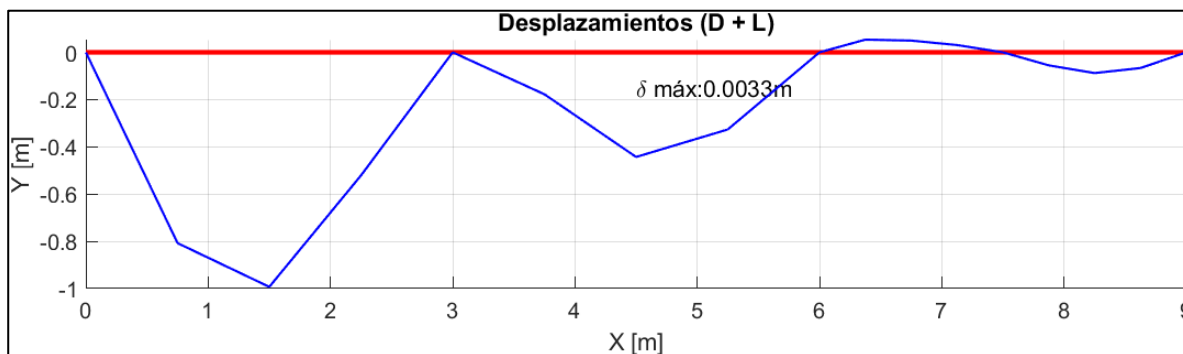


Figura 159: Diagrama de desplazamientos para flexión alrededor del eje débil de la viga continua en AIRO correas.



Resumen de las comparaciones

Tabla 22: Resumen de resultados de análisis, Etabs versus AIRO correas.

Flexión alrededor del:		Etabs	AIRO Correas	Diferencia
Modelo 1				
Eje Fuerte	Momento (KN.m)	10.5165	10.57	0.51%
	Cortante (KN)	7.011	7.05	0.56%
	Deflexión (m)	0.0218	0.022	0.92%
Eje débil	Momento (KN.m)	0.7153	0.71	0.74%
	Cortante (KN)	1.1924	1.19	0.20%
Modelo 2				
Eje Fuerte	Momento (KN.m)	10.5165	10.57	0.51%
	Cortante (KN)	7.886	7.05	10.60%
	Deflexión (m)	0.0218	0.022	0.92%
Eje débil	Momento (KN.m)	0.7155	0.71	0.77%
	Cortante (KN)	1.0574	1.06	0.25%
Modelo 3				
Eje Fuerte	Momento (KN.m)	10.5165	10.57	0.51%
	Cortante (KN)	7.011	7.05	0.56%
	Deflexión (m)	0.0131	0.013	0.76%
Eje débil	Momento (KN.m)	0.7155	0.71	0.77%
	Cortante (KN)	1.0726	1.07	0.24%
Modelo 4				
Eje Fuerte	Momento (KN.m)	7.8634	7.93	0.85%
	Cortante (KN)	8.3216	8.37	0.58%
	Deflexión (m)	0.012	0.012	0.00%
Eje débil	Momento (KN.m)	0.6387	0.64	0.20%
	Cortante (KN)	1.1669	1.17	0.27%

La demanda de la viga obtenida con AIRO Correas, es similar a la determinada con el programa Etabs. El porcentaje promedio de diferencia de acuerdo a los ejemplos abordados es de 1.04 %.

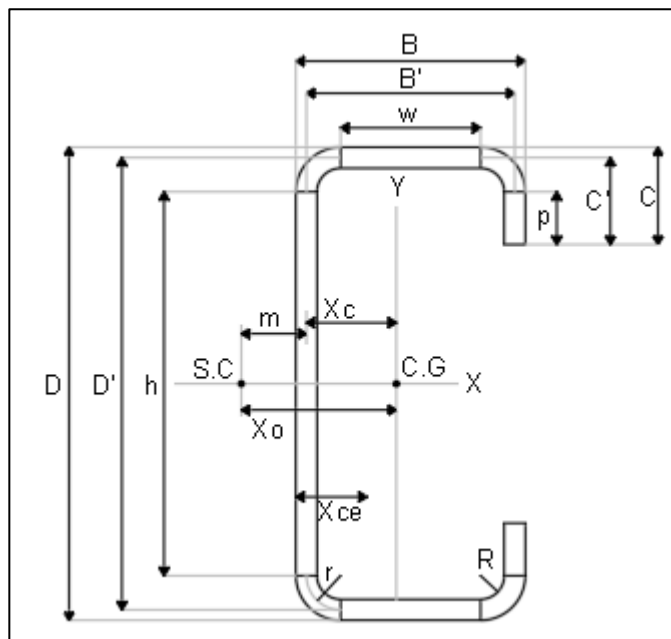
Comparaciones de resistencia al pandeo distorsional en perfiles conformados en frío

Comparación 1

Resistencia al pandeo distorsional obtenida por Geiner Alonso Oviedo Paniagua en su proyecto final de graduación denominado “Desarrollo de una herramienta para el diseño de elementos estructurales de acero laminado en frío basado en la norma AISI 2007 y por el método LRFD” versus la resistencia a pandeo distorsional obtenida manualmente.

A continuación, se presenta en detalle el cálculo de la resistencia para el perfil RTG-1-14 alrededor del eje fuerte.

Figura 160: Sección transversal del perfil conformado en frío para la Comparación 1.



Fuente: Elaboración propia.

$$D := 100 \text{ mm}$$

$$B := 50 \text{ mm}$$

$$C := 15 \text{ mm}$$

$$t := 1.8 \text{ mm}$$

$$R := 6 \text{ mm}$$

$$F_y := 227 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$G := 77000 \text{ MPa}$$

$$\mu := 0.3$$

Parámetros básicos

$$r := R + \frac{t}{2} = 6.9 \text{ mm}$$

$$h := D - (2 \cdot r + t) = 84.4 \text{ mm}$$

$$D' := D - t = 98.2 \text{ mm}$$

$$w := B - 2 \cdot \left(r + \frac{t}{2} \right) = 34.4 \text{ mm}$$

$$B' := B - t = 48.2 \text{ mm}$$

$$C' := C - \frac{t}{2} = 14.1 \text{ mm}$$

$$p := C - \left(r + \frac{t}{2} \right) = 7.2 \text{ mm}$$

$$u := \pi \cdot \frac{r}{2} = 10.84 \text{ mm}$$

$$c := 0.637 \cdot r = 4.4 \text{ mm}$$

$$A := t \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 379.72 \text{ mm}^2$$

$$I_x := 2 \cdot t \cdot \left(0.0417 \cdot h^3 + w \cdot \left(\frac{h}{2} + r \right)^2 + 2 \cdot u \cdot \left(\frac{h}{2} + 0.637 \cdot r \right)^2 + 2 \cdot 0.149 \cdot r^3 + 0.0833 \cdot p^3 + \frac{p}{4} \cdot (h - p)^2 \right) = 597321 \text{ mm}^4$$

$$X_c := \frac{2 \cdot t}{A} \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right) + 0.363 \cdot u \cdot r + u \cdot (w + 1.637 \cdot r) + p \cdot (w + 2 \cdot r) \right) = 16.103 \text{ mm}$$

$$X_{ce} := X_c + \frac{t}{2} = 17.003 \text{ mm}$$

$$I_y := 2 \cdot t \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right)^2 + \frac{w^3}{12} + 0.356 \cdot r^3 + p \cdot (w + 2 \cdot r)^2 + u \cdot (w + 1.637 \cdot r)^2 + 0.149 \cdot r^3 \right) - A \cdot X_c^2 = 127965 \text{ mm}^4$$

$$m := B' \cdot \left(\frac{3 \cdot D'^2 \cdot B' + C' \cdot (6 \cdot D'^2 - 8 \cdot C'^2)}{D'^3 + 6 \cdot D'^2 \cdot B' + C' \cdot (8 \cdot C'^2 - 12 \cdot D' \cdot C' + 6 \cdot D'^2)} \right) = 24.3 \text{ mm}$$

$$X_o := -(X_c + m) = -40.402 \text{ mm}$$

$$J := \frac{t^3}{3} \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 410.095 \text{ mm}^4$$

$$C_w := \frac{D'^2 \cdot B'^2 \cdot t}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot D'^3 \cdot B' + 3 \cdot D'^2 \cdot B'^2 + 48 \cdot C'^4 + 112 \cdot B' \cdot C'^3 + 8 \cdot D' \cdot C'^3 + 48 \cdot D' \cdot B' \cdot C'^2 + 12 \cdot D'^2 \cdot C'^2 + 12 \cdot D'^2 \cdot B' \cdot C' + 6 \cdot D'^3 \cdot C'}{6 \cdot D'^2 \cdot B' + (D' + 2 \cdot C')^3 - 24 \cdot D' \cdot C'^2} \right) = (3 \cdot 10^8) \text{ mm}^6$$

$$\beta_w := - \left(\frac{t \cdot X_c \cdot D'^3}{12} + t \cdot X_c^3 \cdot D' \right) = -3025429.65 \text{ mm}^5$$

$$\beta_f := \frac{t}{2} \cdot ((B' - X_c)^4 - X_c^4) + \frac{t \cdot D'^2}{4} \cdot ((B' - X_c)^2 - X_c^2) = (4.24 \cdot 10^6) \text{ mm}^5$$

$$\beta_l := 2 \cdot C' \cdot t \cdot (B' - X_c)^3 + \frac{2}{3} \cdot t \cdot (B' - X_c) \cdot \left(\left(\frac{D'}{2} \right)^3 - \left(\frac{D'}{2} - C' \right)^3 \right) = 4586301.77 \text{ mm}^5$$

$$j := \frac{1}{2 \cdot I_y} \cdot (\beta_w + \beta_f + \beta_l) - X_o = 63.07 \text{ mm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 18.36 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 39.66 \text{ mm}$$

$$r_o := \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + X_o^2} = 59.52 \text{ mm}$$

$$S_{f_x} := \frac{I_x}{\frac{D}{2}} = 11946 \text{ mm}^3$$

A: área de la sección transversal.

I_x : momento de inercia alrededor del eje X.

X_c : distancia entre el centroide y el eje del alma.

X_{ce} : distancia entre el centroide de la sección transversal y el lado exterior más alejado del alma.

I_y : momento de inercia alrededor del eje Y.

m: distancia entre el centro de cortante y el eje del alma. Tiene signo negativo para indicar que se encuentra al lado izquierdo del eje del alma.

X_o : distancia entre el centroide y el centro de cortante.

J: constante torsional de St. Venant.

Cw: constante de torsión o alabeo.

j: parámetro usado en la determinación del momento elástico crítico.

r_y : radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal Y.

r_x : radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal X.

r_o : radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de cortante.

w: ancho plano del patín.

h: ancho plano del alma.

p: ancho plano de la pestaña.

u: longitud efectiva de una esquina. Las esquinas o dobleces se consideran 100% efectivos.

c: distancia desde el punto de origen hasta el centro de gravedad de la esquina.

r: radio hasta el eje longitudinal de la esquina o doblez.

S_{fx}: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje X.

Límites y consideraciones dimensionales

Relación máxima ancho plano - espesor del patín

El patín es un elemento a compresión rigidizado con un borde longitudinal conectado al alma y el otro borde longitudinal conectado a una pestaña sencilla, por tanto, la relación w/t debe ser menor o igual que 60.

$$\frac{w}{t} = 19.11$$

$$\frac{w}{t} \leq 60$$

Cumple

Relación altura - espesor del alma

El alma no está reforzada, por tanto, la relación h/t debe ser menor o igual que 200.

$$\frac{h}{t} = 46.89$$

$$\frac{h}{t} \leq 200$$

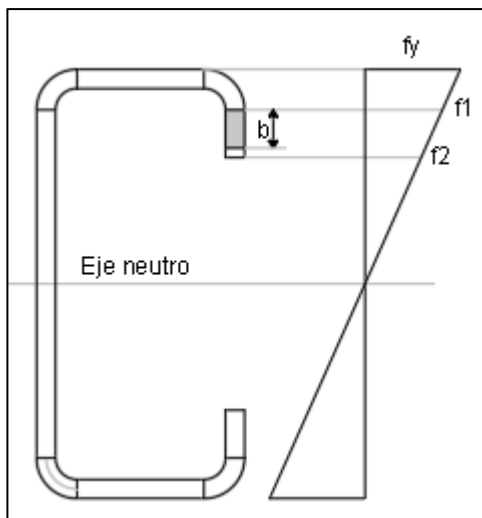
Cumple

Anchos efectivos

Acho efectivo de la pestaña superior

Para determinar el ancho efectivo de la pestaña superior se usa el diagrama de flujo correspondiente a elemento no rigidizado bajo gradiente de esfuerzo cuando f_1 y f_2 están en compresión. La compresión decrece hacia el extremo libre.

Figura 161: Ancho efectivo de la pestaña superior del perfil de la comparación 1.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de f_1 y f_2 se obtienen mediante una semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro pasa por el centroide del perfil y que los esfuerzos tienen una distribución lineal.

$$f_1 := \frac{\left(\frac{D}{2} - R - t\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 191.59 \text{ MPa}$$

$$f_2 := \frac{\left(\frac{D}{2} - C\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 158.9 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 0.829$$

Como el esfuerzo decrece hacia el borde libre, k se calcula mediante la siguiente expresión.

$$k := \frac{0.578}{\Psi + 0.34} = 0.494$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{p} \right)^2 = 5584 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.185$$

Como λ es menor que 0.673 el ancho efectivo de la pestaña o rigidizador es:

$$b_e := p = 7.2 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del patín superior

Aplica el diagrama de flujo para elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.

$$f := F_y = 227 \text{ MPa}$$

$$S := 1.28 \cdot \sqrt{\frac{E}{f}} = 37.994$$

$$\frac{w}{t} = 19.11$$

$$0.328 \cdot S = 12.46$$

La relación w/t es mayor que $0.328 \cdot S$ se requiere rigidizador de borde. De acuerdo al diagrama de flujo, se aplica las siguientes ecuaciones:

$$\theta := 90^\circ$$

$$I_s := \frac{p^3 \cdot t \cdot (\sin(\theta))^2}{12} = 55.99 \text{ mm}^4$$

$$I_a := 399 \cdot t^4 \cdot \left(\frac{w}{S \cdot t} - 0.328 \right)^3 = 22.45 \text{ mm}^4$$

$$t^4 \cdot \left(115 \cdot \frac{w}{S \cdot t} + 5 \right) = 660 \text{ mm}^4$$

Ia es menor que 660, es decir, Cumple

$$R_I := \frac{I_s}{I_a} = 2.49$$

$$R_I > 1$$

Entonces

$$R_I := 1$$

$$n := 0.582 - \frac{w}{4 \cdot t \cdot S} = 0.456$$

$$\frac{1}{3} = 0.33$$

$$n > 0.33$$

Cumple

$$\frac{C}{w} = 0.436$$

La relación C/w es mayor que 0.25, por ello k y Fcr se calculan como sigue.

$$k := \left(4.82 - \frac{5 \cdot C}{w} \right) \cdot R_I^n + 0.43 = 3.07$$

$k \leq 4$ Cumple

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 = 1519.29 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.387$$

λ es menor que 0.673, por tanto:

$$b_e := w = 34.4 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del patín

$$b_1 := \left(\frac{b_e}{2}\right) \cdot R_I = 17.2 \text{ mm}$$

$$b_2 := b_e - b_1 = 17.2 \text{ mm}$$

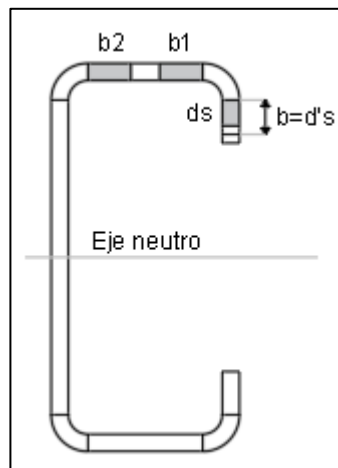
$$b_1 + b_2 = 34.4 \text{ mm}$$

$$w = 34.4 \text{ mm}$$

$$d's := 7.2 \text{ mm}$$

$$ds := d's \cdot R_I = 7.2 \text{ mm}$$

Figura 162: Ancho efectivo del patín del perfil de la comparación 1.



Fuente: Elaboración propia.

f: esfuerzo de compresión en el patín superior

θ : ángulo de doblez de la pestaña respecto al patín.

d 's: Ancho efectivo de la pestaña o rigidizador.

d_s : Ancho efectivo reducido de la pestaña o rigidizador.

b_1 y b_2 : porciones del ancho efectivo del patín.

b_e : ancho efectivo del elemento.

λ : factor de esbeltez.

k : coeficiente de pandeo de placa.

ρ : factor de reducción local.

μ : relación de Poisson del acero.

I_a : momento de inercia adecuado del rigidizador de tal forma que cada elemento componente se comporte como un elemento rigidizado.

I_s : momento de inercia de la sección completa del rigidizador alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser rigidizado.

C : longitud entre bordes externos de la pestaña.

p : ancho plano de la pestaña o rigidizador.

Ancho efectivo del alma

El alma es un elemento sometido a un gradiente de esfuerzos, por ello se usa el diagrama de flujo para alma bajo gradiente de esfuerzos. En la primera iteración se considera el alma como totalmente efectiva, por tanto, el eje neutro coincide con el C.G y por ello f_1 y f_2 son iguales.

Para determinar los esfuerzos f_1 y f_2 se realiza una semejanza de triángulos.

$$f_1 := \frac{F_y \cdot \frac{h}{2}}{\frac{D}{2}} = 191.59 \text{ MPa}$$

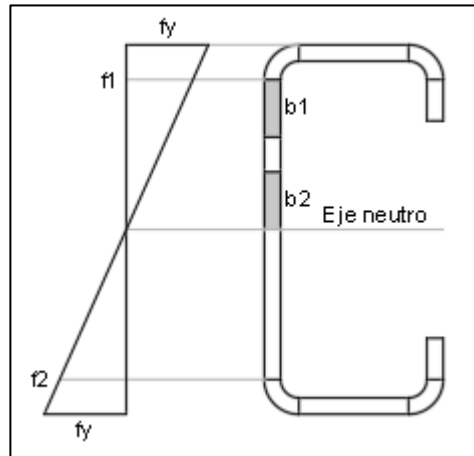
$$f_2 := f_1$$

f_1 : esfuerzo en compresión.

f_2 : esfuerzo en tensión.

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 1$$

Figura 163: Ancho efectivo del alma del perfil de la comparación 1.



Fuente: Elaboración propia.

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 1973.23 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = 0.31$$

Como λ es menor que 0.673

$$b_e := h = 84.4 \text{ mm}$$

b_e : ancho efectivo del alma.

$$h_o := D = 100 \text{ mm}$$

$$b_o := B = 50 \text{ mm}$$

ho: altura del alma medida entre bordes exteriores.

bo: ancho del patín en compresión medido entre bordes externos.

$$\frac{h_o}{b_o} = 2$$

Como la relación ho/bo es menor que 4

$$b1 := \frac{be}{3 + \Psi} = 21.1 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de b2 es:

$$b2 := \frac{be}{2} = 42.2 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de b1 y b2.

$$\frac{h}{2} = 42.2 \text{ mm}$$

$$b1 + b2 = 63.3 \text{ mm}$$

Como la suma de b1 + b2 es mayor que el ancho plano disponible a compresión, h/2, se concluye que el alma es 100% efectiva.

Pestaña 100% efectiva

Patín 100% efectivo

Alma 100% efectiva

Posición del eje neutro

$$Y_{cg} := \frac{D}{2} = 50 \text{ mm}$$

$$I_{ex} := I_x = 597321 \text{ mm}^4$$

$$S_{ex} := \frac{I_{ex}}{Y_{cg}} = 11946 \text{ mm}^3$$

I_{ex} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje X.

S_{ex} : módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y .

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$M_n := S_{ex} \cdot F_y = 2.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$I_s = 55.99 \text{ mm}^4$$

$$I_a = 22.45 \text{ mm}^4$$

Dado de I_s es mayor que I_a el rigidizador es adecuado, es decir que el patín a compresión está rigidizado. Por tanto, ϕ_b es igual a 0.95.

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot M_n = 2.58 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al pandeo lateral torsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$C_b := 1$$

De acuerdo al diagrama de flujo de pandeo lateral torsional para secciones abiertas, con flexión alrededor del eje de simetría, la resistencia nominal a la flexión se determina como sigue:

$$k_y := 1$$

$$L_y := 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 665.22 \text{ MPa}$$

$$k_t := 1$$

$$L_t := 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma_t := \frac{1}{A \cdot r_o^2} \cdot \left(G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right) = 483.32 \text{ MPa}$$

$$F_e := \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_{fx}} \cdot \sqrt{\sigma_{ey} \cdot \sigma_t} = 1072.68 \text{ MPa}$$

$$2.78 \cdot F_y = 631.06 \text{ MPa}$$

Como F_e es mayor que $2.78F_y$, la resistencia al pandeo lateral torsional se determina mediante la ecuación de resistencia nominal de la sección:

$$M_n := S_{ex} \cdot F_y = 2.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot M_n = 2.58 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo distorsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$\beta := 1$$

$$k_\phi := 0$$

$$\xi := 2$$

$$A_f := t \cdot (B + C) = 117 \text{ mm}^2$$

$$J_f := \frac{1}{3} \cdot B \cdot t^3 + \frac{1}{3} \cdot C \cdot t^3 = 126.4 \text{ mm}^4$$

$$I_{xf} := \frac{t \cdot \left(t^2 \cdot B^2 + 4 \cdot B \cdot C^3 - 4 \cdot B \cdot C^3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + t^2 \cdot B \cdot C + C^4 - C^4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right)}{12 \cdot (B + C)} = 1698.8 \text{ mm}^4$$

$$I_{yf} := \frac{t \cdot \left(B^4 + 4 \cdot C \cdot B^3 + 6 \cdot B^2 \cdot C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + 4 \cdot C^3 \cdot B \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + C^4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right)}{12 \cdot (B + C)} = 31731 \text{ mm}^4$$

$$I_{xyf} := \frac{t \cdot B \cdot C^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(B + C \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right)}{4 \cdot (B + C)} = 3894 \text{ mm}^4$$

$$x_o := \frac{B^2 - C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot (B + C)} = 19.2 \text{ mm}$$

$$y_o := \frac{-C^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot (B + C)} = -1.7 \text{ mm}$$

$$h_x := \frac{-\left(B^2 + 2 \cdot C \cdot B + C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right)}{2 \cdot (B + C)} = -30.8 \text{ mm}$$

$$C_{wf} := 0 \text{ mm}^6$$

$$L_{cr} := \left(\frac{4 \cdot \pi^4 \cdot h_o \cdot (1 - \mu^2)}{t^3} \cdot \left(I_{xf} \cdot (x_o - h_x)^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} \cdot (x_o - h_x)^2 \right) + \frac{\pi^4 \cdot h_o^4}{720} \right)^{0.25} = 369.15 \text{ mm}$$

$$L_m := 1000 \text{ mm}$$

$$L := L_{cr} = 369.15 \text{ mm}$$

L: el menor entre Lcr y Lm

$$k_{\phi fe} := \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \left(E \cdot I_{xf} \cdot (x_o - h_x)^2 + E \cdot C_{wf} - E \cdot \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} \cdot (x_o - h_x)^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot G \cdot J_f = 3.91 \text{ kN}$$

$$k_{\phi we} := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{3}{h_o} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot \frac{19 \cdot h_o}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \frac{h_o^3}{240} \right) = 3.45 \text{ kN}$$

$$k_{\phi fg} := \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot \left(A_f \cdot \left((x_o - h_x)^2 \cdot \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2 \cdot y_o \cdot (x_o - h_x) \cdot \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_x^2 + y_o^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right) = 10.97 \text{ mm}^2$$

$$k_{\phi wg} := \frac{h_o \cdot t \cdot \pi^2}{13440} \cdot \left(\frac{(45360 \cdot (1 - \xi) + 62160) \cdot \left(\frac{L}{h_o} \right)^2 + 448 \cdot \pi^2 + \left(\frac{h_o}{L} \right)^2 \cdot (53 + 3 \cdot (1 - \xi)) \cdot \pi^4}{\pi^4 + 28 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{L}{h_o} \right)^2 + 420 \cdot \left(\frac{L}{h_o} \right)^4} \right) = 0.38 \text{ mm}^2$$

$$Fd := \beta \cdot \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi \phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}} = 648.6 \text{ MPa}$$

$$M_y := S_{fx} \cdot Fd = 2.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{cnd} := S_{fx} \cdot Fd = 7.75 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_d := \sqrt{\frac{M_y}{M_{cnd}}} = 0.592$$

Como λ_d es menor que 0.673, Mn se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_n := M_y = 2.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi b := 0.9$$

$$\phi b \cdot Mn = 2.44 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Af: área de la sección transversal del patín en compresión más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín.

Jf: constante de torsión de Saint Venant del patín en compresión, más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín.

Ixf: inercia alrededor del eje X de patín más el rigidizador de borde.

Iyf: inercia alrededor del eje Y de patín más el rigidizador de borde.

xo: distancia en X a partir de la unión aleta – alma al centroide de la aleta.

yo: distancia en Y a partir de la unión patín – alma hasta el centroide del patín.

Ixyf: producto del momento de inercia del patín más el rigidizador de borde.

Cwf: constante de torsión de alabeo del patín más el rigidizador de borde.

hx: distancia en x a partir del centroide del patín hasta el centro de cortante del patín.

k_{ϕ} : rigidez rotacional provista por un elemento de restricción.

ξ : gradiente de esfuerzo en el alma.

$k_{\phi fe}$: rigidez elástica rotacional provista por el patín a la unión patín-alma.

$k_{\phi we}$: rigidez elástica rotacional provista por el alma a la unión patín-alma

$k_{\phi fg}$: rigidez geométrica rotacional demandada por el patín a partir de la unión patín-alma

$k_{\phi wg}$: rigidez geométrica rotacional demandada por el alma a partir de la unión patín – alma.

Fd: esfuerzo de pandeo elástico distorsional.

λd : factor de esbeltez para pandeo distorsional.

PD: pandeo distorsional.

Resistencia nominal de la sección: 2.58 KN.m

Resistencia al pandeo lateral torsional: 2.58 KN.m

Resistencia al pandeo distorsional: 2.44 KN.m

$$\frac{2.58 \text{ kN} \cdot \text{m}}{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 263.27 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$\frac{2.44 \text{ kN} \cdot \text{m}}{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 248.98 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

La resistencia nominal a la flexión corresponde al menor de los valores obtenidos, es decir 2.44 KN.m

Los resultados obtenidos por el investigador Geiner Alonso Oviedo Paniagua son los siguientes:

Tabla 23: Resumen de los resultados obtenidos en la comparación 1, cálculo de pandeo distorsional.

Eje fuerte	Geiner Oviedo	AIRO correas	Diferencia
Resistencia a pandeo lateral torsional	262.5 Kg.m	263.27 Kg.m	0.29%
Resistencia a pandeo distorsional	248.73 Kg.m	248.98 Kg.m	0.10%
Lcr	0.35 m	0.346m	1.14%

Comparación 2

Resistencia al pandeo distorsional obtenida por Rafael Ernesto Prado y Arnaldo Gutiérrez, presentada en el artículo “Evaluación estructural de perfiles C y Z de fabricación nacional basada en la especificación para el diseño de miembros estructurales de acero formados en frío, AISI 2007” versus la resistencia a pandeo distorsional obtenida manualmente.

Perfil C100X3.62

$$D := 100 \text{ mm}$$

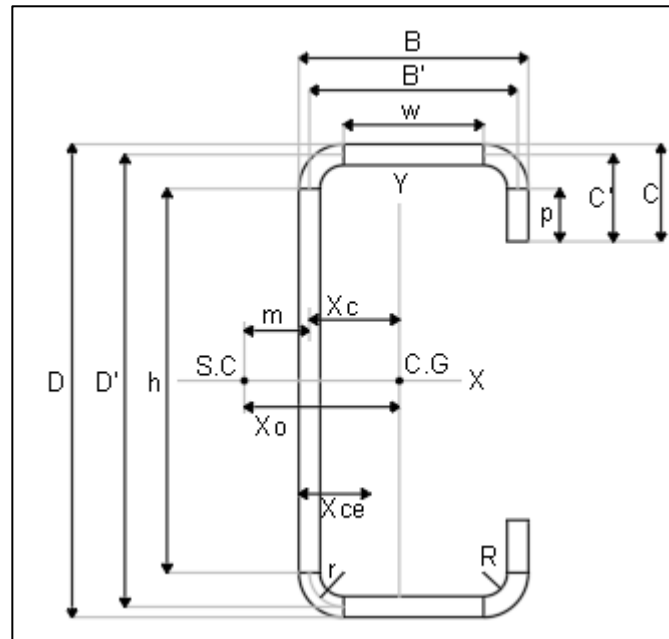
$$B := 50 \text{ mm}$$

$$C := 15 \text{ mm}$$

$$t := 2.15 \text{ mm}$$

$$R := 3 \text{ mm}$$

Figura 164: Sección transversal del perfil conformado en frío para la Comparación 2.



Fuente: Elaboración propia.

$$F_y := 344 \text{ MPa}$$

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$G := 77000 \text{ MPa}$$

$$\mu := 0.3$$

Parámetros básicos

$$r := R + \frac{t}{2} = 4.08 \text{ mm}$$

$$h := D - (2 \cdot r + t) = 89.7 \text{ mm}$$

$$D' := D - t = 97.85 \text{ mm}$$

$$w := B - 2 \cdot \left(r + \frac{t}{2} \right) = 39.7 \text{ mm}$$

$$B' := B - t = 47.85 \text{ mm}$$

$$C' := C - \frac{t}{2} = 13.93 \text{ mm}$$

$$p := C - \left(r + \frac{t}{2} \right) = 9.85 \text{ mm}$$

$$u := \pi \cdot \frac{r}{2} = 6.4 \text{ mm}$$

$$c := 0.637 \cdot r = 2.6 \text{ mm}$$

$$A := t \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 460.97 \text{ mm}^2$$

$$I_x := 2 \cdot t \cdot \left(0.0417 \cdot h^3 + w \cdot \left(\frac{h}{2} + r \right)^2 + 2 \cdot u \cdot \left(\frac{h}{2} + 0.637 \cdot r \right)^2 + 2 \cdot 0.149 \cdot r^3 + 0.0833 \cdot p^3 + \frac{p}{4} \cdot (h - p)^2 \right) = 729898 \text{ mm}^4$$

$$X_c := \frac{2 \cdot t}{A} \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right) + 0.363 \cdot u \cdot r + u \cdot (w + 1.637 \cdot r) + p \cdot (w + 2 \cdot r) \right) = 16.114 \text{ mm}$$

$$X_{ce} := X_c + \frac{t}{2} = 17.189 \text{ mm}$$

$$I_y := 2 \cdot t \cdot \left(w \cdot \left(\frac{w}{2} + r \right)^2 + \frac{w^3}{12} + 0.356 \cdot r^3 + p \cdot (w + 2 \cdot r)^2 + u \cdot (w + 1.637 \cdot r)^2 + 0.149 \cdot r^3 \right) - A \cdot X_c^2 = 156752 \text{ mm}^4$$

$$m := B' \cdot \left(\frac{3 \cdot D'^2 \cdot B' + C' \cdot (6 \cdot D'^2 - 8 \cdot C'^2)}{D'^3 + 6 \cdot D'^2 \cdot B' + C' \cdot (8 \cdot C'^2 - 12 \cdot D' \cdot C' + 6 \cdot D'^2)} \right) = 24.07 \text{ mm}$$

$$X_o := -(X_c + m) = -40.184 \text{ mm}$$

$$J := \frac{t^3}{3} \cdot (h + 2 \cdot w + 4 \cdot u + 2 \cdot p) = 710.276 \text{ mm}^4$$

$$C_w := \frac{D^2 \cdot B^2 \cdot t}{12} \cdot \left(\frac{2 \cdot D^3 \cdot B' + 3 \cdot D^2 \cdot B^2 + 48 \cdot C'^4 + 112 \cdot B' \cdot C'^3 + 8 \cdot D' \cdot C'^3 + 48 \cdot D' \cdot B' \cdot C'^2 + 12 \cdot D^2 \cdot C'^2 + 12 \cdot D^2 \cdot B' \cdot C' + 6 \cdot D^3 \cdot C'}{6 \cdot D^2 \cdot B' + (D' + 2 \cdot C')^3 - 24 \cdot D' \cdot C'^2} \right) = 362067023 \text{ mm}^6$$

$$\beta_w := - \left(\frac{t \cdot X_c \cdot D'^3}{12} + t \cdot X_c^3 \cdot D' \right) = -3585043.31 \text{ mm}^5$$

$$\beta_f := \frac{t}{2} \cdot \left((B' - X_c)^4 - X_c^4 \right) + \frac{t \cdot D'^2}{4} \cdot \left((B' - X_c)^2 - X_c^2 \right) = (4.87 \cdot 10^6) \text{ mm}^5$$

$$\beta_l := 2 \cdot C' \cdot t \cdot (B' - X_c)^3 + \frac{2}{3} \cdot t \cdot (B' - X_c) \cdot \left(\left(\frac{D'}{2} \right)^3 - \left(\frac{D'}{2} - C' \right)^3 \right) = 5290761.95 \text{ mm}^5$$

$$j := \frac{1}{2 \cdot I_y} \cdot (\beta_w + \beta_f + \beta_l) - X_o = 61.14 \text{ mm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 18.44 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 39.79 \text{ mm}$$

$$r_o := \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + X_o^2} = 59.48 \text{ mm}$$

$$S_{f_x} := \frac{I_x}{\frac{D}{2}} = 14598 \text{ mm}^3$$

A: área de la sección transversal.

I_x: momento de inercia alrededor del eje X.

X_c: distancia entre el centroide y el eje del alma.

X_{ce}: distancia entre el centroide de la sección transversal y el lado exterior más alejado del alma.

I_y: momento de inercia alrededor del eje Y.

m: distancia entre el centro de cortante y el eje del alma. Toma un valor negativo para indicar que se encuentra al lado izquierdo del eje del alma.

Xo: distancia entre el centroide y el centro de cortante.

J: constante torsional de St. Venant.

Cw: constante de torsión o alabeo.

j: parámetro usado en la determinación del momento elástico crítico.

ry: radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal Y.

rx: radio de giro de la sección transversal alrededor del eje centroidal X.

ro: radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de cortante.

w: ancho plano del patín.

h: ancho plano del alma.

p: ancho plano de la pestaña.

u: longitud efectiva de una esquina. Las esquinas o dobleces se consideran 100% efectivos.

c: distancia desde el punto de origen hasta el centro de gravedad de la esquina.

r: radio hasta el eje longitudinal de la esquina o doblez.

Sfx: módulo elástico de la sección completa, no reducida, respecto a la fibra extrema en compresión para flexión alrededor del eje X.

Límites y consideraciones dimensionales

Relación máxima ancho plano - espesor del patín

El patín es un elemento a compresión rigidizado con un borde longitudinal conectado al alma y el otro borde longitudinal conectado a una pestaña sencilla, por tanto, la relación w/t debe ser menor o igual que 60.

$$\frac{w}{t} = 18.47$$

$$\frac{w}{t} \leq 60$$

Cumple

Relación altura - espesor del alma

El alma no está reforzada, por tanto, la relación h/t debe ser menor o igual que 200.

$$\frac{h}{t} = 41.72$$

$$\frac{h}{t} \leq 200$$

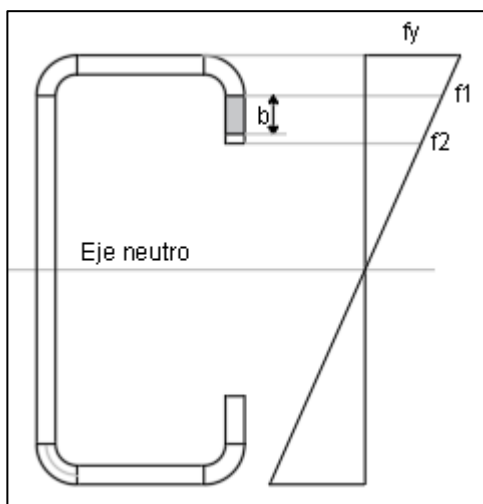
Cumple

Anchos efectivos

Acho efectivo de la pestaña superior

Para determinar el ancho efectivo de la pestaña superior se usa el diagrama de flujo correspondiente a elemento no rigidizado bajo gradiente de esfuerzo cuando f1 y f2 están en compresión. La compresión decrece hacia el extremo libre.

Figura 165: Ancho efectivo de la pestaña superior del perfil de la comparación 2.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de f_1 y f_2 se obtienen mediante una semejanza de triángulos, suponiendo que el eje neutro pasa por el centroide del perfil y que los esfuerzos tienen una distribución lineal.

$$f_1 := \frac{\left(\frac{D}{2} - R - t\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 308.57 \text{ MPa}$$

$$f_2 := \frac{\left(\frac{D}{2} - C\right) \cdot F_y}{\frac{D}{2}} = 240.8 \text{ MPa}$$

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 0.78$$

Como el esfuerzo decrece hacia el borde libre, k se calcula mediante la siguiente expresión.

$$k := \frac{0.578}{\Psi + 0.34} = 0.516$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{p}\right)^2 = 4443 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f_1}{F_{cr}}} = 0.264$$

Como λ es menor que 0.673 el ancho efectivo de la pestaña o rigidizador es:

$$b_e := p = 9.85 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del patín superior

Aplica el diagrama de flujo para elemento bajo compresión uniforme con una pestaña simple como rigidizador de borde.

$$f := F_y = 344 \text{ MPa}$$

$$S := 1.28 \cdot \sqrt{\frac{E}{f}} = 30.864$$

$$\frac{w}{t} = 18.47$$

$$0.328 \cdot S = 10.12$$

La relación w/t es mayor que $0.328 \cdot S$ esto significa que se requiere rigidizador de borde.
De acuerdo al diagrama de flujo, se aplica las siguientes ecuaciones:

$$\theta := 90^\circ$$

$$I_s := \frac{p^3 \cdot t \cdot (\sin(\theta))^2}{12} = 171.22 \text{ mm}^4$$

$$I_a := 399 \cdot t^4 \cdot \left(\frac{w}{S \cdot t} - 0.328 \right)^3 = 168.34 \text{ mm}^4$$

$$t^4 \cdot \left(115 \cdot \frac{w}{S \cdot t} + 5 \right) = 1577 \text{ mm}^4$$

$$I_a < 1577 \text{ mm}^4$$

$$R_I := \frac{I_s}{I_a} = 1.02$$

$$R_I > 1$$

Entonces

$$R_I := 1$$

$$n := 0.582 - \frac{w}{4 \cdot t \cdot S} = 0.432$$

$$\frac{1}{3} = 0.33$$

$n > 0.33$ Cumple

$$\frac{C}{w} = 0.378$$

La relación C/w es mayor que 0.25, por ello k y F_{cr} se calculan como sigue.

$$k := \left(4.82 - \frac{5 \cdot C}{w} \right) \cdot R_I^n + 0.43 = 3.361$$

$k \leq 4$ Cumple

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 = 1781.76 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = 0.439$$

λ es menor que 0.673, por tanto:

$$b_e := w = 39.7 \text{ mm}$$

Ancho efectivo del patín

$$b_1 := \left(\frac{b_e}{2} \right) \cdot R_I = 19.85 \text{ mm}$$

$$b_2 := b_e - b_1 = 19.85 \text{ mm}$$

$$b_1 + b_2 = 39.7 \text{ mm}$$

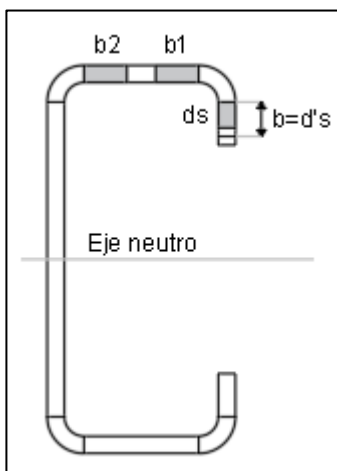
$$w = 39.7 \text{ mm}$$

$$d's := 7.2 \text{ mm}$$

Ancho efectivo reducido de la pestaña

$$d_s := d's \cdot R_I = 7.2 \text{ mm}$$

Figura 166: Ancho efectivo del patín del perfil de la comparación 2.



Fuente: Elaboración propia.

f : esfuerzo de compresión en el patín superior

θ : ángulo de doblez de la pestaña respecto al patín.

$d's$: Ancho efectivo de la pestaña o rigidizador.

ds : Ancho efectivo reducido de la pestaña o rigidizador.

b_1 y b_2 : porciones del ancho efectivo del patín.

b_e : ancho efectivo del elemento.

λ : factor de esbeltez.

k : coeficiente de pandeo de placa.

ρ : factor de reducción local.

μ : relación de Poisson del acero.

I_a : momento de inercia adecuado del rigidizador de tal forma que cada elemento componente se comporte como un elemento rigidizado.

I_s : momento de inercia de la sección completa del rigidizador alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser rigidizado.

C: longitud entre bordes externos de la pestaña.

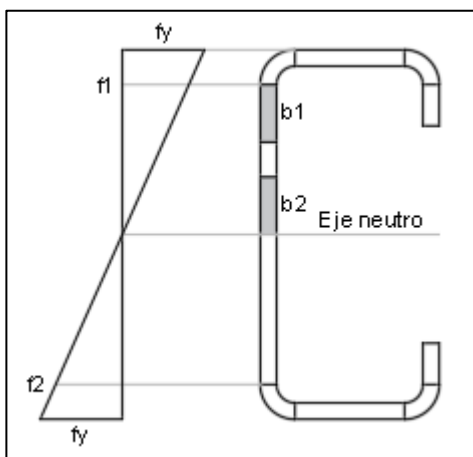
p: ancho plano de la pestaña o rigidizador.

Ancho efectivo del alma

El alma es un elemento sometido a un gradiente de esfuerzos, por ello se usa el diagrama de flujo para alma bajo gradiente de esfuerzos. En la primera iteración se considera el alma como totalmente efectiva, por tanto, el eje neutro coincide con el C.G y por ello f_1 y f_2 son iguales.

Para determinar los esfuerzos f_1 y f_2 se realiza una semejanza de triángulos.

Figura 167: Ancho efectivo del alma del perfil de la comparación 2.



Fuente: Elaboración propia.

$$f_1 := \frac{F_y \cdot \frac{h}{2}}{\frac{D}{2}} = 308.57 \text{ MPa}$$

$$f_2 := f_1$$

f_1 : esfuerzo en compresión.

f_2 : esfuerzo en tensión.

$$\Psi := \left| \frac{f_2}{f_1} \right| = 1$$

$$k := 4 + 2 \cdot (1 + \Psi)^3 + 2 \cdot (1 + \Psi) = 24$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_{cr} := \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 = 2492.36 \text{ MPa}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{f1}{F_{cr}}} = 0.35$$

Como λ es menor que 0.673

$$b_e := h = 89.7 \text{ mm}$$

b_e : ancho efectivo del alma.

$$h_o := D = 100 \text{ mm}$$

$$b_o := B = 50 \text{ mm}$$

h_o : altura del alma medida entre bordes exteriores.

b_o : ancho del patín en compresión medido entre bordes externos.

$$\frac{h_o}{b_o} = 2$$

Como la relación h_o/b_o es menor que 4

$$b_1 := \frac{b_e}{3 + \Psi} = 22.425 \text{ mm}$$

$$\Psi := \left| \frac{f2}{f1} \right| = 1$$

Como Ψ es mayor que 0.236, el valor de b_2 es:

$$b2 := \frac{be}{2} = 44.85 \text{ mm}$$

La zona efectiva a compresión corresponde a la suma de b1 y b2.

$$\frac{h}{2} = 44.85 \text{ mm}$$

$$b1 + b2 = 67.275 \text{ mm}$$

Como la suma de b1 + b2 es mayor que el ancho plano disponible a compresión se concluye que el alma es 100% efectiva.

Pestaña 100% efectiva

Patín 100% efectivo

Alma 100% efectiva

Posición del eje neutro

$$Y_{cg} := \frac{D}{2} = 50 \text{ mm}$$

$$I_{ex} := I_x = 729898 \text{ mm}^4$$

$$S_{ex} := \frac{I_{ex}}{Y_{cg}} = 14598 \text{ mm}^3$$

I_{ex} : momento de inercia de la sección efectiva alrededor del eje X.

S_{ex} : módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión al alcanzar F_y .

Resistencia nominal de la sección

Procedimiento 1, basado en la iniciación de la Fluencia.

$$M_n := S_{ex} \cdot F_y = 5.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$I_s = 171.22 \text{ mm}^4$$

$$I_a = 168.34 \text{ mm}^4$$

Dado de I_s es mayor que I_a el rigidizador es adecuado, es decir que el patín a compresión está rigidizado. Por tanto, ϕ_b es igual a 0.95.

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot M_n = 4.77 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia al pandeo lateral torsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$C_b := 1$$

De acuerdo al diagrama de flujo de pandeo lateral torsional para secciones abiertas, con flexión alrededor del eje de simetría, la resistencia nominal a la flexión se determina como sigue:

$$k_y := 1$$

$$L_y := 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 671.23 \text{ MPa}$$

$$k_t := 1$$

$$L_t := 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma_t := \frac{1}{A \cdot r_o^2} \cdot \left(G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right) = 471.72 \text{ MPa}$$

$$F_e := \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_{fx}} \cdot \sqrt{\sigma_{ey} \cdot \sigma_t} = 1056.94 \text{ MPa}$$

$$2.78 \cdot F_y = 956.32 \text{ MPa}$$

Como F_e es mayor que $2.78F_y$, la resistencia al pandeo lateral torsional se determina mediante la ecuación de resistencia nominal de la sección:

$$M_n := S_{ex} \cdot F_y = 5.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi_b := 0.95$$

$$\phi_b \cdot M_n = 4.77 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pandeo distorsional

$$\phi_b := 0.9$$

$$\beta := 1$$

$$k_\phi := 0$$

$$\xi := 2$$

$$A_f := t \cdot (B + C) = 139.75 \text{ mm}^2$$

$$J_f := \frac{1}{3} \cdot B \cdot t^3 + \frac{1}{3} \cdot C \cdot t^3 = 215.3 \text{ mm}^4$$

$$I_{xf} := \frac{t \cdot \left(t^2 \cdot B^2 + 4 \cdot B \cdot C^3 - 4 \cdot B \cdot C^3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + t^2 \cdot B \cdot C + C^4 - C^4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right)}{12 \cdot (B + C)} = 2041.5 \text{ mm}^4$$

$$I_{yf} := \frac{t \cdot \left(B^4 + 4 \cdot C \cdot B^3 + 6 \cdot B^2 \cdot C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + 4 \cdot C^3 \cdot B \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + C^4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right)}{12 \cdot (B + C)} = 37901 \text{ mm}^4$$

$$I_{xyf} := \frac{t \cdot B \cdot C^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(B + C \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)}{4 \cdot (B + C)} = 4651 \text{ mm}^4$$

$$x_o := \frac{B^2 - C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot (B + C)} = 19.2 \text{ mm}$$

$$y_o := \frac{-C^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot (B + C)} = -1.7 \text{ mm}$$

$$h_x := \frac{-\left(B^2 + 2 \cdot C \cdot B + C^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)}{2 \cdot (B + C)} = -30.8 \text{ mm}$$

$$C_{wf} := 0 \text{ mm}^6$$

$$L_{cr} := \left(\frac{4 \cdot \pi^4 \cdot h_o \cdot (1 - \mu^2)}{t^3} \cdot \left(I_{xf} \cdot (x_o - h_x)^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} \cdot (x_o - h_x)^2 \right) + \frac{\pi^4 \cdot h_o^4}{720} \right)^{0.25} = 338.51 \text{ mm}$$

$$L_m := 1000 \text{ mm}$$

$$L := L_{cr} = 338.5 \text{ mm}$$

L: el menor entre Lcr y Lm

$$k_{\phi fe} := \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \left(E \cdot I_{xf} \cdot (x_o - h_x)^2 + E \cdot C_{wf} - E \cdot \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} \cdot (x_o - h_x)^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot G \cdot J_f = 6.88 \text{ kN}$$

$$k_{\phi we} := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \left(\frac{3}{h_o} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot \frac{19 \cdot h_o}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \frac{h_o^3}{240} \right) = 5.96 \text{ kN}$$

$$k_{\phi fg} := \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot \left(A_f \cdot \left((x_o - h_x)^2 \cdot \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2 \cdot y_o \cdot (x_o - h_x) \cdot \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_x^2 + y_o^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right) = 15.58 \text{ mm}^2$$

$$k_{\phi w g} := \frac{h_o \cdot t \cdot \pi^2}{13440} \cdot \left(\frac{(45360 \cdot (1 - \xi) + 62160) \cdot \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 448 \cdot \pi^2 + \left(\frac{h_o}{L}\right)^2 \cdot (53 + 3 \cdot (1 - \xi)) \cdot \pi^4}{\pi^4 + 28 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{L}{h_o}\right)^2 + 420 \cdot \left(\frac{L}{h_o}\right)^4} \right) = 0.53 \text{ mm}^2$$

$$Fd := \beta \cdot \frac{k_{\phi f e} + k_{\phi w e} + k_{\phi}}{k_{\phi f g} + k_{\phi w g}} = 797.2 \text{ MPa}$$

$$M_y := S_{f_x} \cdot Fd = 5.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{crd} := S_{f_x} \cdot Fd = 11.64 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_d := \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} = 0.657$$

Como λ_d es menor que 0.673, M_n se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_n := M_y = 5.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi b := 0.9$$

$$\phi b \cdot M_n = 4.52 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi b \cdot M_n = 4519529 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Af: área de la sección transversal del patín en compresión más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín.

Jf: constante de torsión de Saint Venant del patín en compresión, más el rigidizador de borde alrededor de un sistema coordenado x-y localizado en el centroide del patín.

Ixf: inercia alrededor del eje X de patín más el rigidizador de borde.

Iyf: inercia alrededor del eje Y de patín más el rigidizador de borde.

Ixyf: producto del momento de inercia del patín más el rigidizador de borde.

xo: distancia en X a partir de la unión aleta – alma al centroide de la aleta.

yo: distancia en Y a partir de la unión patín – alma hasta el centroide del patín.

hx: distancia en x a partir del centroide del patín hasta el centro de cortante del patín.

Cwf: constante de torsión de alabeo del patín más el rigidizador de borde.

k_{ϕ} : rigidez rotacional provista por un elemento de restricción.

ξ : gradiente de esfuerzo en el alma.

$k_{\phi fe}$: rigidez elástica rotacional provista por el patín a la unión patín-alma.

$k_{\phi we}$: rigidez elástica rotacional provista por el alma a la unión patín-alma

$k_{\phi fg}$: rigidez geométrica rotacional demandada por el patín a partir de la unión patín-alma

$k_{\phi wg}$: rigidez geométrica rotacional demandada por el alma a partir de la unión patín – alma.

Fd: esfuerzo de pandeo elástico distorsional.

λ_d : factor de esbeltez para pandeo distorsional.

PD: pandeo distorsional.

Resistencia nominal de la sección: 4.77 KN.m

Resistencia al pandeo lateral torsional: 4.77 KN.m

Resistencia al pandeo distorsional: 4.52 KN.m

Los resultados obtenidos por los investigadores son los siguientes:

Tabla 24: Resumen se los resultados obtenidos en la comparación 2, cálculo de pandeo distorsional.

Eje fuerte	Artículo	AIRO correas	Diferencia
Resistencia nominal de la sección	4782853.81 N.mm	4770614.29 N.mm	0.26%
Resistencia a pandeo distorsional	4531125 N.mm	4519529 N.mm	0.26%
Lcr	306.98 mm	314 mm	2.29%

Las comparaciones con otras investigaciones sobre el cálculo de resistencia a pandeo distorsional muestran resultados muy parecidos a los obtenidos con AIRO correas. El porcentaje de diferencia promedio es de 0.72%.

Comparaciones de resistencia con otros programas

Comparación con Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo G

Figura 168: Datos ingresados en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo G.

Arquimet 2.0 - [RESISTENCIALB6m.cac - Viguetas y Correas - Arquimet 2.0]

Ayuda Archivo Ventanas

Unidades: KN, m NOTA: Presione el botón Analizar cuando realice cambios de configuración.

Diseño Correas | Viguetas para entrepisos

Cargas sin mayorar en KN/m²

Carga muerta: 0.40

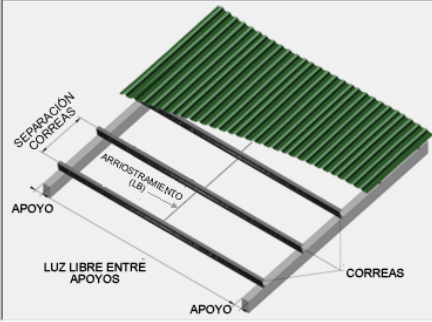
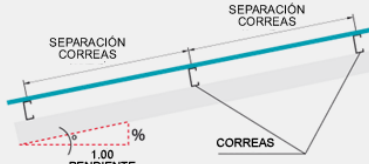
Carga viva de cubierta: 0.50

Carga granizo: 0.00

Viento succión: 0.55

Viento compresión: 0.55

Viento
El viento se considera actuando de manera perpendicular a la cubierta.

Datos geométricos

Separación entre correas (m): 1.50 Luz libre (m): 4.00 4.00

Pendiente en grados: 20.00

Pendiente (%): 36.40

Numero de luces: 2 Apoyo (m): 0.10 0.10 0.10

Arriostamiento (Lb) (Fracción de L): L Sin apoyo Sin apoyo

Consideraciones de diseño

Deflexiones máximas

Instantánea carga viva (L/ 180.00)

Permanente carga total (L/ 120.00)

Arrugamiento

Considerar arrugamiento del alma.

Solución

Tipo	Perfil	Acabado	Grado	Orienta...

Ver reporte completo del perfil

Figura 169: Datos ingresados en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo G.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0.4"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0.5"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="20"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.5"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="340"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="2"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

ID Luz	1	2
Longitud (m)	4	4

ID nudo	1	2	3
Despl Y	0	0	0
Giro	1	1	1

PHR C 305 x 80 - 1.5 mm
PERFIL CONFORMADO TIPO G

Tensor

ST

AC

L/2

L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

Figura 170: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo G, primera parte del reporte.

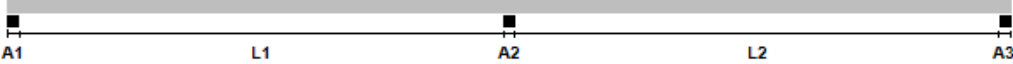

<h1 style="margin: 0;">Memorias de Cálculo</h1>	PROGRAMA DE DISEÑO Y CALCULO ESTRUCTURAL ARQUIMET 2.0																												
	Proyecto: _____ Fecha: _____ Ingeniero: _____ Firma: _____																												
Elementos calculados con el programa de diseño Arquimet 2.0 de ACESCO																													
<h2 style="margin: 0;">REPORTE DE CORREAS</h2> <p style="margin: 0;">PHR C con atiesador 305 x 80 x 25 (1.50 mm) con $F_y = 35.15 \text{ Kgf/mm}^2$ cada 1.50 m sin arriostamiento interior.</p>																													
SECCION LONGITUDINAL																													
																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 30%;">L1</td><td style="text-align: center;">4.00 m</td></tr> <tr><td>L2</td><td style="text-align: center;">4.00 m</td></tr> <tr><td>A1</td><td style="text-align: center;">0.10 m</td></tr> <tr><td>A2</td><td style="text-align: center;">0.10 m</td></tr> <tr><td>A3</td><td style="text-align: center;">0.10 m</td></tr> </table>	L1	4.00 m	L2	4.00 m	A1	0.10 m	A2	0.10 m	A3	0.10 m	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">CONFIGURACION</th> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">TIPO DE CARGA</th> <th style="text-align: left;">DISTRIBUIDA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Carga muerta</td><td style="text-align: center;">0.40 KN/m²</td></tr> <tr><td>Peso propio correa</td><td style="text-align: center;">0.06 KN/m</td></tr> <tr><td>Carga viva</td><td style="text-align: center;">0.50 KN/m²</td></tr> <tr><td>Carga granizo</td><td style="text-align: center;">0.00 KN/m²</td></tr> <tr><td>Viento compresión (Perpendicular)</td><td style="text-align: center;">0.55 KN/m²</td></tr> <tr><td>Viento succión (Perpendicular)</td><td style="text-align: center;">0.55 KN/m²</td></tr> <tr><td>Pendiente sección transversal</td><td style="text-align: center;">20° = 36.3970%</td></tr> </tbody> </table>	CONFIGURACION		TIPO DE CARGA	DISTRIBUIDA	Carga muerta	0.40 KN/m ²	Peso propio correa	0.06 KN/m	Carga viva	0.50 KN/m ²	Carga granizo	0.00 KN/m ²	Viento compresión (Perpendicular)	0.55 KN/m ²	Viento succión (Perpendicular)	0.55 KN/m ²	Pendiente sección transversal	20° = 36.3970%
L1	4.00 m																												
L2	4.00 m																												
A1	0.10 m																												
A2	0.10 m																												
A3	0.10 m																												
CONFIGURACION																													
TIPO DE CARGA	DISTRIBUIDA																												
Carga muerta	0.40 KN/m ²																												
Peso propio correa	0.06 KN/m																												
Carga viva	0.50 KN/m ²																												
Carga granizo	0.00 KN/m ²																												
Viento compresión (Perpendicular)	0.55 KN/m ²																												
Viento succión (Perpendicular)	0.55 KN/m ²																												
Pendiente sección transversal	20° = 36.3970%																												
SECCION TRANSVERSAL																													
 <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">$L = 1.50 \text{ m}$</p>																													
Norma: Reglamento Colombiano NSR - 10. Pag. 1																													

Figura 171: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo G, segunda parte del reporte.

Memorias de Cálculo	PROGRAMA DE DISEÑO Y CALCULO ESTRUCTURAL ARQUIMET 2.0			
	Proyecto: _____		Fecha: _____	
Ingeniero: _____		Firma: _____		
<i>Elementos calculados con el programa de diseño Arquimet 2.0 de ACESCO</i>				
REPORTES DE DISEÑO				
REPORTE FLEXION				
	Apoyos		Interiores	
Ejes locales	3	2	3	2
Resistente (KN.m)	16.1617	2.8315	13.0553	2.6973
Calculado (KN.m)	4.7941	1.4294	4.7941	1.4294
REPORTE CORTANTE				
Ejes locales	2		3	
Resistente (KN)	10.8552		38.3176	
Calculado (KN)	5.8322		1.7390	
REPORTE DEFLEXION				
Deflexiones máximas	Instantanea		Permanente	
Admisible (m)	0.0228		0.0342	
Calculado (m)	0.0005		0.0010	
REPORTE ARRUGAMIENTO				
No. de Apoyo	0			
Resistencia máxima (Kgf)	3.5079			
Arrugamiento (Kgf)	4.9770			
<i>Norma: Reglamento Colombiano NSR - 10. Pag. 2</i>				

Figura 172: Resultados obtenidos en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo G.


Tabla de resultados del perfil seleccionado				n(D/C) = 2.17 		
Referencia	12	INT e:1	21	23	INT e:2	32
Lb (m)	4	4	4	4	4	4
Cb	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
Mux-x (kN-m)	0	2.85	-4.56	-4.56	2.85	0
ΦM_{nx-x} (kN-m)	12.64	12.64	12.64	12.64	12.64	12.64
Vuy (kN-m)	3.7	-1.14	-5.71	5.71	1.14	-3.7
ΦV_{ny} (kN)	10.51	10.51	10.51	10.51	10.51	10.51
Ru (kN)	3.7	0	11.41	11.41	0	3.7
ΦR_n (kN)	5.73	0	5.73	5.73	0	5.73
Deflex (m)	0	0.001	0	0	0.001	0
Deflex adm (m)	0.022(L)	0.033(D+L)	0.022(L)	0.022(L)	0.033(D+L)	0.022(L)
Muy-y (kN-m)	0	0.89	-1.36	-1.36	0.89	0
ΦM_{ny-y} (kN-m)	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55
Vux (kN-m)	1.12	0.44	-1.7	1.7	1.7	-1.12
ΦV_{nx} (kN)	40.41	40.41	40.41	40.41	40.41	40.41
n(D/C) flex biax	0	0.57	0.89	0.89	0.57	0
n(D/C) V biaxial	0.38	0.12	0.58	0.58	0.15	0.38
n(D/C) Flex y V ...	0.35	0.25	0.65	0.65	0.25	0.35

Tabla 25: Resumen de resultados obtenidos con Arquimet versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil conformado en frío tipo G.

Parámetro	Arquimet	AIRO Correas	Diferencia
ΦM_{nx-x}	13.05	12.64	3.14%
ΦV_{ny}	10.85	10.51	3.13%
ΦM_{ny-y}	2.7	2.55	5.56%
ΦV_{nx}	38.32	40.41	5.45%

Comparación con Arquimet 2.0 de perfil conformado en frío tipo doble G

Figura 173: Datos ingresados en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo doble G.

Arquimet 2.0 - [RESISTENCIALB6m.cac - Viguetas y Correas - Arquimet 2.0]

Ayuda Archivo Ventanas

Unidades: KN, m NOTA: Presione el botón Analizar cuando realice cambios de configuración.

Diseño Correas | Viguetas para entrepisos

Cargas sin mayorar en KN/m²

Carga muerta: 0.70

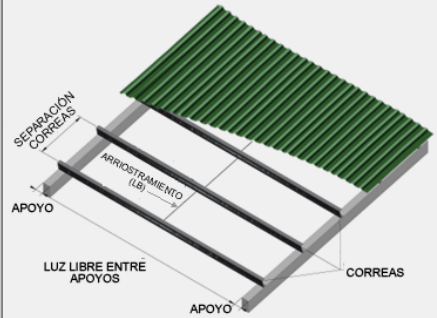
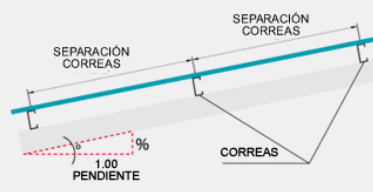
Carga viva de cubierta: 0.50

Carga granizo: 0.00

Viento succión: 0.55

Viento compresión: 0.55

Viento
El viento se considera actuando de manera perpendicular a la cubierta.

Datos geométricos

Separación entre correas (m): 1.80 Luz libre (m): 4.00 4.00

Pendiente en grados: 18.00

Pendiente (%): 32.49

Numero de luces: 2 Apoyo (m): 0.10 0.10 0.10

Arriostamiento (Lb) (Fracción de L): L Sin apoyo Sin apoyo

Consideraciones de diseño

Deflexiones máximas

Instantánea carga viva (L/ 180.00)

Permanente carga total (L/ 120.00)

Arrugamiento

Considerar arrugamiento del alma.

Solución

	Tipo	Perfil	Acabado	Grado	Orienta...
1	Cajón	203 x 67 x 19 (1.20 mm)	Negro	50	1
2	Cajón	160 x 60 x 20 (1.50 mm)	Negro	50	1
3	Cajón	220 x 80 x 20 (1.20 mm)	Negro	50	1

Ver reporte completo del perfil

Figura 174: Datos ingresados en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo doble G.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0.7"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0.5"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.8"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="340"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="2"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

ID Luz	1	2
Longitud (m)	4	4

ID nudo	1	2	3
Despl Y	0	0	0
Giro	1	1	1

PHR C 160 x 60 - 1.5 mm
PERFIL CONFORMADO TIPO DOBLE G

Tensor

ST
 AC
 L/2
 L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

Figura 175: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo doble G, primera parte del reporte.

<h1>Memorias de Cálculo</h1>		PROGRAMA DE DISEÑO Y CALCULO ESTRUCTURAL ARQUIMET 2.0	
		Proyecto: _____ Fecha: _____	
<small>Elementos calculados con el programa de diseño Arquimet 2.0 de ACESCO</small>			
REPORTE DE CORREAS PHR Cajón 160 x 60 x 20 (1.50 mm) con $F_y = 35.15 \text{ Kgf/mm}^2$ cada 1.80 m sin arriostramiento interior.			
SECCION LONGITUDINAL			
L1		4.00 m	
L2		4.00 m	
A1		0.10 m	
A2		0.10 m	
A3		0.10 m	
CONFIGURACION			
TIPO DE CARGA	DISTRIBUIDA		
Carga muerta	0.70 KN/m ²		
Peso propio correa	0.07 KN/m		
Carga viva	0.50 KN/m ²		
Carga granizo	0.00 KN/m ²		
Viento compresión (Perpendicular)	0.55 KN/m ²		
Viento succión (Perpendicular)	0.55 KN/m ²		
Pendiente sección transversal	18° = 32.4920%		
SECCION TRANSVERSAL			
$L = 1.80 \text{ m}$			
<small>Norma: Reglamento Colombiano NSR - 10. Pag. 1</small>			

Figura 176: Resultados obtenidos en Arquimet 2.0 del perfil conformado en frío tipo doble G, segunda parte del reporte.

Memorias de Cálculo	PROGRAMA DE DISEÑO Y CALCULO ESTRUCTURAL ARQUIMET 2.0			
	Proyecto: _____		Fecha: _____	
Ingeniero: _____		Firma: _____		
<i>Elementos calculados con el programa de diseño Arquimet 2.0 de ACESCO</i>				
REPORTES DE DISEÑO				
REPORTE FLEXION				
	Apoyos		Interiores	
Ejes locales	3	2	3	2
Resistente (KN.m)	13.1893	6.7252	13.1893	6.7252
Calculado (KN.m)	7.1078	1.9715	7.1078	1.9715
REPORTE CORTANTE				
Ejes locales	2		3	
Resistente (KN)	43.4209		53.0552	
Calculado (KN)	8.6469		2.3984	
REPORTE DEFLEXION				
Deflexiones máximas	Instantanea		Permanente	
Admisible (m)	0.0228		0.0342	
Calculado (m)	0.0018		0.0044	
REPORTE ARRUGAMIENTO				
No. de Apoyo	0			
Resistencia máxima (Kgf)	5.2008			
Arrugamiento (Kgf)	11.0771			
<i>Norma: Reglamento Colombiano NSR - 10. Pag. 2</i>				

Figura 177: Resultados obtenidos en AIRO correas del perfil conformado en frío tipo doble G.


Tabla de resultados del perfil seleccionado				n(D/C) = 1.81 		
Referencia	12	INT e:1	21	23	INT e:2	32
Lb (m)	4	4	4	4	4	4
Cb	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
Mux-x (kN-m)	0	4.07	-6.77	-6.77	4.07	0
Φ Mnx-x (kN-m)	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
Vuy (kN-m)	5.42	-1.69	-8.46	8.46	1.69	-5.42
Φ Vny (kN)	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	41.4
Ru (kN)	5.42	0	16.92	16.92	0	5.42
Φ Rn (kN)	11.5	0	11.5	11.5	0	11.5
Deflex (m)	0	0.004	0	0	0.004	0
Deflex adm (m)	0.022(L)	0.033(D+L)	0.022(L)	0.022(L)	0.033(D+L)	0.022(L)
Muy-y (kN-m)	0	1.16	-1.88	-1.88	1.16	0
Φ Mny-y (kN-m)	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55
Vux (kN-m)	1.52	0.58	-2.35	2.35	2.35	-1.52
Φ Vnx (kN)	57.56	57.56	57.56	57.56	57.56	57.56
n(D/C) flex biax	0	0.44	0.72	0.72	0.44	0
n(D/C) V biaxial	0.16	0.05	0.25	0.25	0.08	0.16
n(D/C) Flex y V ...	0.13	0.29	0.51	0.51	0.29	0.13

Tabla 26: Resumen de resultados obtenidos con Arquimet versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil conformado en frío tipo doble G.

Parámetro	Arquimet	AIRO Correas	Diferencia
Φ Mnx-x	13.2	14.4	9.09%
Φ Vny	43.42	41.4	4.65%
Φ Mny-y	6.72	7.55	12.35%
Φ Vnx	53.05	57.56	8.50%

La diferencia promedio con respecto a los resultados obtenidos en Arquimet fue de 6.48%.

Comparación con Etabs de perfil laminado en C

Figura 178: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado en C.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0.5"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0.35"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="345"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

C150X12.2 (C6X8.2)

PERFIL LAMINADO EN C

Tensor

ST
AC
L/2
L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /	<input type="text" value="180"/>
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>
W Luz /	<input type="text" value="180"/>

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

Figura 179: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado en C.

Moments and Capacities				
	M_u Moment (kN-m)	ϕM_n (kN-m)	ϕM_n No LTB (kN-m)	ϕM_n Cb=1 (kN-m)
Major Bending	11.1574	15.0872	26.2351	11.5668
Minor Bending	0.7153	3.9692		

Shear Design			
	V_u Force (kN)	ϕV_n Capacity (kN)	Stress Ratio
Major Shear	0	144.1224	0
Minor Shear	1.1924	158.1887	0.008

Figura 180: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado en C.


Tabla de resultados del perfil seleccionado			$n(D/C) =$	0.91 
Referencia	12	INT e:1	21	
Lb (m)	3	3	3	
Cb	1.3	1.3	1.3	
M_{ux-x} (kN-m)	0	10.57	0	
ϕM_{nx-x} (kN-m)	14.49	14.49	14.49	
V_{uy} (kN-m)	7.05	0	-7.05	
ϕV_{ny} (kN)	143.73	143.73	143.73	
R_u (kN)	7.05	0	7.05	
ϕR_n (kN)	316.33	0	316.33	
Deflex (m)	0	0.022	0	
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)	
M_{uy-y} (kN-m)	0	-0.71	0	
ϕM_{ny-y} (kN-m)	4.05	4.05	4.05	
V_{ux} (kN-m)	0.71	1.19	-0.71	
ϕV_{nx} (kN)	158.24	158.24	158.24	
$n(D/C)$ flex biax	0	0.91	0	
$n(D/C)$ V biaxial	0.05	0.01	0.05	
$n(D/C)$ Flex y V comb	0.05	0.73	0.05	

Tabla 27: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado en C.

Parámetro	Etabs	AIRO Correas	Diferencia
ϕM_{nx-x}	15.1	14.49	4.04%
ϕV_{ny}	144.12	143.73	0.27%
ϕM_{ny-y}	3.97	4.05	2.02%
ϕV_{nx}	158.2	158.24	0.03%

Comparación con Etabs de perfil laminado en I

Figura 181: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado en I.

Carga muerta adicional (KN/m2)	<input type="text" value="0.5"/>
Carga viva (KN/m2)	<input type="text" value="0.35"/>
Viento en compresión (KN/m2)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m2)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="345"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	

ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

W200X19.3 (W8X13)
PERFIL LAMINADO EN I

Tensor

ST

AC

L/2

L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

Figura 182: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado en I.

Moments and Capacities				
	M_u Moment (kN-m)	ϕM_n (kN-m)	ϕM_n No LTB (kN-m)	$\phi M_n C_b=1$ (kN-m)
Major Bending	11.5462	42.1758	57.9612	32.3348
Minor Bending	0.715	10.9313		

Shear Design			
	V_u Force (kN)	ϕV_n Capacity (kN)	Stress Ratio
Major Shear	0	245.2349	0
Minor Shear	1.1923	245.0081	0.005

Figura 183: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado en I.


Tabla de resultados del perfil seleccionado			$n(D/C) =$	0.33 
Referencia	12	INT e:1		21
Lb (m)	3	3		3
Cb	1.3	1.3		1.3
M_{ux-x} (kN-m)	0	10.94		0
ϕM_{nx-x} (kN-m)	41.74	41.74		41.74
V_{uy} (kN-m)	7.3	0		-7.3
ϕV_{ny} (kN)	245.19	245.19		245.19
R_u (kN)	7.3	0		7.3
ϕR_n (kN)	225.04	0		225.04
Deflex (m)	0	0.008		0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)		0.033(L)
M_{uy-y} (kN-m)	0	-0.75		0
ϕM_{ny-y} (kN-m)	11.08	11.08		11.08
V_{ux} (kN-m)	0.75	1.24		-0.75
ϕV_{nx} (kN)	246.06	246.06		246.06
$n(D/C)$ flex biax	0	0.33		0
$n(D/C)$ V biaxial	0.03	0.01		0.03
$n(D/C)$ Flex y V comb	0.03	0.26		0.03

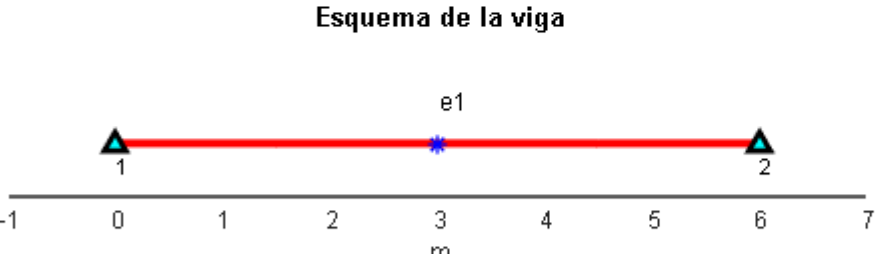
Tabla 28: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado en I.

Parámetro	Etabs	AIRO Correas	Diferencia
ϕM_{nx-x}	42.16	41.75	0.97%
ϕV_{ny}	245.23	245.19	0.02%
ϕM_{ny-y}	10.93	11.08	1.37%
ϕV_{nx}	245	246.06	0.43%

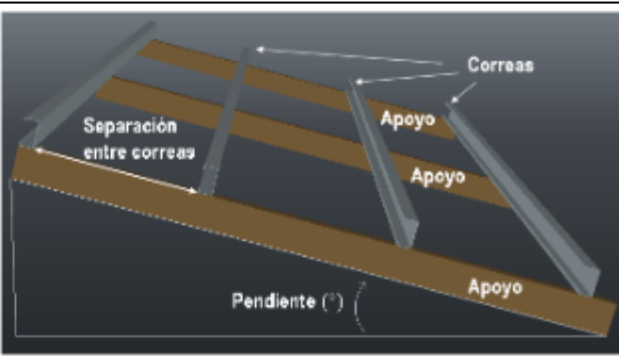
Comparación con Etabs de perfil laminado tubular estructural rectangular


Figura 184: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado tubular estructural rectangular.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0.5"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0.35"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="345"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo



Esquema de la viga





HSS101.6X76.2X3.2
(HSS4X3X.125)
PERFIL LAMINADO
TUBULAR

Tensor

ST
AC
L/2
L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /
D+L Luz /
W Luz /

Figura 185: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado tubular estructural rectangular.

Moments and Capacities				
	M _u Moment (kN-m)	φM _u (kN-m)	φM _u No LTB (kN-m)	φM _u Cb=1 (kN-m)
Major Bending	10.9295	10.7279	10.7279	10.7279
Minor Bending	0.7145	8.7959		

Shear Design			
	V _u Force (kN)	φV _u Capacity (kN)	Stress Ratio
Major Shear	0	101.7581	0
Minor Shear	1.1922	73.8944	0.016

Figura 186: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado tubular estructural rectangular.


Tabla de resultados del perfil seleccionado			n(D/C) =	1.59 
Referencia	12	INT e:1		21
Lb (m)	3	3		3
Cb	1.3	1.3		1.3
Mux-x (kN-m)	0	10.35		0
φMnx-x (kN-m)	11.13	11.13		11.13
Vuy (kN-m)	6.9	0		-6.9
φVny (kN)	105.54	105.54		105.54
Ru (kN)	6.9	0		6.9
φRn (kN)	341.73	0		341.73
Deflex (m)	0	0.08		0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)		0.033(L)
Muy-y (kN-m)	0	-0.7		0
φMny-y (kN-m)	9.1	9.1		9.1
Vux (kN-m)	0.7	1.16		-0.7
φVnx (kN)	77.2	77.2		77.2
n(D/C) flex biax	0	1.01		0
n(D/C) V biaxial	0.07	0.02		0.07
n(D/C) Flex y V comb	0.07	0.93		0.07

Tabla 29: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado tubular estructural rectangular.

Parámetro	Etabs	AIRO Correas	Diferencia
φMnx-x	10.72	11.13	3.82%
φVny	101.8	105.54	3.67%
φMny-y	8.8	9.1	3.41%
φVnx	73.9	77.2	4.47%

Comparación con Etabs de perfil laminado tubular estructural circular

Figura 187: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado tubular estructural circular.

Carga muerta adicional (KN/m2)	<input type="text" value="0.5"/>
Carga viva (KN/m2)	<input type="text" value="0.35"/>
Viento en compresión (KN/m2)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m2)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="345"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

-1 0 1 2 3 4 5 6 7
m

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	

ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

HSS101.6X3.2
(HSS4X.125)
PERFIL LAMINADO
TUBULAR

Tensor

ST
 AC
 L/2
 L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /	<input type="text" value="180"/>
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>
W Luz /	<input type="text" value="180"/>

Figura 188: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado tubular estructural circular.

Moments and Capacities				
	M_u Moment (kN-m)	ϕM_u (kN-m)	ϕM_u No LTB (kN-m)	ϕM_u Cb=1 (kN-m)
Major Bending	10.8973	8.8976	8.8976	8.8976
Minor Bending	0.7144	8.8976		

Shear Design			
	V_u Force (kN)	ϕV_u Capacity (kN)	Stress Ratio
Major Shear	0	85.2724	0
Minor Shear	1.1921	85.2724	0.014

Figura 189: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado tubular estructural circular.

Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	3	3	3
Cb	1.3	1.3	1.3
Mux-x (kN-m)	0	10.33	0
ϕM_{nx-x} (kN-m)	8.98	8.98	8.98
Vuy (kN-m)	6.89	0	-6.89
ϕV_{ny} (kN)	85.43	85.43	85.43
Ru (kN)	6.89	0	6.89
ϕR_n (kN)	0	0	0
Deflex (m)	0	0.102	0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)
Muy-y (kN-m)	0	-0.69	0
ϕM_{ny-y} (kN-m)	8.98	8.98	8.98
Vux (kN-m)	0.69	1.16	-0.69
ϕV_{nx} (kN)	85.43	85.43	85.43
n(D/C) flex biax	0	1.23	0
n(D/C) V biaxial	0.09	0.01	0.09
n(D/C) Flex y V comb	0.08	1.15	0.08

Tabla 30: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado tubular estructural circular.

Parámetro	Etabs	AIRO Correas	Diferencia
ϕM_{nx-x}	8.9	8.98	0.90%
ϕV_{ny}	85.3	85.43	0.15%
ϕM_{ny-y}	8.9	8.98	0.90%
ϕV_{nx}	85.3	85.43	0.15%

Comparación con Etabs de barra circular

Figura 190: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado barra circular de 2” de diámetro.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0.5"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0.35"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="345"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

Barra circular

PERFIL LAMINADO
BARRA CIRCULAR

Tensor

ST
 AC
 L/2
 L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostamiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

Figura 191: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado barra circular.

Moments and Capacities				
	M_u Moment (kN-m)	ϕM_n (kN-m)	ϕM_n No LTB (kN-m)	$\phi M_n C_b=1$ (kN-m)
Major Bending	11.359	6.3891	6.3891	6.7791
Minor Bending	0.7154	6.3891		

Shear Design			
	V_u Force (kN)	ϕV_n Capacity (kN)	Stress Ratio
Major Shear	0	339.5804	0
Minor Shear	1.1925	339.5804	0.004

Figura 192: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado barra circular.

Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	3	3	3
Cb	1.3	1.3	1.3
Mux-x (kN-m)	0	10.77	0
ϕM_{nx-x} (kN-m)	6.39	6.39	6.39
Vuy (kN-m)	7.18	0	-7.18
ϕV_{ny} (kN)	335.35	335.35	335.35
Ru (kN)	7.18	0	7.18
ϕR_n (kN)	0	0	0
Deflex (m)	0	0.373	0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)
Muy-y (kN-m)	0	-0.73	0
ϕM_{ny-y} (kN-m)	6.39	6.39	6.39
Vux (kN-m)	0.73	1.22	-0.73
ϕV_{nx} (kN)	335.35	335.35	335.35
n(D/C) flex biax	0	1.8	0
n(D/C) V biaxial	0.02	0	0.02
n(D/C) Flex y V comb	0.02	1.69	0.02

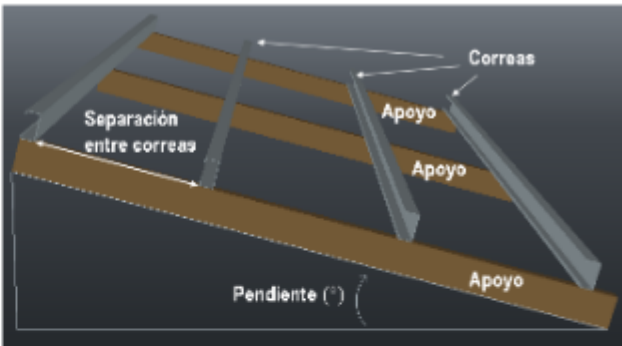
Tabla 31: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado barra circular.

Parámetro	Etabs	AIRO Correas	Diferencia
ϕM_{nx-x}	6.39	6.39	0.00%
ϕV_{ny}	339.6	335.35	1.25%
ϕM_{ny-y}	6.39	6.39	0.00%
ϕV_{nx}	339.6	335.35	1.25%

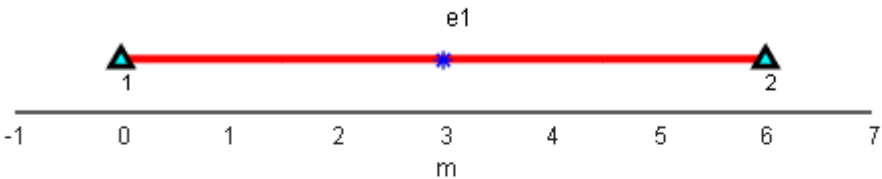
Comparación con Etabs de barra rectangular


Figura 193: Datos para la comparación con Etabs del perfil laminado barra rectangular.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0.5"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0.35"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0.55"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="-0.55"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="345"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.1"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo



Esquema de la viga





Barra rectangular
PERFIL LAMINADO
BARRA RECTANGULAR

Tensor

ST
AC
L/2
L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /	<input type="text" value="180"/>
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>
W Luz /	<input type="text" value="180"/>

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

Barra de 0.05m x 0.1m

Figura 194: Resultados en Etabs para la comparación de perfil laminado barra rectangular.

Moments and Capacities				
	M_u Moment (kN-m)	ϕM_n (kN-m)	ϕM_n No LTB (kN-m)	$\phi M_n C_b=1$ (kN-m)
Major Bending	12.5948	38.783	38.783	37.8344
Minor Bending	0.7154	19.3915		
Shear Design				
	V_u Force (kN)	ϕV_n Capacity (kN)	Stress Ratio	
Major Shear	0	775.6602	0	
Minor Shear	1.1925	775.6602	0.002	

Figura 195: Resultados en AIRO correas para la comparación de perfil laminado barra rectangular.

Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	3	3	3
Cb	1.3	1.3	1.3
M_{ux-x} (kN-m)	0	11.94	0
ϕM_{nx-x} (kN-m)	38.78	38.78	38.78
V_{uy} (kN-m)	7.96	0	-7.96
ϕV_{ny} (kN)	775.58	775.58	775.58
R_u (kN)	7.96	0	7.96
ϕR_n (kN)	0	0	0
Deflex (m)	0	0.034	0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)
M_{uy-y} (kN-m)	0	-0.83	0
ϕM_{ny-y} (kN-m)	19.39	19.39	19.39
V_{ux} (kN-m)	0.83	1.38	-0.83
ϕV_{nx} (kN)	775.58	775.58	775.58
n(D/C) flex biax	0	0.35	0
n(D/C) V biaxial	0.01	0	0.01
n(D/C) Flex y V comb	0.01	0.31	0.01

Tabla 32: Resumen de resultados obtenidos con Etabs versus los resultados obtenidos con AIRO correas en el cálculo de resistencia del perfil laminado barra rectangular.

Parámetro	Etabs	AIRO Correas	Diferencia
ϕM_{nx-x}	38.8	38.78	0.05%
ϕV_{ny}	775.7	775.58	0.02%
ϕM_{ny-y}	19.4	19.39	0.05%
ϕV_{nx}	775.7	775.58	0.02%

La diferencia promedio con respecto a los resultados obtenidos en Etabs de 1.22%.

Comparación con CYPE de perfil laminado en I con patín esbelto

$$\lambda = \frac{bf}{2 \cdot ft} = \frac{1}{2 * 0.0095} = 52.63$$

$$\lambda_p = 0.38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 24.09$$

$\lambda > \lambda_r$ Patín esbelto

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{0.5 - 2 * 0.0095}{0.0127} = 37.87$$

$$\lambda_p = 3.76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 90.57$$

$\lambda < \lambda_p$ Alma compacta

Figura 196: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con patín esbelto para flexión alrededor del eje fuerte.

El momento flector solicitante de cálculo pésimo, M_u , se produce en un punto situado a una distancia de 3.000 m del nudo N1, para la combinación de acciones 1.4·PP+1.4·CM1.	
Donde:	
M_u : Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD	M_u : <u>12.18</u> kN·m
M_c : Resistencia de diseño a flexión	M_c : <u>191.69</u> kN·m
$M_c = \phi_b M_n$	
La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados límite descritos en el Capítulo F:	
Donde:	
ϕ_b : Factor de resistencia a flexión	ϕ_b : <u>0.90</u>
M_n : La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 3, Sección 2, División b	M_n : <u>212.98</u> kN·m

Figura 197: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con patín esbelto para flexión alrededor del eje débil.

El momento flector solicitante de cálculo pésimo, M_r , se produce en un punto situado a una distancia de 3.000 m del nudo N1, para la combinación de acciones 1.2·PP+1.2·CM1+1.6·Q1.

Donde:

M_r : Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD M_r : 70.63 kN·m

M_c : Resistencia de diseño a flexión M_c : 141.99 kN·m

$M_c = \phi_b M_n$

La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados límite descritos en el Capítulo F:

Donde:

ϕ_b : Factor de resistencia a flexión ϕ_b : 0.90

M_n : La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 6, Sección 2, División c M_n : 157.77 kN·m


Figura 198: Dimensiones y propiedades geométricas para el perfil laminado en I con patín esbelto.

PERFIL LAMINADO EN I			Propiedades geométricas			
<p>Ejemplo</p>	Geometría (m)	Geometría (in)	A (m ²)	0.025109	A (in ²)	38.9186
	bf: 1 m	bf: 39.3701 in	Ix (m ⁴)	0.0012607	Ix (in ⁴)	3028.8987
	tf: 0.0095 m	tf: 0.37402 in	Iy (m ⁴)	0.0015834	Iy (in ⁴)	3804.1708
	d: 0.5 m	d: 19.685 in	Sx (m ³)	0.0050429	Sx (in ³)	307.7361
	tw: 0.0127 m	tw: 0.5 in	Sy (m ³)	0.0031668	Sy (in ³)	193.2519
	r: 0 m	r: 0 in	Xc (m)	0.5	Xc (in)	19.685
			Yc (m)	0.25	Yc (in)	9.8425
		rx (m)	0.22408	rx (in)	8.8219	
		ry (m)	0.25112	ry (in)	9.8867	
		Zx (m ³)	0.0053943	Zx (in ³)	329.1817	
		Zy (m ³)	0.0047694	Zy (in ³)	291.0463	
		Cw (m ⁶)	9.5239e-05	Cw (in ⁶)	354658.6...	

Tabla 33: Resumen de resultados obtenidos con CYPE para perfil laminado en I con patín esbelto versus AIRO correas.

Parámetro	CYPE	AIRO Correas	Diferencia
ΦM_{nx-x}	191.69	191.69	0.00%
ΦM_{ny-y}	141.99	141.99	0.00%

Figura 199: Resultados en AIRO correas para el perfil laminado en I con patín esbelto.

Tabla de resultados del perfil seleccionado		n(D/C) = <input type="text" value="0.15"/> 	
Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	6	6	6
Cb	1.14	1.14	1.14
Mux-x (kN-m)	0	19.87	0
ΦMnx-x (kN-m)	191.69	191.69	191.69
Vuy (kN-m)	13.25	0	-13.25
ΦVny (kN)	1313.31	1313.31	1313.31
Ru (kN)	13.25	0	13.25
ΦRn (kN)	508.6	0	508.6
Deflex (m)	0	0	0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)
Muy-y (kN-m)	0	5.96	0
ΦMny-y (kN-m)	141.99	141.99	141.99
Vux (kN-m)	3.97	1.99	-3.97
ΦVnx (kN)	1342.28	1342.28	1342.28
n(D/C) flex biax	0	0.15	0
n(D/C) V biaxial	0.01	0	0.01
n(D/C) Flex y V comb	0.01	0.1	0.01

Comparación con CYPE de perfil laminado en I con alma no compacta

$$\lambda = \frac{bf}{2. ft} = \frac{0.5}{2 * 0.0127} = 19.68$$

$$\lambda_p = 0.38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 24.09$$

$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ Patín no compacto

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{1 - 2 * 0.0127}{0.0095} = 102.59$$

$$\lambda_p = 3.76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 90.57$$

$$\lambda_p = 5.7 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.7 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 137.3$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \text{ Alma no compacta}$$

Figura 200: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma no compacta para flexión alrededor del eje fuerte.

El momento flector solicitante de cálculo pésimo, M_r , se produce en un punto situado a una distancia de 3.000 m del nudo N1, para la combinación de acciones 1.4·PP+1.4·CM1.	
Donde:	
M_r : Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD	M_r : <u>10.65</u> kN·m
M_c : Resistencia de diseño a flexión	M_c : <u>1932.73</u> kN·m
$M_c = \phi_b M_n$	
La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados límite descritos en el Capítulo F:	
Donde:	
ϕ_b : Factor de resistencia a flexión	ϕ_b : <u>0.90</u>
M_n : La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 4, Sección 3, División b, R _{pc} calculado según 2, F _l calculado según 1	M_n : <u>2147.48</u> kN·m

Figura 201: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma no compacta para flexión alrededor del eje débil.

Resistencia a flexión eje Y (Capítulo F)	
Todas las secciones deben cumplir con las especificaciones LRFD desarrolladas en Capítulo F de ANSI/AISC 360-16 (LRFD).	
Se debe satisfacer el siguiente criterio:	
$\eta_{Mx} = \frac{M_r}{M_c} \leq 1$	η_{Mx} : <u>0.228</u> ✓
El momento flector solicitante de cálculo pésimo, M_r , se produce en un punto situado a una distancia de 3.000 m del nudo N1, para la combinación de acciones 1.2·PP+1.2·CM1+1.6·Q1.	
Donde:	
M_r : Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD	M_r : <u>70.63</u> kN·m
M_c : Resistencia de diseño a flexión	M_c : <u>309.43</u> kN·m
$M_c = \phi_b M_n$	
La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados límite descritos en el Capítulo F:	
Donde:	
ϕ_b : Factor de resistencia a flexión	ϕ_b : <u>0.90</u>
M_n : La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 6, Sección 2, División b	M_n : <u>343.81</u> kN·m

Tabla 34: Resumen de resultados obtenidos con CYPE para perfil laminado en I con alma no compacta versus AIRO correas.

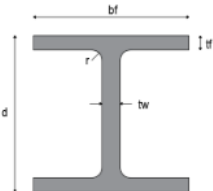
Parámetro	CYPE	AIRO Correas	Diferencia
ΦM_{nx-x}	1932.73	1931.65	0.06%
ΦM_{ny-y}	309.43	309.31	0.04%

Figura 202: Dimensiones y propiedades geométricas para el perfil laminado en I con alma no compacta.

AIRO_CORREAS

PERFIL LAMINADO EN I

Ejemplo 2



Geometría (m)	Geometría (in)
bf: 0.5 m	bf: 19.685 in
tf: 0.0127 m	tf: 0.5 in
d: 1 m	d: 39.3701 in
tw: 0.0095 m	tw: 0.37402 in
r: 0 m	r: 0 in

Propiedades geométricas

A (m ²)	0.021959	A (in ²)	34.0361
Ix (m ⁴)	0.0038279	Ix (in ⁴)	9196.5635
Iy (m ⁴)	0.00026465	Iy (in ⁴)	635.8313
Sx (m ³)	0.0076558	Sx (in ³)	467.1854
Sy (m ³)	0.0010586	Sy (in ³)	64.6005
Xc (m)	0.25	Xc (in)	9.8425
Yc (m)	0.5	Yc (in)	19.685
rx (m)	0.41752	rx (in)	16.4378
ry (m)	0.10978	ry (in)	4.3222
Zx (m ³)	0.0085252	Zx (in ³)	520.2419
Zy (m ³)	0.0016095	Zy (in ³)	98.2171
Cw (m ⁶)	6.4493e-05	Cw (in ⁶)	240166.6...

Figura 203: Resultados en AIRO correas para el perfil laminado en I con alma no compacta.

Tabla de resultados del perfil seleccionado		n(D/C) =	0.04
Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	6	6	6
Cb	1.14	1.14	1.14
Mux-x (kN-m)	0	18.63	0
ΦM_{nx-x} (kN-m)	1931.65	1931.65	1931.65
Vuy (kN-m)	12.42	0	-12.42
ΦV_{ny} (kN)	798.11	798.11	798.11
Ru (kN)	12.42	0	12.42
ΦR_n (kN)	285.15	0	285.15
Deflex (m)	0	0	0
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)
Muy-y (kN-m)	0	5.54	0
ΦM_{ny-y} (kN-m)	309.31	309.31	309.31
Vux (kN-m)	3.7	1.85	-3.7
ΦV_{nx} (kN)	2363.95	2363.95	2363.95
n(D/C) flex biax	0	0.03	0
n(D/C) V biaxial	0.02	0	0.02
n(D/C) Flex y V comb	0.02	0.01	0.02

Comparación con CYPE de perfil laminado en I con alma esbelta

$$\lambda = \frac{bf}{2 \cdot ft} = \frac{0.5}{2 * 0.0127} = 19.68$$

$$\lambda_p = 0.38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 24.09$$

$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ Patín no compacto

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{1.4 - 2 * 0.0127}{0.0095} = 144.69$$

$$\lambda_p = 3.76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 90.57$$

$$\lambda_p = 5.7 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.7 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 137.3$$

$\lambda_r < \lambda$ Alma Esbelta

Figura 204: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma esbelta para flexión alrededor del eje fuerte.

El momento flector solicitante de cálculo pésimo, M_r , se produce en un punto situado a una distancia de 3.000 m del nudo N1, para la combinación de acciones 1.4·PP+1.4·CM1.	
Donde:	
M_r: Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD	M_r : <u>12.50</u> kN·m
M_d: Resistencia de diseño a flexión	M_d : <u>2831.52</u> kN·m
$M_c = \phi_b M_n$	
La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados límite descritos en el Capítulo F:	
Donde:	
ϕ_b: Factor de resistencia a flexión	ϕ_b : <u>0.90</u>
M_n: La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 5, Sección 3, División b	M_n : <u>3146.14</u> kN·m

Figura 205: Resultados en CYPE para el perfil laminado en I con alma esbelta para flexión alrededor del eje débil.

El momento flector solicitante de cálculo pésimo, M , se produce en un punto situado a una distancia de 3.000 m del nudo N1, para la combinación de acciones 1.2-PP+1.2-CM1+1.6-Q1.

Donde:

M : Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD **M** : $\frac{70.63}{310.27}$ kN-m

M_d : Resistencia de diseño a flexión **M_d** : $\frac{70.63}{310.27}$ kN-m

$M_d = \phi_b M_n$

La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados límite descritos en el Capítulo F:

Donde:

ϕ_b : Factor de resistencia a flexión **ϕ_b** : 0.90

M_n : La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 6, Sección 2, División b **M_n** : 344.75 kN-m

Figura 206: Geometría para el perfil laminado en I con alma esbelta.

Ejemplo 3		Geometría (m)	Geometría (in)	A (m ²)	0.025759	A (in ²)	39.9261
	bf: 0.5 m	bf: 19.685 in	Ix (m ⁴)	0.008167	Ix (in ⁴)	19621.316	
	tf: 0.0127 m	tf: 0.5 in	Iy (m ⁴)	0.00026468	Iy (in ⁴)	635.9	
	d: 1.4 m	d: 55.1181 in	Sx (m ³)	0.011667	Sx (in ³)	711.9735	
	tw: 0.0095 m	tw: 0.37402 in	Sy (m ³)	0.0010587	Sy (in ³)	64.6074	
	r: 0 m	r: 0 in	Xc (m)	0.25	Xc (in)	9.8425	
			Yc (m)	0.7	Yc (in)	27.5591	
			rx (m)	0.56308	rx (in)	22.1685	
		ry (m)	0.10137	ry (in)	3.9909		
		Zx (m ³)	0.013297	Zx (in ³)	811.4313		
		Zy (m ³)	0.0016185	Zy (in ³)	98.7678		
		Cw (m ⁶)	0.00012735	Cw (in ⁶)	474244.326		

Figura 207: Resultados en AIRO correas para el perfil laminado en I con alma esbelta.

Tabla de resultados del perfil seleccionado			n(D/C) =	0.04	●
Referencia	12	INT e:1		21	
Lb (m)	6	6		6	
Cb	1.14	1.14		1.14	
Mux-x (kN-m)	0	20.13		0	
ΦM_{nx-x} (kN-m)	2829.87	2829.87		2829.87	
Vuy (kN-m)	13.42	0		-13.42	
ΦV_{ny} (kN)	517.98	517.98		517.98	
Ru (kN)	13.42	0		13.42	
ΦR_n (kN)	277.94	0		277.94	
Deflex (m)	0	0		0	
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)		0.033(L)	
Muy-y (kN-m)	0	6.04		0	
ΦM_{ny-y} (kN-m)	310.16	310.16		310.16	
Vux (kN-m)	4.03	2.01		-4.03	
ΦV_{nx} (kN)	2363.95	2363.95		2363.95	
n(D/C) flex biax	0	0.03		0	
n(D/C) V biaxial	0.03	0		0.03	
n(D/C) Flex y V comb	0.03	0.01		0.03	

Tabla 35: Resumen de resultados obtenidos con CYPE para perfil laminado en I con alma esbelta versus AIRO correas.

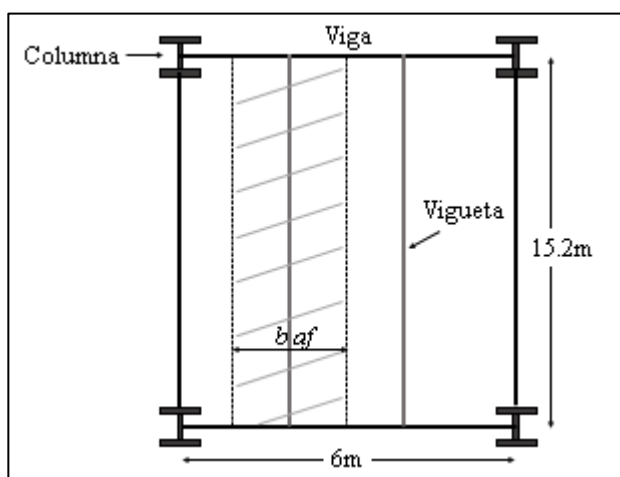
Parámetro	CYPE	AIRO Correas	Diferencia
ΦM_{nx-x}	2831.52	2829.87	0.06%
ΦM_{ny-y}	310.27	310.16	0.04%

La diferencia promedio con respecto a los resultados obtenidos en CYPE de 0.03%.

Comparación manual 1: flexión alrededor del eje fuerte sin arriostramiento lateral puntual. Zona 3, pandeo lateral torsional elástico.

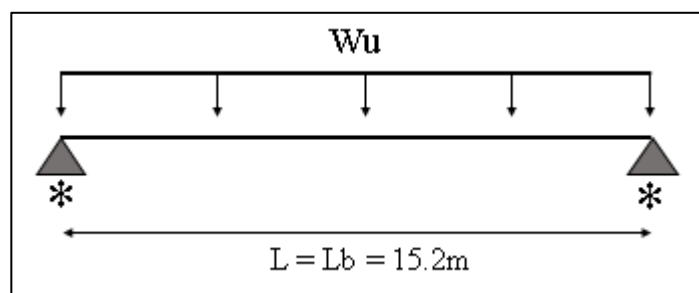
En la siguiente figura se muestra el arreglo de vigas y viguetas que se usan para soportar un piso de edificio industrial. Suponer que la losa o sistema de piso no proporciona arriostramiento lateral continuo. Carga viva de 5KN/m^2 y carga muerta de 8KN/m^2 .

Figura 208: Esquema del arreglo de vigas y viguetas para la comparación manual 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 209: Modelo idealizado de la vigüeta para la comparación manual 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 210: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 1.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="8"/>										
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="5"/>										
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>										
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>										
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="0"/>										
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="2"/>										
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>										
Fy (MPa)	<input type="text" value="350"/>										
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>	<p>W530X182 (W21X122) PERFIL LAMINADO EN I</p>									
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.05"/>										
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho										
	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo										
Esquema de la viga											
ID Luz	1										
Longitud (m)	15.2										
<table border="1"> <tr> <td>ID nudo</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Despl Y</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Giro</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>			ID nudo	1	2	Despl Y	0	0	Giro	1	1
ID nudo	1	2									
Despl Y	0	0									
Giro	1	1									
<table border="1"> <tr> <td>L Luz /</td> <td><input type="text" value="180"/></td> </tr> <tr> <td>D+L Luz /</td> <td><input type="text" value="120"/></td> </tr> <tr> <td>W Luz /</td> <td><input type="text" value="180"/></td> </tr> </table>			L Luz /	<input type="text" value="180"/>	D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>	W Luz /	<input type="text" value="180"/>			
L Luz /	<input type="text" value="180"/>										
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>										
W Luz /	<input type="text" value="180"/>										

Tensor

ST
AC
L/2
L/3

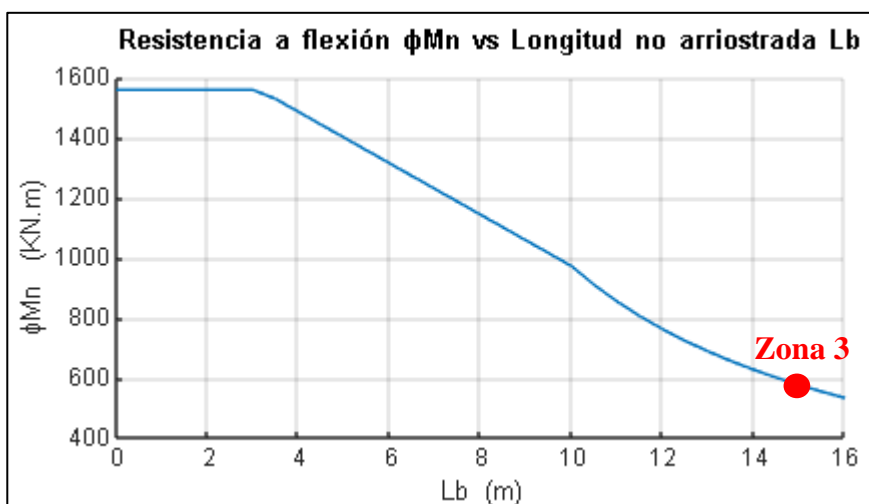
ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /	<input type="text" value="180"/>
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>
W Luz /	<input type="text" value="180"/>

Figura 211: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 1.

Tabla de resultados del perfil seleccionado		n(D/C) = 3.25 ●	
Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	15.2	15.2	15.2
Cb	1.14	1.14	1.14
Mux-x (kN-m)	0	2094.92	0
ΦM_{nx-x} (kN-m)	643.86	643.86	643.86
Vuy (kN-m)	551.29	0	-551.29
ΦV_{ny} (kN)	1758.79	1758.79	1758.79
Ru (kN)	551.29	0	551.29
ΦR_n (kN)	833.08	0	833.08
Deflex (m)	0	0.151	0
Deflex adm (m)	0.084(L)	0.127(D+L)	0.084(L)
Muy-y (kN-m)	0	0	0
ΦM_{ny-y} (kN-m)	391.24	391.24	391.24
Vux (kN-m)	0	0	0
ΦV_{nx} (kN)	2905.31	2905.31	2905.31
n(D/C) flex biax	0	3.25	0
n(D/C) V biaxial	0.31	0	0.31
n(D/C) Flex y V comb	0.31	3.25	0.31

Figura 212: Gráfica de resistencia a flexión vs longitud no arriestrada en AIRO correas para la comparación manual 1

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida manualmente: 643.68 KN.m

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida en AIRO Correas: 643.86 KN.m

La diferencia es de 0.028%.

Comparación manual 2: flexión alrededor del eje fuerte con arriostramiento lateral puntual en la mitad de la luz. Zona 2; pandeo lateral torsional inelástico.

Este es el mismo ejemplo de la comparación 1, pero con arriostramiento a L/2.


Figura 213: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 2.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="8"/>		
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="5"/>		
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>		
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>		
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="0"/>		
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="2"/>		
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>		Fy (MPa)
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb	<input type="text" value="1"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m)	<input type="text" value="0.05"/>	
Número de luces:	<input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo	
Esquema de la viga			
ID Luz	1		
Longitud (m)	15.2		
ID nudo	1	2	
Despl Y	0	0	
Giro	1	1	
Tensor			
ST			
AC			
L/2			
L/3			
ST: Sin tensor AC: Arriostramiento continuo			
Deflexión admisible			
L Luz /	<input type="text" value="180"/>		
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>		
W Luz /	<input type="text" value="180"/>		

W530X248 (W21X166)

PERFIL LAMINADO EN I

Figura 214: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 2.

Tabla de resultados del perfil seleccionado		n(D/C) = <input type="text" value="0.49"/> 	
Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	7.6	7.6	7.6
Cb	1.3	1.3	1.3
Mux-x (kN-m)	0	1100.6	0
ΦM_{nx-x} (kN-m)	2231.48	2231.48	2231.48
Vuy (kN-m)	289.63	0	-289.63
ΦV_{ny} (kN)	2294.29	2294.29	2294.29
Ru (kN)	289.63	0	289.63
ΦR_n (kN)	1363.57	0	1363.57
Deflex (m)	0	0.055	0
Deflex adm (m)	0.084(L)	0.127(D+L)	0.084(L)
Muy-y (kN-m)	0	0	0
ΦM_{ny-y} (kN-m)	554.58	554.58	554.58
Vux (kN-m)	0	0	0
ΦV_{nx} (kN)	4107.92	4107.92	4107.92
n(D/C) flex biax	0	0.49	0
n(D/C) V biaxial	0.13	0	0.13
n(D/C) Flex y V comb	0.13	0.49	0.13

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida manualmente: 2229 KN.m

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida en AIRO Correas: 2231.48 KN.m

La diferencia es de 0.11 %.

Comparación manual 3: flexión alrededor del eje fuerte con arriostramiento continuo.

Zona 1; comportamiento plástico.

Figura 215: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 3.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="8"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="5"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="0"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="2"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="350"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.05"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

ID Luz	1	
Longitud (m)	15.2	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

W530X182 (W21X122)

PERFIL LAMINADO EN I

Tensor

ST
 AC
 L/2
 L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo


Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

Figura 216: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 3.

Tabla de resultados del perfil seleccionado		n(D/C) = <input type="text" value="0.68"/> 	
Referencia	12	INT e:1	21
Lb (m)	0	0	0
Cb	1	1.14	1.14
Mux-x (kN-m)	0	1078.34	0
ΦM_{nx-x} (kN-m)	1587.64	1587.64	1587.64
Vuy (kN-m)	283.77	0	-283.77
ΦV_{ny} (kN)	1758.79	1758.79	1758.79
Ru (kN)	283.77	0	283.77
ΦR_n (kN)	833.08	0	833.08
Deflex (m)	0	0.078	0
Deflex adm (m)	0.084(L)	0.127(D+L)	0.084(L)
Muy-y (kN-m)	0	0	0
ΦM_{ny-y} (kN-m)	391.24	391.24	391.24
Vux (kN-m)	0	0	0
ΦV_{nx} (kN)	2905.31	2905.31	2905.31
n(D/C) flex biax	0	0.68	0
n(D/C) V biaxial	0.16	0	0.16
n(D/C) Flex y V comb	0.16	0.68	0.16

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida manualmente: 1584.7 KN.m

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida en AIRO Correas: 1587.64 KN.m

La diferencia es de 0.18%.

Comparación manual 4: resistencia a cortante para flexión alrededor del eje fuerte.

Figura 217: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 4.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="5"/>
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="5"/>
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="0"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="2"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="350"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.05"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

W530X82 (W21X55)
PERFIL LAMINADO EN I

Tensor

ST
AC
L/2
L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /	<input type="text" value="180"/>
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>
W Luz /	<input type="text" value="180"/>

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

Figura 220: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 5.

Carga muerta adicional (KN/m2)	<input type="text" value="5"/>
Carga viva (KN/m2)	<input type="text" value="5"/>
Viento en compresión (KN/m2)	<input type="text" value="0"/>
Viento en succión (KN/m2)	<input type="text" value="0"/>
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="20"/>
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="2"/>
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>
Fy (MPa)	<input type="text" value="350"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.05"/>
Número de luces: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo

Esquema de la viga

Perfil I Ejemplo

PERFIL LAMINADO EN I

Tensor

ST
AC
L/2
L/3


ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /	<input type="text" value="180"/>
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>
W Luz /	<input type="text" value="180"/>

ID Luz	1	
Longitud (m)	6	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1

Figura 221: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 5.

Tabla de resultados del perfil seleccionado			n(D/C) =	0.16 
Referencia	12	INT e:1	21	
Lb (m)	6	6	6	
Cb	1.14	1.14	1.14	
Mux-x (kN-m)	0	135.65	0	
ΦMnx-x (kN-m)	7610.54	7610.54	7610.54	
Vuy (kN-m)	90.44	0	-90.44	
ΦVny (kN)	890.89	890.89	890.89	
Ru (kN)	90.44	0	90.44	
ΦRn (kN)	516.66	0	516.66	
Deflex (m)	0	0	0	
Deflex adm (m)	0.033(L)	0.05(D+L)	0.033(L)	
Muy-y (kN-m)	0	49.37	0	
ΦMny-y (kN-m)	662.19	662.19	662.19	
Vux (kN-m)	32.92	16.46	-32.92	
ΦVnx (kN)	3609.9	3609.9	3609.9	
n(D/C) flex biax	0	0.09	0	
n(D/C) V biaxial	0.11	0	0.11	
n(D/C) Flex y V comb	0.1	0.02	0.1	

Resistencia a cortante en el eje fuerte obtenida manualmente: 888.12KN.

Resistencia a cortante en el eje fuerte obtenida en AIRO Correas: 890.89 KN.

La diferencia es de 0.3 %.

Comparación manual 6: perfil laminado en I con patín no compacto

$$\lambda = \frac{bf}{2 \cdot ft} = \frac{0.305}{2 * 0.0154} = 9.9$$

$$\lambda_p = 0.38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 24.09$$

$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ Patín no compacto

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{0.307 - 2 * (0.0154 + 0.0151)}{0.0099} = 24.85$$

$$\lambda_p = 3.76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 * \sqrt{\frac{200000}{344.7}} = 90.57$$

$\lambda < \lambda_p$ Alma compacta

Figura 222: Datos ingresados en AIRO correas para la comparación manual 6.

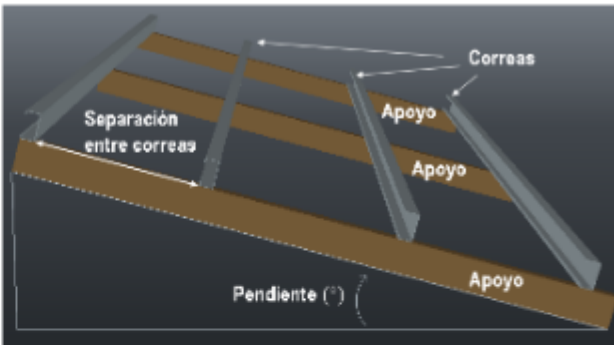

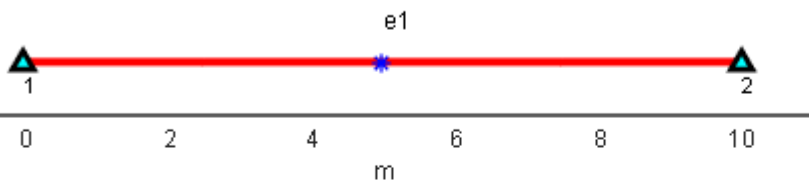

Carga muerta adicional (KN/m2)	<input type="text" value="0.5"/>	
Carga viva (KN/m2)	<input type="text" value="0.35"/>	
Viento en compresión (KN/m2)	<input type="text" value="0.55"/>	
Viento en succión (KN/m2)	<input type="text" value="-0.55"/>	
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="18.43"/>	
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="1.61"/>	
E (MPa)	<input type="text" value="200000"/>	
Fy (MPa)	<input type="text" value="350"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.05"/>	
Número de luces:	<input type="text" value="1"/>	
	<input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo derecho <input type="checkbox"/> Voladizo en el extremo izquierdo	
Esquema de la viga		
		
ID Luz	1	
Longitud (m)	10	
ID nudo	1	2
Despl Y	0	0
Giro	1	1
Tensor		
ST	▲	
AC	■	
L/2	■	
L/3	▼	
ST: Sin tensor AC: Arriostramiento continuo		
Deflexión admisible		
L Luz /	<input type="text" value="180"/>	
D+L Luz /	<input type="text" value="120"/>	
W Luz /	<input type="text" value="180"/>	

Figura 223: Resultados obtenidos en AIRO correas para la comparación manual 6.

Tabla de resultados del perfil seleccionado			n(D/C) =	0.1 
Referencia	12	INT e:1	21	
Lb (m)	5	5	5	
Cb	1.3	1.3	1.3	
Mux-x (kN-m)	0	41.19	0	
ΦM_{nx-x} (kN-m)	489.2	489.2	489.2	
Vuy (kN-m)	16.48	0	-16.48	
ΦV_{ny} (kN)	638.9	638.9	638.9	
Ru (kN)	16.48	0	16.48	
ΦR_n (kN)	384.79	0	384.79	
Deflex (m)	0	0.006	0	
Deflex adm (m)	0.056(L)	0.083(D+L)	0.056(L)	
Muy-y (kN-m)	0	-2.97	0	
ΦM_{ny-y} (kN-m)	221.55	221.55	221.55	
Vux (kN-m)	1.78	2.97	-1.78	
ΦV_{nx} (kN)	1775.47	1775.47	1775.47	
n(D/C) flex biax	0	0.1	0	
n(D/C) V biaxial	0.03	0	0.03	
n(D/C) Flex y V comb	0.03	0.08	0.03	

Resistencia a flexión alrededor del eje fuerte obtenida manualmente: 482.92 KN.m.

Resistencia a flexión alrededor del eje débil obtenida manualmente: 218.03 KN.m.

Tabla 36: Resumen de resultados obtenidos manualmente para perfil laminado en I con patín no compacto versus AIRO correas.

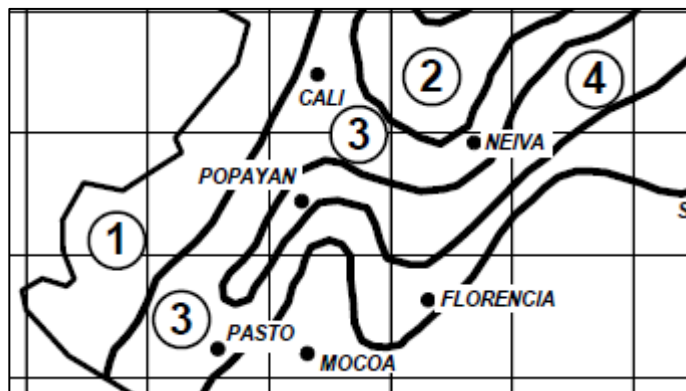
Parámetro	Manualmente	AIRO Correas	Diferencia
ΦM_{nx-x}	482.92	489.2	1.28%
ΦM_{ny-y}	218.03	221.55	1.59%

Ejemplo de cálculo de la carga de viento para una correa.

Bodega de forma rectangular en pórticos de concreto, ubicada en zona urbana de la ciudad de Popayán. La altura media de cubierta, h es 10m. El periodo natural de la estructura es de 1 segundo. La dimensión horizontal del edificio medido en dirección normal a la dirección del viento es de 30 m. La dimensión horizontal del edificio medido en dirección paralela a la dirección del viento es de 20 m. En la fachada principal se tiene la puerta (8m X 6m) que representa la única abertura en la edificación. La inclinación de la cubierta (2 aguas) es de 20°. El área aferente para la correa es de 12 m².

Velocidad básica de viento: 42 m/s (zona 4, B.2.4)

Figura 224: Ubicación de la ciudad de Popayán en el mapa de velocidad básica de viento para Colombia.



Las correas se consideran como parte de componentes y recubrimientos, por tanto, el factor de dirección de viento, K_d es: 0.85

La bodega es una estructura de ocupación normal, es decir que pertenece al grupo de uso I. Popayán es una región no propensa a huracanes, por tanto, el factor de importancia es: 0.87

La rugosidad del terreno es de categoría B, por ser una construcción ubicada en zona urbana con numerosas obstrucciones del tamaño de una vivienda. Y se tiene una categoría de exposición B. Por tanto, el coeficiente de exposición se determina así:

$$Z_g = 365.8$$

$$\alpha = 7$$

$$\text{Para } 4 \text{ m} \leq Z < Z_g \quad K_z = 2.01(Z/Z_g)^{2/\alpha}$$

$$K_z = 2.01 \left(\frac{10}{365.8} \right)^{\frac{2}{7}} = 0.72$$

Para la determinación del factor topográfico K_{zt} , no se cumplen las condiciones para aumento de velocidad sobre colinas o escarpes, por tanto, el factor topográfico K_{zt} es: 1

Debido a que la frecuencia fundamental es de 1 Hz la estructura es rígida y el factor de efecto ráfaga se calcula así:

\bar{z} : altura equivalente de la estructura definida como $0.6h$, pero no menor a Z_{\min} .

$$0.6 * 10\text{m} < 9\text{m} \text{ por tanto } \bar{z} = 9\text{m}$$

$$L_{\bar{z}} = \ell \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} = 97.5 \left(\frac{9}{10} \right)^{1/3} = 94.13$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.62 \left(\frac{B+h}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.62 \left(\frac{30+10}{94.13} \right)^{0.63}}} = 0.86$$

$$I_{\bar{z}} = c \left(\frac{10}{\bar{z}} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.3 \left(\frac{10}{9} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.3$$

$$g_Q = g_v = 3.4$$

$$G = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7 * 3.4 * 0.3 * 0.86}{1 + 1.7 * 3.4 * 0.3} \right) = 0.84$$

La clasificación del cerramiento es: edificio cerrado puesto que no se cumplen las condiciones para edificio abierto ni parcialmente cerrado.

La presión por viento se determina mediante la siguiente expresión:

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I$$

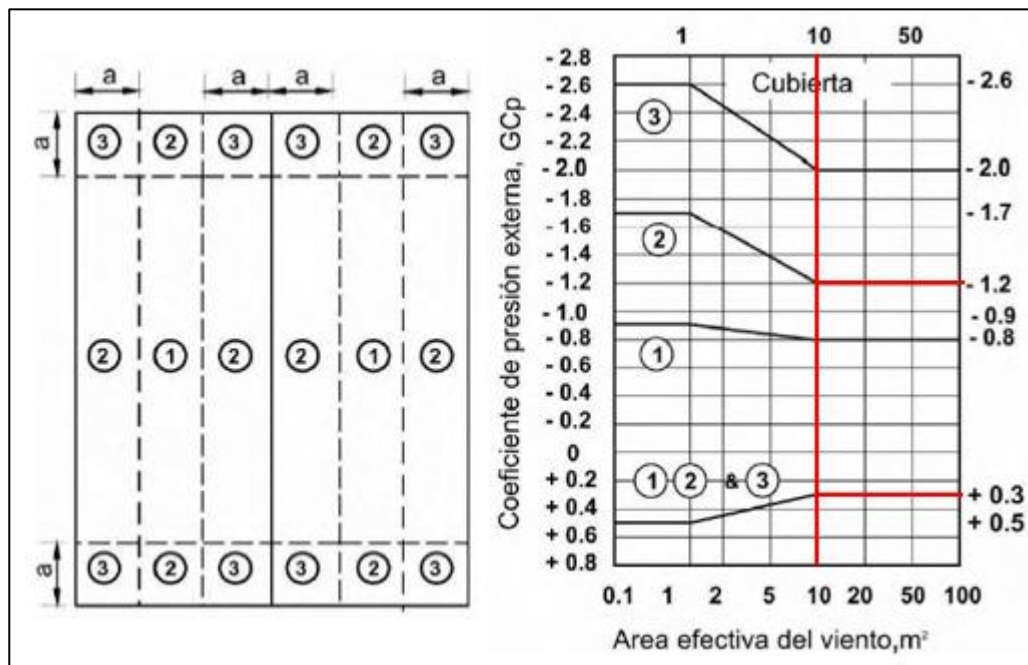
$$q_z = 0.613 * 0.72 * 1 * 0.85 * 42^2 * 0.87 = 575.74 \text{ N/m}^2$$

El coeficiente de presión interna es de 0.18 y -0.18 para edificios cerrados.

El coeficiente de presión externa se determina así:

Cubierta de edificio cerrado con $h < 18\text{m}$ y inclinación ente 7° y 27° . Figura B.6.5-8C del título B de la NSR 10.

Figura 225: Coeficientes GC_p tomados de la figura B.6.5-8C para el ejemplo de carga de viento.



Fuente: Adaptado de la figura B.6.5-8C de la NSR10.

Coeficiente de presión externa, GC_p (-): -1.2

Coeficiente de presión externa, GC_p (+): 0.3

La carga de viento de diseño para un edificio cerrado se calcula así:

$$p = q_z \cdot (GC_p - GC_{pi})$$

$$p \text{ succión} = 575.74 (-1.2 - (-0.18)) = -587.25 \text{ N/m}^2$$

$$p \text{ compresión} = 575.74 (0.3 - 0.18) = 69.08 \text{ N/m}^2$$

Figura 226: Resultados obtenidos en el módulo de viento de AIRO correas para el ejemplo de carga de viento.

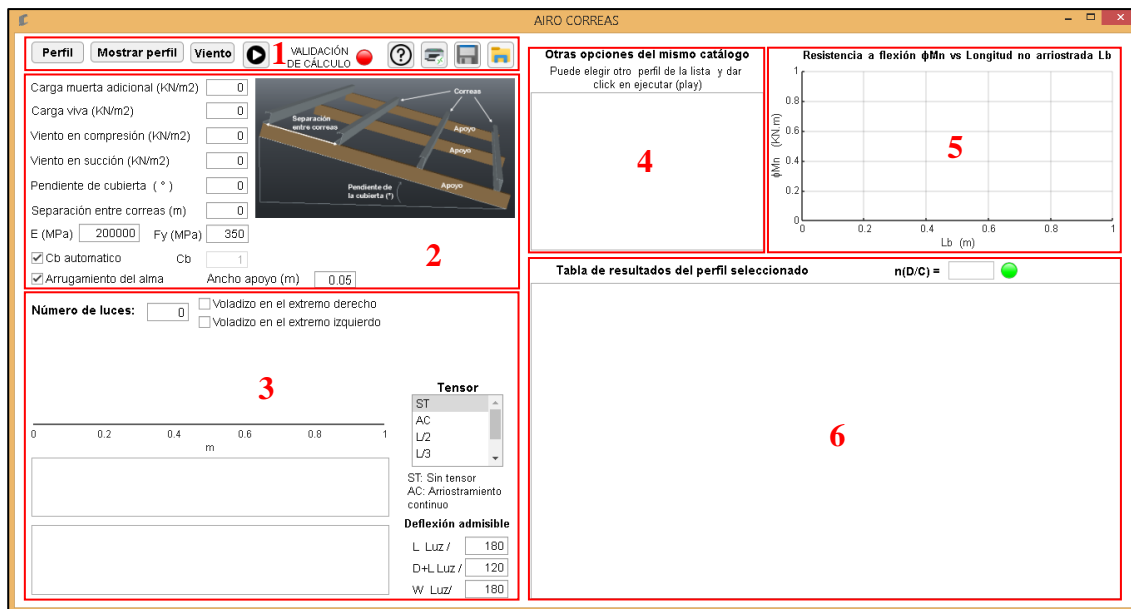
RESULTADOS
Coeficiente de exposición K_z : 0.72
Factor topográfico K_{zt} : 1
Factor de efecto ráfaga, G : 0.84
Presión por velocidad, q_z : 0.58 kN/m ²
Coeficiente de presión interna, GC_{pi} (+): 0.18
Coeficiente de presión interna, GC_{pi} (-): -0.18
Coeficiente de presión externa, GC_p (+): 0.3
Coeficiente de presión externa, GC_p (-): -1.2
Carga de viento de diseño (compresión): 0.07 kN/m ²
Carga de viento de diseño (succión): -0.59 kN/m ²
<i>La carga de viento de diseño debe ser mínimo de 0.4 kN/m² (B.6.1.3.2)</i>

MANUAL DE USUARIO DE AIRO CORREAS

AIRO CORREAS es un programa para diseño de correas con perfiles laminados en caliente y conformados en frío. Se basa en las normas NSR 10, AISC 360-16 y AISI S100-07.

Al iniciar el aplicativo se encuentra por defecto la siguiente ventana.

Figura 227: Ventana principal de AIRO correas.



La ventana principal se compone de los siguientes elementos:

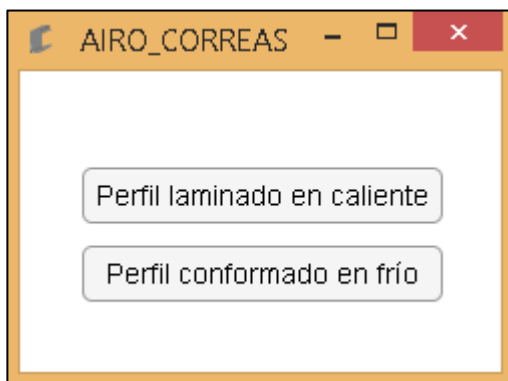
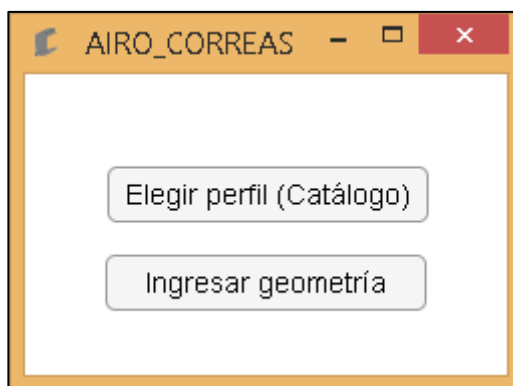
1. Botones de la barra superior.
2. Datos generales.
3. Esquema de la viga.
4. Otras opciones.
5. Gráfica de resistencia ΦM_n vs L_b .
6. Tabla de resultados.

Botones de la barra superior

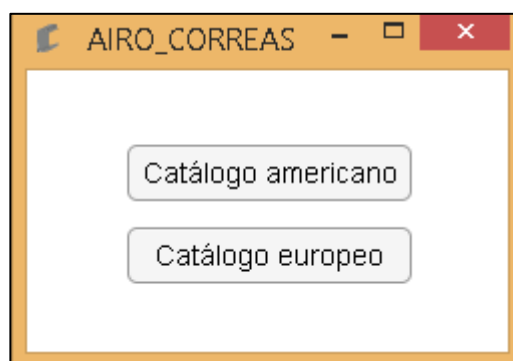
- **Perfil:** permite iniciar una serie de ventanas emergentes que conducen al usuario a la elección de un perfil de catálogo o ingresar la geometría de un perfil en particular.

Perfil

Las ventanas emergentes son las siguientes:

Figura 228: Ventana 1.**Figura 229:** Ventana 2.

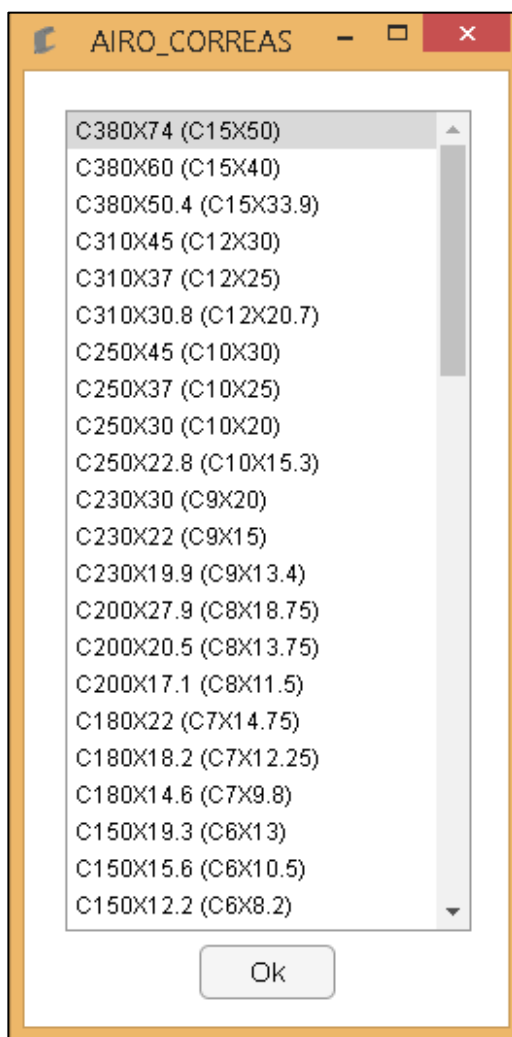
Al elegir la opción *Elegir perfil (Catálogo)*, se presentará la ventana emergente 3 (a)

Figura 230: Ventana 3 (a).

Posteriormente aparecerá una ventana emergente con las formas de los perfiles disponibles:

Figura 231: Ventana 4 (a).

Al seleccionar una forma, aparece la ventana emergente con la lista de perfiles del catálogo y la forma elegidos

Figura 232: Ventana 5 (a).

Al elegir la opción *Ingresar geometría*, se muestra la ventana emergente 3 (b)

Figura 233: Ventana 3 (b).



En esta ventana se elige la forma del perfil y posteriormente se presenta una nueva ventana emergente donde el usuario puede consignar el nombre y la geometría del elemento.

Figura 234: Ventana 4 (b).

Perfil laminado: tipo C

Nombre

Geometría

bf (m)	<input type="text" value="0"/>
tf (m)	<input type="text" value="0"/>
d (m)	<input type="text" value="0"/>
tw (m)	<input type="text" value="0"/>
p (%)	<input type="text" value="0"/>

p: pendiente del patín.

- **Mostrar perfil:** permite visualizar el perfil elegido de catálogo o ingresado manualmente.

En esta ventana se observa la forma del perfil, el tipo y el nombre. Las dimensiones de la sección transversal y un cuadro de propiedades geométricas en metros y en pulgadas.

Figura 235: Ventana mostrar perfil.

PERFIL LAMINADO EN C

C150X12.2 (C6X8.2)

Geometría (m) Geometría (in)

bf: 0.0488 m bf: 1.9213 in

tf: 0.0087 m tf: 0.34291 in

d: 0.152 m d: 5.9843 in

tw: 0.0051 m tw: 0.2 in

p: 0.1667 % p: 6.563 in

Propiedades geométricas

A (m ²)	0.0015338	A (in ²)	2.3773
Ix (m ⁴)	5.3747e-06	Ix (in ⁴)	12.9129
Iy (m ⁴)	2.9069e-07	Iy (in ⁴)	0.69839
Sx (m ³)	7.072e-05	Sx (in ³)	4.3156
Sy (m ³)	8.1523e-06	Sy (in ³)	0.49748
Xc (m)	0.013142	Xc (in)	0.51741
Yc (m)	0.076	Yc (in)	2.9921
rx (m)	0.059197	rx (in)	2.3306
ry (m)	0.013767	ry (in)	0.542
Zx (m ³)	8.3714e-05	Zx (in ³)	5.1085
Zy (m ³)	1.6288e-05	Zy (in ³)	0.99395
Cw (m ⁶)	1.2498e-09	Cw (in ⁶)	4.654

- **Viento:** este botón presenta una herramienta para el cálculo de la carga de viento para correas (componentes y revestimientos)



Figura 236: Ventana de viento.

MÉTODO ANALÍTICO SÓLO PARA CUBIERTAS

Velocidad básica de viento (m/s)

Factor de dirección de viento (kd)

Altura media de cubierta, h (m)

Coefficiente para reducción de presión por velocidad debido a la altitud

Periodo natural de la estructura (s)

Coefficiente de amortiguamiento crítico de la estructura β

Dimensión horizontal de la cubierta paralela a la dirección del viento, L (m)

Dimensión horizontal de la cubierta normal a la dirección del viento, B (m)

Aumento de velocidad sobre colinas o escarpes

Factor de reducción para coeficiente de presión interna, Ri

Coefficiente de presión neta CN (-). Figs. B.6.5-16A a B.6.5-16C

Coefficiente de presión neta CN (+). Figs. B.6.5-16A a B.6.5-16C

Coefficiente de presión externo G_{Cp} (-). figs. B.6.5-8 a B.6.5-13

Coefficiente de presión externo G_{Cp} (+) figs. B.6.5-8 a B.6.5-13

VER CONDICIONES

Grupo de uso

I II III IV

Categoría de exposición

B C D

Regiones no propensas a huracanes y regiones con posibilidad de huracanes de velocidad entre 40 a 45 m/s

Regiones propensas a huracanes de velocidad mayor a 45 m/s

Clasificación del cerramiento

Edificio abierto

Edificio cerrado

Edificio parcialmente cerrado

Tipo de estructura	Factor de direccionalidad del viento K _d
Edificios:	
Sistema principal de resistencia de cargas de viento	0.85
Componentes y recubrimientos	0.85
Cubiertas abovedadas	0.85
Chimeneas, tanques y estructuras similares:	
Cuadradas	0.9
Hexagonales	0.95
Redondas	0.95
Aviones sólidos	0.85
Aviones abiertos y estructura rectangular	0.85
Torres en celosía:	
Triangular, cuadrada y rectangular	0.85
Todas las otras secciones transversales	0.95

RESULTADOS

La carga de viento de diseño debe ser mínimo de 0.4 kN/m² (B.6.1.3.2)

- **Correr:** permite realizar el análisis de la viga y el cálculo de la resistencia.



Al dar clic en el botón correr:

- Se dibuja la gráfica de *Resistencia a flexión ΦMn vs Longitud no arriostrada L_b* .
- Se llena la información en la *Tabla de resultados del perfil seleccionado*.
- Se presentan 3 ventanas emergentes:

Figura 237: Ventana de diagramas para envolverte.

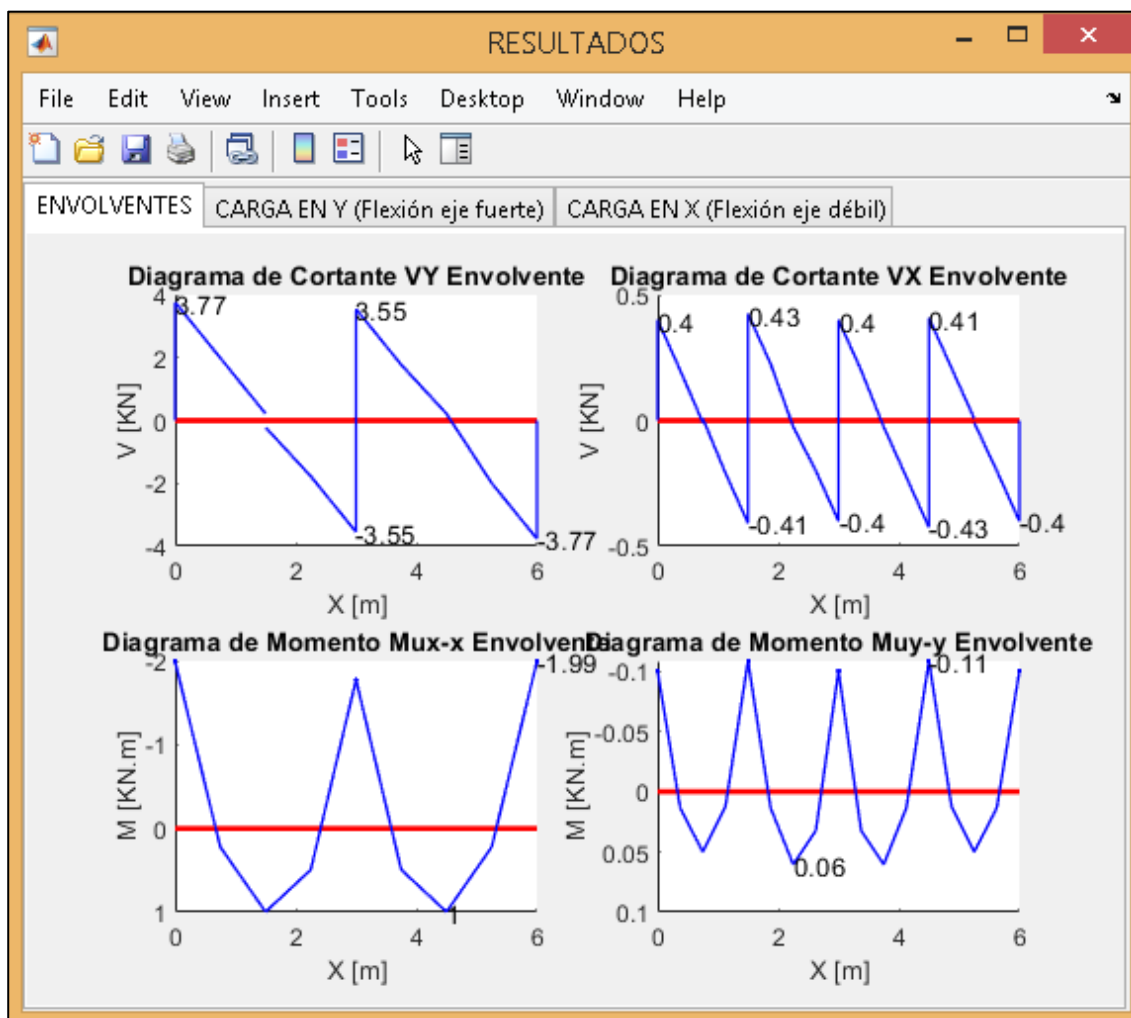


Figura 238: Ventana de diagramas para carga en Y.

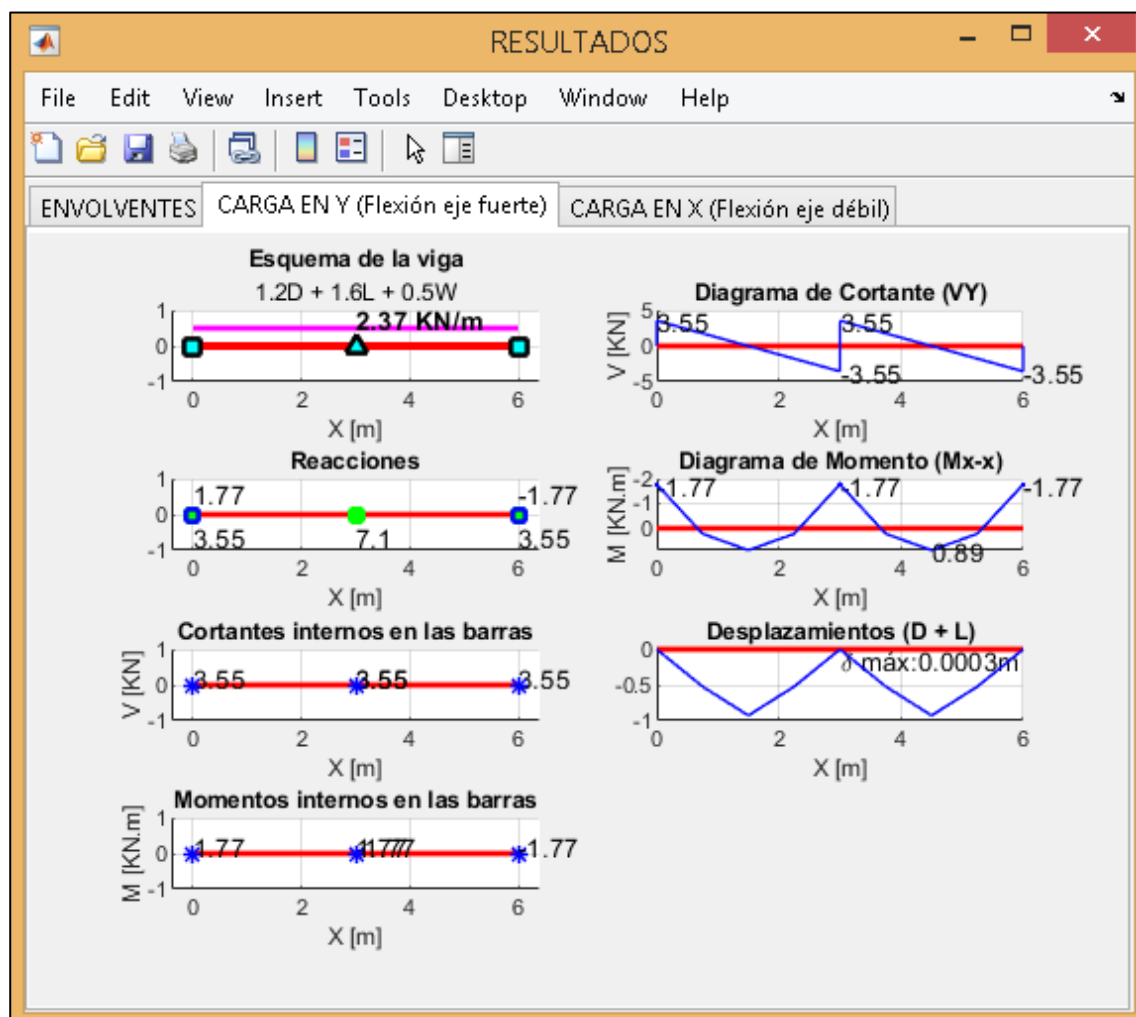
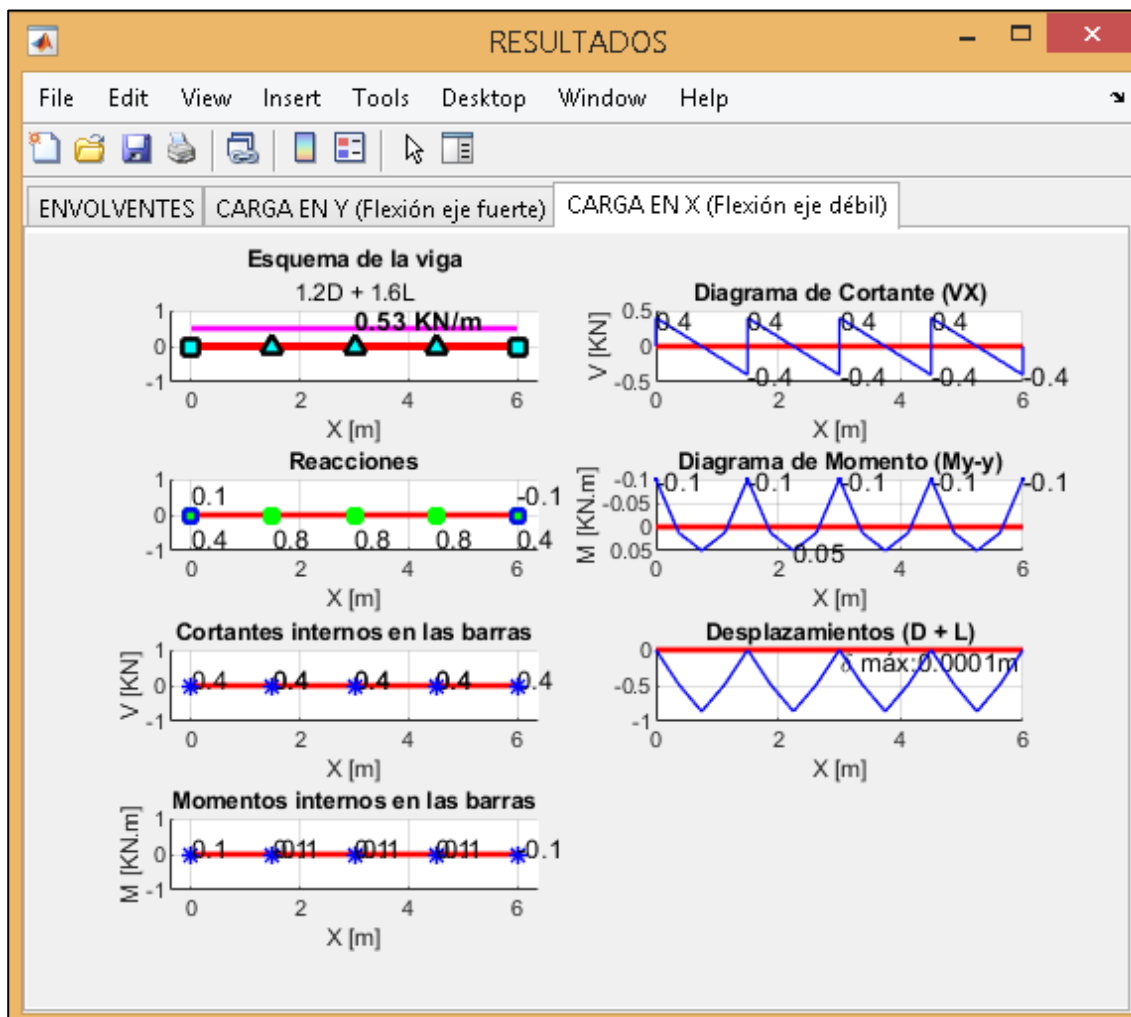


Figura 239: Ventana de diagramas para carga en X.



- **Validación de cálculo:** el círculo de color rojo indica que no se ha ingresado información suficiente para ejecutar el análisis y diseño. También puede indicar que después de ejecutar el botón correr, se ha modificado algún dato y no se ha dado clic en botón correr nuevamente. El color verde indica que se ha ingresado la información, se ha ejecutado correctamente el análisis y posteriormente no se ha modificado datos.

VALIDACIÓN DE CÁLCULO ● VALIDACIÓN DE CÁLCULO ●

- **Ayuda:** permite acceder a información relacionada con el autor, la versión del programa, este documento (Manual de AIRO).



- **Imprimir resultados:** genera un archivo .pdf en el cual se presenta los resultados de demanda y resistencia.



- **Guardar:** permite guardar los datos de un proyecto.



- **Abrir:** permite cargar los datos de un proyecto guardado anteriormente. Al cargarse la información debe dar clic en el botón correr nuevamente.



Datos generales

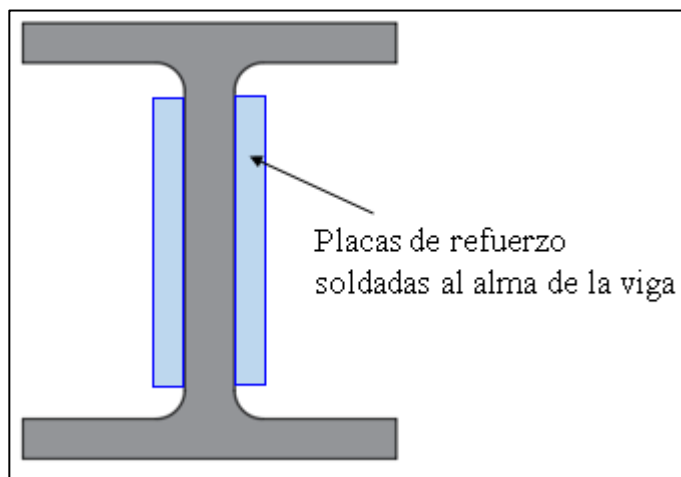
Figura 240: Sección de datos generales.

Carga muerta adicional (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>	
Carga viva (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>	
Viento en compresión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>	
Viento en succión (KN/m ²)	<input type="text" value="0"/>	
Pendiente de cubierta (°)	<input type="text" value="0"/>	
Separación entre correas (m)	<input type="text" value="0"/>	
E (MPa) <input type="text" value="200000"/>	Fy (MPa) <input type="text" value="350"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Cb automatico	Cb <input type="text" value="1"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Arrugamiento del alma	Ancho apoyo (m) <input type="text" value="0.05"/>	

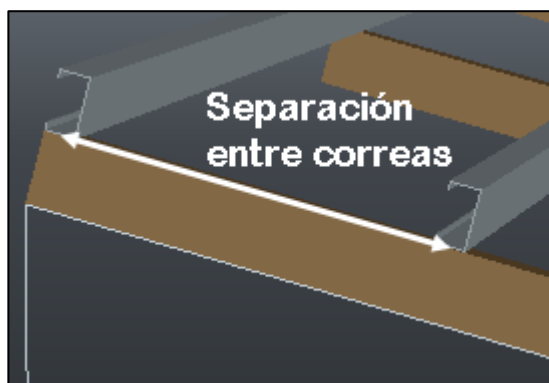
En esta sección se debe ingresar las cargas (KN/m²), la pendiente de la cubierta (°) y la separación entre correas (m). Además, módulo de elasticidad del acero (E), el esfuerzo de fluencia del acero (Fy) y el factor de modificación para pandeo lateral torsional (Cb).

Adicionalmente se presenta la opción para calcular la resistencia al arrugamiento del alma y para ello se solicita el ancho del apoyo. Cuando el usuario selecciona la opción de arrugamiento del alma, significa que no consideró el uso de rigidizadores transversales en el alma en la zona de los apoyos. Cuando el usuario los coloca no es necesario calcular la resistencia al arrugamiento del alma.

Figura 241: Placas de refuerzo para el alma.



La separación entre correas se mide inclinada y entre centro de apoyos, como se muestra en la imagen.



Por defecto se tiene C_b igual a 1. Este es un valor conservador y arroja la menor resistencia. Si el valor de C_b aumenta, la resistencia aumenta también. Si el usuario lo desea, puede ingresar un valor de C_b diferente o puede seleccionar *C_b calculado por el programa*.

Esquema de la viga

Figura 242: Sección esquema de la viga.

Número de luces: Voladizo en el extremo derecho
 Voladizo en el extremo izquierdo

Tensor

ST

AC

L/2

L/3

ST: Sin tensor
AC: Arriostamiento continuo

Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

En esta sección el usuario debe:

- Definir el *Numero de luces* de la viga.

Número de luces:

- Definir condición de voladizos.

Voladizo en el extremo derecho

Voladizo en el extremo izquierdo

- Ingresar la longitud de cada una de las luces que conforman la viga.

ID Luz	1	2
Longitud (m)	0	0

- Definir el tipo de apoyo en cada uno de los nudos de la viga.

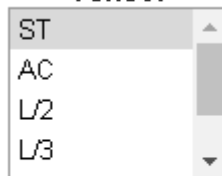
ID nudo	1	2	3
Despl Y	0	0	0
Giro	1	1	1

0: significa restringido

1: significa libre

- Seleccionar el número de tensores:
 - ST: sin tensor. Por defecto.
 - L/2: tensor en la mitad de la luz.
 - L/3: tensor a los tercios de la luz.
 - L/4: tensor a los cuartos de la luz.
 - L/5: tensor a los quintos de la luz.
 - AC: arriostramiento continuo.

Tensor



ST: Sin tensor
AC: Arriostramiento continuo

- Definir factores para deflexión admisible

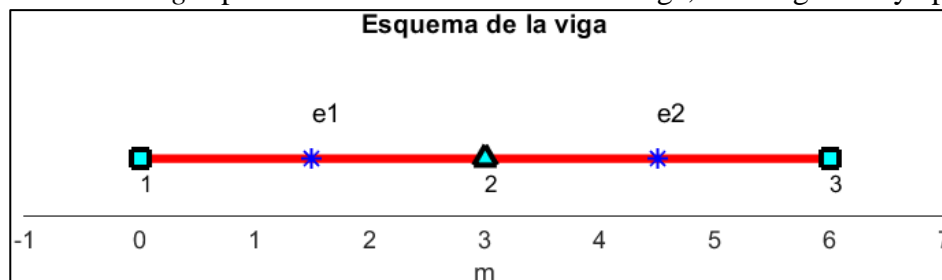
Deflexión admisible

L Luz /

D+L Luz /

W Luz /

- *Esquema de la viga*: permite observar las luces de la viga, sus longitudes y apoyos.



- Los números de la parte superior de la viga corresponden al identificador de la luz.

- Apoyo empotrado



- Apoyo fijo



- Tensor



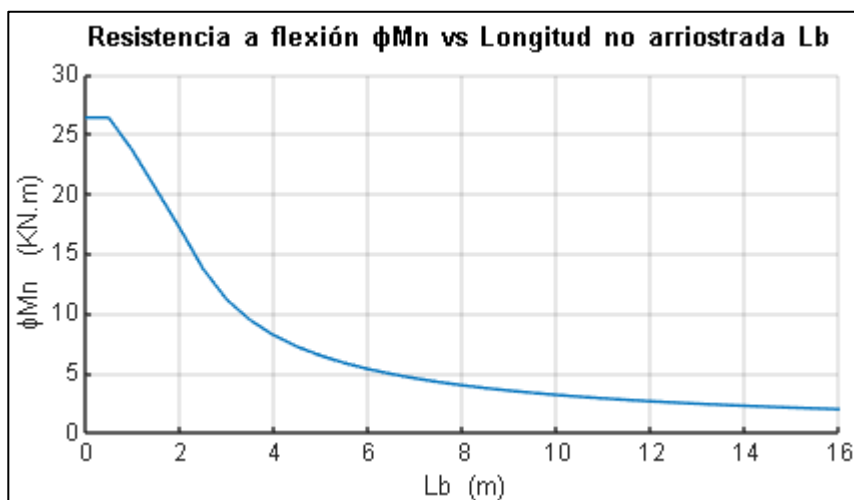
Otras opciones

Otras opciones del mismo catálogo		
Puede elegir otro perfil de la lista y dar click en ejecutar (play)		
Nombre	n (D/C)	peso (kg/m)
C75X5.2 (C3X3.5)	0.38	5.2
C75X5.2 (C3X3.5)	0.38	5.2
C75X6.1 (C3X4.1)	0.36	6.1
C75X6.1 (C3X4.1)	0.36	6.1
C100X6.7 (C4X4.5)	0.28	6.7
C100X6.7 (C4X4.5)	0.28	6.7
C75X7.4 (C3X5)	0.31	7.4
C75X7.4 (C3X5)	0.31	7.4

En esta sección se presentan los perfiles de la misma forma y del mismo catálogo que cumplen con los chequeos y se organizan de menor a mayor peso.

Grafica de Resistencia ΦM_n vs L_b

Figura 243: Gráfica de resistencia a flexión vs longitud no arriostrada.



Permite observar cómo varia la resistencia a flexión del perfil respecto a la longitud no arriostrada para flexión alrededor del eje fuerte.

Tabla de resultados

Figura 244: Tabla de resultados de AIRO correas.

Tabla de resultados del perfil seleccionado						n(D/C) = 0.12 ●
Referencia	12	INT e:1	21	23	INT e:2	32
Lb (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Cb	1.17	1.17	2.63	2.63	1.17	1.17
Mux-x (kN-m)	0	1.66	-2.66	-2.66	1.66	0
ΦM_{nx-x} (kN-m)	23.79	23.79	26.37	26.37	23.79	23.79
Vuy (kN-m)	2.88	-0.89	-4.44	4.44	0.89	-2.88
ΦV_{ny} (kN)	145.94	145.94	145.94	145.94	145.94	145.94
Ru (kN)	2.88	0	8.87	8.87	0	2.88
ΦR_n (kN)	126.97	0	126.97	126.97	0	126.97
Deflex (m)	0	0.001	0	0	0.001	0
Deflex adm (m)	0.017(L)	0.025(D+L)	0.017(L)	0.017(L)	0.025(D+L)	0.017(L)
Muy-y (kN-m)	0	-0.13	-0.09	-0.09	-0.13	0
ΦM_{ny-y} (kN-m)	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11
Vux (kN-m)	0.31	0.49	-0.37	0.37	0.37	-0.31
ΦV_{nx} (kN)	160.67	160.67	160.67	160.67	160.67	160.67
n(D/C) flex biax	0	0.1	0.12	0.12	0.1	0
n(D/C) Ψ_y	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02
n(D/C) Ψ_x	0	0	0	0	0	0

En la tabla de resultados se presenta:

- Referencia:

12	INT e:1	21
----	---------	----

La tabla se organiza de acuerdo a las luces de la viga. De cada luz se muestran 3 datos: valores en el nudo inicial de la luz, en el nudo intermedio y en el nudo final.

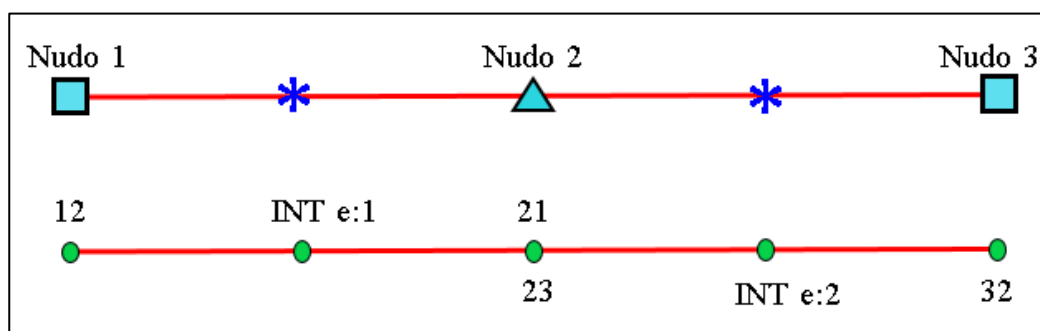
Por ejemplo:

12: nudo 1 mirando hacia el nudo 2.

INT e:1: nudo intermedio de la luz 1.

21: nudo 2 mirando hacia el nudo 1.

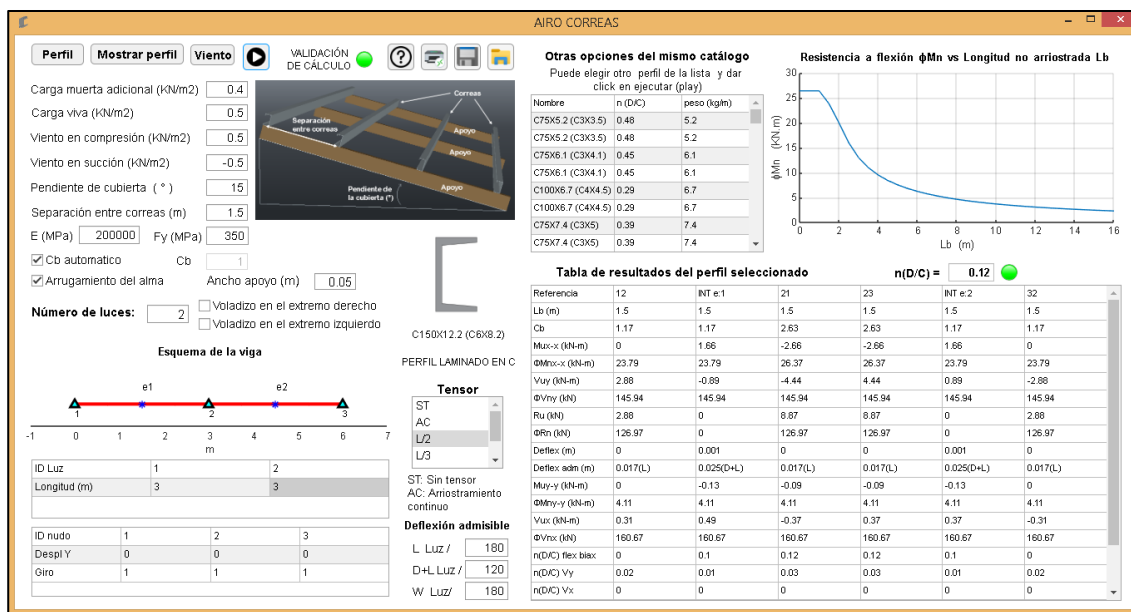
Figura 245: Ejemplo de referencia de una luz en la tabla de resultados.



- L_b (m): longitud no arriostrada para flexión alrededor del eje fuerte.
- C_b : factor de modificación para pandeo lateral torsional usado.
- M_{ux-x} (kN-m): momento último para flexión alrededor del eje x.
- ΦM_{nx-x} (kN-m): resistencia a flexión alrededor del eje x.
- V_{uy} (kN-m): cortante último para flexión alrededor del eje fuerte.
- ΦV_{ny} (kN): resistencia a cortante para flexión alrededor del eje fuerte.
- R_u (kN): arrugamiento del alma último (flexión alrededor del eje fuerte).
- ΦR_n (kN): resistencia al arrugamiento del alma (flexión alrededor del eje fuerte).
- Deflex (m): máxima deflexión de la viga (flexión alrededor del eje fuerte).

- Deflex adm (m): deflexión admisible de la viga de acuerdo a las condiciones definidas por el usuario.
- M_{uy-y} (kN-m): momento último para flexión alrededor del eje y.
- ΦM_{ny-y} (kN-m): resistencia a flexión alrededor del eje y.
- V_{ux} (kN-m): cortante ultimo para flexión alrededor del eje débil.
- ΦV_{nx} (kN): resistencia a cortante para flexión alrededor del eje débil.
- n(D/C) flex biax: Demanda / Capacidad para flexión biaxial.
- n(D/C) V_y : Demanda / Capacidad para cortante en Y.
- n(D/C) V_x : Demanda / Capacidad para cortante en X.
- n(D/C) deflexión: chequeo de deflexión en el eje fuerte
- n(D/C) Flex y V comb: chequeo de flexión y corte combinados en el eje fuerte.
- n(D/C) ΦR_n y Flex comb: chequeo de flexión y arrugamiento del alma combinados.

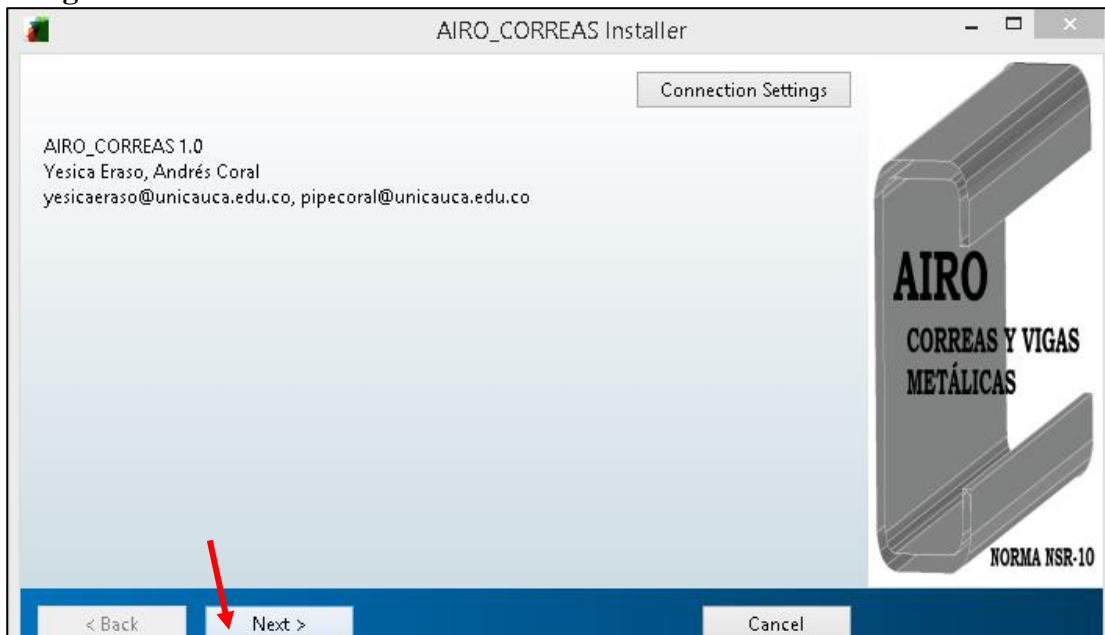
Figura 246: Ventana principal de AIRO correas con ejemplo de análisis y diseño.



INSTALADOR

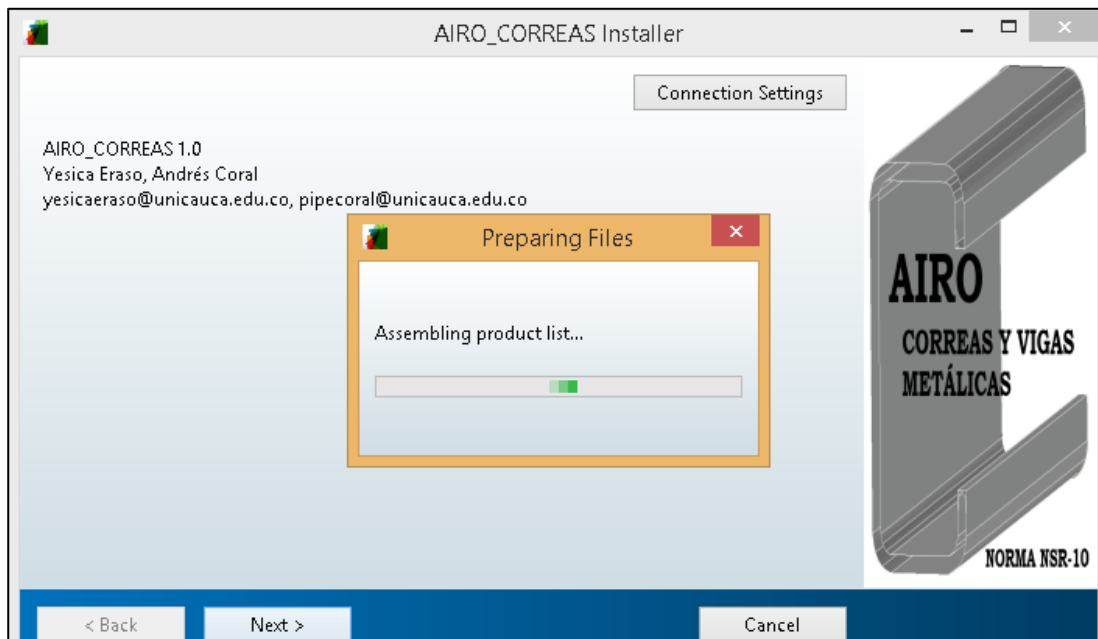
AIRO CORREAS es un software desarrollado con el lenguaje de programación de MATLAB. Al iniciar el instalador se tiene la siguiente ventana.

Figura 247: Paso 1 en la instalación de AIRO correas.



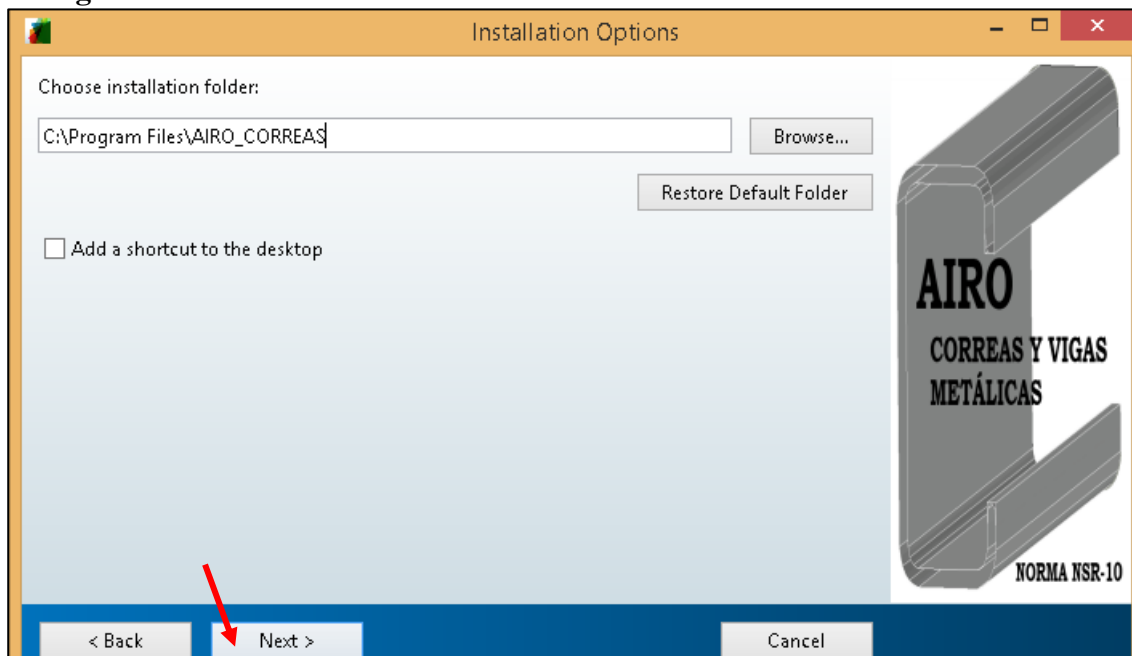
Clic en la opción siguiente. Posteriormente se presenta una ventana indicando que el sistema está preparando los archivos.

Figura 248: Paso 2 en la instalación de AIRO correas.



Una vez ensamblada la lista de productos se presenta la siguiente ventana:

Figura 249: Paso 3 en la instalación de AIRO correas.



Elegir una carpeta de instalación y dar clic en siguiente.

A continuación, se debe elegir la carpeta de instalación del componente de ejecución de Matlab y dar clic en siguiente.

Figura 250: Paso 4 en la instalación de AIRO correas.



Posteriormente debe leer y aceptar los términos para el uso de la licencia.

Figura 251: Paso 5 en la instalación de AIRO correas.

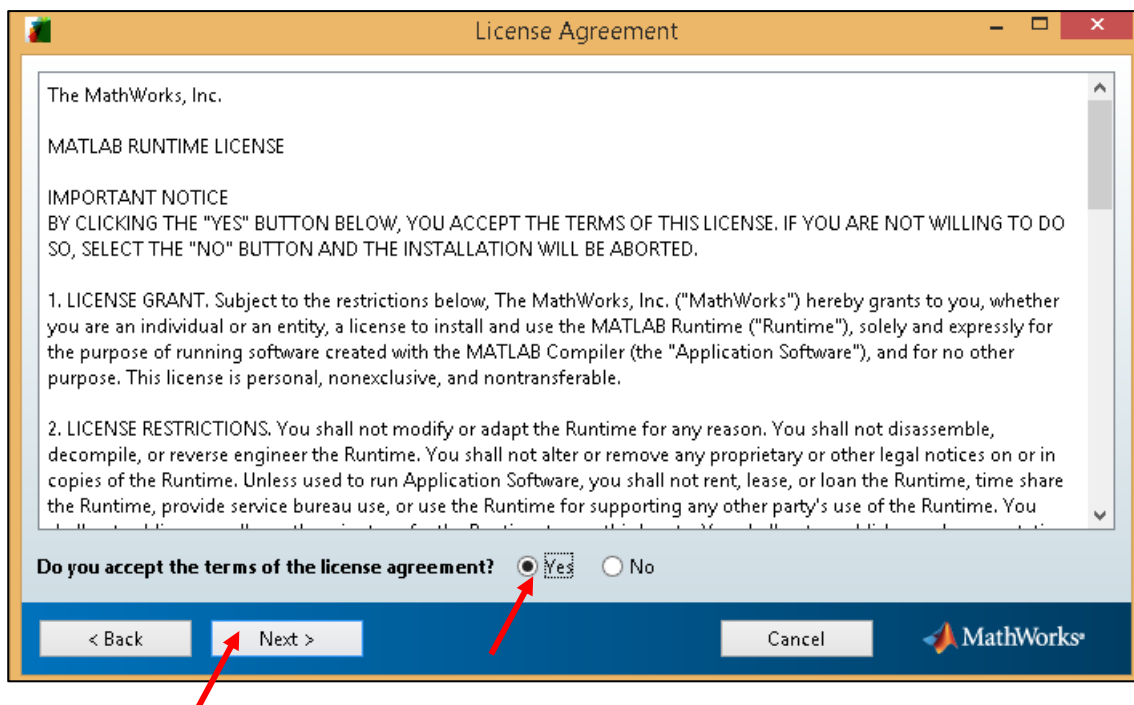
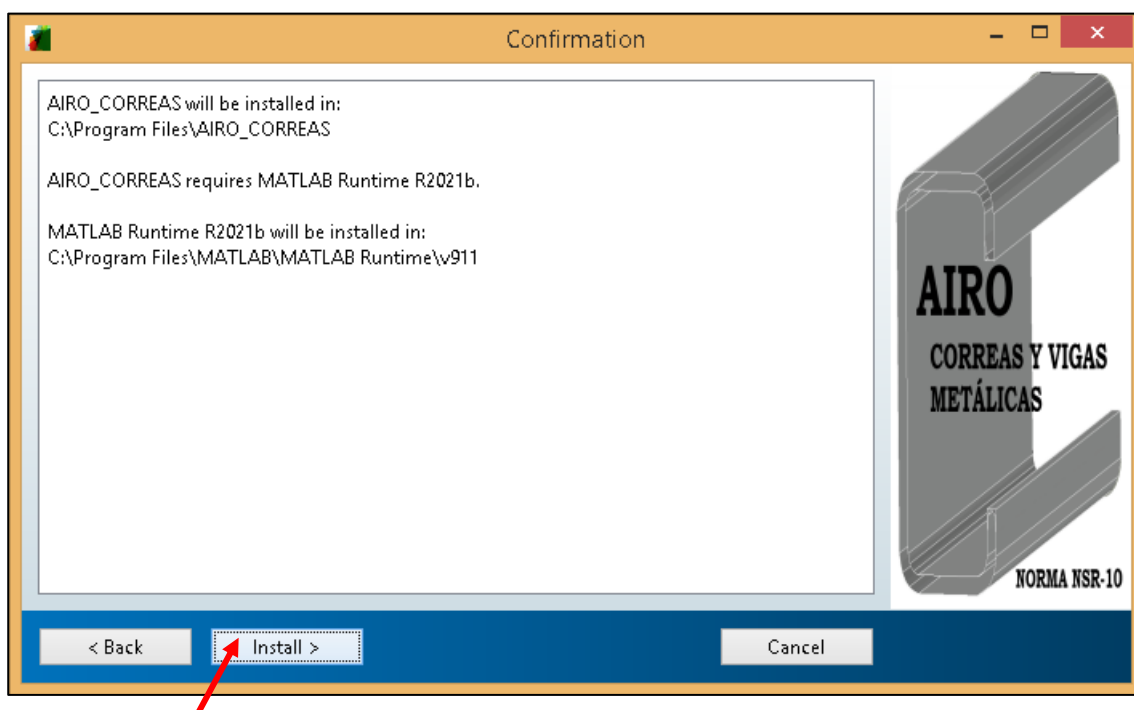


Figura 252: Paso 6 en la instalación de AIRO correas.



Por último, dar clic en instalar. Se mostrará una barra de progreso como la siguiente.

Figura 253: Paso 7 en la instalación de AIRO correas.

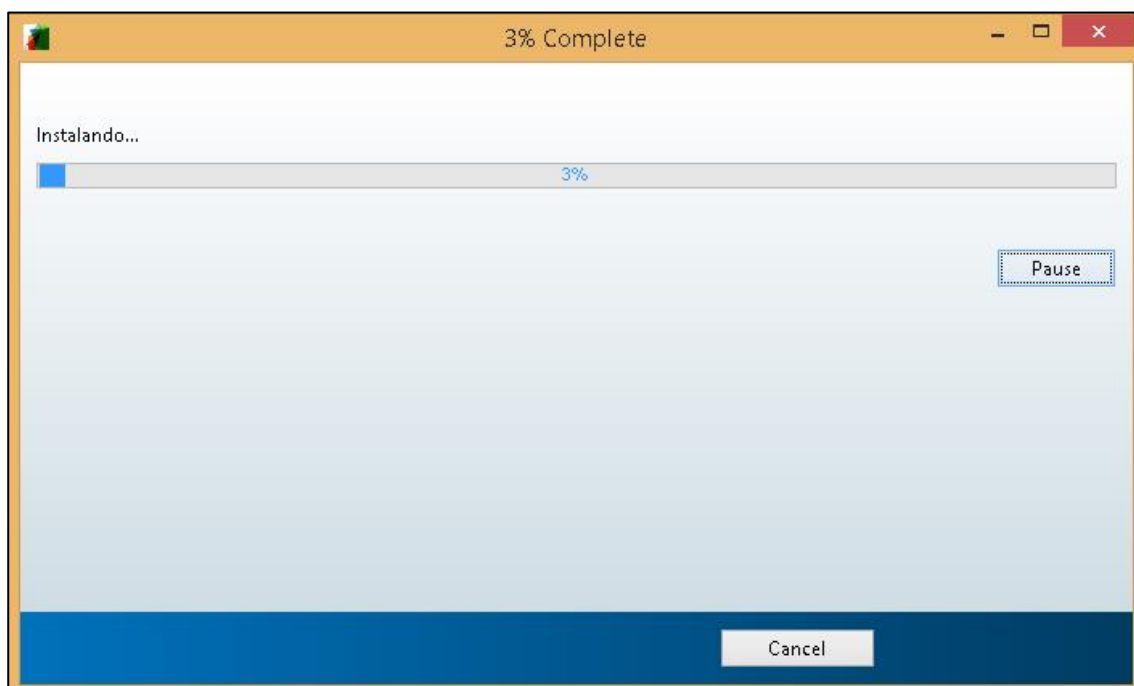
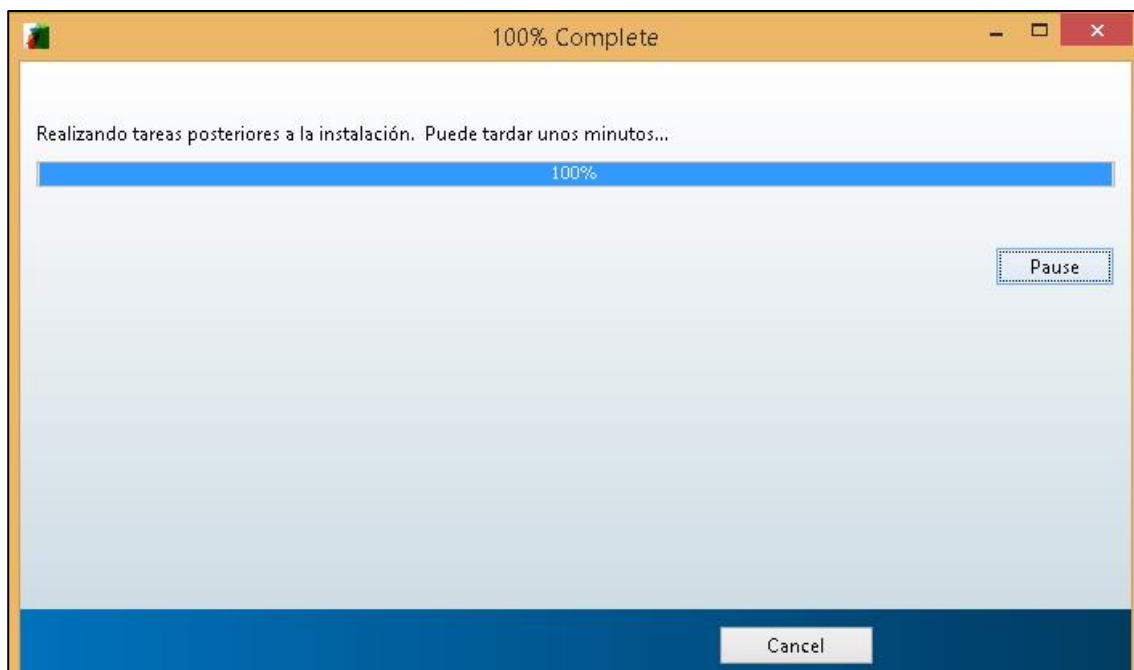
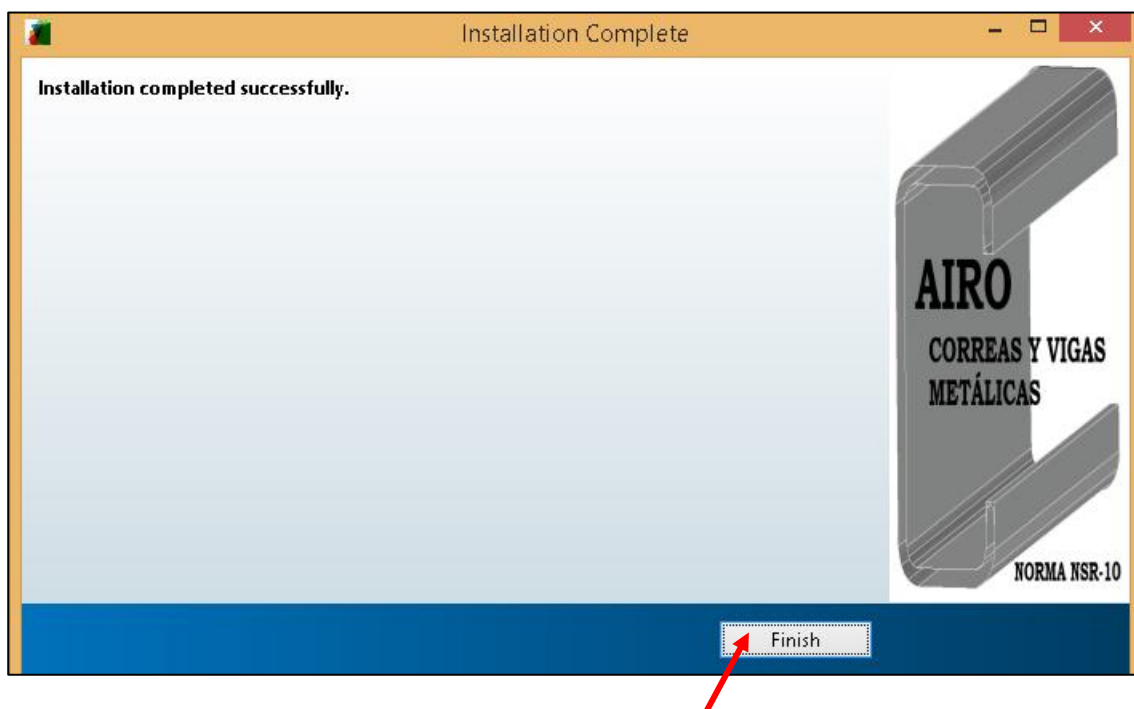


Figura 254: Paso 8 en la instalación de AIRO correas.



Una vez completado el 100% de la instalación se debe dar clic en finalizar.

Figura 255: Paso 9 en la instalación de AIRO correas.



CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis matricial para flexión biaxial, con cargas uniformemente distribuidas, con apoyo fijo, empotrado o voladizo, para cualquier número de luces y pendiente de la viga (inclinación de cubierta).
- Se desarrollaron las funciones para el cálculo de resistencia de perfiles laminados en caliente de forma I, C, tubular estructural rectangular o cuadrado, tubular estructural circular, barra rectangular y barra circular.
- Se creó el código fuente del programa en el lenguaje de MATLAB para determinar la resistencia de perfiles conformados en frío tipo C, G y doble G.
- Se estableció el módulo para cálculo de carga de viento para correas en edificios cerrados, parcialmente cerrados o abiertos.
- Se implementó el generador de la memoria de cálculo con los resultados de análisis y diseño de la correa.
- Debido al espesor de la lámina de los perfiles en frío, existen zonas más susceptibles a pandearse, por ello, se debe establecer que partes de la sección están aportando realmente resistencia a la compresión debido a la flexión.
- Al revisar y comparar los capítulos relacionados con la resistencia a flexión se encontró una diferencia entre el capítulo F de la NSR10 con respecto a la AISC 360-16 en las ecuaciones para los perfiles tubulares estructurales rectangulares o cuadrados, pues la norma NSR 10 no aborda el estado límite para pandeo lateral torsional. En el programa “AIRO correas” se considera el pandeo lateral torsional para perfiles tubulares estructurales rectangulares o cuadrados.
 - Al revisar la norma ASCE-7-10 se encontró una diferencia en la determinación de R_B para estructuras flexibles en el cálculo de efecto ráfaga (Ecuación B.6.5-8) respecto a la norma NSR10. En la norma colombiana aparece una variable E que en la norma estadounidense no existe. En el programa “AIRO correas” se calcula el efecto ráfaga de acuerdo a las ecuaciones que se presentan en la norma ASCE-7-10.

LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

- Aunque el programa está orientado a elementos sometidos a flexión biaxial, es posible hacer el análisis de cualquier viga indicando que la pendiente de la cubierta es cero.
- Las cargas que ingresa el usuario deben ser uniformemente distribuidas. No se admiten cargas puntuales, ni momentos externos, ni otras formas de carga.
- Se permiten voladizos. Sin embargo, el usuario debe tener en cuenta que la distribución de tensores se hace por igual para todas las luces sin importar la condición de voladizo en los extremos.
- Tener en cuenta que cuando se tiene arriostramiento continuo ($L_b=0$), no hay flexión alrededor del eje débil.

El programa no realiza el diseño de perfiles conformados en frío que no cumple límites y consideraciones dimensionales.

- Para el cálculo de la resistencia al pandeo lateral torsional de perfiles conformados en frío, la longitud no arriostrada para torsión, L_t , en AIRO Correas se toma igual a la longitud no arriostrada para flexión alrededor del eje fuerte, L_y .
- El programa tiene catálogos de perfiles europeos, pero no diseña conforme a la norma europea.

TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar la influencia de la torsión en las correas y aplicarlo al programa “AIRO correas”.
- Implementar más tipos de secciones transversales.
- Calcular la carga por viento en muros y en sistemas principales de resistencia a fuerzas de viento.
- Implementar el cálculo de la resistencia a cortante para almas con huecos en los perfiles conformados en frío.
- Considerar el chequeo de rigidizadores de almas.
- Ingresar perfiles en forma en I con espesor de patín superior diferente al espesor del patín inferior.

BIBLIOGRAFÍA

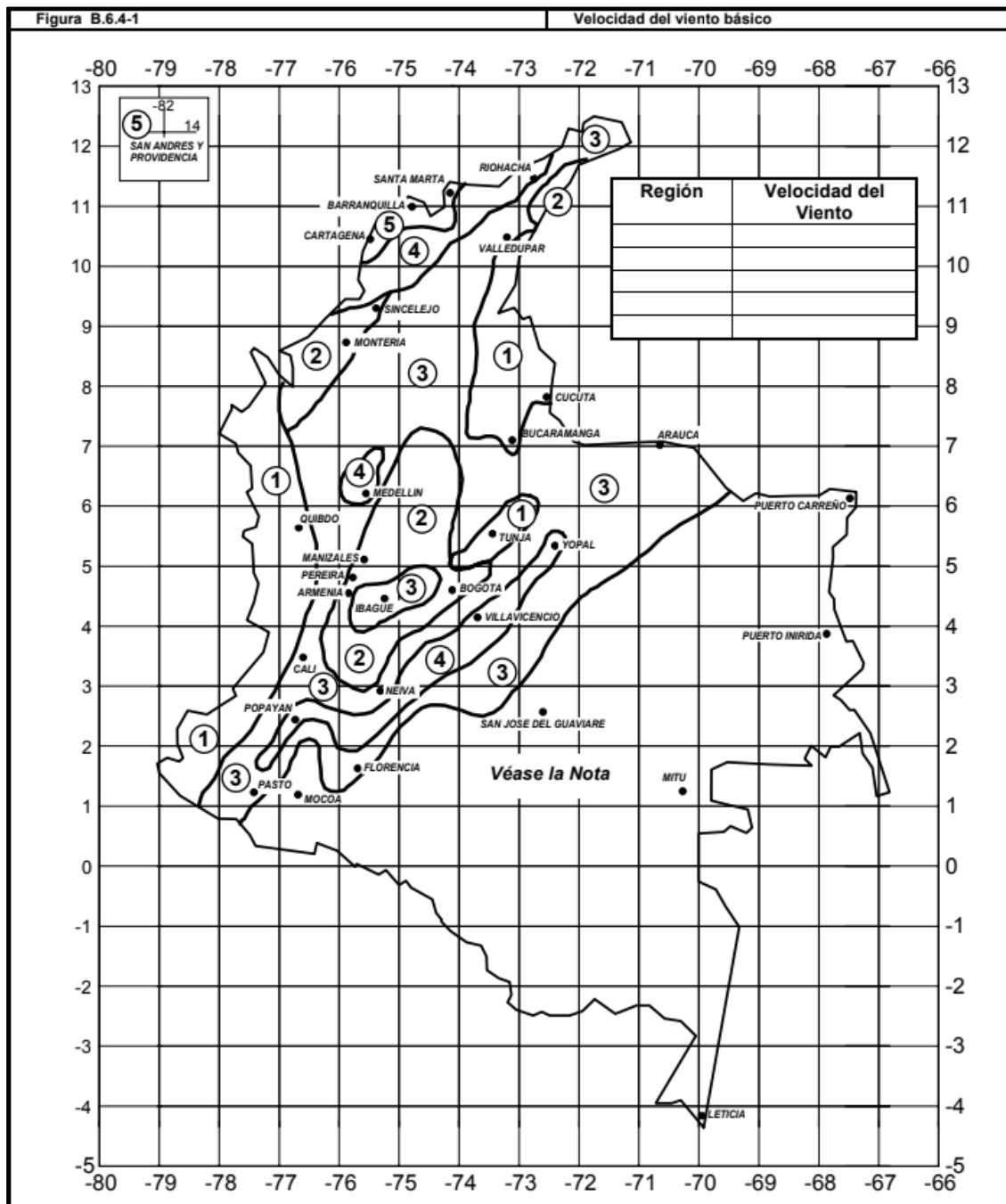
- AISC. (2016). Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- AISI. (2003). Manual Cold-Formed Steel Design, Institute American Iron and Steel. Washington DC.
- AISI. (2007). North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute.
- ASCE. (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.
- Baque Jiménez, Q. M. (2015). Capacidad a flexión de los perfiles doblados en frío utilizados en el Ecuador. Guayaquil, Ecuador.
- Blanco Díaz, E., Cervera Ruiz, M., & Suárez Arroyo, B. (2015). Análisis matricial de estructuras. Barcelona, España: CIMNE.
- Galambos, T. (2016). Structural Members and Frames. New York: Dover Publications.
- IBC. (2009). International Buildin Code.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). Diseño de estructuras de acero. México: Alfaomega.
- Naspud Uruchima, P. R. (2021). Estimación del efecto de los esfuerzos residuales en la capacidad portante de perfiles de acero en lámina delgada conformados en frío. Bogotá, Colombia.
- NSR10. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá, Colombia: AIS.
- Oviedo Paniagua, G. A. (2010). Desarrollo de una herramienta para el diseño de elementos estructurales de acero laminados en frío basado en la norma AISI 2007 y por el método LRFD. Cartago, Costa Rica.
- Padilla Punzo, H., & Rojas Rojas, R. (2009). Análisis estructural con matrices. Morelia, México: Trillas.

Prado Bellorin, R. E., & Gutiérrez, A. (2014). Evaluación estructural de perfiles C y Z de fabricación nacional basada en la especificación para el diseño de miembros estructurales de acero formados en frío, AISI 2007. Caracas, Venezuela.

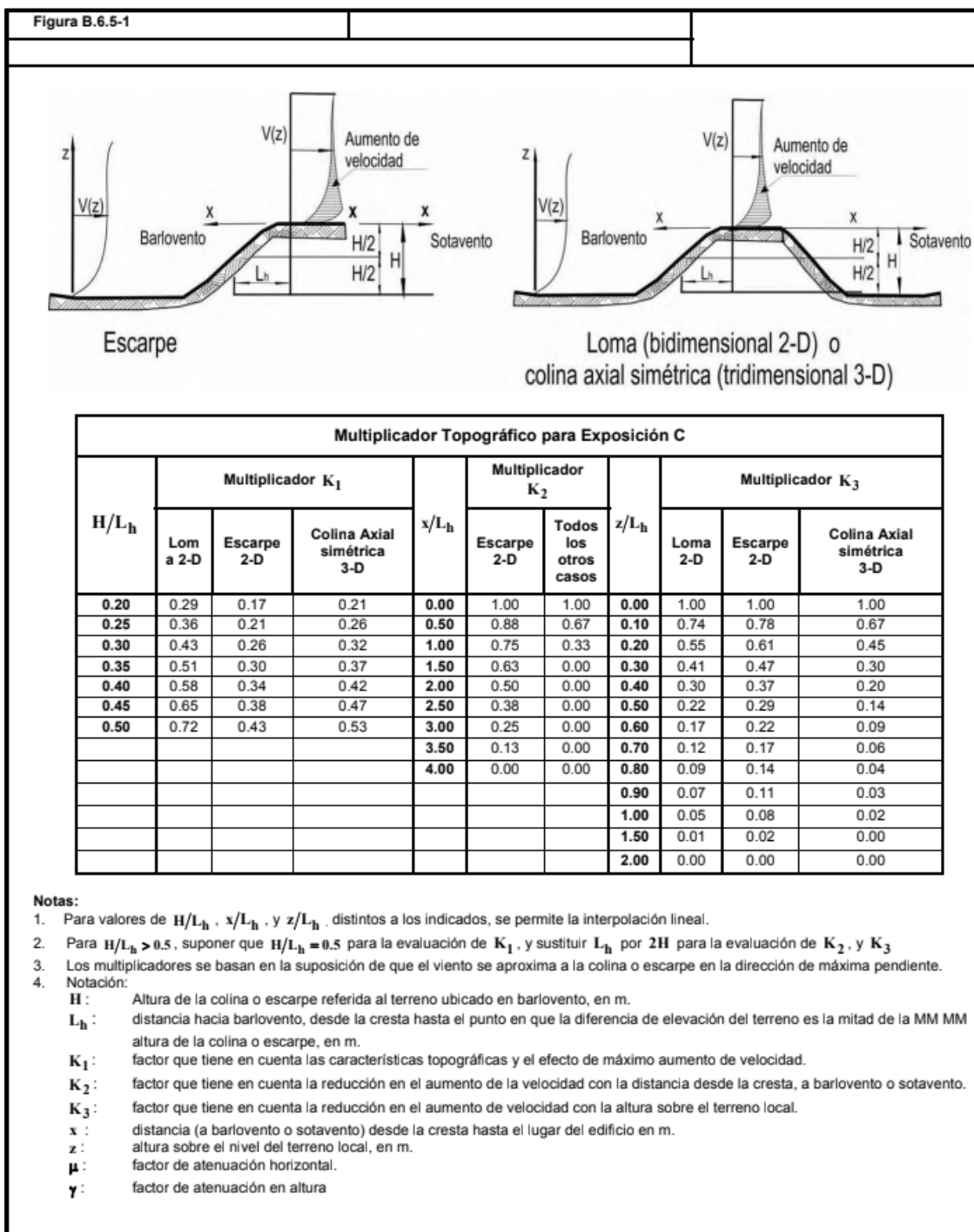
Rochel Awad, R. (1993). Análisis matricial de estructuras. Medellín, Colombia: Centro de publicaciones de la EAFIT.

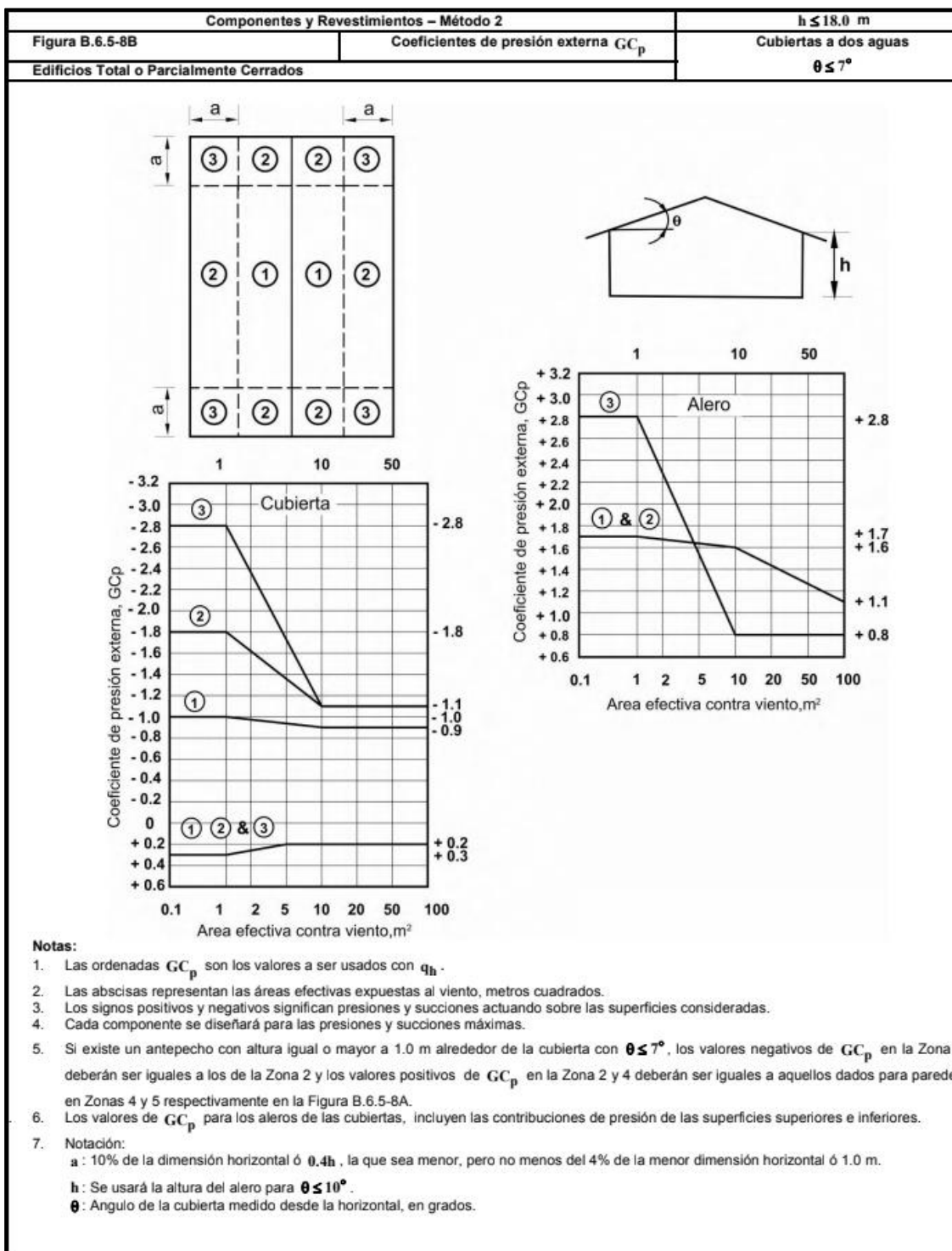
ANEXOS

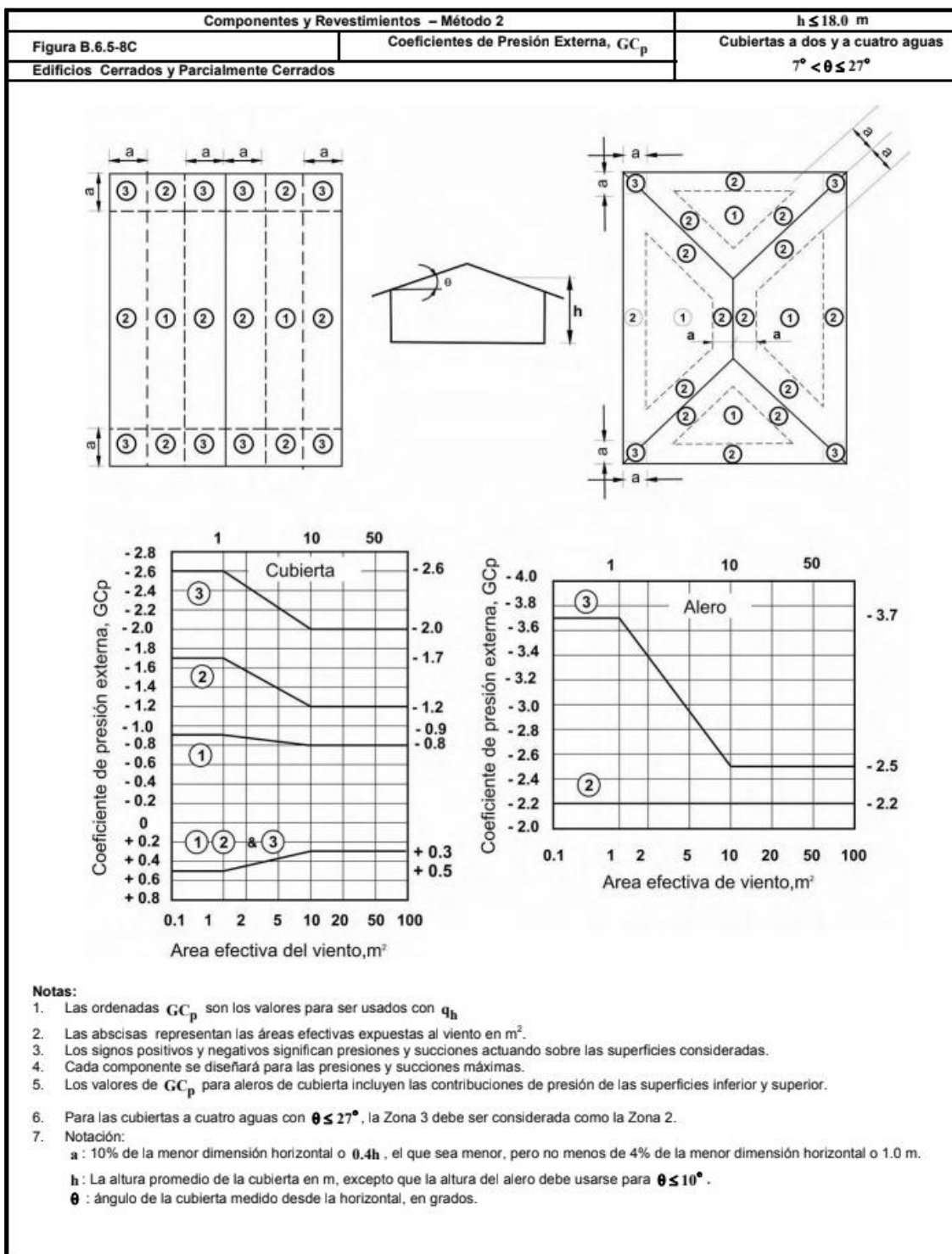
Anexo 1: Mapa de velocidad de viento básica para Colombia. Figura B.6.4-1 del título B de la NSR10.



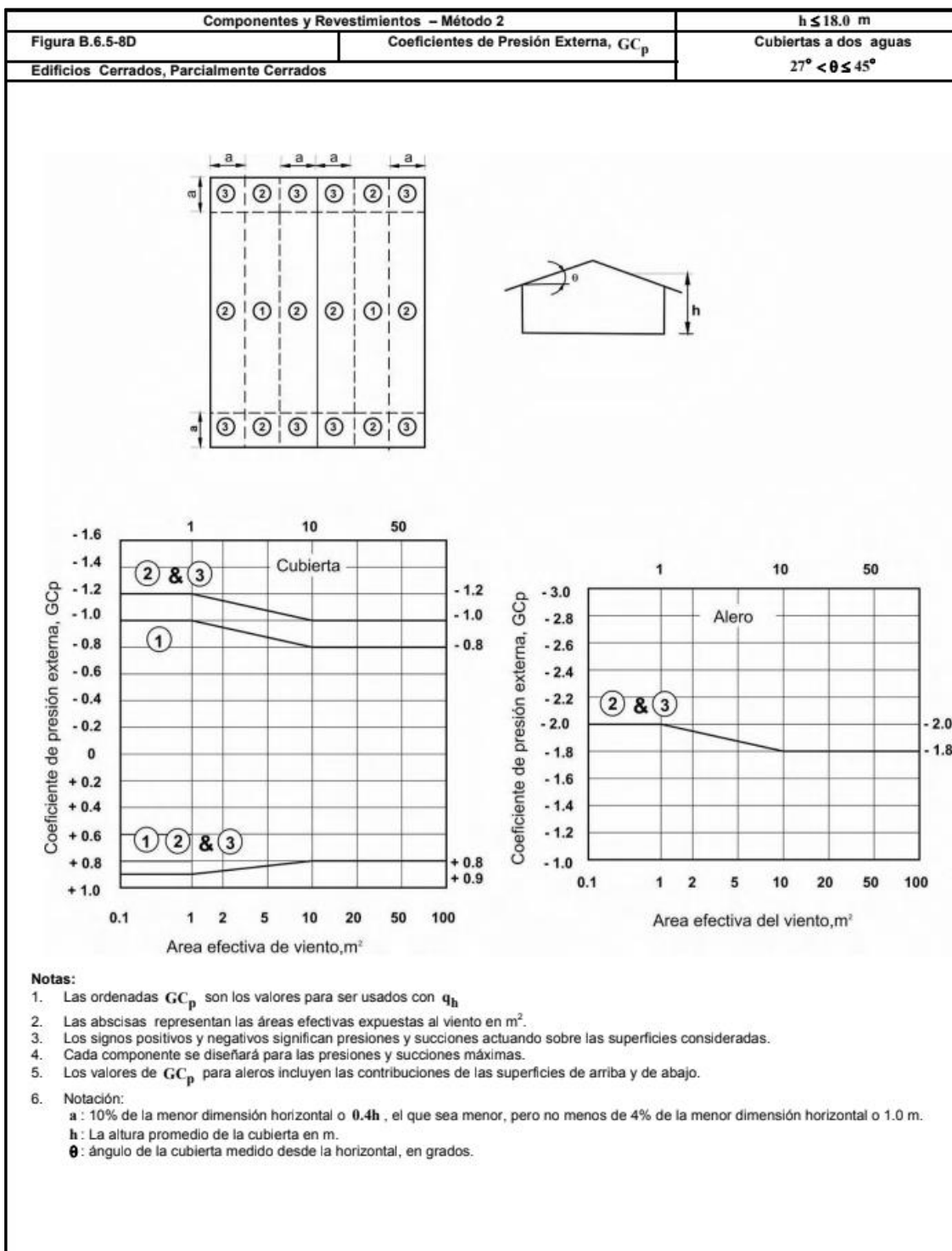
Anexo 2: Factor topográfico Kzt. Figura B.6.5-1 del título B de la NSR10.



Anexo 3: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-8B del título B de la NSR10.


Anexo 4: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-8C del título B de la NSR10.


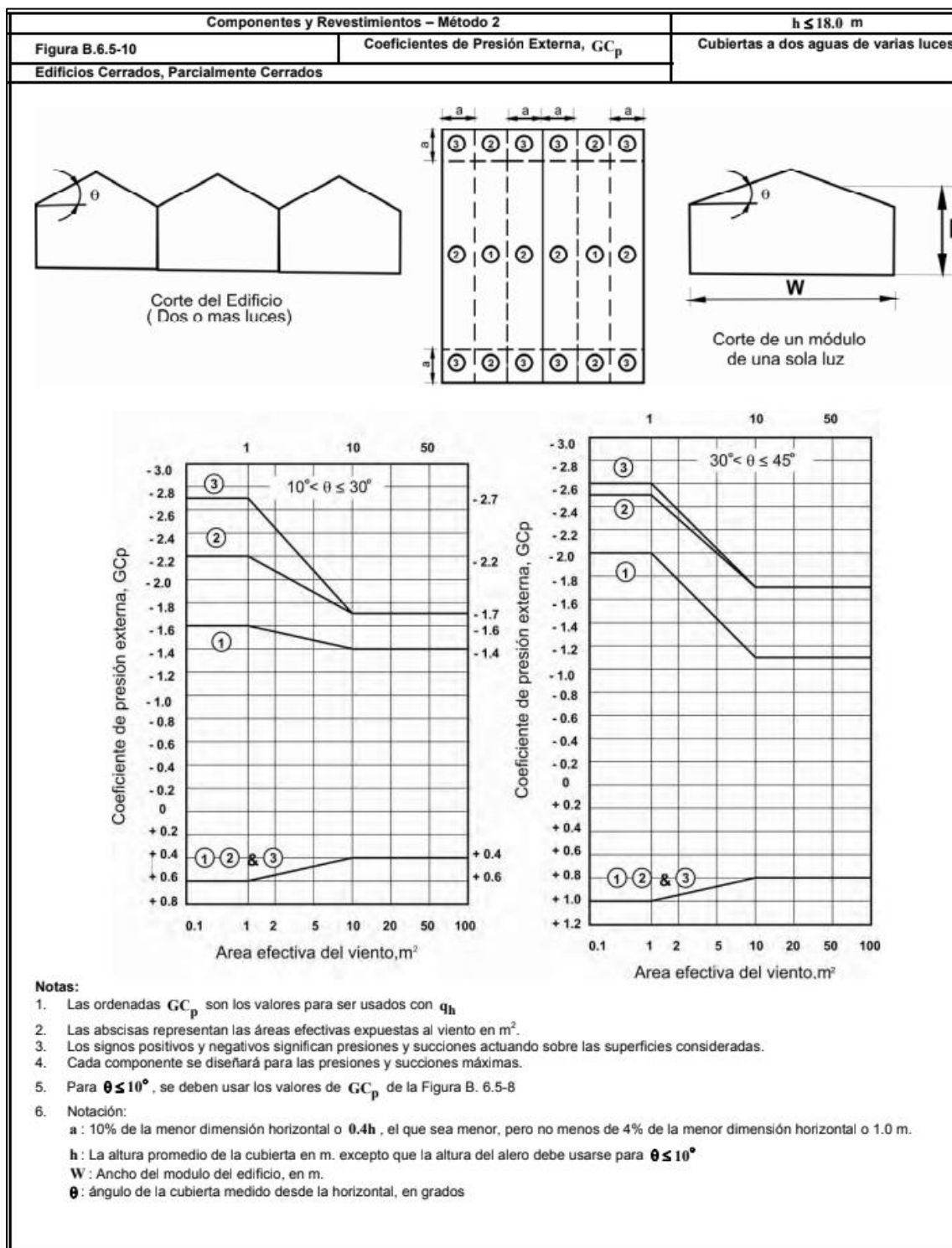
Anexo 5: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-8D del título B de la NSR10.

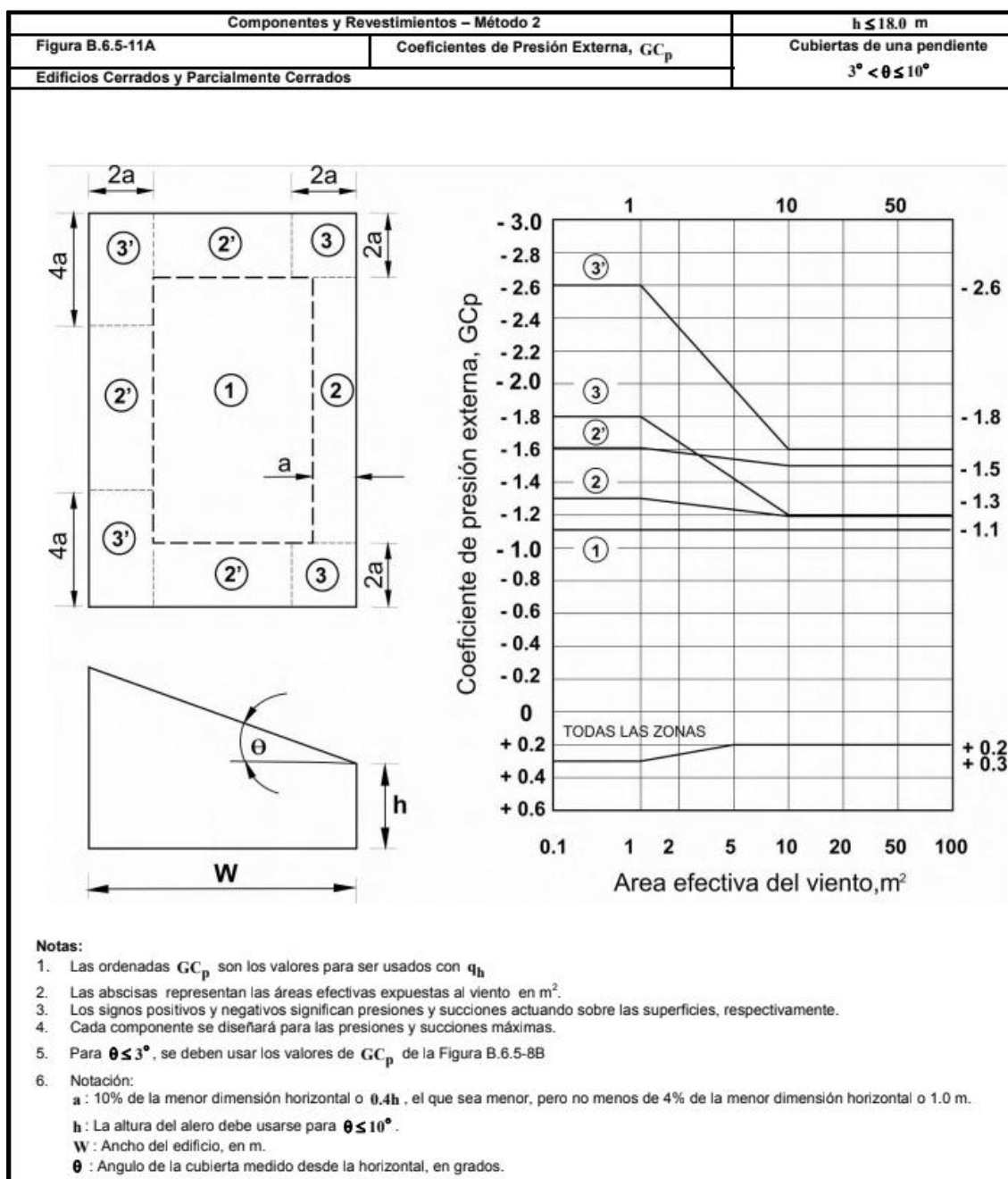


Anexo 6: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-9 del título B de la NSR10.

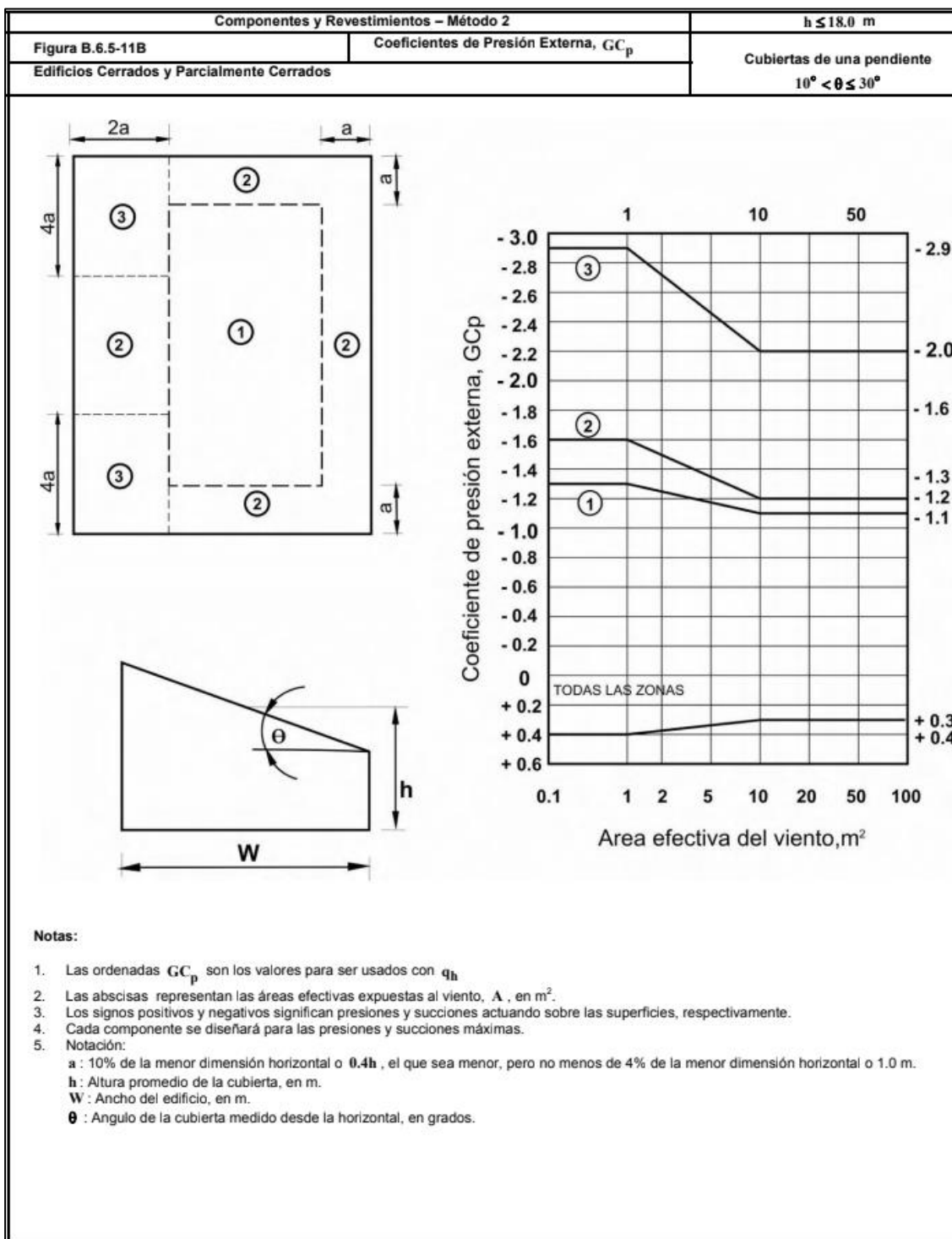
Componentes y Revestimientos – Método 2		$h \leq 18.0 \text{ m}$
Figura B.6.5-9	Coefficientes de Presión Externa, GC_p	Cubiertas Escalonadas
Edificios Cerrados, Parcialmente Cerrados		
<p>Notas:</p> <ol style="list-style-type: none"> En el nivel inferior plano, las cubiertas escalonadas mostradas en la Figura B.6.5-9, las designaciones de zona y coeficientes de presión de la Figura B.6.5-8B se deben usar, excepto que para las intersecciones de la parte superior de la cubierta con las paredes, Zona 3 debe ser tratada como Zona 2, y Zona 2 como Zona 1. Los valores positivos de GC_p iguales a los de las paredes en la Figura B.6.5-8A deben usarse en las áreas achuradas mostradas en la Figura B.6.5-9.. Notación: b : $1.5h_1$ en Figura B.6.5-9, pero no mayor que 30.0 m h : Promedio de la altura de la cubierta, en m. h_1 : h_1 o h_2 en la Figura B.6.5-9; $h = h_1 + h_2$; $h_1 \geq 3.0 \text{ m}$; $h_1/h_2 = 0.3$ a 0.7 W : ancho del edificio en la Figura B.6.5-9 W_i : W_1 o W_2 o W_3 en la Figura B.6.5-9. $W = W_1 + W_2$ o $W_1 + W_2 + W_3$; $W_i/W = 0.25$ a 0.75 θ : ángulo de la cubierta medido desde la horizontal, en grados. 		

Anexo 7: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-10 del título B de la NSR10.

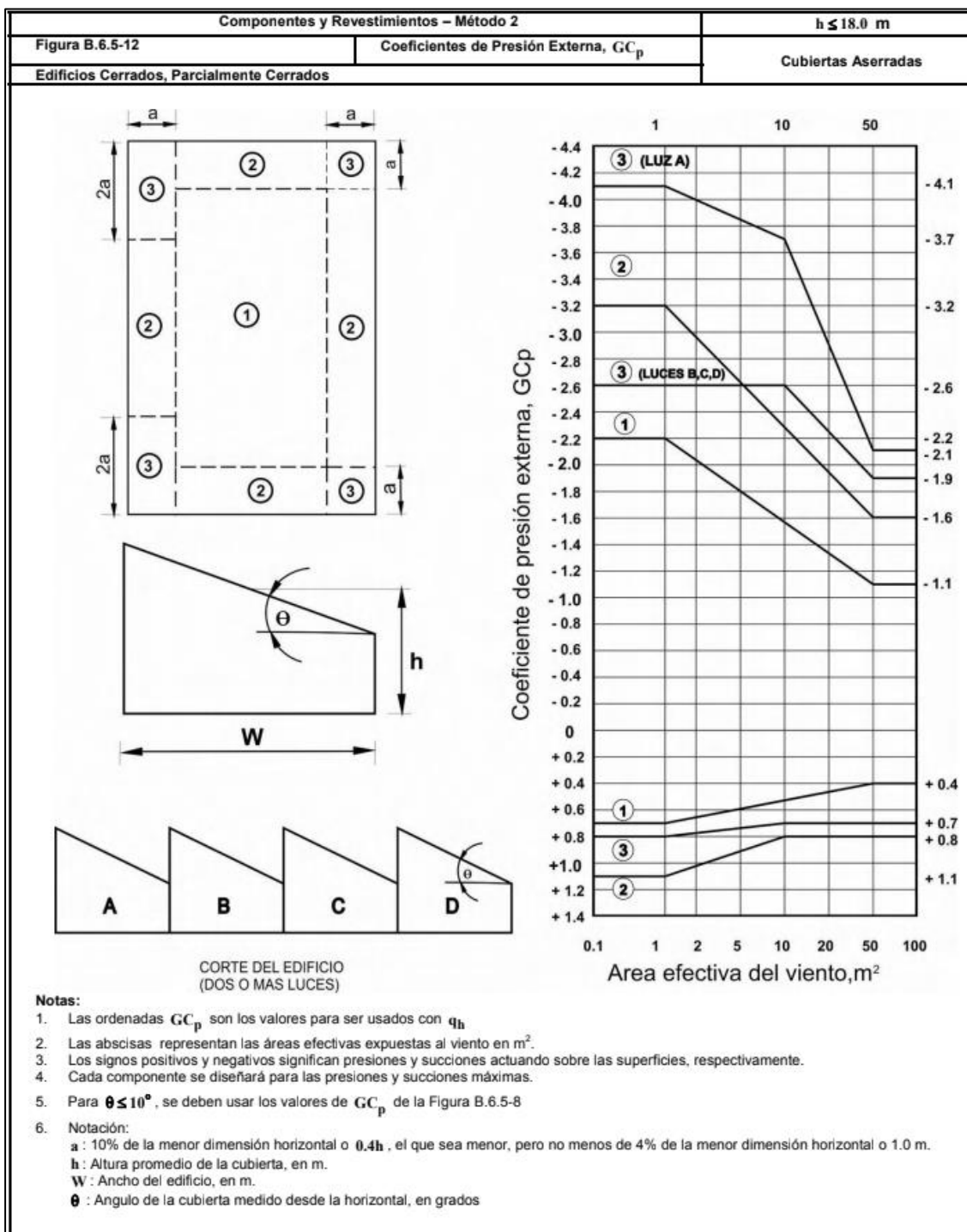


Anexo 8: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-11^a del título B de la NSR10.


Anexo 9: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-11B del título B de la NSR10.



Anexo 10: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-12 del título B de la NSR10.



Anexo 11: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-13 del título B de la NSR10.

Componentes y Revestimientos – Método 2		Todas las Alturas
Figura B.6.5-13	Coeficientes de Presión Externa, GC_p	Cubiertas en Domos
Edificios Cerrados y Parcialmente Cerrados		

Viento

θ

D

Viento

f

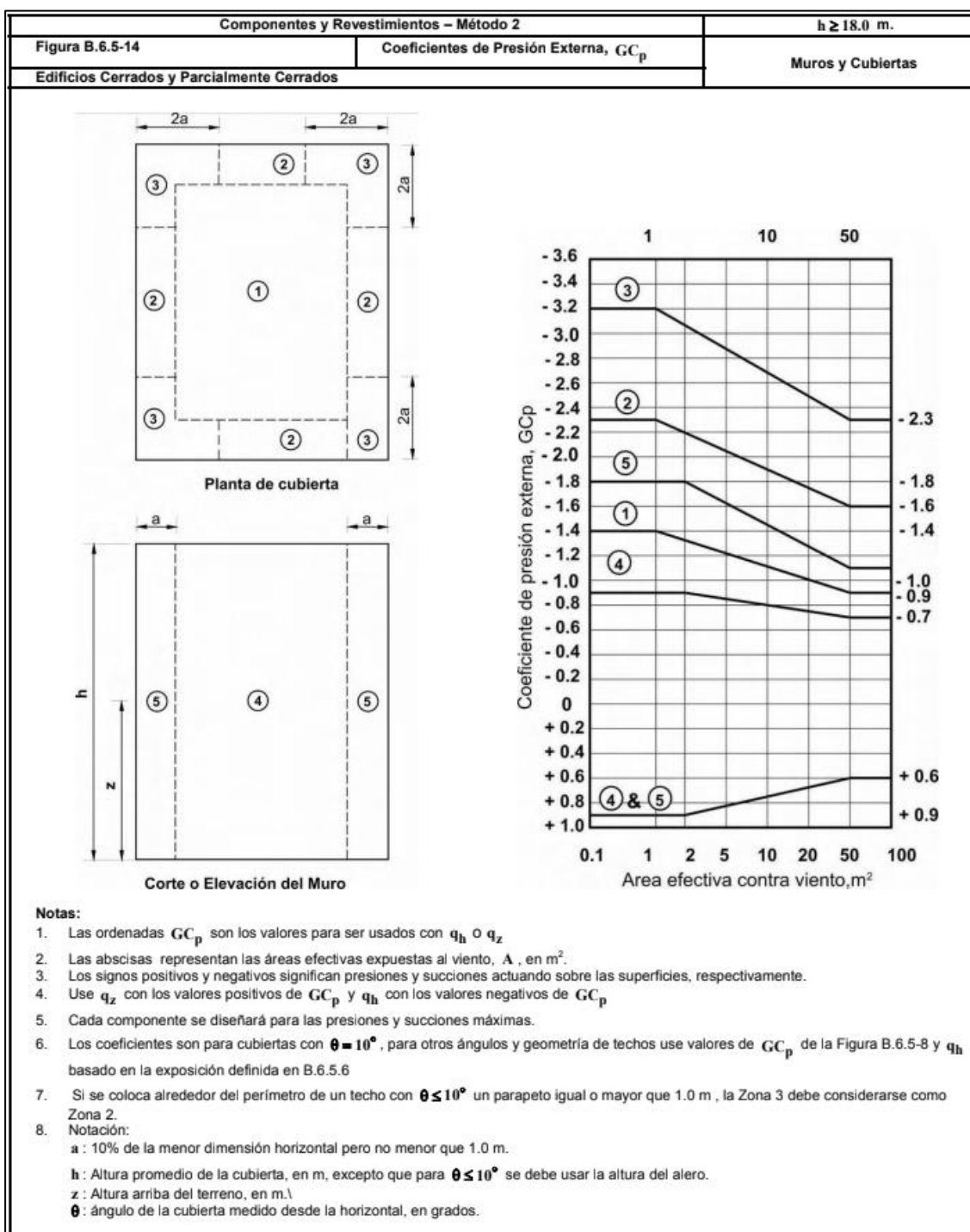
h_D

Coeficiente de Presión Externa Para Domos con Base Circular			
θ , grados	Presión Negativa	Presión Positiva	Presión Positiva
	0 - 90	0 - 60	61 - 90
GC_p	-0.9	+0.9	+0.5

Notas:

- Los valores de GC_p para ser usados con $q_{(h_D+f)}$ donde $h_D + f$ es la altura a la cresta del domo
- Los signos positivos y negativos significan presiones y succiones actuando sobre las superficies, respectivamente.
- Cada componente se diseñará para las presiones y succiones máximas.
- Los valores aplican para $0.0 \leq h_D/D \leq 0.5$, $0.2 \leq f/D \leq 0.5$
- $\theta = 0^\circ$ en la base del domo, $\theta = 90^\circ$ en el centro del punto mas alto del domo, f es medida desde la base del domo hasta el tope.

Anexo 12: Coeficientes de presión externa. Figura B.6.5-14 del título B de la NSR10.



Anexo 13: Coeficientes de presión neta. Figura B.6.5-16^a del título B de la NSR10.

Componentes y Revestimientos		0.25 ≤ h/L ≤ 1.0 m											
Figura B.6.5-16A		Coeficientes de Presión Neta, C_N										Cubiertas Libres de una Pendiente	
Edificios Abiertos													
Angulo de Cubierta θ	Área Efectiva de Viento	C_N											
		Flujo de Viento Libre						Flujo de Viento Obstruido					
		Zona 3		Zona 2		Zona 1		Zona 3		Zona 2		Zona 1	
0°	≤ a^2	2.4	-3.3	1.8	-1.7	1.2	-1.1	1	-3.6	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a^2 , ≤ $4.0 a^2$	1.8	-1.7	1.8	-1.7	1.2	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> $4.0 a^2$	1.2	-1.1	1.2	-1.1	1.2	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
7.5°	≤ a^2	3.2	-4.2	2.4	-2.1	1.6	-1.4	1.6	-5.1	1.2	-2.6	0.8	-1.7
	> a^2 , ≤ $4.0 a^2$	2.4	-2.1	2.4	-2.1	1.6	-1.4	1.2	-2.6	1.2	-2.6	0.8	-1.7
	> $4.0 a^2$	1.6	-1.4	1.6	-1.4	1.6	-1.4	0.8	-1.7	0.8	-1.7	0.8	-1.7
15°	≤ a^2	3.6	-3.4	2.7	-2.9	1.8	-1.9	2.4	-4.2	1.8	-3.2	1.2	-2.1
	> a^2 , ≤ $4.0 a^2$	2.7	-3.9	2.7	-2.9	1.8	-1.9	1.8	-3.2	1.8	-3.2	1.2	-2.1
	> $4.0 a^2$	1.8	-1.9	1.8	-1.9	1.8	-1.9	1.2	-2.1	1.2	-2.1	1.2	-2.1
30°	≤ a^2	5.2	-5	3.9	-3.8	2.6	-2.5	3.2	-4.6	2.4	-3.5	1.6	-2.3
	> a^2 , ≤ $4.0 a^2$	3.9	-3.8	3.9	-3.8	2.6	-2.5	2.4	-3.5	2.4	-3.5	1.6	-2.3
	> $4.0 a^2$	2.6	-2.5	2.6	-2.5	2.6	-2.5	1.6	-2.3	1.6	-2.3	1.6	-2.3
45°	≤ a^2	5.2	-4.6	3.9	-3.5	2.6	-2.3	4.2	-3.8	3.2	-2.9	2.1	-1.9
	> a^2 , ≤ $4.0 a^2$	3.9	-3.5	3.9	-3.5	2.6	-2.3	3.2	-2.9	3.2	-2.9	2.1	-1.9
	> $4.0 a^2$	2.6	-2.3	2.6	-2.3	2.6	-2.3	2.1	-1.9	2.1	-1.9	2.1	-1.9

Notas:

- C_N identifica las presiones netas (contribuciones de las superficies superior e inferior)
- Flujo de viento libre identifica flujos de viento relativamente sin obstrucción, con bloqueo menor o igual al 50%. Flujo obstruido de viento identifica objetos bajo cubierta que inhiben el flujo de viento (bloqueo mayor al 50%).
- Para valores de θ diferentes a los que se muestran, se permite interpolación lineal.
- Los signos positivos y negativos significan presiones y succiones actuando sobre las superficies, respectivamente.
- Cada componente se diseñará para los coeficientes de presiones y succiones mostrados.
- Notación:
 - a : 10% de la menor dimensión horizontal o $0.4h$, el que sea menor, pero no menos de 4% de la menor dimensión horizontal o 1.0 m.
 - h : Altura promedio de la cubierta, en m.
 - L : Dimensión horizontal del edificio, medida a lo largo de la dirección del viento, en m.
 - θ : ángulo de la cubierta medido desde la horizontal, en grados.

Anexo 14: Coeficientes de presión neta. Figura B.6.5-16B del título B de la NSR10.

Componentes y Revestimientos		0.25 ≤ h/L ≤ 1.0 m											
Figura B.6.5-16B		Coeficientes de Presión Neta, C _N										Cubiertas Libres de dos aguas	
Edificios Abiertos		θ ≤ 45°											
Ángulo de Cubierta θ	Área Efectiva de Viento	C _N											
		Flujo de Viento Libre						Flujo de Viento Obstruido					
		Zona 3		Zona 2		Zona 1		Zona 3		Zona 2		Zona 1	
0°	≤ a ²	2.4	-3.3	1.8	-1.7	1.2	-1.1	1	-3.6	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.8	-1.7	1.8	-1.7	1.2	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> 4.0 a ²	1.2	-1.1	1.2	-1.1	1.2	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
7.5°	≤ a ²	2.2	-3.6	1.7	-1.8	1.1	-1.2	1	-5.1	0.8	-2.6	0.5	-1.7
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.7	-1.8	1.7	-1.8	1.1	-1.2	0.8	-2.6	0.8	-2.6	0.5	-1.7
	> 4.0 a ²	1.1	-1.2	1.1	-1.2	1.1	-1.2	0.5	-1.7	0.5	-1.7	0.5	-1.7
15°	≤ a ²	2.2	-2.2	1.7	-1.7	1.1	-1.1	1	-3.2	0.8	-2.4	0.5	-1.6
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.7	-1.7	1.7	-1.7	1.1	-1.1	0.8	-2.4	0.8	-2.4	0.5	-1.6
	> 4.0 a ²	1.1	-1.1	1.1	-1.1	1.1	-1.1	0.5	-1.6	0.5	-1.6	0.5	-1.6
30°	≤ a ²	2.6	-1.8	2	-1.4	1.3	-0.9	1	-2.4	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	2	-1.4	2	-1.4	1.3	-0.9	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> 4.0 a ²	1.3	-0.9	1.3	-0.9	1.3	-0.9	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
45°	≤ a ²	2.2	-1.6	1.7	-1.2	1.1	-0.8	1	-2.4	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.7	-1.2	1.7	-1.2	1.1	-0.8	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> 4.0 a ²	1.1	-0.8	1.1	-0.8	1.1	-0.8	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2

Notas:

- C_N identifica las presiones netas (contribuciones de las superficies superior e inferior)
- Flujo de viento libre identifica flujos de viento relativamente sin obstrucción, con bloqueo menor o igual al 50%. Flujo obstruido de viento identifica objetos bajo cubierta que inhiben el flujo de viento (bloqueo mayor al 50%).
- Para valores de θ diferentes a los que se muestran, se permite interpolación lineal.
- Los signos positivos y negativos significan presiones y succiones actuando sobre las superficies, respectivamente.
- Cada componente se diseñará para los coeficientes de presiones y succiones mostrados.
- Notación:
 - a : 10% de la menor dimensión horizontal o 0.4h, el que sea menor, pero no menos de 4% de la menor dimensión horizontal o 1.0 m.
 - h : Altura promedio de la cubierta, en m.
 - L : Dimensión horizontal del edificio, medida a lo largo de la dirección del viento, en m.
 - θ : ángulo de la cubierta medido desde la horizontal, en grados.

Anexo 15: Coeficientes de presión neta. Figura B.6.5-16C del título B de la NSR10.

Componentes y Revestimientos		0.25 ≤ h/L ≤ 1.0 m											
Figura B.6.5-16C	Coeficientes de Presión Neta, C _N	Cubiertas en Artesa (dos aguas invertidas)											
Edificios Abiertos		θ ≤ 45°											
Ángulo de Cubierta θ	Área Efectiva de Viento	C _N											
		Flujo de Viento Libre			Flujo de Viento Obstruido								
		Zona 3	Zona 2	Zona 1	Zona 3	Zona 2	Zona 1						
0°	≤ a ²	2.4	-3.3	1.8	-1.7	1.2	-1.1	1	-3.6	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.8	-1.7	1.8	-1.7	1.2	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> 4.0 a ²	1.2	-1.1	1.2	-1.1	1.2	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
7.5°	≤ a ²	2.4	-3.3	1.8	-1.7	1.2	-1.1	1	-4.8	0.8	-2.4	0.5	-1.6
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.8	-1.7	1.8	-1.7	1.2	-1.1	0.8	-2.4	0.8	-2.4	0.5	-1.6
	> 4.0 a ²	1.2	-1.1	1.2	-1.1	1.2	-1.1	0.5	-1.6	0.5	-1.6	0.5	-1.6
15°	≤ a ²	2.2	-2.2	1.7	-1.7	1.1	-1.1	1	-2.4	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.7	-1.7	1.7	-1.7	1.1	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> 4.0 a ²	1.1	-1.1	1.1	-1.1	1.1	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
30°	≤ a ²	1.8	-2.6	1.4	-2	0.9	-1.3	1	-2.8	0.8	-2.1	0.5	-1.4
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.4	-2	1.4	-2	0.9	-1.3	0.8	-2.1	0.8	-2.1	0.5	-1.4
	> 4.0 a ²	0.9	-1.3	1.9	-1.3	0.9	-1.3	0.5	-1.4	0.5	-1.4	0.5	-1.4
45°	≤ a ²	1.6	-2.2	1.2	-1.7	0.8	-1.1	1	-2.4	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> a ² , ≤ 4.0 a ²	1.2	-1.7	1.2	-1.7	0.8	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	> 4.0 a ²	0.8	-1.1	1.8	-1.1	0.8	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2

Notas:

- C_N identifica las presiones netas (contribuciones de las superficies superior e inferior)
- Flujo de viento libre identifica flujos de viento relativamente sin obstrucción, con bloqueo menor o igual al 50%. Flujo de viento obstruido identifica objetos bajo cubierta que inhiben el flujo de viento (bloqueo mayor al 50%).
- Para valores de θ diferentes a los que se muestran, se permite interpolación lineal.
- Los signos positivos y negativos significan presiones y succiones actuando sobre las superficies, respectivamente.
- Cada componente se diseñará para los coeficientes de presiones y succiones mostrados.
- Notación:
 - a : 10% de la menor dimensión horizontal o 0.4h, el que sea menor, pero no menos de 4% de la menor dimensión horizontal o 1.0 m.
 - h : Altura promedio de la cubierta, en m.
 - L : Dimensión horizontal del edificio, medida a lo largo de la dirección del viento, en m.
 - θ : ángulo de la cubierta medido desde la horizontal, en grados.