



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

ESCUELA DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE VIGAS DE ACERO DE
ALMA ALIGERADA**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título del

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

**Br. Hernández Valera, Francheska Tibisay
Br. Navas Meserón, Wilnys Yineth**

TUTOR:

Ing. González, Freddy

FECHA:

Caracas, junio de 2017

FALCUTAD DE INGENIERIA

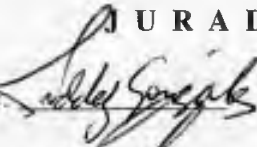
ESCUELA DE INGENIERA CIVIL

**COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE VIGAS DE ACERO DE ALMA
ALIGERADA**

Este jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su
contenido con el resultado: NONTE

JURADO EXAMINADOR

Nombre:



Nombre:

Jose' M Velásquez

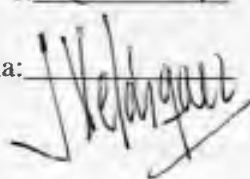
Nombre:

por: José Bolívar

Firma:



Firma:



Firma:



REALIZADO POR

Br. Hernández Valera, Francheska Tibisay

Br. Navas Meserón, Wilnys Yineth

PROFESOR GUIA

Ing. González, Freddy

FECHA

Caracas, Julio de 2017

Sinopsis

El uso de perfiles de acero en edificaciones es lo más cotidiano que se puede encontrar en el campo de la ingeniería civil, debido al comportamiento de secciones compuestas, (acero-concreto) que ofrecen ductilidad y resistencia. En el presente trabajo se propone una variante de perfiles de acero, denominados Perfiles de Alma Alveolada las cuales aportan múltiples ventajas, enfocando el estudio para secciones de aberturas casteladas y celulares.

Debido al déficit de perfiles de acero en el mercado venezolano, se plantean las vigas de alma aligerada como una alternativa a la hora de ejecutar algún proyecto estructural, presentando tablas de propiedades mecánicas para dichos perfiles donde se especifica: área, momentos de inercia, módulo resistente de la sección y módulo plástico de la sección. Para dos secciones transversales, pertenecientes al mismo miembro. Una correspondiente a la sección alveolada y la otra correspondiente a la sección completamente sólida. Las tablas de propiedades fueron realizadas a partir de la información proporcionada por las productoras de perfiles comerciales (perfiles bases), definiendo de antemano una configuración geométrica de corte a la cual será sometido el perfil base.

Se presenta el diseño de sección mixta por el método de los estados límites el cual está delimitado por los estados límites de resistencia y de servicio, como también por las acciones realizada en la etapa de construcción y montaje, de vigas de alma llena y de vigas alveolares estudiando los diferentes mecanismos de colapso a los cuales son susceptibles estas últimas, tales como mecanismo de flexión, mecanismo Vierendeel, Pandeo lateral-torsional, Pandeo local del alma, Pandeo local del alma por cizallamiento, entre otros. Realizando posteriormente un estudio comparativo entre ellas respecto al peso, al momento de inercia de la sección, al módulo resistente de la sección y el módulo plástico.

De lo anterior se presenta un procedimiento y recomendaciones para el diseño de vigas de alma aligerada, como viga principal para un sistema de entre piso, así como una serie de tablas de propiedades y resultados que serán de gran ayuda para el proyectista.

ÍNDICE GENERAL

Sinopsis	i
INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS	ix
CAPÍTULO I.....	4
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Objetivos de la investigación	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Alcance	6
1.4 Antecedentes	6
MARCO METODOLÓGICO	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1 Vigas de acero de alma aligerada	8
2.2 Procesos de fabricación	9
2.3 Aplicación de las vigas alveoladas	11
2.4 Configuración geométrica de las aberturas	13
2.4.1 Vigas casteladas	14
2.4.2 Vigas celulares	16
2.5 Ventajas y desventajas de las vigas alveolares.....	17
2.5.1 Ventajas.....	17
2.5.2 Desventajas	19
2.6 Mecanismos de falla.....	19
2.6.1 Formación de mecanismos de flexión.....	22
2.6.2 Formación de mecanismo Vierendeel.....	23
2.6.3 Pandeo lateral-torsional.....	24
2.6.4 Pandeo local del alma.....	25
2.6.7 Ruptura de las juntas soldadas en los montantes	27

2.7	Propiedades de la sección transversal.....	27
2.7.1	Sección “T”	28
2.7.2	Sección de alma llena.....	28
2.7.3	Sección ponderada	29
2.8	Estados límites por resistencia	30
2.8.1	Capacidad de corte de la viga.....	30
2.8.2	Capacidad a flexión de la viga	32
2.8.3	Formación de mecanismo plástico	34
2.8.4	Pandeo local del montante	44
2.8.5	Pandeo local del alma por corte horizontal	48
2.8.6	Pandeo lateral torsional	52
2.8.7	Pandeo local del ala de la sección T.....	56
2.8.8	Pandeo local del alma de la sección T	56
2.8.9	Ruptura de la soldadura.....	57
2.9	Estado límite de servicio	57
CAPÍTULO III		59
3.1	Criterios generales	59
3.1.1	Sistema de cargas	59
3.1.2	Esfuerzos admisibles	60
3.1.3	Estados límites	60
3.2	Elaboración de las tablas de propiedades	62
3.2.1	Tabla de propiedades para secciones de alma llena y alveolada.....	62
3.2.2	Tabla de propiedades de sección T	72
3.2.3	Relación ancho-espesor.....	74
3.3	Diseño por tensiones admisibles	78
3.4	Diseño por estados límites.....	82
CAPÍTULO IV		122
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE VIGA DE ALMA LLENA Y VIGA ALVEOLADA		122
4.1	Análisis de resultados obtenidos mediante estudio de estados límites.....	122
4.2	Análisis elástico mediante el uso de elementos finitos	125
4.2.1	Descripción general del software SAP 2000.....	125
4.2.2	Secciones y propiedades del material considerados en la modelación	126

4.2.3 Cargas y condiciones de borde aplicadas.....	126
CAPÍTULO V	133
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
5.1 Conclusiones	133
5.2 Recomendaciones	134
Anexo 1: Procedimiento de diseño de vigas alveoladas mediante el método de los estados límites	135
Anexo 2: Tablas resumen de las propiedades de una viga alveolada y su sección equivalente	137
Anexo 3: Ecuaciones de las propiedades de la sección transversal	145
BIBLIOGRAFÍA	150

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de fabricación de viga castelada de abertura hexagonal (izquierda) y viga castelada de abertura octagonal o viga peraltada (derecha)	9
Figura 2 Partes de viga de acero de alma aligerada. A las vigas con este tipo de abertura se les conoce como vigas celulares	10
Figura 3 Proceso de expansión a partir de corte y unión de perfil laminado(a). Proceso de ensamblaje a partir de láminas (b).....	11
Figura 4 Viga casteladas usadas en estacionamiento.....	12
Figura 5 Pasarela con vigas alveoladas, ubicada en el Km 8 de la Carretera Panamericana	13
Figura 6 Esquema de segmento de viga castelada	15
Figura 7 Diferencia entre una viga celular con optimización Altura/Pero (izquierda) y optimización Carga/Peso (derecha).....	17
Figura 8 Los ductos pueden atravesar el alma del perfil sin necesidad de aumentar las zonas correspondientes al cielo raso, permitiendo el aprovechamiento del espacio además de ofrecer una ambientación diferente.	18
Figura 9 Representación gráfica del ahorro de espacio libre	19
Figura 10 Distribución de los esfuerzos a flexión ocasionados por la carga aplicada a la viga y la fuerza cortante aplicada en el punto de inflexión, ubicado en el centro de los cordones	21
Figura 11 Diagrama de fuerzas actuantes en el segmento superior del montante	21
Figura 12 Falla por mecanismo de flexión	22
Figura 13 Articulaciones plásticas, formación de paralelogramos	23
Figura 14 Analogía de mecanismo Vierendeel	23
Figura 15 Pandeo lateral torsional de viga mixta.....	24
Figura 16 Pandeo lateral torsional del montante debido a corte vertical.	25
Figura 17 Pandeo del alma por corte.	26
Figura 18 Ruptura de la soldadura en el montante del alma.....	27
Figura 19 Sección transversal T	28
Figura 20 Sección transversal con alma llena.	29
Figura 21 Segmento de viga.....	29

Figura 22 Elementos adoptados para análisis de tensiones en la sección transversal.....	35
Figura 23 Equilibrio de fuerzas en el agujero de la viga.	36
Figura 24 Distribución de esfuerzos cortantes en zona T.	38
Figura 25 Puntos clave en el estudio de la distribución de esfuerzos cortantes en la sección 1 del cortante.	39
Figura 26 Puntos clave para el estudio de esfuerzos en la sección transversal 2 del cordón.....	40
Figura 27 Método gráfico para determinar sección más desfavorable de la viga, propuesto por Delesques 1969.	41
Figura 28 Modelado típico de viga celular	47
Figura 29 Modelo propuesto por Lawson. La falla del montante se da por los esfuerzos de compresión y tracción en el alma.	47
Figura 30 Modelo de puntal efectivo sobre el montante.....	48
Figura 31 Fuerzas y momentos actuantes respecto al punto de intersección 0.....	49
Figura 32 Efecto de fuerzas aplicadas en el punto de intersección. Generan esfuerzos flectores sobre el eje curvo.....	49
Figura 33 Sección prismática, extraída del alma del miembro, la cual sufrirá los efectos del pandeo.	51
Figura 34 Efecto de ubicación de la carga.	54
Figura 35 Variación de coeficiente según la condición de apoyo y carga aplicada.....	55
Figura 36 Estudio de la sección para la inercia equivalencia en un segmento de.....	58
Figura 37 Esquema de carga aplicada a la correa, condición simplemente apoyada.....	60
Figura 38 Esquema de carga aplicada a la viga, condición empotrada.....	60
Figura 39 Elementos en compresión de miembro, con sección transversal T, sometido a flexión.	75
Figura 40 Partes de las secciones transversales de un mismo miembro	80
Figura 41 Evaluación de momentos secundarios	88
Figura 42 Sección transversal de un perfil estándar y un perfil alveolado.	122
Figura 43 Imagen referencial del software de diseño SAP2000.....	126
Figura 44 Carga sobre nodos principales de la viga, aplicadas a una separación “s” (izquierda viga castelada, derecha viga celular).	127

Figura 45 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en los extremos de la viga CB 472.	127
Figura 46 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en las aberturas centrales de la viga CB 472.....	127
Figura 47 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en los extremos de la viga CB 472.	128
Figura 48 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en las aberturas centrales de la viga CB 472.....	128
Figura 49 Distribución de esfuerzos cortantes en los extremos de la viga CB 472.	128
Figura 50 Distribución de esfuerzos cortantes en las aberturas centrales de la viga	128
Figura 51 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) el extremo de la viga CB 472.	128
Figura 52 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) en las aberturas centrales de la viga CB 472.	129
Figura 53 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en los extremos de la viga CB 480.	129
Figura 54 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en las aberturas centrales de la viga CB480.....	129
Figura 55 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en los extremos de la viga CB 480.	129
Figura 56 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en las aberturas centrales de la viga CB 480.....	130
Figura 57 Distribución de esfuerzos cortantes en los extremos de la viga CB 480.	130
Figura 58 Distribución de esfuerzos cortantes en las aberturas centrales de la viga CB 480.....	130
Figura 59 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) en el extremo de la viga CB 480.	130
Figura 60 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) en las aberturas centrales de la viga CB 480.	130
Figura 61 Identificación de los puntos de estudio.....	131

Figura 62 Representación de esfuerzos principales de compresión, tracción y esfuerzos cortantes, según los ejes principales establecidos por SAP2000.	132
---	-----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 -Comparación de propiedades geométricas de las diferentes secciones transversales de una viga castelada	30
Tabla 2 Esfuerzo cortante permisible para diferentes ángulos de corte	52
Tabla 3 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base IPN	64
Tabla 4 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base IPE.....	65
Tabla 5 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base PROPERCA (serie estándar) .	66
Tabla 6 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base PROPERCA (serie petrolera) .	67
Tabla 7 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base IPN	68
Tabla 8 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base IPE.....	69
Tabla 9 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base PROPERCA (serie estándar).....	70
Tabla 10 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base PROPERCA (serie petrolera)	71
Tabla 11 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base IPN.	72
Tabla 12 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base IPE	73
Tabla 13 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base PROPERCA (serie estándar).....	73
Tabla 14 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base PROPERCA (serie petrolera).....	74
Tabla 15 Límites de relación de esbeltez local, para una sección T, según la Norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para Construcciones de Acero”	75
Tabla 16 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base IPN .	76

Tabla 17 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base IPE..	76
Tabla 18 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base PROPERCA (serie estándar).....	77
Tabla 19 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base PROPERCA (serie petrolera).....	77
Tabla 20 Propiedades de los materiales	82
Tabla 21 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 1.a.....	85
Tabla 22 Deflexiones de miembro, caso 1.a	85
Tabla 23 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.a.....	85
Tabla 24 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 1.b.....	86
Tabla 25 Deflexiones de miembro, caso 1.b	86
Tabla 26 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.b.....	87
Tabla 27 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura (caso 1.b – viga CB 472)	88
Tabla 28 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 1.b – viga CB 472)	88
Tabla 29 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 1.b – viga CB 472)	89
Tabla 30 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 1.c.....	92
Tabla 31 Deflexiones de miembro, caso 1.c	92
Tabla 32 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.c.....	93
Tabla 33 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura (caso 1.c – correa CB 240)	95
Tabla 34 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 1.c – correa CB 240)	95
Tabla 35 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes.....	96
Tabla 36 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura.....	99
Tabla 37 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura.....	100
Tabla 38 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 1.c – viga CB 480)	100
Tabla 39 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 2.a...	104

Tabla 40 Deflexiones de miembros, caso 2.a.....	104
Tabla 41 Verificación de resistencia de los miembros, caso 2.a.....	105
Tabla 42 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 2.b...	105
Tabla 43 Deflexiones de miembros, caso 2.b	105
Tabla 44 Verificación de resistencia de los miembros, caso 2.a.....	106
Tabla 45 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura.....	107
Tabla 46 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 2.b – viga CB 664)	107
Tabla 47 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 2.b – viga CB 664)	108
Tabla 48 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 2.c ...	110
Tabla 49 Deflexiones de miembro, caso 2.c	111
Tabla 50 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.c.....	111
Tabla 51 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura (caso 2.c – correa CB 210)	112
Tabla 52 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 2.c – correa CB 210)	113
Tabla 53 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes.....	114
Tabla 54 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura.....	117
Tabla 55 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura.....	117
Tabla 56 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 2.c – viga CB 675)	118
Tabla 57 Resistencia disponible de junta soldada.....	121
Tabla 58 Cuadro comparativo entre la selección de perfiles estándares y alveolados para caso 1, correa de luz 6 m.	123
Tabla 59 Cuadro comparativo entre la selección de perfiles estándares y alveolados para caso 1, viga de luz 7 m.	123
Tabla 60 Cuadro comparativo de caso 2, entre la selección de perfiles estándares y alveolados para correa de luz 4 m.	124
Tabla 61 Cuadro comparativo de caso 2, entre la selección de perfiles estándares y alveolados para viga de luz 9 m.	124

Tabla 62 Porcentaje de ahorro de peso para los casos estudiados	125
Tabla 63 Valores de esfuerzos principales, viga CB 472.....	131
Tabla 64 Valores de esfuerzos principales, CB 480.....	131

SIMBOLOGÍA

A_A	Área de sección transversal de zonas T superior e inferior
A_{cr}	Área crítica de la sección transversal sometida a falla Vierendeel
A_g	Área de corte de la sección transversal de zona de alma llena
A_T	Área de corte de un cordón correspondiente a la zona alveolada
A_w	Área de corte horizontal en el montante
B	Longitud de zona de transición en abertura hexagonal
C	Constante torsional, para secciones I c=1
C_w	Constante de alabeo, mm^6
D_o	Diámetro de abertura en el alma para vigas celulares, mm
E	Módulo de elasticidad del acero, $E= 2.100.000 \text{ kgf/cm}^2$
ε	$\sqrt{235/F_y}$; con f_y en $\frac{N}{mm^2}$ coeficiente para la sección clasificada
F_y	Esfuerzo mínimo de cedencia especificado según el tipo de acero
G	Módulo de elasticidad al corte del acero, $G=E/2.6 \approx 808000 \text{ Kg/cm}^2$
H	Altura de perfil sin modificar, mm
I_{tx}	Inercia del cordón respecto al eje x, mm^4
I_y	Momento de inercia fuera del plano, mm^4
J	Constante torsional, mm^4
L_b	Longitud de la viga no arriostrada lateralmente, mm
L_p	Longitud límite sin arriostramiento lateral para el estado límite de fluencia, mm
L_r	Longitud límite sin arriostramiento lateral para el estado límite de pandeo flexo-torsional, mm
M	Momento de flexión
M_e	Resistencia a flexión en la sección crítica del montante
M_{max}	Momento máximo de flexión en la sección crítica del montante
$M_{p,T}$	Capacidad de momento en las secciones T superior e inferior
$M_{p,Tlocal}$	Resistencia a flexión local en las secciones T superior e inferior
M_{pv}	Momento de flexión Vierendeel

M_u	Momento máximo en la viga producido por cargas aplicadas
N	Número de aberturas en la viga alveolada
V_n	Fuerza cortante nominal
V_c	Fuerza cortante admisible
S	Módulo de sección elástico, mm^3
S_x	Módulo de sección elástico tomado en torno al eje x, mm^3
T	Fuerza axial actuante en los cordones de la viga alveolada
V_{Vmax}	Corte máximo vertical
V_{Hmax}	Corte máximo horizontal
Z	Módulo de sección plástico, mm^3
σ	Esfuerzo a flexión del montante por método de Lawson
γ_{M1}	Factor parcial para la resistencia de los miembros a la inestabilidad asistida por controles de miembros
b_f	Ancho del ala del perfil en la sección transversal, mm
d	Altura de corte en perfil base, mm
d_b	Altura del alma en la zona T inferior, mm
d_t	Altura del alma en la zona T superior, mm
h_b	Altura total de la zona T inferior, mm
h_c	Altura del perfil luego del proceso de castelación, mm
h_o	Distancia entre los centroides de las alas, mm
h_t	Altura total de la zona T superior, mm
h_s	Altura total de la abertura luego del proceso de castelación
h_w	Altura del alma de viga castelada, mm
k_y	Factor de longitud efectiva a flexión, $k_y = 1$
k_ϕ	Factor de longitud efectiva a torsión, $k_\phi = 1$
l_{ef}	Longitud efectiva de la abertura, varía según el tipo de patrón de corte, mm
l_o	Longitud de la abertura
r_{ts}	Radio de giro efectivo, mm
s	Separación entre orificios medida de centro a centro de las aberturas, mm

s_o	Separación entre extremo de la viga y centro de la primera abertura
t_f	Espesor del ala, mm
t_w	Espesor del alma, mm
y_t	Distancia entre los centroides de las secciones T
y_o	Distancia del extremo inferior del alma de sección T hasta el centroide de la misma

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El avance de las investigaciones sobre el uso de los perfiles de acero como vigas, busca obtener el mejor aprovechamiento de dicho material, en función de las necesidades que puedan presentarse en la concepción de distintos proyectos. A pesar de la existencia de una amplia variedad de perfiles para ser usados como vigas y la facilidad de selección del que mejor se ajuste al diseño, existen problemas muy puntuales que pueden ser condicionantes para la elección final.

La reducción de altura entre los niveles de la edificación limita el aprovechamiento de los espacios debido al uso de cielo raso para el proceso de ubicación y pase de servicios tales como cables, tuberías de flujo continuo, ductos, entre otros sistemas, esto puede ocasionar disminución en la altura libre disponible.

Se presentan también casos de diseño de miembros que arrojan el requerimiento de perfiles con grandes dimensiones, y por ende gran peso, los cuales son de difícil adquisición en nuestro país por su alto costo y en algunos casos la disponibilidad de los mismos puede ser escasa, debido a que son catalogados como productos de baja rotación por las acerías.

Bajo la existencia de estos problemas puede considerarse el uso de una variante de perfiles que no sean los convencionales señalados en normas y especificaciones. Dicha variante, propuesta en este estudio consiste en perfiles con aberturas en el alma, conocidas como vigas de alma aligerada o vigas alveolares. Esta condición de aberturas permite, bajo el aprovechamiento de la misma cantidad de acero, establecer en muchos casos una sección de mayor altura y por ende mayor momento de inercia, siendo una viga más liviana en comparación con otros miembros de igual dimensión. Por esta razón ofrecen versatilidad y buen comportamiento en los requerimientos a las que son sometidas.

Existen diversas investigaciones basadas en el estudio de la resistencia de estos miembros estructurales de acero, más no todas las normas de acero poseen información ampliamente desarrollada, es decir no profundizan de forma explícita en el diseño de estructuras de acero con este tipo de variante en perfiles. Por lo que, las vigas de alma aligerada son objeto de constante estudio.

A pesar de la existencia de distintos estudios que permiten conocer los estados límites de resistencia y servicio, es decir, los puntos de colapso y su comportamiento al ser sometida a grandes solicitaciones en proyectos estructurales, especialmente a flexión, estos estudios en el país son escasos y por ende no se encuentran normados para su fácil aplicación. Lo que trae como consecuencia, el no poder aprovechar las bondades de estos miembros en edificaciones y otras construcciones.

Por lo anterior, surge el interés de estudiar y analizar su comportamiento y características, logrando destacar los aspectos más importantes en su diseño, con la finalidad de incentivar y promover el uso de las mismas en nuestro país.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Presentar el comportamiento, los criterios de diseño, las características de las vigas de alma aligerada (con aberturas en las almas) con la finalidad de exponer un procedimiento para su diseño, de acuerdo a los criterios y fundamentos establecidos en las normas de diseño de acero para edificaciones nacional e internacionales, así como de los resultados de las investigaciones.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar los estados límites de diseño por resistencia, bajo consideración de la existencia de puntos críticos en las aberturas del alma de la viga propensas a colapso local en dichas zonas.

- Analizar los estados límites de diseño por servicio en dicha viga.
- Comparar el comportamiento estructural de dos modelos de carga entre viga de alma aligerada tratada como viga vierendeel y una viga de alma llena, desarrolladas a través del método de elementos finitos de un programa comercial para el diseño de estructuras.

1.3 Alcance

Esta es una investigación mayormente documental en la cual se establece las siguientes limitantes:

- Perfiles abiertos comercializados en el país.
- Aberturas en el alma del tipo hexagonal y circular.
- Las normas bajo las cuales se realizarán los procesos comparativos son las normas COVENIN 1618:1998 y ANSI/AISC 360 vigente.
- El estudio será desarrollado en base al diseño convencional de estructuras de acero, es decir no se contempla el diseño sismorresistente para dichas vigas.
- Análisis mediante del método de elementos finitos de un programa comercial para el diseño de estructuras.

1.4 Antecedentes

Sevak Demirdjian

McGill University Montreal, Canadá 1999

Título: Stability of Castellated Beam Webs

En esta tesis se describe un estudio sobre el comportamiento de las vigas de sección castelada, usando los métodos elásticos y plásticos de análisis los cuales utilizan para predecir los modos de falla de estas vigas.

J. G. Verweij

Delft University of Technology, Países bajos 2010

Título: cellular Beam-Columns in Portal Frame Structures

Se dedica a la investigación del comportamiento de las vigas celulares. el uso en estructuras de pórtico parece atractivo por razones de estética, por lo tanto, la investigación de su comportamiento estructural es relevante.

MARCO METODOLÓGICO

La metodología empleada para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado es mayormente documental más, sin embargo, también cuenta con una investigación comparativa. Esto con la finalidad de investigar el comportamiento de las vigas alveoladas, en relación con las vigas de alma llena de las que estas se derivan.

La elaboración del presente trabajo se divide en dos partes. La primera consiste en la recolección, manejo e interpretación de información relacionada con las vigas de alma aligerada, con la finalidad de conocer su comportamiento, determinar sus características, criterios de diseño y estados límites según las formas de las aberturas, siguiendo referencias bibliográficas provenientes, en su mayoría, de trabajos de investigación expuestos en jornadas especiales. Con dicha información se permite la comprensión y correcto desarrollo de los métodos de diseño y consideraciones importantes en el mismo.

En la segunda parte, se analizarán procedimientos propuestos por distintos autores, para el diseño y cálculo de las vigas alveoladas, estableciendo un esquema de trabajo para su diseño. Se establecerán los criterios de comparación, respecto al comportamiento estructural de una viga de alma aligerada, suponiéndola como viga vierendeel, con una viga de alma llena. Dicha comparación se realizará por medio del desarrollo de un modelo computarizado de ambas vigas, mediante el método de elementos finitos, para finalmente determinar cuál miembro tiene mejor comportamiento al ser sometido a flexión.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Vigas de acero de alma aligerada

Las vigas alveoladas consisten en el uso de perfiles de acero en forma de I con perforaciones en el alma, con las cuales se logra aumentar el módulo de inercia, con la misma cantidad de material. Este proceso es realizado desde inicios del año 1930, cuando Geoffrey Murray Boyd en medio de la construcción de una grúa, disponía de vigas de acero con propiedades de las alas que se adaptaban a los requerimientos, pero para las luces solicitadas el alma no cumplía, por lo que en necesidad de alcanzar las distancias requeridas dividió el alma de las vigas, por un proceso de corte del material, y las unió con soldadura, obteniendo como resultado unos perfiles con aberturas en el alma que permitían aumentar su rigidez manteniendo su peso inicial. Por ello, también se les conoce como vigas Boyd.

El aprovechamiento de estos miembros, como se mencionó previamente, se hace al realizar un corte según un patrón definido que puede ser en zigzag, circular, sinusoidal, entre otros. La viga queda dividida en dos partes, para posteriormente ser unida mediante soldadura en el alma.

Las vigas con corte hexagonal son conocidas como vigas casteladas, ya que en sus inicios su figura se asimilaba a la forma de los castillos y las vigas con aberturas circulares son conocidas como vigas celulares.

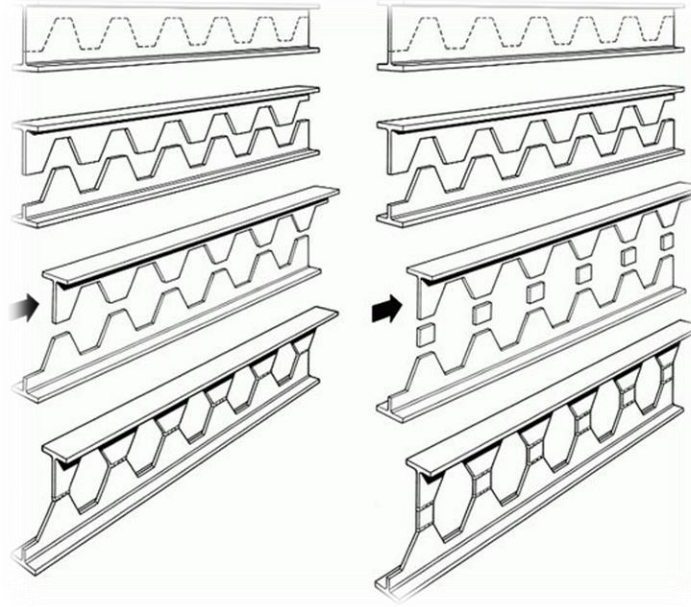


Figura 1 Proceso de fabricación de viga castelada de abertura hexagonal (izquierda) y viga castelada de abertura octagonal o viga peraltada (derecha)

2.2 Procesos de fabricación

Luego de seleccionar el perfil laminado en forma de I y definir el patrón de corte a realizar en el alma, este elemento es sometido a un proceso inicial de corte, el cual divide dicho perfil en dos partes, para posteriormente ser unidas mediante soldadura. Las zonas donde el alma es nuevamente unida se conocen como montante. Este trabajo puede ser realizado manualmente o de forma automatizada con maquinaria adecuada. Este proceso permite realizar vigas con secciones asimétricas respecto al eje neutro del perfil inicial, ya que las alturas de las zonas T en una misma sección transversal no necesariamente deberán ser iguales.

El principio básico de fabricación es el mismo, tanto para vigas celulares como vigas casteladas, la diferencia entre uno y otro depende de la forma de la abertura y cómo estos miembros se encuentran en el mercado actual, ya que las primeras ofrecen la facilidad de ubicarse en empresas manufactureras, mientras que las segundas se elaboran a menor escala según la solicitud de algún proyecto.

Como se mencionó anteriormente, las vigas celulares son fabricadas por distintas manufactureras de acero, las cuales usan sus propios procesos patentados. Además del proceso básico de corte y soldadura en un perfil laminado, estas vigas pueden ser fabricadas mediante el uso de tres láminas, las cuales se arman de manera tal que la forma final del miembro sea una I. En la lámina que será usada para el alma se realizan los agujeros circulares y luego a dicha lámina se sueldan las demás, que constituirán las alas del perfil. Este proceso puede resultar costoso, considerando la longitud de la soldadura a aplicar (unión entre alma y alas), y además se produce cierta pérdida de material debido a la forma circular del patrón de corte, situación que no ocurre en las vigas con aberturas hexagonales.

En las vigas casteladas se puede modificar su forma inicial, convirtiéndola en octogonal, al agregar láminas de acero en la unión del alma. A estas vigas se les conoce como vigas peraltadas, cabe destacar que se evita su uso debido a la tendencia a fallar por esbeltez del alma.

Existen diversos modelos de corte, pero como principio básico se debe garantizar que la combinación de los agujeros en la longitud de la viga produzca en los extremos de la misma, secciones de alma llena, con el fin de que la sección transversal en dichas zonas sea capaz de soportar los altos esfuerzos cortantes, sino será necesario rellenar las aberturas con una plancha o reforzar uno o varios alveolos.

Por razones económicas, se debe evitar el uso de placas y refuerzos.

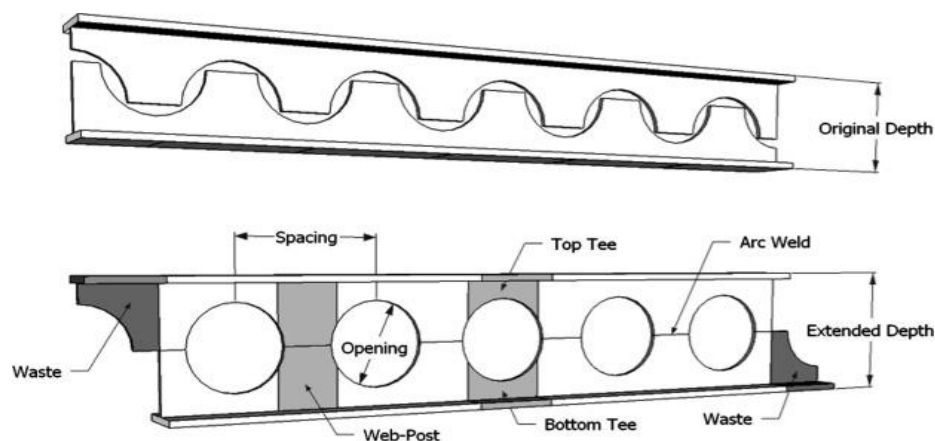


Figura 2 Partes de viga de acero de alma aligerada. A las vigas con este tipo de abertura se les conoce como vigas celulares

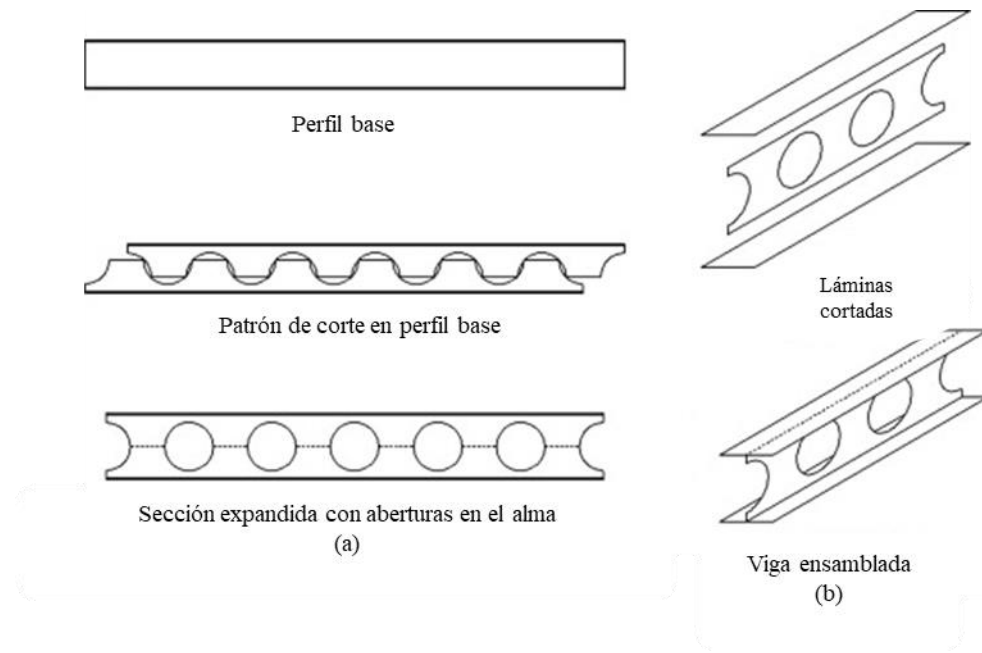


Figura 3 Proceso de expansión a partir de corte y unión de perfil laminado(a). Proceso de ensamblaje a partir de láminas (b)

2.3 Aplicación de las vigas alveoladas

Estos tipos de vigas son ideales para cubrir grandes luces en techos curvos de cubierta, cercanas a 40 m, con condición simplemente apoyadas o continuas. Su aplicación genera competitividad con las vigas en celosía debido a la disminución de intervenciones en el proceso de montaje de la estructura. En las vigas celulares incluso se puede proporcionar la opción de curvatura a lo largo de su longitud sin generar deformaciones en sus alveolos.

Son atractivas para los arquitectos además de su practicidad en la utilización de los espacios libres, evitando el uso de materiales para cielo raso. Ideal en estructuras con requerimientos de instalaciones adicionales en el interior del espacio libre, como calefacción, ventilación, aire acondicionado, etc. Se puede alcanzar luces libres de hasta 15 m planos, permitiendo el paso de las distintas instalaciones a través de los agujeros.

En procesos de rehabilitación de las estructuras, estas vigas son adaptables a la condición dada, gracias a la ligereza y flexibilidad que ofrecen.

Su aplicación para estacionamientos (ver fig. 4), es muy útil debido al alcance de grandes luces, facilidad en la distribución de los sistemas de agua, y además son ideales para este tipo de estructuras ya que permite una mejor circulación de los gases acumulados en estos espacios.

En el diseño de estructuras mixtas genera una construcción más ligera y es adaptable a los requerimientos solicitados con diseños de vigas de alma llena, lo que significa un ahorro en el uso del material.

Pueden ser tanto vigas primarias con condiciones de carga considerable, como vigas secundarias que requieran grandes luces.

El uso de esta alternativa puede resultar costoso en comparación con un diseño convencional, pero es importante recordar que esta propuesta es perfectamente viable cuando no se dispone de los perfiles requeridos, según el diseño estructural.



Figura 4 Viga casteladas usadas en estacionamiento.



Figura 5 Pasarela con vigas alveoladas, ubicada en el Km 8 de la Carretera Panamericana

2.4 Configuración geométrica de las aberturas

La elección de la forma de los alveolos vendrá dada por una serie de requisitos estructurales y estéticos, que se deberán garantizar al momento de la ejecución del proyecto. Se muestra a continuación, una serie de consideraciones generales, independiente de la forma de las aberturas:

- La elección de la forma de los alveolos dependerá del uso de dichos agujeros y/o diseño del arquitecto.
- La ubicación de los alveolos deberá centrarse en el alma.
- La mejor ubicación de las aberturas es la zona central de la luz libre de la viga, en donde las fuerzas cortantes no sean significativas. En los apoyos, la sección del alma debe ser completa, ininterrumpida por agujeros (zona de mayor corte).
- Las dimensiones de los alveolos se verán directamente relacionadas la altura de viga buscada y la condición de carga a aplicar. Si se busca una buena relación altura/peso, las aberturas resultantes tendrán las mayores dimensiones posibles, sin exceder los límites de resistencia y estabilidad. Mientras que, si se hace enfoque en una relación carga/peso, los alveolos serán más pequeños, para así presentar buen comportamiento ante las solicitaciones a la que es sometida dicha viga.

2.4.1 Vigas casteladas

La configuración geométrica de estas aberturas depende básicamente de tres parámetros, ángulo de corte Φ , relación de expansión α y longitud de soldadura “e”.

- Ángulo de corte Φ : influye en el número de aberturas (N) por unidad de longitud en la viga. N será más pequeño cuando el ángulo es pequeño, y N aumentará a medida que el ángulo incremente. Dougherty (1993) señala cómo diferentes ensayos han demostrado que mientras el incremento de N tiene poco efecto sobre la rigidez elástica de la viga castelada, mejora considerablemente la ductilidad y la capacidad de rotación. El ángulo de corte varía entre 45° y 70° . Usualmente se trabaja con 60° .

$$\tan\phi = \frac{h}{b} \quad (2-1)$$

$$b = \frac{h}{\tan\phi} \quad (2-2)$$

$$h_t = h_b = \frac{h - d}{2} \quad (2-3)$$

$$s = 2(b + e) \quad (2-4)$$

Es importante resaltar que las alturas de la sección T superior e inferior en la zona alveolada (h_t y h_b respectivamente) no necesariamente deben ser iguales, estas vigas permiten ofrecer la variación de su inercia a lo largo de la luz. En este trabajo se hace el enfoque de vigas con inercia constante en toda su longitud.

- Relación de expansión α : es una relación de la altura incrementada de la viga luego del proceso de corte y unión. En teoría, la altura original de la viga puede ser modificada hasta alcanzar el doble de su medida original, pero la altura total de las zonas T es un factor limitante. Si las T son muy pequeñas, fallarán por flexión Vierendeel en el tramo de longitud “e”.

En el patrón hexagonal, la altura de corte viene identificada por la letra d.

$$h_s = 2d \quad (2-5)$$

$$h_t = \frac{hs}{4} \quad (2-6)$$

$$h_c = d + h \quad (2-7)$$

$$\alpha = \frac{h_c}{h} \approx 1,5 \quad (2-8)$$

- Longitud de soldadura “e”: como su nombre lo indica, es la longitud soldada del alma conocida como montante, Si dicha longitud es muy pequeña, el alma soldada fallará con corte horizontal y, si esta es muy larga, los cordones (zonas T) podrían fallar por flexión Vierendeel, por lo que un balance razonable entre los dos mecanismos de falla es $e = \frac{h_s}{4}$.
- Jamadar A. M. y Kumbhar P.D. (2015), en su trabajo proponen los siguientes límites generales basados en el Euro código 3 *proyectos de estructuras de acero* y trabajos de campo. Estas aberturas estándar pueden ser modificadas sin afectar el comportamiento estructural. Los límites establecidos son:
 - $1,08 < \frac{s}{h_s} < 1,50$
 - $1,25 < \frac{h_c}{h_s} < 1,75$
 - $h_s \leq 0,8 h_c$
 - $e \leq 0,4(h_s)$
 - Longitud de alma llena extremo de viga $\geq 0,5(h_s)$

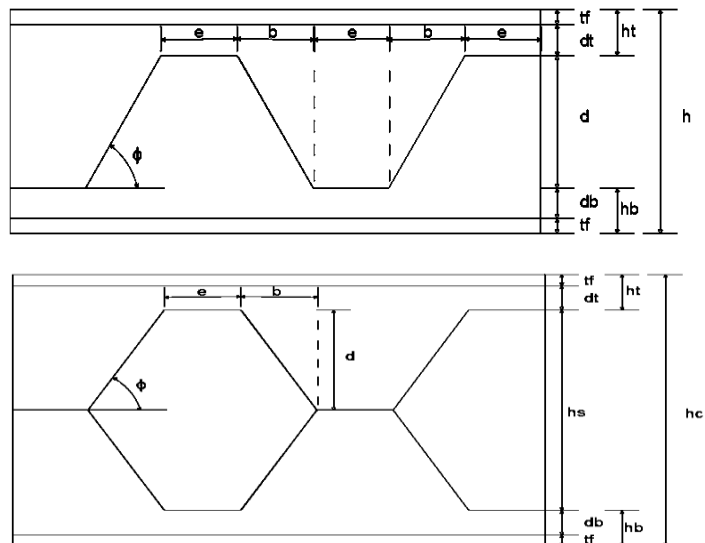


Figura 6 Esquema de segmento de viga castelada

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Vigas celulares

Las características de las secciones circulares de estas vigas dependerán principalmente del diámetro. Se presenta la configuración propuesta por distintos autores.

- Verweij, J.G. (2010) tras la recolección de información de distintas fuentes, propone los siguientes límites geométricos. Estos límites están basados en investigaciones y resultados de ensayos bajo la condición de carga distribuida uniformemente o múltiples puntos de carga, por lo que el autor sugiere que, para la utilización de otros valores distintos a los propuestos, se realicen las pruebas suficientes o cálculos avanzados para justificar su uso.
 - Diámetro de abertura $D_o \leq 0,8 h$
 - Espaciamiento (centro a centro) $s \geq 1,2 D_o$
 - Distancia desde agujero a fin de la viga $s_e \geq 0,5 D_o \quad s_e \geq 0,5 h$
 - Altura de sección T $h_t = h_b \geq t_f + 30mm$
 - Distancia mínima al punto de carga $0,5 h \quad 0,25 D_o$
- ArcelorMittal Europe en su catálogo *Long Products Sections and Merchants Bars ACB Cellular Beams*, establecen un rango de diseño según dos condiciones de diseño.

Para vigas con relación Altura/Peso

- Diámetro de abertura $D_o = 1,0 a 1,3 h$
- Espaciamiento (centro a centro) $s = 1,1 a 1,3 D_o$
- Altura de la viga modificada $h_c = 1,4 a 1,6 h$

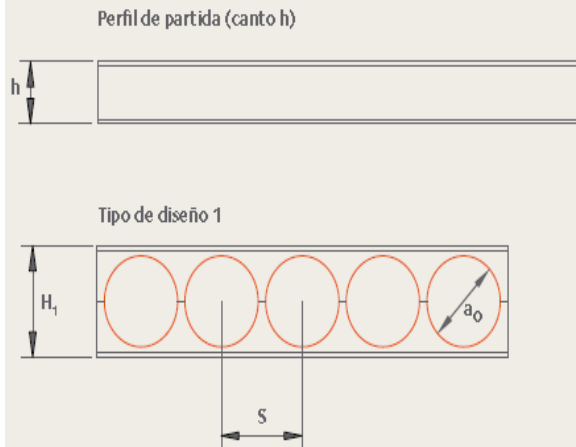
Para vigas con relación Carga/Peso

- Diámetro de abertura $D_o = 0,8 a 1,1 h$
- Espaciamiento (centro a centro) $s = 1,2 a 1,7 D_o$
- Altura de la viga modificada $h_c = 1,3 a 1,4 h$

- MACSTEEL TRADING, en su publicación *Cellbeam program design guide and Property tables* exponen la siguiente configuración
 - Diámetro de abertura $D_{o\min} = 0,7 h \quad D_{o\max} = 1,3 h$
 - Espaciamiento (centro a centro) $s_{\min} = 1,08 D_o \quad s_{\max} = 1,6 h$

Objetivos:

Optimización de la relación canto/peso



Objetivos:

Optimización de la relación carga/peso

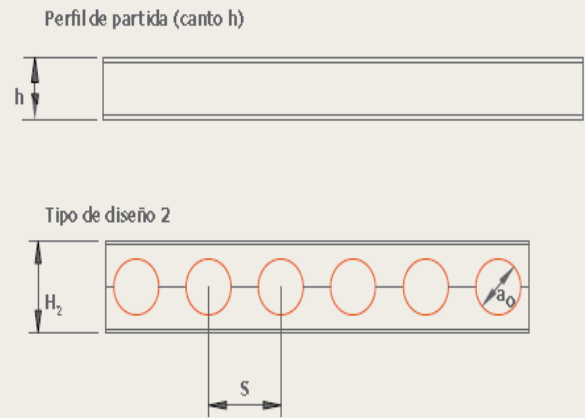


Figura 7 Diferencia entre una viga celular con optimización Altura/Peso (izquierda) y optimización Carga/Peso (derecha).

Fuente: ArcelorMittal

2.5 Ventajas y desventajas de las vigas alveolares

2.5.1 Ventajas

- Debido a la ligereza del peso propio de estas vigas, se logra un ahorro del peso total de la estructura.
- Son ideales para cubrir grandes luces con cargas moderadas, debido a su ligereza de peso.
- Disminución del diseño y ensamblaje de conexiones, al alcanzar mayores luces.
- El diseño es controlado por la capacidad de momento.
- Los ductos o tuberías de servicio pasan a través del alma de las vigas, disminuyendo la altura de entre piso y evitando el uso de material para cielo raso.
- Mayor aprovechamiento de la capacidad del acero, aumentado el módulo de resistencia, el momento de inercia y rigidez, sin necesidad de incrementar el peso propio de la viga.
- Logran la misma resistencia de vigas con alma llena con un significativo menor uso de acero.

- El proceso de construcción es mecánico, el cual sólo requiere corte por flama y unión a través de soldadura.
- Son vigas atractivas que ofrecen a los arquitectos innovación en sus diseños.
- El proceso de construcción y montaje es más sencillo al compararse con las vigas con celosía.
- Bajos costos de mantenimiento y pintura.
- Son aptas en edificios de varios pisos, almacenes comerciales e industriales.
- Se pueden emplear como unidades secundarias o principales en construcciones de mediano o largo alcance.
- Ofrece una variante ante la ausencia de disponibilidad de perfiles en el mercado venezolano, el cual presenta en la actualidad fuerte escasez de los perfiles tradicionales.



Figura 8 Los ductos pueden atravesar el alma del perfil sin necesidad de aumentar las zonas correspondientes al cielo raso, permitiendo el aprovechamiento del espacio además de ofrecer una ambientación diferente.

Fuente: ACB Vigas alveolares

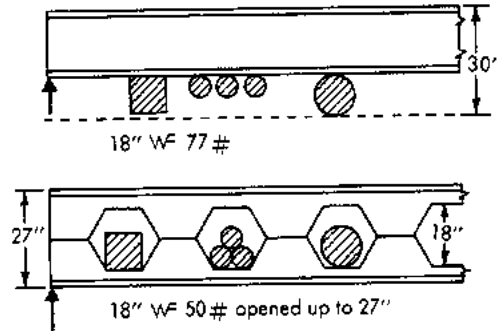


Figura 9 Representación gráfica del ahorro de espacio libre

Fuente: Blodgett, 1991.

2.5.2 Desventajas

- El comportamiento estructural puede diferir al de una viga de alma llena, debido al desconocimiento de los puntos donde se produce los esfuerzos máximos.
- La capacidad de corte en las zonas de alma llena, conocidas en inglés como “web posts” y en español como “montante”, es un factor limitante.
- No es apropiada su aplicación en tramos cortos con grandes solicitaciones.
- Las deformaciones en los cordones (sección T) son importantes y el análisis de las deflexiones es más complejo que para las vigas de alma llena.
- Se generan concentraciones de esfuerzos cerca de las aberturas, generando puntos susceptibles al colapso. Estas concentraciones son causadas por la redistribución de esfuerzos dentro del alma.
- Se desarrollan diversos efectos locales.
- Formación de rotulas plásticas en las esquinas de las aberturas debido a esfuerzos cortante de gran magnitud.
- Los costos de fabricación de este tipo de vigas pueden resultar elevados debido al trabajo de manufacturación (cortar y soldar).
- Presentan problemas de estabilidad en el proceso de montaje de la estructura.

2.6 Mecanismos de falla

La presencia de alveolos implica un comportamiento diferente al de una viga de alma llena. Debido a la continuidad de los agujeros en el miembro, este puede considerarse, para su estudio, como una serie de componentes estructurales ensamblados,

de manera que los montantes, ubicados entre los agujeros, se encuentran a compresión y los cordones horizontales, superior e inferior separados por la altura de la abertura, actuando a compresión y tracción respectivamente. Por la simetría de la sección, si se presentase una reversión de momentos las alas tendrían igual comportamiento tanto en momento positivo como en momento negativo.

Las alas de la viga se encargan de recibir la mayor parte de las tensiones a flexión, mientras que el alma de la misma soporta los esfuerzos cortantes. Por lo que, la pérdida de área en el alma no representa mayor inconveniente respecto a la distribución del momento, sin embargo, para el corte debe considerarse tal modificación.

En las zonas donde se ubican los agujeros se forman dos secciones T, conformadas por las alas y el alma restante de la viga, luego del proceso de corte y unión. La fuerza de corte debe ser transferido por flexión pura en las secciones T, por lo que se puede asumir que dicha fuerza se concentra en el punto medio de la sección, tomando este punto como el de inflexión de la zona T (ver fig. 10). En base a este comportamiento, el diseño de las vigas alveoladas se puede asimilar al mecanismo Vierendeel. Blodgett (1991) presenta las siguientes consideraciones:

1. El tope y el fondo están sujetas a esfuerzos de compresión y tracción respectivamente, inducidos por el momento de flexión principal. Debe haber continuidad de estas secciones a todo lo largo de la viga para permitir la transferencia de estos esfuerzos.
2. El corte vertical en la viga es soportado por el alma, tanto de las secciones sólidas como las secciones T.
3. En la abertura del alma, el corte vertical es dividido igualmente entre el cordón superior e inferior. Si el segmento del agujero es dividido en el medio del cordón y se asume que el corte es aplicado en este punto, este producirá un momento de flexión en la zona T en “voladizo” (0).
4. La fuerza cortante horizontal aplicada en el montante a lo largo del eje neutro puede someter al mismo a pandeo local.

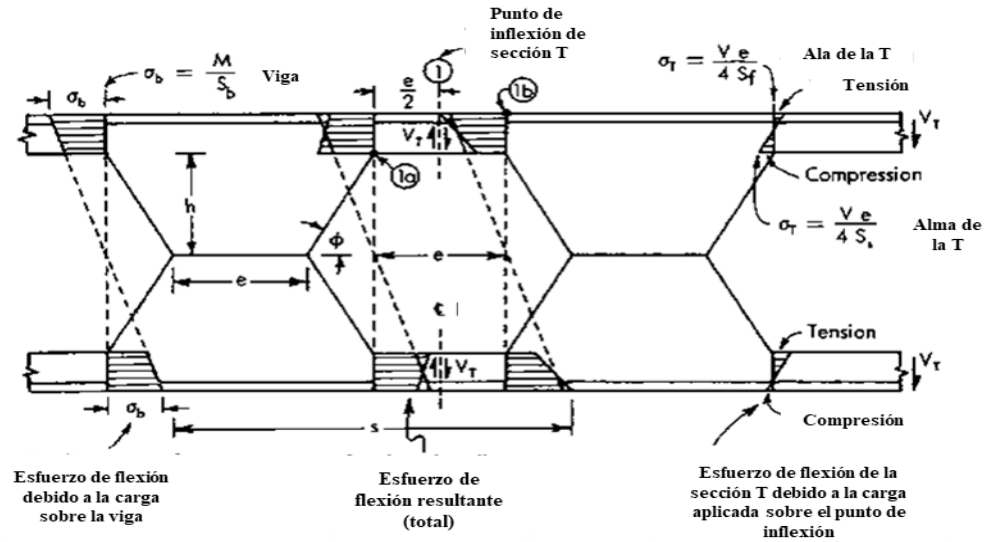


Figura 10 Distribución de los esfuerzos a flexión ocasionados por la carga aplicada a la viga y la fuerza cortante aplicada en el punto de inflexión, ubicado en el centro de los cordones

Fuente: Adaptación de Blodgett, 1991.

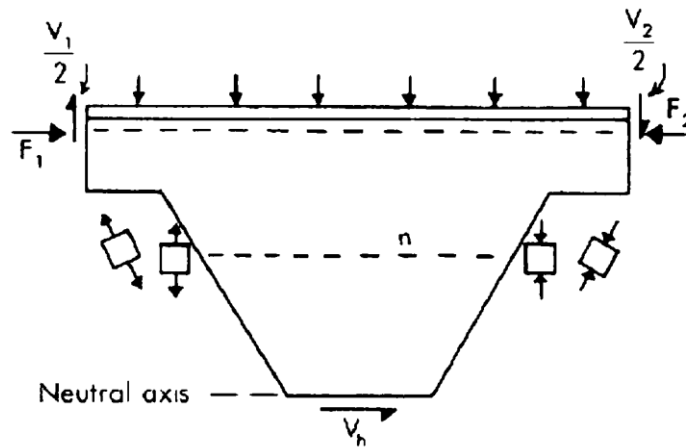


Figura 11 Diagrama de fuerzas actuantes en el segmento superior del montante

Fuente: Blodgett, 1991.

Respecto al alma de la viga, su comportamiento dependerá de las distancias mínimas y máximas entre las aberturas. La separación entre agujeros debe ser tal, que se evite la interacción de los esfuerzos en ella. Si se obtiene valores altos de la relación altura/espesor se puede presentar el caso de viga con alma esbelta, resultando propensa a problemas de inestabilidad.

Verweij (2010) indica que el pandeo local en el alma puede presentarse por fuerzas de compresión o por la combinación de fuerzas cortantes horizontales y verticales, generando esfuerzos diagonales de tracción y compresión en los ejes opuestos de las aberturas respectivamente.

2.6.1 Formación de mecanismos de flexión

Se puede presentar en vigas con grandes luces sujetas a flexión y un valor de la relación altura/luz superior a 20. Bajo flexión pura, la sección obtenida es compacta, los cordones ceden a tracción y compresión antes de plastificarse completamente, Demirdjian (1999). La cedencia de las secciones T es similar a la de la viga de alma llena, a pesar de que la distribución de los esfuerzos a través del eje central es interrumpida por la presencia de los agujeros. Por lo tanto, la capacidad máxima de soporte dentro del plano de la viga castelada, es determinada con la siguiente ecuación, donde Z_x es el módulo de sección plástica de toda la sección a través de su eje central.

$$M_p = Z_x F_y$$

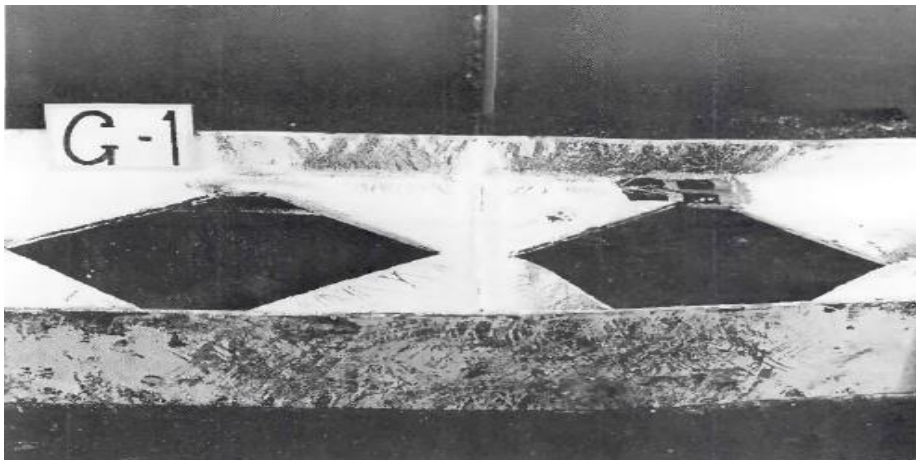


Figura 12 Falla por mecanismo de flexión

Fuente: Hosain M. U. y Speirs W. G., 1973

2.6.2 Formación de mecanismo Vierendeel

En presencia de fuerzas cortantes de gran magnitud en las esquinas de los orificios, estas deben ser transferidas a través de los cordones (zonas T), con momentos resultantes que permitirán mantener el equilibrio en la viga. Esto como consecuencia de la modificación del alma de la misma, extrayendo áreas regulares y continuas en toda su longitud, sufriendo una alteración en la distribución de los esfuerzos.

El mecanismo Vierendeel proviene del estudio de vigas configuradas con elementos verticales a compresión y con elementos horizontales, sometidos a compresión y tracción, sin necesidad del uso de barras diagonales. A diferencia de las cerchas, que transmiten solo cargas axiales, las vigas Vierendeel transmiten momentos flectores.

La falla que presentará la viga vendrá dada por la formación de cuatro (4) articulaciones en los comienzos de los orificios (bielas), debido a la presencia de corte y momento en la sección T, y la forma final resultante de los cordones se asimila a un paralelogramo.

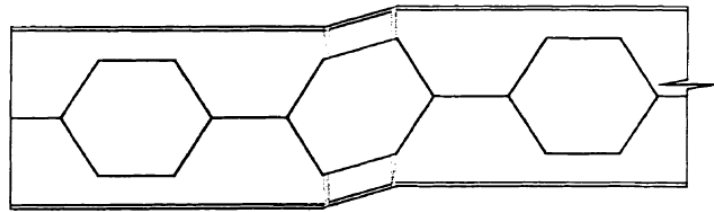


Figura 13 Articulaciones plásticas, formación de paralelogramos

Fuente: Demirdjian, 1999.

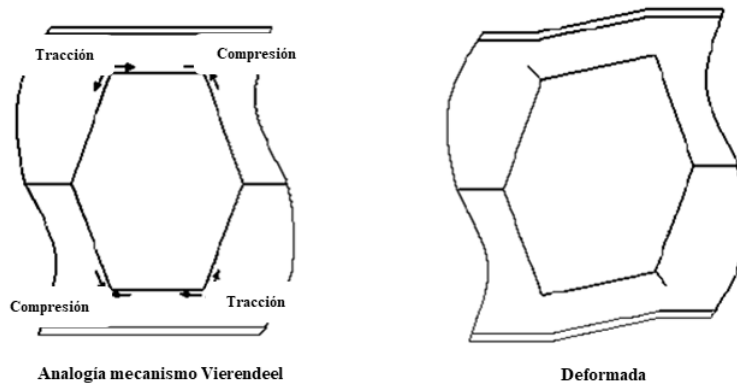


Figura 14 Analogía de mecanismo Vierendeel

2.6.3 Pandeo lateral-torsional

Involucra un desplazamiento lateral y un giro de la sección transversal simultáneamente. Se presenta en vigas con ausencia de soportes laterales en las alas sometidas a compresión. Para algunos autores, la presencia de las aberturas no tiene gran influencia en el comportamiento de las vigas para este mecanismo de colapso (Demirdjian, 1999; Nethercot y Kerdal, 1982). Por otro lado, estudios más recientes han comprobado que la variación de la sección transversal, debido a la presencia de los alveolos, interfiere directamente en el radio de giro del eje de menor inercia, lo que implica una reducción de capacidades resistentes de las vigas de alma aligerada para este mecanismo de colapso.

Hay casos donde la flexión lateral torsional ocurre justamente con el pandeo local del alma, generando distorsión en la misma (Zirakian y Showkati, 2006; Ellobody 2010; Gizejowski y Salah, 2011; Bezerra *et al.*, 2010).

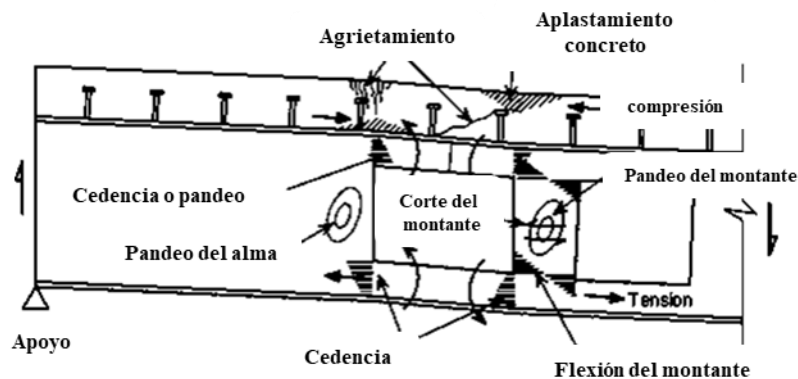


Figura 15 Pandeo lateral torsional de viga mixta.

Fuente: Adaptación de Verweij, 2010.



Figura 16 Pandeo lateral torsional del montante debido a corte vertical.

Fuente: Verweij, 2010.

2.6.4 Pandeo local del alma

El montante del alma puede fallar por pandeo debido a compresión o corte horizontal a través del mismo, dependiendo de la geometría de las aberturas y la magnitud de los esfuerzos actuantes. El pandeo del montante del alma por compresión ocurre para los casos en que el momento flector es predominante, en cuanto a pandeo por corte ocurre cuando la fuerza cortante es significativa en comparación al momento. La capacidad última del montante será gobernada por falla de flexión causada por el desarrollo de una articulación en el mismo o por falla de pandeo.

Al observar el segmento de una viga y su equilibrio de fuerzas, se obtiene una fuerza de corte F que surge a lo largo de la junta soldada (fig. 17), la cual generará solicitaciones de flexión en el alma. Es posible notar que surgirá esfuerzos de tracción entorno al eje AB y compresión respecto al eje CD. Estos esfuerzos pueden provocar pandeo en la mitad superior o inferior del montante, surgiendo así un punto de inflexión en la región de la soldadura. Ese es el caso de colapso del alma por pandeo debido al cortante.

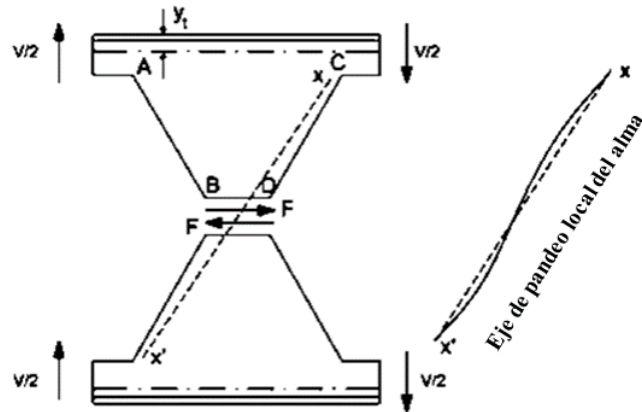


Figura 17 Pandeo del alma por corte.

Fuente: Adaptación de Gomes, 2011.

De un modo general, el pandeo de las vigas puede ocurrir en régimen elástico o inelástico. En el primer caso el fenómeno de inestabilidad se da cuando los esfuerzos aún no han alcanzado el límite de elasticidad del material. En el segundo, el pandeo ocurre después del inicio de la plastificación de material.

Gomes (2011) señala el trabajo de Delesques (1968), en el cual se realiza un estudio sobre la estabilidad de los montantes del alma de vigas, con patrón de corte Litzka, asumiendo un comportamiento indefinidamente elástico. Por ende, en base a los resultados experimentales, se concluye que el pandeo elástico es improbable a ocurrir.

2.6.5 Pandeo local del alma por cizallamiento

Puede ser influenciado por la geometría de la abertura y por la adición de placas expansoras de la altura de la viga (vigas peraltadas), de acuerdo con las relaciones definidas por Zaarour y Redwood (1996):

- Altura de la abertura versus altura total de la sección.
- Altura de abertura versus longitud mínima del montante del alma.

2.6.6 Pandeo local del alma por compresión

Gomes (2011), indica que, en el pandeo por compresión, el alma sufre un desplazamiento fuera del plano de la viga sin que ocurra torsión. Normalmente este mecanismo de colapso ocurre en puntos de carga concentrada o de apoyo.

Cualquier carga transversal directamente aplicada en el ala superior de la viga, es tomada en el alma como corte vertical. Al evaluar un segmento de viga de longitud “s”, la mitad de la carga transversal aplicada se deberá transferir como compresión a través del montante del alma (longitud del montante “e”), hasta el cordón inferior. El corte es dividido igualmente los cordones, superior e inferior.

2.6.7 Ruptura de las juntas soldadas en los montantes

Ocurre cuando se reduce la longitud “e” con el objetivo de disminuir el efecto de momento secundario Gomes (2011). Ensayos realizados, enfocados en la ruptura de la soldadura, demuestran que normalmente las vigas alcanzan su capacidad máxima antes que otros mecanismos de colapso (Kerdal y Nethercot 1984). De esa manera, se presentará ruptura de la junta soldada si los esfuerzos cortantes locales alcanzan la fluencia del material. En algunos casos, se observa una deformación excesiva en la proximidad de la soldadura, sin rotura.

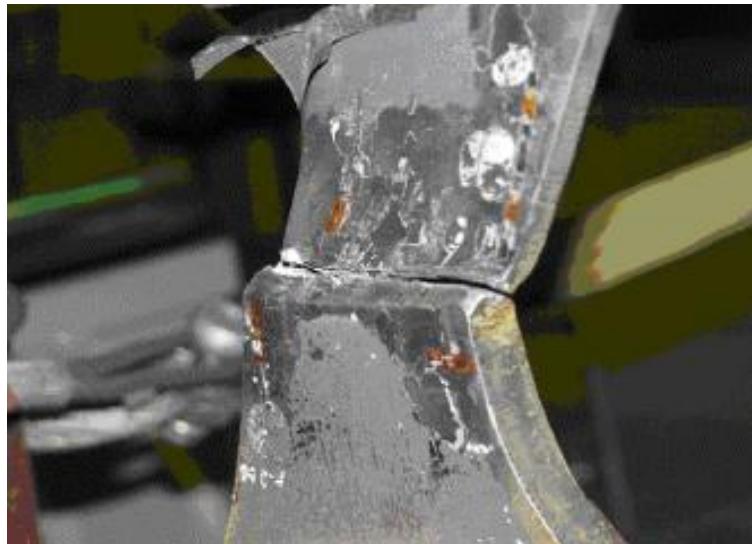


Figura 18 Ruptura de la soldadura en el montante del alma.

Fuente: Verweij, 2010.

2.7 Propiedades de la sección transversal

La geometría de la sección transversal influye en las ecuaciones de sus propiedades, como son: momento de inercia, módulo de sección elástico y módulo de

sección plástico. Bradley (2003), en su trabajo propone tres enfoques de estudio en la sección transversal de la viga.

2.7.1 Sección “T”

El montante no contribuye al arriostramiento lateral y estabilidad de la viga castelada. La sección transversal es tomada como dos T, completamente simétrica respecto a los dos ejes principales. Este análisis es el más conservador y consiste en una sección T superior, ubicada en el tope del agujero, y una sección T en la parte inferior, separadas según el eje fuerte, a una distancia igual a la altura de la abertura (Figura 19)

El centro de gravedad y el centro de corte coinciden en el mismo punto. Esta configuración de las aberturas es la más eficiente, respecto al proceso de construcción y armado de la viga.

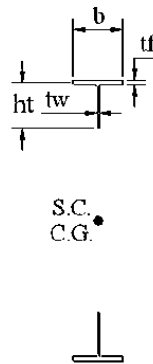


Figura 19 Sección transversal T

Fuente: Bradley, 2003.

2.7.2 Sección de alma llena

La sección transversal presentada es la de un sólido en su totalidad, sin interrupción por aberturas de ningún tipo. Esta sección es la menos conservadora, ya que los resultados arrojados, se relacionarán con una distribución continua de esfuerzos, escenario que no se presenta en toda la longitud de la viga ya que, en presencia de aberturas, tales distribuciones se ven interrumpidas y alteradas. Las ecuaciones para esta sección son las mismas que para la sección de un perfil laminado.

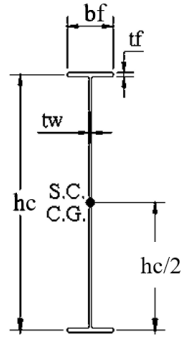


Figura 20 Sección transversal con alma llena.

Fuente: Adaptado de Bradley, 2003.

2.7.3 Sección ponderada

Para el cálculo de las propiedades de la sección ponderada, se considera el segmento de viga con alma sólida, el segmento de transición con longitud “b” y el de los cordones (zona T). La geometría del agujero es utilizada para calcular un porcentaje de la viga, asociado a las diferentes secciones que presenta la misma, bien sea la T, la de alma llena y la de transición. Las propiedades para un punto dado dentro de la longitud “b” pueden ser encontradas mediante interpolación y, también se puede obtener una inercia equivalente, como se verá más adelante.

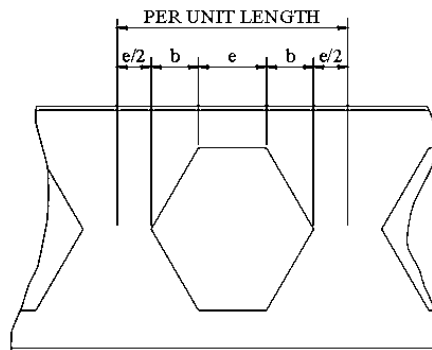


Figura 21 Segmento de viga.

Fuente: Bradley, 2003.

A continuación, se presenta un resumen de las propiedades de las diferentes secciones, según los ejes principales de tales secciones. Las ecuaciones se encuentran desarrolladas en el **Anexo 3**.

Tabla 1 -Comparación de propiedades geométricas de las diferentes secciones transversales de una viga castelada

Propiedad	Sección Alveolada	Sección Alma llena
A	$h_c t_w + 2(b_f - t_w)t_f$	$2h_t t_w + 2(b_f - t_w)t_f$
I_x	$\frac{b_f t_f^3}{6} + b_f t_f \left(\frac{h_c - t_f}{2}\right)^2 + \frac{t_w d_t^3}{6} + t_w d_t \left(\frac{h_s + d_t}{2}\right)^2$	$\frac{b_f t_f^3}{6} + \frac{b_f t_f (h_c - t_f)^2}{2} + \frac{t_w (h_c - 2t_f)^3}{12}$
I_y	$\frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{d_t t_w^3}{6}$	$\frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{(h_c - 2t_f)t_w^3}{12}$
S_x	$\frac{1}{h_c} \left[\frac{b_f t_f^3}{3} + b_f t_f (h_c - t_f)^2 + \frac{t_w d_t^3}{3} + t_w d_t (h_s + d_t)^2 \right]$	$\frac{1}{h_c} \left[\frac{b_f t_f^3}{3} + b_f t_f (h_c - t_f)^2 + \frac{t_w (h_c - 2t_f)^3}{6} \right]$
S_y	$\frac{1}{3} \left[\frac{d_t t_w^3}{b_f} + t_f b_f^2 \right]$	$\frac{1}{6} \left[2t_f b_f^2 + \frac{(h_c - 2t_f)t_w^3}{b_f} \right]$
Z_x	$(b_f t_f)(h_c - t_f) + d_t t_w (h_s + d_t)$	$b_f t_f (h_c - t_f) + \frac{(h_c - 2t_f)^2 t_w}{4}$
Z_y	$\frac{1}{2} (d_t t_w^2 + b_f^2 t_f)$	$\frac{(h_c - 2t_f)t_w^2}{4} + \frac{t_f b_f^2}{2}$

Fuente: Elaboración propia

2.8 Estados límites por resistencia

2.8.1 Capacidad de corte de la viga

Jamadar A. M. y Kumbhar P.D. (2015) indican que el corte máximo inducido, vertical y horizontal en la viga, debido a cargas externas deberá ser menor que la capacidad de corte vertical y horizontal respectivamente.

- Corte vertical en sección de alma llena

$$V_n = 0,6 F_y A_g c_{v1} \quad (2-9)$$

$$A_g = (h_c - 2t_f)t_w \quad (2-10)$$

Donde

$$\phi_v = 1,00$$

El corte vertical se calcula para la sección de alma llena y la sección alveolada, según lo indicado en el capítulo G de la norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para construcción de acero”.

Sección de alma llena, se busca el factor c_{v1}

$$\text{Cuando } \frac{h_w}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$c_{v1} = 1,0$$

$$\text{Cuando } \frac{h_w}{t_w} > 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$c_{v1} = \frac{1,10 \sqrt{k_v E / F_y}}{h_t / t_w}$$

- Corte vertical en sección alveolada

$$V_n = 0,6 F_y A_A c_{v2} \quad (2-11)$$

$$A_A = (h_c - h_s) t_w \quad (2-12)$$

Sección de alma alveolada c_{v2}

$$\text{Cuando } \frac{h_t}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$c_{v2} = 1,0$$

$$\text{Cuando } 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h_t}{t_w} \leq 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$c_{v2} = \frac{1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}}{\frac{h_t}{t_w}}$$

$$\text{Cuando } \frac{h_t}{t_w} > 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$c_{v2} = \frac{1,51 k_v E}{(h_t / t_w)^2 F_y}$$

El factor k_v debe tomarse como 5.34 para la sección de alma llena y como 1.2 para la sección castelada.

Para sección de alma llena y alma alveolada Φ_v

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$$

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} > 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 0,90$$

- Corte horizontal en sección alveolada

$$V_n = 0,6F_y A_w \quad (2-13)$$

$$A_w = e t_w \quad (2-14)$$

La fuerza cortante admisible, según LRFD es

$$V_n = \phi_v V_n \quad (2-15)$$

2.8.2 Capacidad a flexión de la viga

Según Bradley (2003), al realizar el proceso de montaje de la viga, a esta se le debe agregar una carga por construcción para obtener el momento más desfavorable de la misma. El autor propone una carga de construcción P de 300 lb (equivalente a 136 kg).

$$M = \frac{w L_b^2}{8} + \frac{P L_b}{4} \quad (2-16)$$

Jamadar A. M. y Kumbhar P.D. (2015), señalan los diseños propuestos por el Euro código para vigas casteladas.

Se debe garantizar que el momento máximo inducido en la viga, debido a cargas externas, sea inferior a la capacidad de momento en los cordones (superior e inferior).

$$M_u < M_T$$

$$M_T = F_y A_A y_t$$

La resistencia a la flexión de la sección perforada debe ser suficiente para resistir el momento flector aplicado. La posición óptima para las aberturas del alma a lo largo del tramo depende de la proporción relativa del momento de flexión y de la fuerza de corte. En general, Las aberturas tienen un mayor efecto sobre la resistencia al corte de la viga que la resistencia a la flexión.

Con el momento obtenido se busca el esfuerzo axial requerido en la viga, en función de las secciones alveoladas, obteniendo

$$T = \left(\frac{M_r}{y_t} \right) \quad (2-17)$$

Donde

M_r = esfuerzo a flexión requerido

y_t = distancia entre los centroides de las secciones T superior e inferior

2.8.2.1 Cálculo de esfuerzo de flexión nominal

El esfuerzo a flexión calculado debe compararse con el esfuerzo a flexión requerido para soportar el momento vierendeel, para una longitud no arriostrada equivalente a la longitud del cordón ($L_b = e$ para viga castelada, $L_b = D_o/2$ para viga celular).

El AISC, indica que el esfuerzo a flexión nominal será el menor valor obtenido de los estados límites de cedencia, pandeo lateral-torsional, pandeo local del ala y pandeo local del alma de los cordones. Donde, según la norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para construcción de acero” en la sección F9 señala que el esfuerzo nominal a flexión será

$$M_n = M_p \quad (2-18)$$

$$M_p = M_y \quad (2-19)$$

Donde

$M_y = F_y S_{x-T}$ = momento de cedencia alrededor del eje de flexión

S_{x-T} = módulo de sección elástico de la sección T alrededor del eje x

Debido a que el alma de la sección está a compresión, el momento plástico está limitado al mínimo módulo de sección de la sección T.

2.8.2.2 Flexión vierendeel en zonas T

La flexión Vierendeel se desarrolla de manera similar tanto para vigas que pertenecen a un sistema de losas mixtas como las que no forman parte del mismo.

Para secciones compuestas (acero y concreto), el concreto recibe una parte de la fuerza cortante global, reduciendo el momento Vierendeel. La fuerza nominal de concreto viene dada por V_c .

Calculando la fuerza de concreto V_{nc}

$$V_{nc} = 0,53(\sqrt{f'c})b_{ef}t_c \quad (2-20)$$

La fuerza admisible de corte, V_c será

$$V_c = \phi_{cv}V_{nc} \quad (2-21)$$

Donde

$$\phi_{cv} = 0.75 \text{ (LRFD)}$$

La fuerza neta se obtendrá con

$$V_{r-net} = V_r - V_c \quad (2-22)$$

La fuerza de flexión Vierendeel requerida será

$$M_{vr} = V_{r-net} \left(\frac{A_T}{A_n} \right) \left(\frac{e}{2} \right) \quad (2-23)$$

Donde

A_n =área neta, suma de las áreas T en las vigas casteladas

A_T = área de sección T

Shaikh A. y Autade P. (2016) guiándose del enfoque dado por Olander o Sahmel, explican que las combinaciones de las fuerzas actuantes en los cordones deben ser chequeadas con la siguiente ecuación

$$\frac{P_o}{P_u} + \frac{M}{M_p} \leq 1 \quad (2-24)$$

P_o y M son las fuerzas y momentos en la sección para un ángulo θ respecto a la vertical. El valor de M_p depende de la clasificación de la sección

$$P_u = A_{cr}F_y \quad (2-25)$$

$$M_p = Z_x F_y \text{ Para secciones plásticas} \quad (2-26)$$

2.8.3 Formación de mecanismo plástico

Como se ha mencionado anteriormente, las vigas con aberturas en el alma sufren una modificación en la distribución de esfuerzos y estos tienden a concentrarse en las zonas más vulnerables, que son los cordones. Por lo que, aislando un segmento de viga de

longitud “s”, situado entre las articulaciones virtuales, este se puede evaluar como un elemento aislado, teniendo en el cordón superior una especie de tramo en voladizo. Gomes (2011) propone dos secciones de estudio en la zona T, siendo la 1 y 2 como se muestra en la figura 22. Se hace enfoque en la sección transversal que posea menor área sólida, debido a la presencia de los agujeros, ya que es más vulnerable y está sujeta a los esfuerzos ocasionados por el momento flector M y esfuerzos de tracción debido a la fuerza cortante V , asumiendo la hipótesis de que dicha fuerza es dividida igualmente entre los dos cordones ($V/2$).

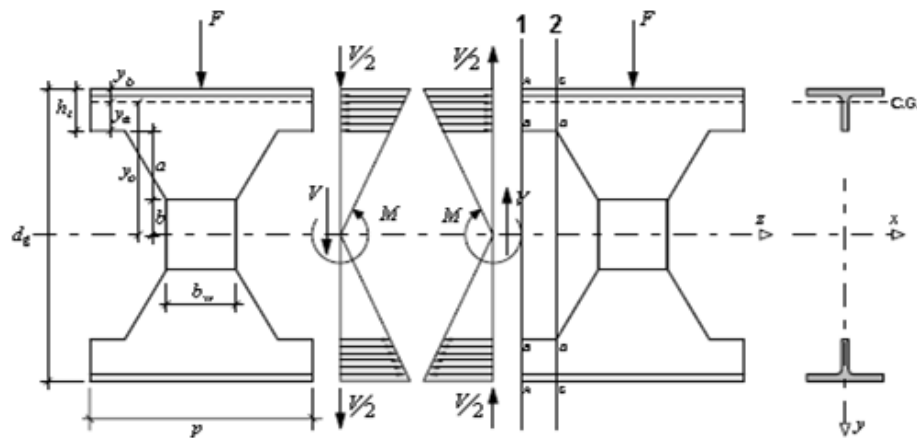


Figura 22 Elementos adoptados para análisis de tensiones en la sección transversal.

Fuente: Gomes, 2011.

2.8.3.1 Análisis de la sección transversal 1

La distribución de tensiones derivada del momento flector viene dada por la ecuación.

$$\sigma_M = \frac{M}{I_x} y \quad (2-27)$$

La inercia I_x se toma para la viga de sección con mayor abertura (condición más desfavorable) y, según la distribución de esfuerzos se tiene las ecuaciones aplicables para el punto A y B respectivamente.

$$\sigma_{M,A} = \frac{M}{I_x} \frac{h_c}{2} = \frac{M}{S_x} \quad (2-28)$$

$$\sigma_{M,B} = \frac{M}{I_x} (y_o - y_a) \quad (2-29)$$

Manteniendo la misma hipótesis que para las vigas convencionales de alma llena, es decir, que las deformaciones por corte son tan pequeñas que su cálculo puede ser ignorado, el esfuerzo máximo a ser considerado para efecto de dimensionamiento es el esfuerzo normal correspondiente al punto A, cuyo valor depende del módulo resistente de la sección alveolada. Con base a este razonamiento, se puede usar el módulo resistente como una primera aproximación del pre-dimensionado de la viga.

$$\sigma_{M,A} = \frac{M}{S_x} \leq F_y \quad (2-30)$$

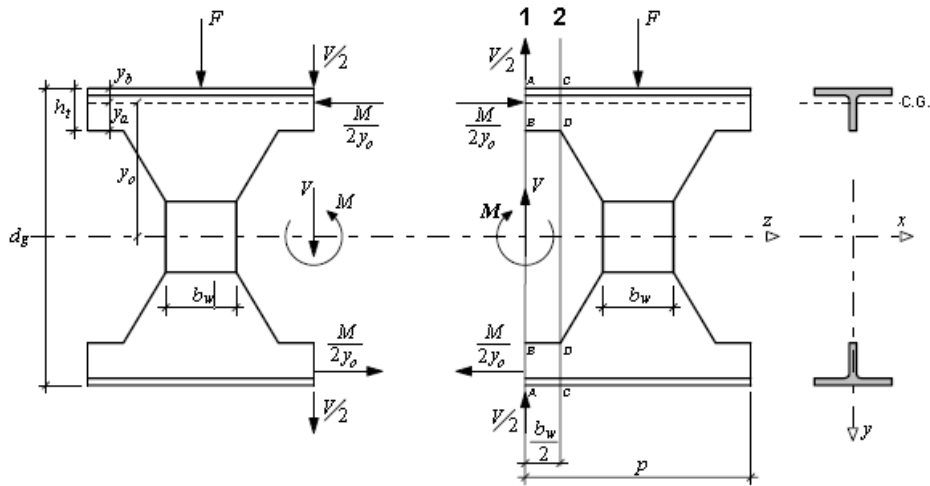


Figura 23 Equilibrio de fuerzas en el agujero de la viga.

Fuente: Gomes, 2011.

El momento flector actuante M en el sistema de fuerzas es equilibrado por un par contrario, generado por las fuerzas de valor $M/2y_o$, separadas entre los centros de gravedad de los cordones (sección T). Halleux (1966) demuestra lo razonable que es admitir una distribución uniforme de esfuerzos normales a los cordones. En ese caso el esfuerzo puede ser calculado con la siguiente ecuación

$$\sigma_M = \frac{M}{2y_o} \frac{1}{A_T} = \frac{M}{Z_x} \leq F_y \quad (2-31)$$

Al comparar las ecuaciones anteriores, sin tener en cuenta una posible influencia de cizallamiento originado por la fuerza cortante, se puede evaluar el aumento de la

capacidad de carga, mediante la aceptación de la sección de plastificación completa. Para admitir la hipótesis de una distribución variable de esfuerzos, normales a la sección del cordón, se debe cumplir

$$\frac{M}{F_y S_x} \leq 1 \quad (2-32)$$

Para admitir la hipótesis de una distribución uniforme, de esfuerzos normales a la sección del cordón, se debe cumplir

$$\frac{M}{F_y Z_x} \leq 1 \quad (2-33)$$

Manipulando las ecuaciones (2-32) y (2-33)

$$\frac{Z_x}{S_x} = \frac{2y_o A_t}{S_x} \quad \text{y} \quad S_x = \frac{2y_o^2 A_t}{\frac{h_c}{2}} = \frac{4y_o^2 A_t}{h_c}$$

$$\frac{Z_x}{S_x} = \frac{h_c}{2y_o} \quad (2-34)$$

Como se puede percibir, el módulo de sección resistente elástico de la zona del alveolo fue calculado de forma aproximada, ignorando la inercia propia de los dos cordones. Cimadevila (2000), las diferencias obtenidas con el uso de la expresión simplificada no superan el 1%.

Considerando una situación real, en que los esfuerzos por cizallamiento están presentes debido a las fuerzas cortantes se tiene dos posibles situaciones. Admitiendo un análisis de régimen elástico, en el cual se tiene una hipótesis de distribución de esfuerzos variables, la tensión normal máxima es alcanzada en el punto A, en el cual el valor de corte es nulo. Por lo tanto, con esa hipótesis, la condición de estado límite ultimo de agotamiento viene expresado por la ecuación (2-27).

Si se admite un análisis en régimen plástico, como propone Halleux, una distribución de esfuerzos normales y uniformes, la condición más restrictiva se dará en la fibra sujeta al máximo esfuerzo cortante. En ese caso, se tiene un problema de esfuerzos combinados y el análisis de esfuerzos deberá ser realizado según un criterio de cedencia que aplique a la situación. La condición de agotamiento puede ser escrita de la siguiente forma

$$\frac{Z_x}{S_x} = K$$

$$\sigma = \frac{M}{Z_x} = \frac{M}{KS_x} = \frac{F_y}{K} \quad (2-35)$$

Utilizando el criterio de Von Mises, se tiene que

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq F_y \quad (2-36)$$

Sustituyendo la ecuación (2-35) en la ecuación (2-36)

$$\left(\frac{F_y}{K}\right)^2 + 3\tau^2 \leq F_y^2 \quad (2-37)$$

$$\tau \leq \frac{\sqrt{K^2 - 1}}{K\sqrt{3}} F_y \leq \frac{\sqrt{K^2 - 1}}{K} \tau_y \quad (2-38)$$

El valor de K depende de la geometría de la sección del perfil.

La distribución de esfuerzos cortantes en el ala es lineal, con los siguientes puntos significativos

- Si $s = 0$ $\tau = 0$
- Si $s = \frac{b_f}{2}$ $\tau = \frac{V}{4I_{tx}} (2y_b - t_f) \frac{b_f}{2}$

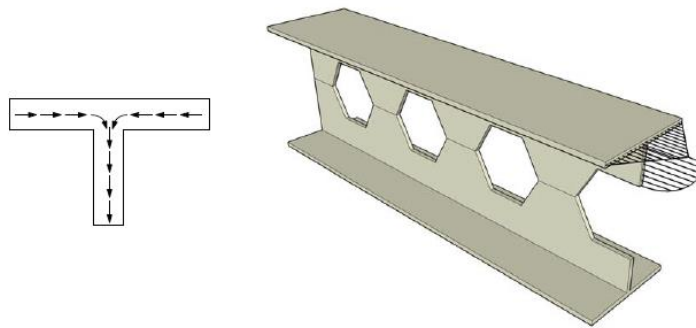


Figura 24 Distribución de esfuerzos cortantes en zona T.

Fuente: Gomes, 2011.

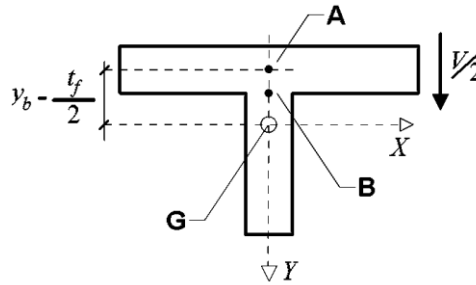


Figura 25 Puntos clave en el estudio de la distribución de esfuerzos cortantes en la sección 1 del cortante.

Fuente: Gomes, 2011.

A pesar de que la distribución del cortante es lineal en el ala, no resulta así en el alma. La figura anterior muestra los puntos claves en tal distribución. El punto B sufrirá la suma de los esfuerzos cortantes provenientes del alma y del ala, por lo que, el resultante será mucho mayor a los esfuerzos del ala. Además, como el alma generalmente posee un espesor inferior al del ala, tal diferencia puede propiciar susceptibilidad de grandes concentraciones de esfuerzos en esa zona. Gomes (2011) propone como solución a ese problema redondear la junta alma-ala.

$$\tau_A = \frac{V}{4I_{tx}} (2y_b - t_f) \frac{b_f}{2} \quad (2-39)$$

$$\tau_B = \frac{V}{4I_{tx}} (2y_b - t_f) b_f \frac{t_f}{2} \quad (2-40)$$

La condición de verificación en la sección 1 vendrá dada por la ecuación.

$$\sigma_{max} = \sigma_M = \frac{M}{2y_o A_T} \quad (2-41)$$

$$\tau_{max} = \frac{V y_a^2}{4I_{tx}} \quad (2-42)$$

$$\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2 \leq F_y^2 \quad (2-43)$$

$$\left(\frac{M}{2y_o A_T} \right)^2 + 3 \left(\frac{V y_a^2}{4I_{tx}} \right)^2 \leq F_y^2 \quad (2-44)$$

$$\left(\frac{M}{2y_o A_T F_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{V y_a^2}{4I_{tx} F_y} \right)^2 \leq 1 \quad (2-45)$$

Con la última ecuación se puede verificar la capacidad resistente en la sección 1, considerando la combinación de esfuerzos actuantes en cualquier punto de la viga, en función del momento flector y la fuerza cortante en ese punto.

2.8.3.2 Análisis de la sección transversal 2

El análisis de la sección transversal 2 demuestra que en esta se desarrollan esfuerzos normales, resultantes del momento flector y esfuerzos cortantes debido a la fuerza de corte, más a dicha sección se le debe sumar un nuevo esfuerzo normal, causado por la acción de la fuerza cortante aplicada en el punto medio del cordón, la cual genera una nueva flexión.

Las siguientes ecuaciones corresponde al momento causado por la fuerza cortante aplicada en el punto medio del cordón y el esfuerzo resultante

$$M_v = \frac{V}{2} \left(\frac{e}{2} \right) = \frac{Ve}{4} \quad (2-46)$$

$$\sigma_v = \frac{Ve y_a}{4 I_{tx}} \quad (2-47)$$

El esfuerzo normal máximo se producirá en la fibra más alejada, en este caso el borde del alma de la sección T (y_a).

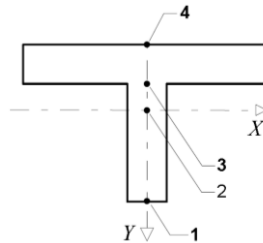


Figura 26 Puntos clave para el estudio de esfuerzos en la sección transversal 2 del cordón.

Fuente: Gomes, 2011.

Análisis de esfuerzos en el punto 1

$$\sigma_M = \frac{M}{2y_o A_T} \quad \sigma_v = \frac{Ve y_a}{4 I_{tx}} \quad \tau = 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_M + \sigma_v \leq F_y \quad (2-48)$$

$$\frac{M}{2y_o A_T} + \frac{V e y_a}{4 I_{tx}} \leq F_y \quad (2-49)$$

$$\frac{4M I_{tx} + 2y_o A_T V e y_a}{2y_o A_T 4I_{tx}} \leq F_y \quad (2-50)$$

$$M + \left(\frac{y_o A_T e y_a}{2I_{tx}}\right)V \leq 2y_o A_T F_y = M_{plo} \quad (2-51)$$

M_{plo} es el momento de plastificación de la viga alveolada, en la sección donde se ubica la abertura

La ecuación (2-49) puede ser reescrita como se muestra a continuación, donde el valor de c dependerá de las características del perfil y del tipo de abertura que este tenga

$$M + cV \leq M_{plo} \quad (2-52)$$

$$c = \frac{y_o A_T e y_a}{2I_{tx}} \quad (2-53)$$

Cada alveolo en el alma de la viga está sometido a una combinación momento-cortante, Delesques (1969) plantea un método gráfico para encontrar la sección más crítica de la viga, es decir, la que resiste la mayor combinación de flexión y corte. La sección crítica será aquella que presente mayor distancia entre los diagramas de corte y momento de la viga.

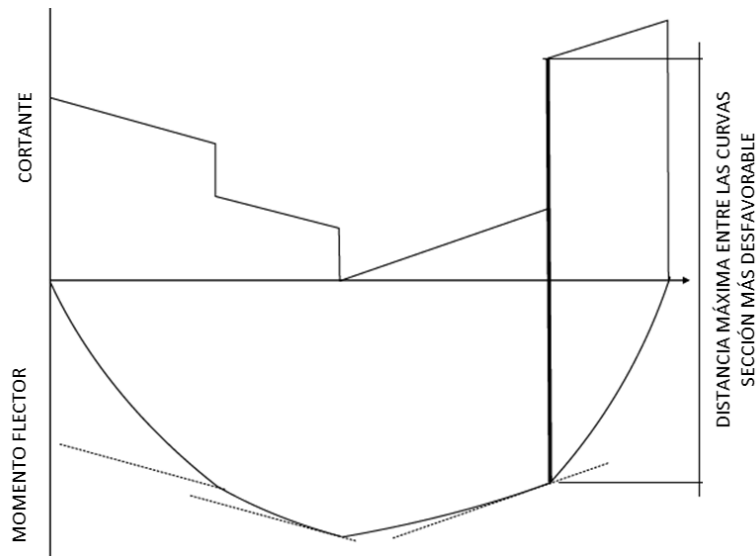


Figura 27 Método gráfico para determinar sección más desfavorable de la viga, propuesto por Delesques 1969.

Fuente: Adaptación de Gomes, 2011.

De manera analítica, se puede determinar la sección más desfavorable de la siguiente forma

$$\frac{d\sigma_1}{dx} = \frac{dM}{dx} + c \frac{dV}{dx} \quad (2-54)$$

Para el caso de una viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida, se tiene las siguientes ecuaciones

$$M = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2} \quad \frac{dM}{dx} = \frac{qL}{2} - qx$$

$$V = \frac{qL}{2} - qx \quad \frac{dV}{dx} = -q$$

$$\frac{dM}{dx} + c \frac{dV}{dx} = 0$$

$$x = \frac{L}{2} - c \quad (2-55)$$

Donde, x representa la longitud, medida desde un extremo de la viga, hasta donde se ubica la sección más crítica. Con la ecuación anterior se observa que dicha sección no coincide con la del momento máximo, como ocurre con las vigas de alma llena.

Análisis de esfuerzos en el punto 2

$$\sigma_M = \frac{M}{2y_o A_T} \quad \sigma_v = 0 \quad \tau = \frac{Vy_a^2}{4I_{tx}}$$

$$\sigma_{max}^2 + 3\tau^2 \leq F_y^2 \quad (2-56)$$

$$\left(\frac{M}{2y_o A_T}\right)^2 + 3\left(\frac{Vy_a^2}{4I_{tx}}\right)^2 \leq F_y^2 \quad (2-57)$$

$$M^2 + 3\left(\frac{y_o A_T y_a^2}{2I_{tx}}\right)^2 V^2 \leq 2y_o A_T F_y^2 = M_{plo}^2 \quad (2-58)$$

$$\sqrt{M^2 + c_1^2 V^2} \leq M_{plo} \quad (2-59)$$

$$c_1 = \frac{\sqrt{3}y_o A_T y_a^2}{2I_{tx}} \quad (2-60)$$

El valor del coeficiente c_1 se puede obtener en función del coeficiente c .

$$\left[\frac{c_1}{c}\right]^2 = \left[\frac{\frac{\sqrt{3}y_o A_T y_a^2}{2I_{tx}}}{\frac{y_o A_T y_a^2}{2I_{tx}}}\right]^2 = \frac{3y_a^2}{e^2}$$

$$c_1^2 = 3c^2 \frac{y_a^2}{e^2} \quad (2-61)$$

Análisis de esfuerzos en el punto 3

El punto 3 se ubica en la unión alma-ala.

$$\sigma_M = \frac{M}{2y_o A_T} \quad \sigma_v = \frac{Ve}{4} \left(\frac{y_b - t_f}{I_{tx}} \right) \quad \tau = \frac{V}{4I_{tx}} (h_t - t_f) [2y_a - (h_t - t_f)]$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq F_y \quad (2-66)$$

$$\left[\frac{M}{2y_o A_T} + \frac{Ve}{4} \left(\frac{y_b - t_f}{I_{tx}} \right) \right]^2 + 3 \left[\frac{V}{4I_{tx}} (h_t - t_f) [2y_a - (h_t - t_f)] \right]^2 \leq F_y^2 \quad (2-62)$$

En las vigas alveolares, se puede observar que el valor de $h_t - t_f$ se aproxima al valor de y_a (fig. 23). Esto quiere decir que el centro de gravedad del cordón se ubica muy próximo a la junta alma-ala.

Análisis de esfuerzos en el punto 4

$$\sigma_M = \frac{M}{2y_o A_T} \quad \sigma_v = \frac{Ve y_b}{4 I_{tx}} \quad \tau = 0$$

Es evidente que, una vez que $y_b < y_a$ el estado de esfuerzos en el punto 1 siempre será más desfavorable que el punto 4.

Cimadevila (2000) explica que, cuando se considera una distribución de esfuerzos variables, con tensiones normales (ocasionadas por fuerza cortante) muy bajas en el punto A, la condición más restrictiva referente al dimensionado ocurre para el punto B (fig. 25). Como consecuencia, la consideración de una u otra hipótesis debe ser hecha para dicho punto.

En el punto B, los esfuerzos de flexión originados por el cortante son idénticos, cualquiera que sea la hipótesis adoptada para la distribución de esfuerzos normales y esfuerzos originados por el momento flector, estos son menores cuando se supone una distribución variable de esfuerzos normales. Se puede concluir que la hipótesis de Halleux conduce realmente a una capacidad resistente mayor, lo contrario que ocurre en la sección 1, correspondiente a los puntos de momento nulos en los cordones.

2.8.4 Pandeo local del montante

Demirdjian S. (1999) propone, para diferentes relaciones ancho/altura de abertura, la siguiente ecuación de momento plástico, para vigas casteladas

$$M_p = 0,25t_w(s - e)^2F_y \quad (2-63)$$

Además de la presencia de cargas concentradas en la viga que puedan propiciar este mecanismo de falla, existen otras condiciones que le hace susceptible al colapso, como la relación entre el espesor del alma, separación de las aberturas y altura de las mismas. Los esfuerzos simultáneos de tracción en un eje de la abertura y compresión en el otro generan el efecto de torsión en el montante.

La guía del AISC “*Castellated and Cellular Beam Design*”, basándose en estudios realizados por Aglan y Redwood (1974) propone una serie de ecuaciones que varían según el ángulo de corte y el tipo de sistema al que pertenezcan las vigas.

2.8.4.1 Vigas casteladas

Esta propuesta sólo es aplicable, en un rango de ángulo entre 45 a 60° con una variación máxima de dos grados de sus límites.

Al estudiar un segmento de viga como un cuerpo libre, existe una diferencia de fuerzas axiales que son transferidas como un corte horizontal a través del montante.

Para vigas que no pertenecen a un sistema de losas mixtas, la ecuación de corte es

$$V_{rh} = \left| \frac{M_{r(i+1)} - M_{r(i)}}{y_o} \right| = |T_{r(i)} - T_{r(i+1)}| \quad (2-64)$$

Mientras que, para losas mixta, la ecuación será la siguiente

$$V_{rh} = |T_{r(i)} - T_{r(i+1)}| \quad (2-65)$$

La ecuación de momento crítico del pandeo lateral del montante M_{ocr} varía según su ángulo de corte

Ángulo $\emptyset=45^\circ$

$$e/t_w = 10 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,351 - 0,051 \left(\frac{h_s}{e} \right) + 0,0026 \left(\frac{h_s}{e} \right)^2 \leq 0,26$$

$$e/t_w = 20 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 3,276 - 1,208 \left(\frac{h_s}{e}\right) + 0,154 \left(\frac{h_s}{e}\right)^2 - 0,0067 \left(\frac{h_s}{e}\right)^3$$

$$e/t_w = 30 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,952 - 0,30 \left(\frac{h_s}{e}\right) + 0,0319 \left(\frac{h_s}{e}\right)^2 - 0,0011 \left(\frac{h_s}{e}\right)^3$$

Ángulo $\emptyset=60^\circ$

$$e/t_w = 10 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,587(0,917)^{\frac{h_s}{e}} \leq 0,493$$

$$e/t_w = 20 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 1,96(0,699)^{\frac{h_s}{e}}$$

$$e/t_w = 30 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 2,55(0,574)^{\frac{h_s}{e}}$$

Los factores de resistencia (ϕ), según LRFD

- $\phi = 43^\circ - 47^\circ \quad \phi_b = 0.90$
- $\phi = 52.5^\circ \quad \phi_b = 0.60$
- $\phi = 58^\circ - 62^\circ \quad \phi_b = 0.90$

La capacidad a flexión admisible del montante será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) M_p \quad (2-66)$$

2.8.4.2 Vigas celulares

La capacidad de pandeo y flexión del montante pueden estimarse según lo propuesto en la publicación del AISC “*Castellated and celular beam design*”, basándose en los estudios realizados por el Steel Construction Institute of the United Kingdom (Ward, 1990), en donde la resistencia última del montante se rige por la falla de flexión, causada por la formación de una articulación plástica en el alma o por el pandeo en sí de la misma. Las siguientes ecuaciones son el resultado de estudios de elementos finitos no lineales, aplicables únicamente para $1,08 \leq \frac{s}{d_o} \leq 1,50$ y $1,25 \leq \frac{hc}{d_o} \leq 1,75$

El corte horizontal V_{rh}

$$V_{rh} = |T_{r(i)} - T_{r(i+1)}| \quad (2-67)$$

La capacidad requerida a flexión puede ser determinada con

$$M_{rh} = \frac{D_o}{2} V_{rh} \quad (2-68)$$

Para obtener la flexión admisible, se debe calcular M_{max}/M_e

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[C1 \left(\frac{s}{D_o} \right) - C2 \left(\frac{s}{D_o} \right)^2 - C3 \right] \quad (2-69)$$

Donde

M_e = momento de flexión elástico

C1, C2 y C3 son constantes en función de las propiedades del montante

El momento elástico es

$$M_e = \frac{t_w F_y (s - D_o)^2}{6} \quad (2-70)$$

$$C1 = 5,097 + 0,1464 \left(\frac{D_o}{t_w} \right) - 0,00174 \left(\frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (2-71)$$

$$C2 = 1,441 + 0,0625 \left(\frac{D_o}{t_w} \right) - 0,000683 \left(\frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (2-72)$$

$$C3 = 3,645 + 0,0853 \left(\frac{D_o}{t_w} \right) - 0,00108 \left(\frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (2-73)$$

El momento flector admisible será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{max}}{M_e} \right) M_e \quad (2-74)$$

Donde

$\phi_b = 0,90$ (LRFD)

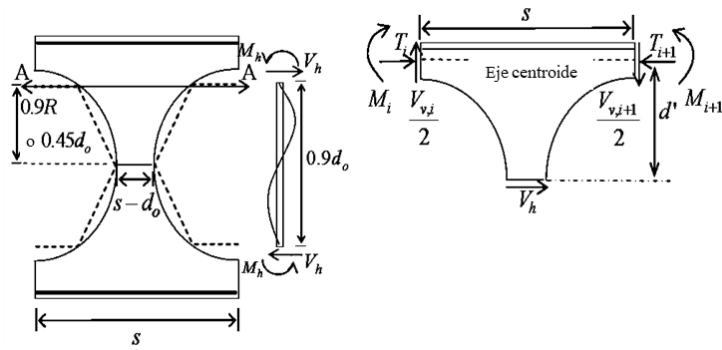


Figura 28 Modelado típico de viga celular

Fuente: Adaptación de Panedpojaman, 2012.

Lawson, R. M. y Hicks, S. J. (2006) indican que el método de Ward es aplicable únicamente a vigas simétricas, razón por la cual Lawson presentó un modelo diferente, basado en una zona a compresión.

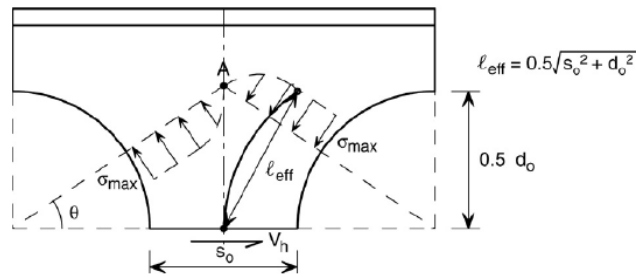


Figura 29 Modelo propuesto por Lawson. La falla del montante se da por los esfuerzos de compresión y tracción en el alma.

Los esfuerzos a compresión vienen dados por la fuerza presente en el cordón superior, o por la mitad del corte vertical aplicado a una abertura simétrica. El ancho efectivo del montante (recibe esfuerzos de compresión) fue tomado por el autor como la mitad del ancho del mismo, tal como se muestra en la siguiente figura.

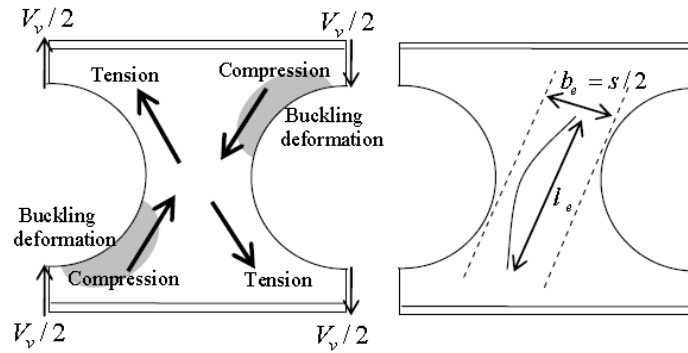


Figura 30 Modelo de puntal efectivo sobre el montante

La longitud efectiva donde se desarrolla este efecto se calcula con la siguiente ecuación.

$$l_e = 0,5 \sqrt{s_o^2 + D_o^2} \quad (2-75)$$

La ecuación propuesta, basada en observaciones empíricas desarrolladas por la FABSEC, permite determinar dicho esfuerzo a compresión

$$\sigma = \frac{V_v}{e(t_w)} \quad (2-76)$$

2.8.5 Pandeo local del alma por corte horizontal

Blodgett (1991) explica que, al evaluar un segmento sólido del alma de la viga, aislado entre los puntos donde se forman las articulaciones, la fuerza de corte horizontal V_h , aplicada a lo largo del eje neutro de la viga generará resistencia a la flexión en dicha porción del alma.

En el método de análisis, la sección se considera rígida. El esfuerzo de flexión resultante, actuando verticalmente, deberá ser resuelto sobre un eje paralelo al eje inclinado de la abertura (hexágono).

Uno de los métodos de resolución es el Wedge Method. Con este método (0), los lados no paralelos de la figura se extienden hasta que las líneas alcanzan un punto de intersección, denominado "0". A partir de este punto se traza un arco, de radio ρ , hacia la zona central de la sección, esta línea curva representará la sección "a" a ser considerada. El módulo de sección de la sección curvada es determinado.

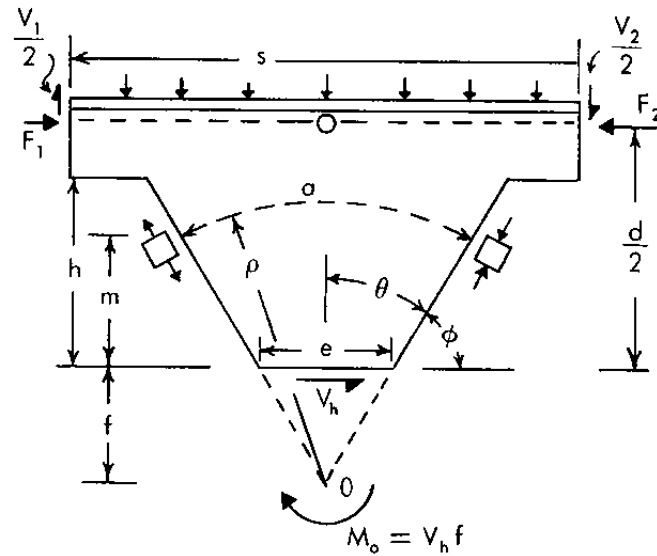


Figura 31 Fuerzas y momentos actuantes respecto al punto de intersección 0.

Fuente: Blodgett, 1991.

Las fuerzas y los momentos aplicados al miembro son transferidos al punto 0. La fuerza horizontal (V_h) generará un momento respecto al punto "0". Las fuerzas y los momentos actuantes en el punto 0 generan esfuerzos de flexión en la sección curva "a" (ver 0).

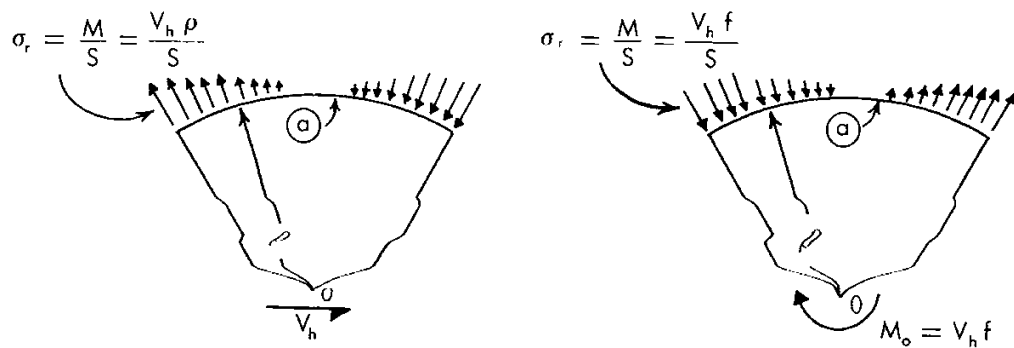


Figura 32 Efecto de fuerzas aplicadas en el punto de intersección. Generan esfuerzos flectores sobre el eje curvo.

Fuente: Blodgett, 1991.

Momento actuante en la sección curva “a”

$$M = V_h \rho - M_o$$

$$M = V_h \rho - V_h f$$

$$M = V_h(\rho - f) \quad (2-77)$$

Esfuerzo de flexión radial, en la sección curva

$$\sigma_r = \frac{M}{S} = \frac{V_h(\rho - f)}{S} \quad (2-78)$$

$$f = \frac{e}{2 \tan \theta} \quad (2-79)$$

$$\rho = \frac{m}{\cos \theta} + \frac{e}{2 \tan \theta} \quad (2-80)$$

$$a = 2\rho\theta \quad (2-81)$$

$$s = \frac{2}{3} t_w \rho^2 \theta^2 \quad (2-82)$$

Por lo tanto, el esfuerzo radial de flexión alrededor de la sección curva “a”:

$$\sigma_r = \frac{3V_h(\rho - f)}{2t_w \rho^2 \theta^2} \quad (2-83)$$

Esto puede demostrar que la sección curva “a”, teniendo el mayor esfuerzo de flexión ocurre a una distancia de: $m = \frac{e}{\tan \theta} (\cos \theta - \frac{1}{2}) \leq d$

Este valor de “m” será menor que el de “d” y será usado siempre que “e” no exceda estos valores

Para $\theta = 45^\circ$, “e” $\leq 4,83d$

Para $\theta = 30^\circ$, “e” $\leq 1,58d$

Este valor de “m” para la posición del mayor esfuerzo flector podrá ser combinado con la ecuación (2-83) y como resultado, se obtendrá la ecuación que arrojará dicho valor a lo largo de “a”.

$$\sigma_r = \frac{3V_h \tan \theta}{4t_w e \theta^2} \quad (2-84)$$

El siguiente paso es determinar el esfuerzo a compresión permitido σ . Si el esfuerzo a flexión σ_r es excesivo, es posible incrementar la distancia “e” del montante y

de los cordones, generando como consecuencia, un mayor esfuerzo de flexión secundaria σ_T , en la sección T. Como alternativa de incrementar la distancia “e”, podrá ser posible reforzar dicho segmento del alma, agregando una lámina alrededor del eje del agujero, en la zona donde está ocurriendo el exceso de esfuerzos.

2.8.5.1 Esfuerzo admisible de compresión por flexión

Tratando la sección como un miembro prismático (fig. 33), se tiene

$$\sigma = \left[1,0 - \frac{10,434}{C_e} \left(\frac{h}{t_w} \right)^2 \right] 0,60 F_y \quad (2-85)$$

$$\text{Donde, } C_e = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}}$$

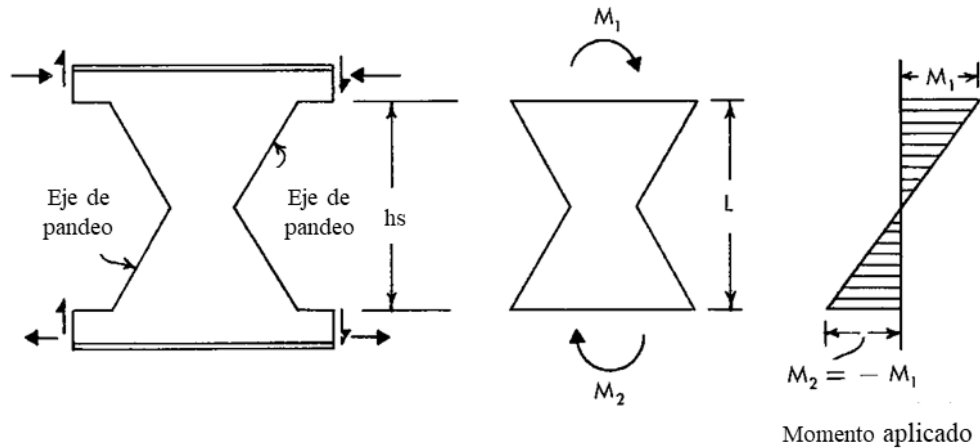


Figura 33 Sección prismática, extraída del alma del miembro, la cual sufrirá los efectos del pandeo.

Fuente: Adaptación de Blodgett, 1991.

2.8.5.2 Esfuerzo cortante permisible

De la ecuación (2-85), se obtiene la compresión permisible por flexión σ . A partir de $V_h = \tau t_w e$ y con el máximo esfuerzo de flexión σ_r se obtiene lo siguiente

$$\sigma_r = \frac{3V_h \tan \theta}{4t_w e \theta^2} = \frac{3\tau_a t_w e \tan \theta}{4t_w e \theta^2} \leq \sigma$$

$$\tau \leq \frac{4\theta^2}{3 \tan \theta} \sigma \leq 0,40 F_y \quad (2-86)$$

La fórmula (2-86) para el esfuerzo cortante permisible τ ha sido simplificada para varios ángulos de corte (tabla 2).

Tabla 2 Esfuerzo cortante permisible para diferentes ángulos de corte

ϕ	θ	τ_h
45	45	$0.8225\sigma_h$
50	40	$0.7745\sigma_h$
55	35	$0.7106\sigma_h$
60	30	$0.6332\sigma_h$

Fuente: Blodgett, 1991.

2.8.6 Pandeo lateral torsional

La publicación de la AISC “*Castellated and celular beam design*” indica que la verificación de este estado límite se realiza en la sección T, tomando como referencia las propuestas de la norma ANSI/AISC “*Especificación para construcción de acero*”

Cuando $L_b \leq L_p$ el estado límite no aplica

Cuando $L_p < L_b \leq L_r$

$$M_n = M_p - (M_p - M_y) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \quad (2-87)$$

Cuando $L_b > L_r$

$$M_n = M_{cr} \quad (2-88)$$

Donde

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$L_r = 1,95 \left(\frac{E}{F_y} \right) \frac{\sqrt{I_y J}}{S_x} \sqrt{2,36 \left(\frac{F_y}{E} \right) \frac{h_t S_x}{J} + 1} \quad (2-89)$$

$$M_{cr} = \frac{1,95E}{L_b} \sqrt{I_y J} \left(B + \sqrt{1 + B^2} \right) \quad (2-90)$$

$$B = -2,3 \frac{h_t}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}} \quad (2-91)$$

h_t = altura de la sección T en tracción

Por otra parte, Bradley T. P. (2003) explica en su trabajo, que el pandeo lateral torsional está presente en todos los especímenes sometidos a condiciones de carga uniformemente distribuida, señalando los trabajos realizados por Salmon y Johnson (1996) en los cuales, para vigas casteladas resulta una derivación del pandeo lateral torsional, que involucra la suma de la resistencia al movimiento lateral y la resistencia a la torsión, asumiendo que la carga aplicada pasa a través del centroide de la viga

La solución propuesta por el autor aplica para los casos de viga ubicada en el rango elástico, es decir, L_b es mayor que L_r , donde el valor de L_r puede ser calculado según la ecuación propuesta en la norma AISC del año 1999. En este trabajo se realizó la adaptación a la norma ANSI/AISC 360-16, con lo que se tiene:

$$L_r = 1,95 r_{ts} \frac{E}{0,70 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,70 F_y}{E}\right)^2}} \quad (2-92)$$

$$r_{ts}^2 = \frac{I_y h_o}{2 S_x} \quad (2-93)$$

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (2-94)$$

$$F_{cr} = C_b \frac{\pi^2 E}{(L_b / r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (2-95)$$

La ecuación (2-95) proporciona un resultado idéntico al de la siguiente ecuación, pero por facilidades de aplicación a posteriores verificaciones de la viga, se suele aplicar la mencionada anteriormente.

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{E I_y G J + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (2-96)$$

Para diagramas de momento no uniforme con extremos de la viga arriostrado, el coeficiente C_b se calcula con la siguiente ecuación

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (2-97)$$

Donde

M_{msx} = máximo momento en la longitud no arriostrada

M_A = momento a 1/4 de la longitud no arriostrada

M_B = momento en el medio de la longitud no arriostrada

M_C = momento a 3/4 de la longitud no arriostrada

Para casos de flexión uniforme $C_b=1,0$

Este autor señala la consideración de agregar un término a la ecuación del momento crítico, asociado a la ubicación del punto de carga en la viga.

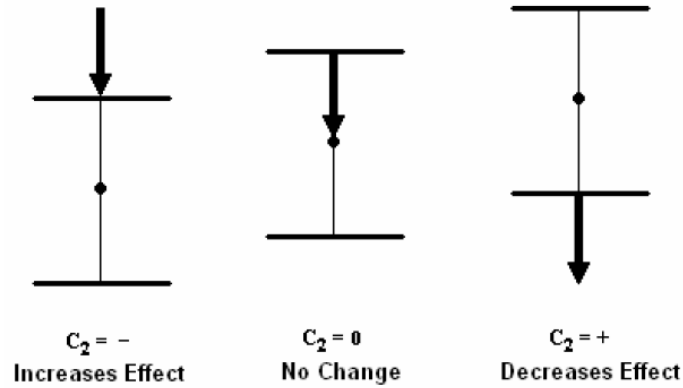


Figura 34 Efecto de ubicación de la carga.

Fuente: Bradley, 2003.

La carga aplicada al ala superior aumenta la probabilidad de ocurrencia del pandeo lateral torsional. Clark y Hill (1960) presentan la ecuación clásica para este mecanismo de colapso adicionándole el término asociado al punto de aplicación de la carga.

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi \sqrt{EI_y GJ}}{k_y L_b} \left[\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{(k_\phi L_b)^2} \frac{EC_w (C_2^2 + 1)}{GJ}} \pm \frac{C_2 \pi}{k_\phi L_b} \sqrt{\frac{EC_w}{GJ}} \right] \quad (2-98)$$

El signo dependerá de la ubicación del punto de carga, como se muestra en la fig.34. El coeficiente C_2 depende de la condición de apoyo y el tipo de carga aplicada a la viga. Los coeficientes k_y y k_ϕ influyen en la consideración de la fuerza de la viga al ser manejada en el proceso de montura y ensamblaje de una estructura. Para este trabajo dichos valores serán igual a uno (1).

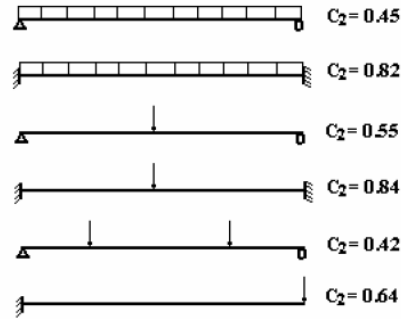


Figura 35 Variación de coeficiente según la condición de apoyo y carga aplicada.

Fuente: Bradley, 2003.

En el trabajo de investigación *Lateral-Torsional Buckling of Castellated Beams*, Showkati H. (2008), en base al ensayo de 10 grupos de vigas casteladas con forma de aberturas hexagonales y altura (h_c) variante entre 100 mm a 300 mm, propone las siguientes ecuaciones empíricas para hallar el coeficiente de modificación de pandeo lateral-torsional.

$$C_b = 0,321 \left(\frac{L_b}{r_y} \right)^{0,174} \quad (2-99)$$

El coeficiente C_b para secciones I con alma llena en toda su longitud, cargada uniformemente distribuida en el ala superior de la viga, se propone como:

$$C_b = 0,373 \left(\frac{L_b}{r_y} \right)^{0,16} \quad (2-100)$$

Esta ecuación es conveniente dentro del siguiente rango $150 < \frac{L_b}{r_y} < 400$ para vigas I.

Al comparar las dos ecuaciones anteriores se puede observar como el valor de C_b se reduce alrededor de un 7% (dependiendo de la forma de la abertura).

Además de estas ecuaciones empíricas, el autor propone un nuevo coeficiente C_c para uso teórico, el cual involucra en el cálculo de la capacidad a flexión, el proceso de alteración geométrica del alma de la viga. Para aberturas hexagonales, C_c es igual a 1.056.

2.8.7 Pandeo local del ala de la sección T

El capítulo F, en la sección F9, indica, según la condición de la sección (compacta, no-compacta, esbelta) de miembros a compresión sometidos a flexión, cuál es la ecuación requerida para chequear el pandeo local del ala de la misma

- Para secciones con ala compacta, el estado límite de pandeo local del ala no aplica
- Para secciones con ala no-compacta

$$M_n = \left[M_p - (M_p - 0,7F_y S_{xf}) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] \leq 1,6M_y \quad (2-101)$$

- Para secciones con ala esbelta

$$M_n = \frac{0,7ES_{xf}}{\left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^2} \quad (2-102)$$

Donde

S_{xf} = módulo de sección elástico referente al ala en compresión

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

$\lambda_{pf} = \lambda_p$, valor límite para ala compacta, según su definición en la tabla B4.1b

$\lambda_{rf} = \lambda_r$, valor límite para ala no-compacta, según su definición en la tabla B4.1b

$M_y = F_y S_x$ = momento de cedencia alrededor del eje de flexión

$M_p = F_y Z_x$ = momento plástico alrededor del eje de flexión

2.8.8 Pandeo local del alma de la sección T

El esfuerzo nominal a flexión para pandeo local en el alma de una sección T, será

$$M_n = F_{cr} S_x \quad (2-103)$$

- Cuando $\frac{d}{t_w} \leq 0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = F_y$$

- Cuando $0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{d}{t_w} \leq 1,52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \left[1,43 - 0,515 \left(\frac{h_t}{t_w} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right] F_y$$

- Cuando $\frac{d}{t_w} > 1,52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \frac{1,52E}{\left(\frac{h_t}{t_w} \right)^2}$$

2.8.9 Ruptura de la soldadura

Jamadar A. M. y Kumbhar P.D. (2015), el esfuerzo de soldadura deberá ser mayor que el esfuerzo cortante horizontal en el montante. La ruptura de la junta soldada puede ocurrir si su longitud es reducida. El trabajo presentado por Kerdal y Nethercott (1984) muestra que, para la ruptura de la soldadura hay una relación de la geometría recomendada ($e/s=0.232$), la cual hace menos propenso el alcance del presente estado límite.

Fuerza cortante de la soldadura $> V_{hmax}$

$$\text{Fuerza cortante de la soldadura} = \frac{et_w F_y}{\sqrt{3}}$$

De la ecuación anterior, Demirdjian (1999) explica en su trabajo, que esta puede tomarse como un límite superior al evaluar la fuerza cortante vertical crítica que ocasiona pandeo en el montante.

2.9 Estado límite de servicio

En las vigas tradicionales (alma llena) se considera como flecha máxima la generada por el momento flector, despreciando la deformación ocasionada por la fuerza cortante. En los casos de vigas alveolares y vigas vierendeel, la flecha ocasionada por el esfuerzo cortante puede ser significativa, debido a la disminución de rigidez del alma (Gomes, 2011), por lo tanto, existen algunos autores que consideran la influencia del cortante, como otros no. En este trabajo se omitirá dichas deformaciones.

Para una viga simplemente apoyada, sometida a carga uniformemente distribuida, se tiene

$$f = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI_e} \quad (2-104)$$

Para una viga empotrada en sus extremos, sometida a carga uniformemente distribuida, se tiene

$$f = \frac{1}{384} \frac{qL^4}{EI_e} \quad (2-105)$$

La flecha de una viga alveolar puede ser estimada con precisión utilizando la ecuación de flecha para condición de simplemente apoyada, utilizando las propiedades mecánicas adecuadas, las cuales consideren la variación de inercia en la viga. Por lo tanto, en la ecuación de flecha se hará uso de una inercia equivalente.

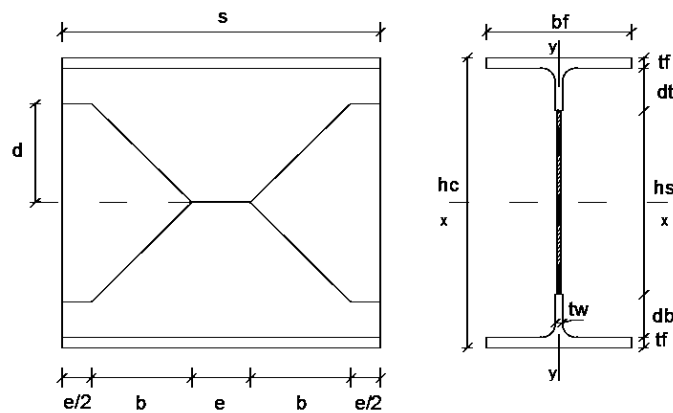


Figura 36 Estudio de la sección para la inercia equivalencia en un segmento de longitud “s”

Fuente: Elaboración propia

- Inercia alrededor del eje fuerte (Viga castelada)

$$I_e = \frac{2}{s} \left[I_{xA} \left(b + \frac{e}{2} \right) + \frac{1}{2} t_w d^3 b + I_x \left(\frac{e}{2} \right) \right]$$

- Inercia alrededor del eje fuerte (Viga celular)

$$I_e = 2(A_t y_o^2 + I_t) + \frac{t_w D o^3}{8} \left(\frac{1}{2} - \frac{e}{3(D o + e)} \right)$$

CAPÍTULO III

DISEÑO DE VIGAS DE ALMA ALIGERADA

3.1 Criterios generales

Se propone una serie de criterios para facilitar el diseño de las vigas alveoladas, siguiendo propuestas de diversas bibliografías como la del autor Blodgett, el manual PROPERCA, SIDETUR y ARCELORMITTAL. Además del apoyo de las normas ANSI/AISC 360-16 y COVENIN 1618:1998.

3.1.1 Sistema de cargas

Las combinaciones de carga dispuestas en la Norma Venezolana Covenin 1618-1998 son las siguientes:

- $1,4CP$ (1)
- $1,2CP + 1,6CV + 0,5 CV_t$ (2)
- $1,2CP + 1,6CV_t + (0,5CV \text{ o } 0,8W)$ (3)
- $1,2CP + 1,3W + 0,5 CV + 0,5CV_t$ (4)
- $1,2CP + 1,9W$ (5)

Donde:

CP: Carga permanente

CV: Carga variable

CV_t: Carga variable de techo

W: Carga de viento

Para el diseño de una viga de entrepiso, se hará uso de la combinación numero dos (2), $1,2CP + 1,6CV + 0,5 CV_t$. la carga CV_t será igual a cero (0).

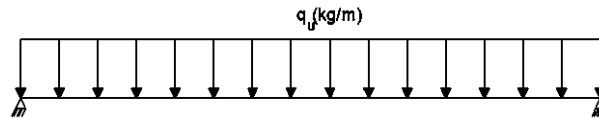


Figura 37 Esquema de carga aplicada a la correa, condición simplemente apoyada

Fuente: Elaboración propia

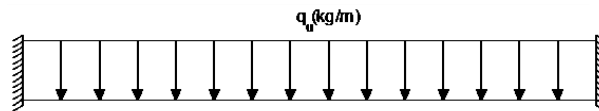


Figura 38 Esquema de carga aplicada a la viga, condición empotrada

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Esfuerzos admisibles

El diseño se realiza de manera tal que, los esfuerzos admisibles calculados por efecto de las cargas de servicio no alcanzan la cedencia del material, por lo tanto, los miembros tendrán un comportamiento elástico.

- Flexión $\sigma_f = 0,60F_y$
- Cortante $\tau = 0,40F_y$

3.1.3 Estados límites

Se aprovecha la máxima capacidad resistente y de uso, proporcionada por el material hasta alcanzar el agotamiento de la misma.

3.1.3.1 Estado límite de servicio

Esta condición afecta la apariencia, confort y durabilidad de la estructura bajo condiciones de carga normales de uso.

Una de las características de estas vigas es el peso liviano que tienen con relación a sus dimensiones, es por ello que se debe cuidar la flecha tanto en la etapa de construcción como en la etapa de uso.

En la etapa de construcción, cuando se presenta el caso de estructuras mixtas, se evalúa el impacto de la colocación de concreto sin fraguar. Mientras que, en la de uso, se

verifica que la viga no sufra grandes deflexiones debido a las cargas impuestas (cargas permanentes y cargas variables).

Etapas de construcción

- Verificación de correa $\delta = \frac{5qL^4}{384EI} < Y_{\max} = \frac{L}{200}$
- Verificación de viga $\delta = \frac{qL^4}{384EI} < Y_{\max} = \frac{L}{200}$

Etapas de uso

- Verificación de correa $\delta = \frac{5q_{(cv+cp)}L^4}{384EI} < Y_{\max} = \frac{L}{360}$
- Verificación de viga $\delta = \frac{q_{(cv+cp)}L^4}{384EI} < Y_{\max} = \frac{L}{360}$

Si el diseño es para una sección mixta, entonces el momento de inercia corresponderá al de dicha sección $I = I_{x_{\text{mix}}}$

3.1.3.2 Estado límite de resistencia

Se alcanza la capacidad de agotamiento del material, por lo que, la estructura puede presentar pérdida de soporte de carga, generándose deformaciones excesivas, inestabilidad y fatiga del material.

Una vez que se garantiza la deformada dentro de los valores aceptables, se evalúa la resistencia del miembro. Si el diseño corresponde a una correa, el momento último será para la condición de simplemente apoyado, mientras que, si el diseño se aplica a una viga, como momento último se tomará el de los apoyos (momento negativo), asumiendo en el caso de vigas de losa mixta, que el acero de la sección absorberá completamente dicho momento.

Se evaluará el pandeo local de los elementos pertenecientes a la sección transversal, según lo establecido en la norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para construcción de acero” y lo propuesto según los distintos autores mencionados en el capítulo III.

3.2 Elaboración de las tablas de propiedades

Como se mencionó en el apartado 3.7, las propiedades mecánicas de la viga dependerán de la sección transversal. Estos valores pueden ser tabulados, según los límites geométricos que se establezcan para las aberturas, siendo una herramienta de trabajo al considerar el diseño de estos miembros dentro de un proyecto dado.

A continuación, se presenta una serie de tablas de propiedades de vigas alveoladas, realizadas a partir de la información proporcionada por productos comerciales (perfiles base).

3.2.1 Tabla de propiedades para secciones de alma llena y alveolada

Los valores que conforman las tablas fueron estimados siguiendo las siguientes consideraciones:

- Por cada perfil comercial se obtuvo un perfil de alma aligerada, es decir, para una altura nominal dada, se aplicó una única configuración geométrica según el modelo de corte. No se presenta variación de alturas de corte para un mismo perfil.
- Con el fin de ofrecer el mayor aprovechamiento de las aberturas, se tomó el límite superior de los rangos aceptables para el diseño de los alveolos.

Vigas casteladas

- $\alpha = \frac{hc}{h} \approx 1,50$
- $\frac{hc}{hs} < 1,75$
- $hs \leq 0,8 hc$
- $e \leq 0,25 hs$

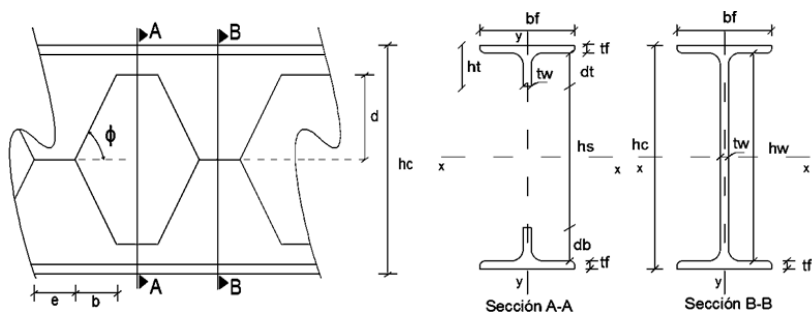
Vigas celulares

- Diámetro de abertura $D_o = 1,1 h$
- Espaciamiento (centro a centro) $s = 0,50 hs$
- Altura de la viga modificada $h_c = 1,5 h$
- Se presenta las propiedades para dos secciones transversales, pertenecientes al mismo miembro. La sección A-A corresponde a la sección alveolada y la sección B-B se emplea a la zona completamente sólida.

- La denominación del perfil modificado se presenta como CB, seguida del número que representa la altura del perfil modificado. Será la misma forma de nomenclatura para cualquier modelo de perfil comercial, por lo que en las tablas se especificará cuál es el perfil base utilizado.
- Las distintas configuraciones se presentan para perfiles IPN, IPE, PROPERCA VP y CP (serie estándar y petrolera).
- Se anexan las tablas de propiedades para la sección T, con el momento de inercia alrededor del eje neutro que pasa por el centro de gravedad de dicha sección. Los módulos de sección elástico se calculan para el alma (S_{Tw}) y el ala (S_{Tf}).

Es importante resaltar que, actualmente en Venezuela se presenta una escasez considerable de perfiles comerciales en el mercado siderúrgico, por lo que es posible que muchos de los mismos indicados en las tablas de propiedades no se encuentren. Aun así, la intención de este trabajo es proporcionar una herramienta que pueda ser usada bajo las condiciones de la situación actual, con los productos que se encuentran en el mercado venezolano, y también en el futuro, cuando este medio vuelva a tener diversidad.

Tabla 3 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base IPN

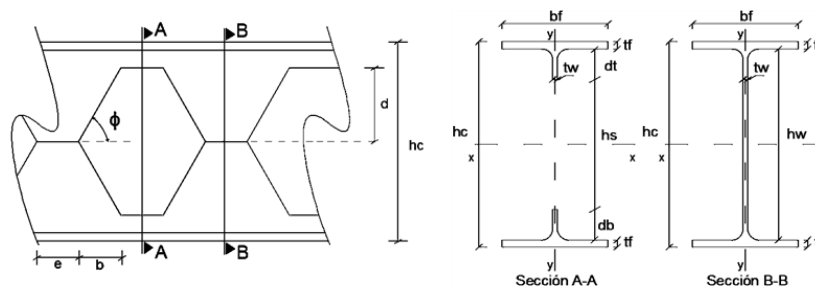


Fy (kg/cm ²)	2530
Ø	60
Abertura	Hexagonal
Perfil original	IPN

Perfil	Perfil original					Perfil modificado																						
	Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas						Sección A-A								Sección B-B								
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	hs (mm)	d (mm)	e (mm)	b (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)			
CB-120	80	42	5,9	3,9	6,0	120	14,1	80	40	20,0	23,1	6,1	186	31	33	4	2	5	6,9	203	34	40	7	3	6			
CB-150	100	50	6,8	4,5	8,3	150	18,2	100	50	25,0	28,9	8,4	407	54	58	7	3	9	9,8	444	59	70	14	6	9			
CB-180	120	58	7,7	5,1	11,2	180	22,3	120	60	30,0	34,6	11,2	779	87	93	13	4	13	13,3	853	95	111	25	9	14			
CB-210	140	66	8,6	5,7	14,4	210	26,4	140	70	35,0	40,4	14,4	1362	130	139	21	6	19	17,2	1492	142	167	42	13	20			
CB-240	160	74	9,5	6,3	17,9	240	30,5	160	80	40,0	46,2	17,9	2220	185	199	32	9	27	21,6	2435	203	239	65	17	28			
CB-270	180	82	10,4	6,9	21,9	270	34,6	180	90	45,0	52,0	21,8	3430	254	273	48	12	36	26,4	3765	279	329	96	23	38			
CB-300	200	90	11,3	7,5	26,3	300	38,7	200	100	50,0	57,7	26,1	5075	338	363	69	15	47	31,8	5575	372	438	138	31	50			
CB-330	220	98	12,2	8,1	31,1	330	42,8	220	110	55,0	63,5	30,8	7248	439	471	96	20	60	37,7	7967	483	569	193	39	64			
CB-360	240	106	13,1	8,7	36,2	360	46,9	240	120	60,0	69,3	35,9	10053	559	599	131	25	75	44,1	11056	614	724	262	49	80			
CB-390	260	113	14,1	9,4	41,9	390	50,9	260	130	65,0	75,1	41,4	13595	697	748	170	30	92	51,3	14972	768	907	342	60	98			
CB-420	280	119	15,2	10,1	48,0	420	54,8	280	140	70,0	80,8	47,2	17956	855	918	214	36	110	59,0	19804	943	1115	430	72	118			
CB-450	300	125	16,2	10,8	54,2	450	58,8	300	150	75,0	86,6	53,2	23187	1031	1106	265	42	130	67,1	25617	1139	1349	532	85	139			
CB-480	320	131	17,3	11,5	61,1	480	62,7	320	160	80,0	92,4	59,7	29599	1233	1325	326	50	153	75,9	32739	1364	1619	654	100	163			
CB-510	340	137	18,3	12,2	68,1	510	66,7	340	170	85,0	98,1	66,4	37111	1455	1564	394	58	177	85,1	41107	1612	1916	791	116	189			
CB-540	360	143	19,5	13	76,2	540	70,5	360	180	90,0	103,9	74,1	46359	1717	1846	478	67	205	95,6	51414	1904	2267	960	134	221			
CB-570	380	149	20,5	13,7	84,0	570	74,5	380	190	95,0	109,7	81,5	56773	1992	2142	568	76	235	105,8	63038	2212	2637	1142	153	252			
CB-600	400	155	21,6	14,4	92,6	600	78,4	400	200	100,0	115,5	89,5	69064	2302	2477	674	87	268	116,8	76744	2558	3053	1354	175	288			
CB-675	450	170	24,3	16,2	115,0	675	88,2	450	225	112,5	129,9	111,2	108375	3211	3457	1001	118	363	146,7	120677	3576	4277	2012	237	392			
CB-750	500	185	27	18	141,0	750	98	500	250	125,0	144,3	135,2	162435	4332	4666	1434	155	478	180,1	181185	4832	5791	2883	312	518			
CB-825	550	200	30	19	167,0	825	107,5	550	275	137,5	158,8	160,9	234240	5679	6113	2012	201	619	211,1	260583	6317	7550	4044	404	669			
CB-900	600	215	32,4	21,6	199,0	900	117,6	600	300	150,0	173,2	190,1	328286	7295	7867	2703	251	776	257,1	367166	8159	9811	5437	506	846			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base IPE

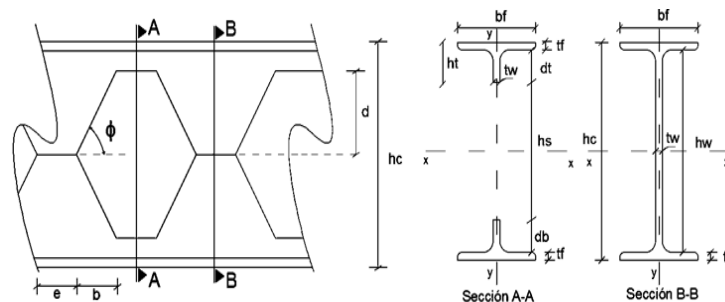


Fy (kg/cm ²)	2530
Ø	60
Perfil original	IPE
Abertura	Hexagonal

Perfil	Perfil original					Perfil modificado																					
	Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas						Sección A-A								Sección B-B							
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	hs (mm)	d (mm)	e (mm)	b (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)		
CB-120	80	46	5,2	3,8	6,0	120	14,8	80	40	20,0	23,1	5,9	183	31	33	4	2	6	8,9	199	33	39	8	4	6		
CB-150	100	55	5,7	4,1	8,1	150	19,3	100	50	25,0	28,9	7,9	383	51	55	8	3	9	12,0	418	56	65	16	6	9		
CB-180	120	64	6,3	4,4	10,4	180	23,7	120	60	30,0	34,6	10,1	717	80	85	14	4	13	15,4	781	87	101	28	9	14		
CB-210	140	73	6,9	4,7	12,9	210	28,1	140	70	35,0	40,4	12,7	1228	117	125	22	6	19	19,3	1335	127	148	45	12	19		
CB-240	160	82	7,4	5	15,8	240	32,6	160	80	40,0	46,2	15,4	1947	162	173	34	8	25	23,4	2118	176	205	68	17	26		
CB-270	180	91	8	5,3	18,8	270	37	180	90	45,0	52,0	18,5	2966	220	233	50	11	34	28,0	3223	239	276	101	22	35		
CB-300	200	100	8,5	5,6	22,4	300	41,5	200	100	50,0	57,7	21,6	4297	286	304	71	14	43	32,8	4670	311	360	142	28	45		
CB-330	220	110	9,2	5,9	26,2	330	45,8	220	110	55,0	63,5	25,6	6173	374	396	102	19	56	38,6	6696	406	468	205	37	58		
CB-360	240	120	9,8	6,2	30,7	360	50,2	240	120	60,0	69,3	29,7	8537	474	502	141	24	72	44,6	9251	514	591	283	47	74		
CB-405	270	135	10,2	6,6	36,1	405	57,3	270	135	67,5	77,9	35,1	12780	631	667	209	31	94	52,9	13863	685	788	419	62	97		
CB-450	300	150	10,7	7,1	42,2	450	64,3	300	150	75,0	86,6	41,2	18551	824	871	301	40	122	62,5	20148	895	1031	603	80	126		
CB-495	330	160	11,5	7,5	49,1	495	71	330	165	82,5	95,3	47,5	25837	1044	1103	393	49	149	72,2	28083	1135	1307	787	98	154		
CB-540	360	170	12,7	8	57,1	540	77,3	360	180	90,0	103,9	55,5	35995	1333	1409	521	61	186	84,3	39106	1448	1668	1042	123	192		
CB-600	400	180	13,5	8,6	66,3	600	86,5	400	200	100,0	115,5	63,5	50697	1690	1787	657	73	222	97,9	55284	1843	2131	1315	146	229		
CB-675	450	190	14,6	9,4	77,6	675	97,9	450	225	112,5	129,9	73,9	74461	2206	2336	836	88	268	116,2	81599	2418	2812	1673	176	278		
CB-750	500	200	16	10,2	90,7	750	109	500	250	125,0	144,3	86,2	107052	2855	3026	1069	107	326	137,2	117677	3138	3663	2140	214	339		
CB-825	550	210	17,2	11,1	106,0	825	120,3	550	275	137,5	158,8	98,9	148187	3592	3813	1330	127	387	160,0	163577	3965	4652	2664	254	404		
CB-900	600	220	19	12	122,0	900	131	600	300	150,0	173,2	115,0	204693	4549	4832	1690	154	469	187,0	226293	5029	5912	3384	308	491		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base PROPERCA (serie estándar)

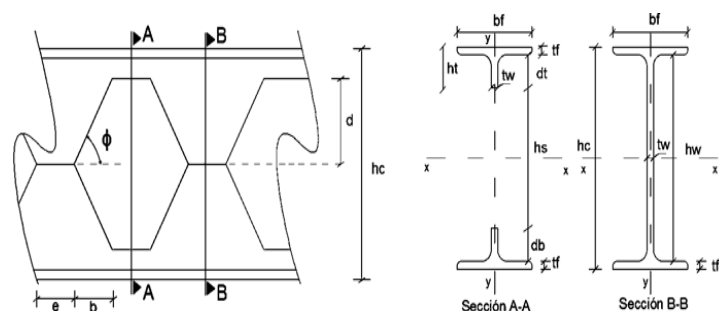


Fy (kg/cm ²)	2530
Ø	60
Perfil original	PROPERCA
Serie	Estandar
Abertura	Hexagonal

	Perfil	Perfil original					Perfil modificado																										
		Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas								Sección A-A										Sección B-B								
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	db (mm)	hs (mm)	d (mm)	e (mm)	b (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)						
VP	CB-180	120	100	4,5	3	9,7	180	25,5	25,5	120	60	30,0	34,6	10,5	775	86	90	38	8	23	14,1	818	91	101	75	15	23						
	CB-210	140	100	6	3	12,4	210	29	29	140	70	35,0	40,4	13,7	1374	131	137	50	10	30	17,9	1443	137	152	100	20	30						
	CB-240	160	100	6	6	16,4	240	34	34	160	80	40,0	46,2	16,1	2031	169	180	50	10	31	25,7	2236	186	218	100	20	32						
	CB-270	180	125	6	4,5	17,7	270	39	39	180	90	45,0	52,0	18,5	3039	225	236	98	16	47	26,6	3258	241	273	196	31	48						
	CB-300	200	125	9	4,5	24,1	300	41	41	200	100	50,0	57,7	26,2	5306	354	372	147	23	71	35,2	5606	374	417	293	47	72						
	CB-375	250	150	9	4,5	29,4	375	53,5	53,5	250	125	62,5	72,2	31,8	10164	542	567	253	34	102	43,1	10750	573	637	507	68	103						
	CB-450	300	150	12	6	41,3	450	63	63	300	150	75,0	86,6	43,6	19786	879	926	338	45	136	61,6	21136	939	1061	676	90	139						
	CB-525	350	175	12	6	48,3	525	75,5	75,5	350	175	87,5	101,0	51,1	31782	1211	1270	536	61	185	72,1	33925	1292	1454	1073	123	188						
	CB-600	400	200	12	6	55,4	600	88	88	400	200	100,0	115,5	58,6	47850	1595	1669	800	80	242	82,6	51050	1702	1909	1601	160	245						
CB-630	420	200	12	9	65,7	630	93	93	420	210	105,0	121,2	64,7	56971	1809	1913	801	80	244	102,5	62528	1985	2309	1604	160	252							
CP	CB-210	140	140	9	6	25,5	210	26	26	140	70	35,0	40,4	28,3	2764	263	279	206	29	89	36,7	2901	276	309	412	59	90						
	CB-240	160	160	9	6	29,3	240	31	31	160	80	40,0	46,2	32,5	4186	349	368	307	38	116	42,1	4391	366	407	615	77	117						
	CB-270	180	180	9	6	33,1	270	36	36	180	90	45,0	52,0	36,7	6029	447	469	438	49	146	47,5	6320	468	518	875	97	148						
	CB-300	200	200	12	9	50,1	300	38	38	200	100	50,0	57,7	54,8	10936	729	773	800	80	242	72,8	11536	769	863	1602	160	246						
	CB-330	220	220	12	9	55,3	330	43	43	220	110	55,0	63,5	60,5	14705	891	941	1065	97	292	80,3	15504	940	1050	2131	194	297						
	CB-360	240	240	12	9	60,4	360	48	48	240	120	60,0	69,3	66,2	19254	1070	1127	1383	115	348	87,8	20291	1127	1256	2767	231	352						
	CB-390	260	260	12	9	65,7	390	53	53	260	130	65,0	75,1	71,9	24656	1264	1329	1758	135	408	95,3	25974	1332	1481	3517	271	413						

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte hexagonal, a partir de un perfil base PROPERCA (serie petrolera)

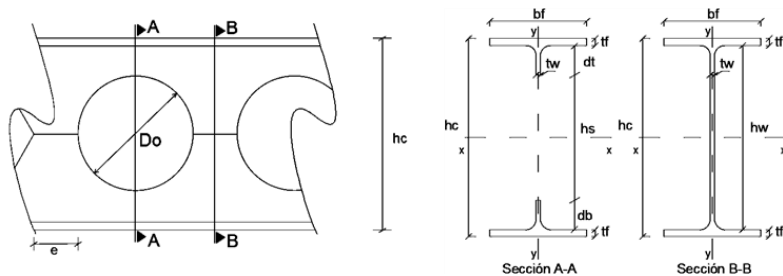


Fy (kg/cm ²)	2530
Ø	60
Perfil original	PROPERCA
Serie	Petrolera
Abertura	Hexagonal

	Perfil	Perfil original					Perfil modificado																					
		Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas						Sección A-A								Sección B-B							
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	hs (mm)	d (mm)	e (mm)	b (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)		
VP	CB-180	120	100	9	6	18,9	180	21	120	60	30,0	34,6	20,5	1443	160	172	75	15	45	27,7	1530	170	193	150	30	46		
	CB-210	140	100	9	6	19,9	210	26	140	70	35,0	40,4	21,1	2036	194	207	75	15	45	29,5	2173	207	236	150	30	47		
	CB-240	160	100	9	6	20,8	240	31	160	80	40,0	46,2	21,7	2745	229	243	75	15	46	31,3	2950	246	282	150	30	47		
	CB-270	180	100	9	6	21,8	270	36,00	180	90	45,0	52,0	22,3	3575	265	282	75	15	46	33,1	3867	286	330	150	30	47		
	CB-300	200	125	9	6	26,2	300	41	200	100	50,0	57,7	27,4	5486	366	387	147	23	71	39,4	5886	392	447	293	47	73		
	CB-300	200	125	12	9	36,0	300	38	200	100	50,0	57,7	36,8	7201	480	513	196	31	95	54,8	7801	520	603	392	63	99		
	CB-360	240	120	12	6	32,8	360	48	240	120	60,0	69,3	34,6	9928	552	584	173	29	87	49,0	10620	590	670	346	58	89		
	CB-360	240	120	12	9	37,8	360	48	240	120	60,0	69,3	37,4	10531	585	626	173	29	88	59,0	11568	643	755	348	58	93		
	CB-375	250	150	12	6	38,9	375	50,5	250	125	62,5	72,2	42,1	13244	706	744	338	45	136	57,1	14026	748	838	676	90	138		
	CB-375	250	150	12	9	44,2	375	50,5	250	125	62,5	72,2	45,1	13935	743	790	338	45	137	67,6	15107	806	931	677	90	142		
	CB-450	300	150	12	9	47,8	450	63	300	150	75,0	86,6	47,3	21043	935	994	338	45	138	74,3	23068	1025	1197	678	90	144		
	CB-525	350	175	12	9	56,0	525	75,5	350	175	87,5	101,0	55,6	33854	1290	1366	537	61	187	87,1	37069	1412	1642	1075	123	194		
	CB-600	400	200	12	9	64,2	600	88	400	200	100,0	115,5	63,8	51028	1701	1798	801	80	244	99,8	55828	1861	2158	1603	160	252		
CP	CB-240	160	160	12	9	39,8	240	28	160	80	40,0	46,2	43,4	5444	454	485	410	51	155	57,8	5751	479	543	821	103	158		
	CB-270	180	180	12	9	44,9	270	33	180	90	45,0	52,0	49,1	7873	583	621	584	65	196	65,3	8311	616	693	1168	130	199		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base IPN

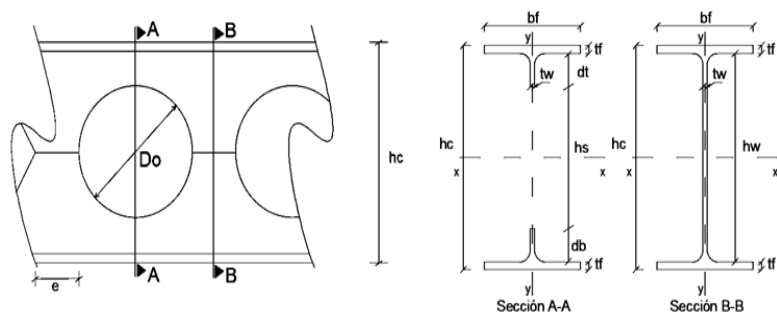


Fy (kg/cm ²)	2530
Perfil original	IPN
Abertura	Circular

Perfil	Perfil original					Perfil modificado																					
	Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas							Sección A-A							Sección B-B							
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	db (mm)	hs (mm)	Do (mm)	e (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)		
CB-118	80	42	5,9	3,9	6,0	118,1	9,2	9,2	88	88	44,0	5,7	173	29	31	4	2	5	9,1	195	33	39	7	3	6		
CB-147	100	50	6,8	4,5	8,3	147,6	12,0	12,0	110	110	55,0	7,9	378	51	54	7	3	9	12,8	428	58	68	14	6	9		
CB-177	120	58	7,7	5,1	11,2	177,2	14,9	14,9	132	132	66,0	10,4	724	82	87	13	4	13	17,2	822	93	109	25	9	14		
CB-206	140	66	8,6	5,7	14,4	206,7	17,7	17,7	154	154	77,0	13,4	1264	122	130	21	6	19	22,2	1437	139	164	42	13	20		
CB-236	160	74	9,5	6,3	17,9	236,2	20,6	20,6	176	176	88,0	16,7	2059	174	185	32	9	26	27,7	2346	199	234	65	17	28		
CB-265	180	82	10,4	6,9	21,9	265,7	23,5	23,5	198	198	99,0	20,3	3180	239	254	48	12	36	34,0	3626	273	321	96	23	38		
CB-295	200	90	11,3	7,5	26,3	295,3	26,3	26,3	220	220	110,0	24,3	4704	319	337	69	15	47	40,8	5369	364	428	138	31	50		
CB-324	220	98	12,2	8,1	31,1	324,8	29,2	29,2	242	242	121,0	28,6	6717	414	438	96	20	60	48,2	7674	473	556	193	39	64		
CB-354	240	106	13,1	8,7	36,2	354,3	32,1	32,1	264	264	132,0	33,4	9315	526	556	130	25	75	56,3	10649	601	708	262	49	80		
CB-383	260	113	14,1	9,4	41,9	383,8	34,8	34,8	286	286	143,0	38,4	12587	656	694	170	30	92	65,3	14420	751	886	342	60	98		
CB-413	280	119	15,2	10,1	48,0	413,4	37,5	37,5	308	308	154,0	43,7	16613	804	851	214	36	110	74,9	19073	923	1091	430	72	117		
CB-442	300	125	16,2	10,8	54,2	442,9	40,2	40,2	330	330	165,0	49,2	21434	968	1025	265	42	129	84,8	24669	1114	1319	532	85	139		
CB-472	320	131	17,3	11,5	61,1	472,4	42,9	42,9	352	352	176,0	55,2	27346	1158	1226	325	50	151	95,7	31526	1335	1583	654	100	163		
CB-501	340	137	18,3	12,2	68,1	501,9	45,7	45,7	374	374	187,0	61,3	34263	1365	1446	394	57	175	106,9	39581	1577	1873	791	116	189		
CB-531	360	143	19,5	13	76,2	531,5	48,2	48,2	396	396	198,0	68,3	42775	1610	1706	477	67	203	119,8	49503	1863	2216	959	134	220		
CB-561	380	149	20,5	13,7	84,0	561,0	51,0	51,0	418	418	209,0	75,1	52353	1866	1979	567	76	232	132,3	60691	2164	2577	1141	153	252		
CB-590	400	155	21,6	14,4	92,6	590,5	53,7	53,7	440	440	220,0	82,4	63663	2156	2286	673	87	265	145,8	73885	2502	2983	1354	175	288		
CB-664	450	170	24,3	16,2	115,0	664,3	60,4	60,4	495	495	247,5	102,2	99796	3004	3187	999	118	359	182,4	116170	3497	4180	2012	237	392		
CB-738	500	185	27	18	141,0	738,2	67,1	67,1	550	550	275,0	124,0	149449	4049	4297	1431	155	473	223,0	174405	4725	5659	2882	312	517		
CB-812	550	200	30	19	167,0	812,0	73,5	73,5	605	605	302,5	147,9	215798	5315	5639	2008	201	613	262,9	250860	6179	7378	4043	404	668		
CB-885	600	215	32,4	21,6	199,0	885,8	80,5	80,5	660	660	330,0	174,1	301635	6811	7232	2697	251	768	316,7	353384	7979	9584	5436	506	845		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base IPE

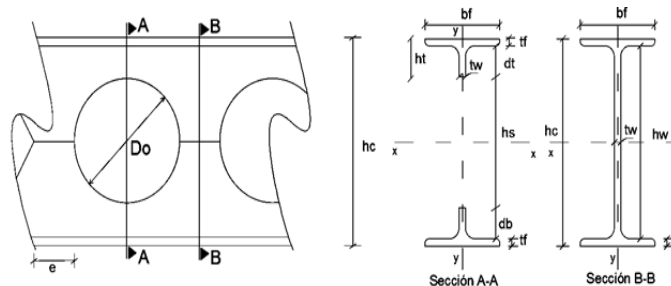


Fy (kg/cm ²)	2530
Perfil original	IPE
Abertura	Circular

Perfil	Perfil original					Perfil modificado																							
	Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas						Sección A-A									Sección B-B								
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	db (mm)	hs (mm)	Do (mm)	e (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)				
CB-118	80	46	5,2	3,8	6,0	118,1	9,9	9,9	88	88	44,0	5,53	171	29	31	4	2	6	8,88	192	33	38	8	4	6				
CB-147	100	55	5,7	4,1	8,1	147,6	13,1	13,1	110	110	55,0	7,35	357	48	51	8	3	9	11,86	402	55	64	16	6	9				
CB-177	120	64	6,3	4,4	10,4	177,2	16,3	16,3	132	132	66,0	9,50	668	75	80	14	4	13	15,30	752	85	99	28	9	14				
CB-206	140	73	6,9	4,7	12,9	206,7	19,4	19,4	154	154	77,0	11,90	1144	111	116	22	6	19	19,14	1287	125	144	45	12	19				
CB-236	160	82	7,4	5	15,8	236,2	22,7	22,7	176	176	88,0	14,41	1814	154	161	34	8	25	23,21	2041	173	200	68	17	26				
CB-265	180	91	8	5,3	18,8	265,7	25,9	25,9	198	198	99,0	17,30	2764	208	218	50	11	33	27,80	3107	234	270	101	22	35				
CB-295	200	100	8,5	5,6	22,4	295,3	29,1	29,1	220	220	110,0	20,26	4004	271	284	71	14	43	32,58	4501	305	352	142	28	45				
CB-324	220	110	9,2	5,9	26,2	324,8	32,2	32,2	242	242	121,0	24,04	5758	355	371	102	19	56	38,32	6455	397	458	205	37	58				
CB-354	240	120	9,8	6,2	30,7	354,3	35,4	35,4	264	264	132,0	27,90	7968	450	471	141	24	71	44,27	8918	503	579	283	47	74				
CB-398	270	135	10,2	6,6	36,1	398,6	40,6	40,6	297	297	148,5	32,90	11923	598	625	209	31	94	52,50	13364	671	771	419	62	97				
CB-442	300	150	10,7	7,1	42,2	442,9	45,7	45,7	330	330	165,0	38,60	17297	781	816	301	40	122	62,03	19424	877	1009	603	80	126				
CB-487	330	160	11,5	7,5	49,1	487,2	50,6	50,6	363	363	181,5	44,39	24083	989	1032	393	49	149	71,61	27072	1111	1279	787	98	154				
CB-531	360	170	12,7	8	57,1	531,5	55,0	55,0	396	396	198,0	51,99	33559	1263	1319	520	61	185	83,67	37699	1419	1632	1042	123	192				
CB-590	400	180	13,5	8,6	66,3	590,5	61,8	61,8	440	440	220,0	59,22	47182	1598	1669	657	73	221	97,06	53287	1805	2085	1315	146	229				
CB-664	450	190	14,6	9,4	77,6	664,3	70,1	70,1	495	495	247,5	68,65	69134	2081	2175	835	88	267	115,18	78634	2367	2750	1673	176	278				
CB-738	500	200	16	10,2	90,7	738,2	78,1	78,1	550	550	275,0	79,93	99245	2689	2811	1068	107	324	136,03	113386	3072	3582	2140	214	338				
CB-812	550	210	17,2	11,1	106,0	812,0	86,3	86,3	605	605	302,5	91,40	137100	3377	3533	1329	127	385	158,55	157584	3882	4549	2664	254	403				
CB-885	600	220	19	12	122,0	885,8	93,9	93,9	660	660	330,0	106,13	189236	4273	4473	1689	154	467	185,33	217986	4922	5779	3384	308	490				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base PROPERCA (serie estándar)

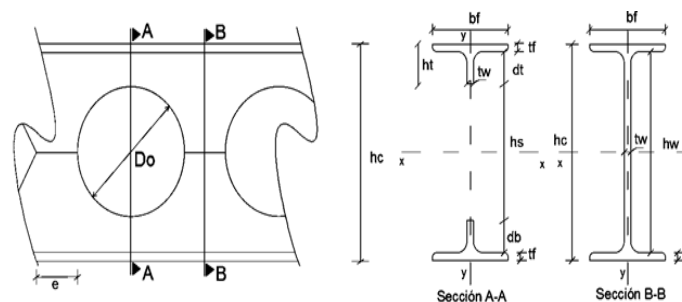


Fy (kg/cm ²)	2530
Perfil original	PROPERCA
Serie	Estandar
Abertura	Circular

	Perfil	Perfil original					Perfil modificado																			
		Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas					Sección A-A								Sección B-B						
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	hs (mm)	Do (mm)	e (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	
VP	CB-177	120	100	4,5	3	9,7	177,2	18,1	132	132	66,0	10,1	732	83	86	38	8	23	14,0	790	89	99	75	15	23	
	CB-206	140	100	6	3	12,4	206,7	20,3	154	154	77,0	13,2	1302	126	131	50	10	30	17,8	1393	135	149	100	20	30	
	CB-236	160	100	6	6	16,4	236,2	24,1	176	176	88,0	14,9	1881	159	167	50	10	30	25,5	2154	182	214	100	20	32	
	CB-265	180	125	6	4,5	17,7	265,7	27,9	198	198	99,0	17,5	2852	215	223	98	16	47	26,4	3143	237	267	196	31	48	
	CB-295	200	125	9	4,5	24,1	295,3	28,6	220	220	110,0	25,1	5011	339	354	147	23	71	35,0	5410	366	409	293	47	72	
	CB-369	250	150	9	4,5	29,4	369,1	38,0	275	275	137,5	30,4	9596	520	540	253	34	102	42,8	10376	562	625	507	68	103	
	CB-442	300	150	12	6	41,3	442,9	44,4	330	330	165,0	41,3	18593	840	875	338	45	136	61,1	20390	921	1039	676	90	139	
	CB-516	350	175	12	6	48,3	516,7	53,9	385	385	192,5	48,5	29879	1157	1202	536	61	185	71,6	32732	1267	1424	1073	123	188	
	CB-590	400	200	12	6	55,4	590,5	63,3	440	440	220,0	55,6	45001	1524	1579	800	80	241	82,0	49260	1668	1870	1601	160	245	
	CB-620	420	200	12	9	65,7	620,1	67,0	462	462	231,0	60,1	52859	1705	1778	801	80	243	101,6	60255	1944	2259	1604	160	252	
CP	CB-206	140	140	9	6	25,5	206,7	17,3	154	154	77,0	27,3	2617	253	267	206	29	89	36,5	2800	271	302	412	59	90	
	CB-236	160	160	9	6	29,3	236,2	21,1	176	176	88,0	31,3	3966	336	352	307	38	116	41,9	4238	359	399	615	77	117	
	CB-265	180	180	9	6	33,1	265,7	24,9	198	198	99,0	35,4	5713	430	449	437	49	146	47,3	6101	459	508	875	97	148	
	CB-295	200	200	12	9	50,1	295,3	25,6	220	220	110,0	52,6	10333	700	736	800	80	241	72,4	11131	754	845	1602	160	245	
	CB-324	220	220	12	9	55,3	324,8	29,4	242	242	121,0	58,1	13899	856	898	1065	97	292	79,9	14962	921	1029	2131	194	296	
	CB-354	240	240	12	9	60,4	354,3	33,2	264	264	132,0	63,6	18204	1028	1075	1383	115	347	87,3	19584	1105	1231	2767	231	352	
	CB-383	260	260	12	9	65,7	383,8	36,9	286	286	143,0	69,0	23317	1215	1267	1758	135	407	94,8	25072	1306	1451	3517	271	413	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10 Dimensiones y propiedades de las secciones pertenecientes a una viga alveolada con patrón de corte circular, a partir de un perfil base PROPERCA (serie petrolera)



Fy (kg/cm ²)	2530
Perfil original	PROPERCA
Serie	Petrolera
Abertura	Circular

	Perfil	Perfil original					Perfil modificado																				
		Dimensiones geométricas					Dimensiones geométricas					Sección A-A								Sección B-B							
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	Peso(kg/m)	hc (mm)	dt (mm)	hs (mm)	Do (mm)	e (mm)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)	A (cm²)	Ix (cm⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Iy (cm⁴)	Sy (cm³)	Zy (cm³)		
VP	CB-177	120	100	9	6	18,9	177,2	13,58	132	132	66,0	19,6	1360	154	163	75	15	45	27,5	1475	167	189	150	30	46		
	CB-206	140	100	9	6	19,9	206,7	17,34	154	154	77,0	20,1	1913	185	196	75	15	45	29,3	2096	203	231	150	30	47		
	CB-236	160	100	9	6	20,8	236,2	21,11	176	176	88,0	20,5	2571	218	229	75	15	45	31,1	2844	241	276	150	30	47		
	CB-265	180	100	9	6	21,8	265,7	24,87	198	198	99,0	21,0	3339	251	264	75	15	45	32,9	3728	281	323	150	30	47		
	CB-295	200	125	9	6	26,2	295,3	28,63	220	220	110,0	25,9	5144	348	365	147	23	71	39,1	5677	385	437	293	47	73		
	CB-295	200	125	12	9	36,0	295,3	25,63	220	220	110,0	34,6	6720	455	482	196	31	95	54,4	7518	509	590	392	63	99		
	CB-354	240	120	12	6	32,8	354,3	33,16	264	264	132,0	32,8	9322	526	552	173	29	87	48,6	10242	578	657	346	58	89		
	CB-354	240	120	12	9	37,8	354,3	33,16	264	264	132,0	34,8	9763	551	582	173	29	88	58,5	11143	629	738	348	58	93		
	CB-369	250	150	12	6	38,9	369,1	35,04	275	275	137,5	40,2	12495	677	708	338	45	136	56,7	13534	733	821	676	90	138		
	CB-369	250	150	12	9	44,2	369,1	35,04	275	275	137,5	42,3	13002	705	741	338	45	136	67,1	14562	789	911	677	90	142		
	CB-442	300	150	12	9	47,8	442,9	44,45	330	330	165,0	44,0	19532	882	925	338	45	137	73,7	22227	1004	1170	678	90	143		
	CB-516	350	175	12	9	56,0	516,7	53,85	385	385	192,5	51,7	31443	1217	1273	537	61	186	86,3	35723	1383	1606	1075	123	194		
	CB-590	400	200	12	9	64,2	590,5	63,26	440	440	220,0	59,4	47417	1606	1675	801	80	243	99,0	53806	1822	2111	1603	160	251		
CP	CB-236	160	160	12	9	39,8	236,2	18,11	176	176	88,0	41,7	5138	435	462	410	51	154	57,5	5547	470	532	820	103	158		
	CB-265	180	180	12	9	44,9	265,7	21,87	198	198	99,0	47,1	7436	560	591	583	65	195	65,0	8018	603	680	1168	130	199		

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Tabla de propiedades de sección T

El estudio de las propiedades se realiza alrededor del eje que pasa por el centro de gravedad de dicha sección. Las ecuaciones utilizadas para la elaboración de las siguientes tablas se encuentran en el Anexo 1.

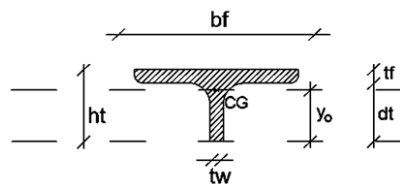
Donde

s_{xw} =Módulo de sección elástico del alma, alrededor del eje neutro que pasa por el centro de gravedad de la sección T

s_{xf} =Módulo de sección elástico del ala, alrededor del eje neutro que pasa por el centro de gravedad de la sección T

Tabla 11 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base IPN.

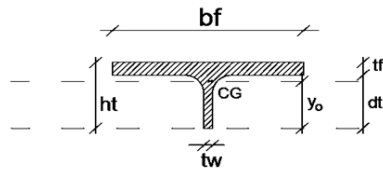
Fuente: Elaboración propia



Fy (kg/cm ²)	2530
Perfil original	IPN

Perfil	Perfil original				HEXAGONAL							Perfil	CIRCULAR						
	Dimensiones geométricas				Sección T								Sección T						
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	dt (mm)	ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)		dt (mm)	ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)
CB-120	80	42	5,9	3,9	14,1	20	3,03	1,52	0,61	0,40	1,29	CB-118	9,2	15,1	2,83	1,12	0,27	0,25	0,70
CB-150	100	50	6,8	4,5	18,2	25	4,22	1,92	1,39	0,72	2,38	CB-147	12,0	18,8	3,94	1,41	0,61	0,43	1,30
CB-180	120	58	7,7	5,1	22,3	30	5,60	2,31	2,73	1,18	3,96	CB-177	14,9	22,6	5,22	1,71	1,19	0,69	2,16
CB-210	140	66	8,6	5,7	26,4	35	7,18	2,70	4,87	1,80	6,11	CB-206	17,7	26,3	6,69	2,01	2,10	1,05	3,34
CB-240	160	74	9,5	6,3	30,5	40	8,95	3,10	8,05	2,60	8,91	CB-236	20,6	30,1	8,33	2,30	3,47	1,51	4,89
CB-270	180	82	10,4	6,9	34,6	45	10,92	3,49	12,59	3,61	12,44	CB-265	23,5	33,9	10,15	2,60	5,41	2,09	6,85
CB-300	200	90	11,3	7,5	38,7	50	13,07	3,88	18,82	4,85	16,80	CB-295	26,3	37,6	12,14	2,89	8,08	2,79	9,27
CB-330	220	98	12,2	8,1	42,8	55	15,42	4,27	27,10	6,34	22,07	CB-324	29,2	41,4	14,32	3,19	11,62	3,65	12,21
CB-360	240	106	13,1	8,7	46,9	60	17,97	4,66	37,85	8,12	28,32	CB-354	32,1	45,2	16,68	3,48	16,21	4,66	15,70
CB-390	260	113	14,1	9,4	50,9	65	20,72	5,04	51,84	10,28	35,61	CB-383	34,8	48,9	19,21	3,77	22,19	5,89	19,78
CB-420	280	119	15,2	10,1	54,8	70	23,62	5,42	69,25	12,78	43,83	CB-413	37,5	52,7	21,87	4,05	29,64	7,31	24,38
CB-450	300	125	16,2	10,8	58,8	75	26,60	5,79	90,71	15,65	53,19	CB-442	40,2	56,4	24,60	4,34	38,80	8,95	29,65
CB-480	320	131	17,3	11,5	62,7	80	29,87	6,17	116,80	18,93	63,81	CB-472	42,9	60,2	27,60	4,62	49,95	10,82	35,60
CB-510	340	137	18,3	12,2	66,7	85	33,21	6,54	148,13	22,64	75,72	CB-501	45,7	64,0	30,64	4,90	63,33	12,92	42,31
CB-540	360	143	19,5	13	70,5	90	37,05	6,91	186,48	26,98	89,30	CB-531	48,2	67,7	34,16	5,18	79,72	15,40	49,92
CB-570	380	149	20,5	13,7	74,5	95	40,75	7,29	230,51	31,64	104,08	CB-561	51,0	71,5	37,53	5,46	98,51	18,04	58,27
CB-600	400	155	21,6	14,4	78,4	100	44,77	7,66	281,91	36,81	120,43	CB-590	53,7	75,3	41,21	5,74	120,47	20,99	67,46
CB-675	450	170	24,3	16,2	88,2	112,5	55,60	8,59	448,86	52,26	168,71	CB-664	60,4	84,7	51,09	6,44	191,76	29,77	94,68
CB-750	500	185	27	18	98	125	67,59	9,52	680,75	71,52	228,35	CB-738	67,1	94,1	62,02	7,14	290,77	40,71	128,34
CB-825	550	200	30	19	107,5	137,5	80,43	10,50	961,92	91,58	296,34	CB-812	73,5	103,5	73,96	7,87	411,09	52,22	165,98
CB-900	600	215	32,4	21,6	117,6	150	95,06	11,38	1400,72	123,13	386,50	CB-885	80,5	112,9	87,05	8,54	598,15	70,03	217,71

Tabla 12 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base IPE

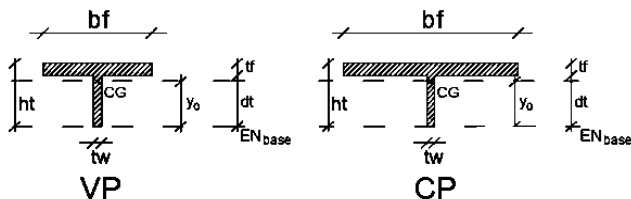


Fy (kg/cm²)	2530
Perfil original	IPE

Perfil	Perfil original				HEXAGONAL								Perfil	CIRCULAR						
	Dimensiones geométricas				Sección T									Sección T						
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	dt (mm)	ht	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)	dt (mm)		ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)	
CB-120	80	46	5,2	3,8	14,8	20	2,95	1,55	0,61	0,39	1,36	CB-118	9,9	15,1	2,77	1,14	0,27	0,23	0,74	
CB-150	100	55	5,7	4,1	19,3	25	3,93	1,96	1,32	0,67	2,45	CB-147	13,1	18,8	3,67	1,46	0,57	0,39	1,34	
CB-180	120	64	6,3	4,4	23,7	30	5,07	2,38	2,49	1,05	3,99	CB-177	16,3	22,6	4,75	1,77	1,07	0,60	2,20	
CB-210	140	73	6,9	4,7	28,1	35	6,36	2,79	4,27	1,53	6,03	CB-206	19,4	26,3	5,95	2,09	1,83	0,88	3,34	
CB-240	160	82	7,4	5	32,6	40	7,70	3,21	6,86	2,14	8,65	CB-236	22,7	30,1	7,20	2,40	2,93	1,22	4,83	
CB-270	180	91	8	5,3	37	45	9,24	3,62	10,45	2,88	11,91	CB-265	25,9	33,9	8,65	2,72	4,46	1,64	6,67	
CB-300	200	100	8,5	5,6	41,5	50	10,82	4,04	15,25	3,78	15,86	CB-295	29,1	37,6	10,13	3,04	6,51	2,15	8,94	
CB-330	220	110	9,2	5,9	45,8	55	12,82	4,46	21,57	4,83	20,75	CB-324	32,2	41,4	12,02	3,35	9,21	2,75	11,70	
CB-360	240	120	9,8	6,2	50,2	60	14,87	4,88	29,63	6,07	26,50	CB-354	35,4	45,2	13,95	3,67	12,64	3,44	14,97	
CB-405	270	135	10,2	6,6	57,3	67,5	17,55	5,51	45,34	8,22	36,64	CB-383	40,6	50,8	16,45	4,16	19,35	4,66	20,94	
CB-450	300	150	10,7	7,1	64,3	75	20,62	6,13	67,24	10,96	49,25	CB-413	45,7	56,4	19,30	4,63	28,71	6,20	28,43	
CB-495	330	160	11,5	7,5	71	82,5	23,73	6,75	94,67	14,03	63,08	CB-442	50,6	62,1	22,19	5,10	40,44	7,92	36,57	
CB-540	360	170	12,7	8	77,3	90	27,77	7,36	131,04	17,80	80,05	CB-472	55,0	67,7	25,99	5,56	55,96	10,06	46,30	
CB-600	400	180	13,5	8,6	86,5	100	31,74	8,15	192,46	23,61	104,21	CB-501	61,8	75,3	29,61	6,18	82,30	13,33	60,96	
CB-675	450	190	14,6	9,4	97,9	112,5	36,94	9,12	297,07	32,58	139,39	CB-531	70,1	84,7	34,33	6,92	127,28	18,38	82,52	
CB-750	500	200	16	10,2	109	125	43,12	10,09	439,22	43,54	182,13	CB-561	78,1	94,1	39,96	7,67	188,39	24,56	108,43	
CB-825	550	210	17,2	11,1	120,3	137,5	49,47	11,03	630,74	57,16	232,27	CB-590	86,3	103,5	45,70	8,40	271,02	32,25	139,38	
CB-900	600	220	19	12	131	150	57,52	12,00	879,97	73,33	293,35	CB-664	93,9	112,9	53,07	9,14	378,14	41,37	176,00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base PROPERCA (serie estándar)

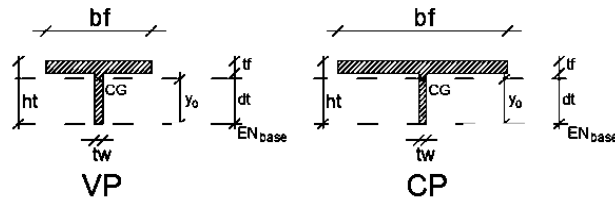


Fy (kg/cm²)	2530
Perfil original	Properca-Estándar

Perfil		Perfil original				HEXAGONAL							Perfil	CIRCULAR						
		Dimensiones geométricas				Sección T								Sección T						
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	dt (mm)	ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)		dt (mm)	ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)
VP	CB-180	120	100	4,5	3	25,5	30	5,27	2,56	1,96	0,77	4,43	CB-180	18,1	22,6	5,04	1,91	0,84	0,44	2,43
	CB-210	140	100	6	3	29	35	6,87	2,98	3,12	1,05	5,98	CB-210	20,3	26,3	6,61	2,21	1,35	0,61	3,21
	CB-240	160	100	6	6	34	40	8,04	3,19	8,23	2,58	10,20	CB-240	24,1	30,1	7,45	2,42	3,52	1,46	5,94
	CB-270	180	125	6	4,5	39	45	9,26	3,77	9,65	2,56	13,28	CB-270	27,9	33,9	8,75	2,84	4,12	1,45	7,59
	CB-300	200	125	9	4,5	41	50	13,10	4,20	13,25	3,16	16,52	CB-300	28,6	37,6	12,54	3,12	5,73	1,84	8,91
	CB-375	250	150	9	4,5	53,5	62,5	15,91	5,33	26,61	4,99	28,83	CB-375	38,0	47,0	15,21	3,99	11,38	2,85	15,92
	CB-450	300	150	12	6	63	75	21,78	6,25	58,59	9,38	46,84	CB-450	44,4	56,4	20,67	4,68	25,05	5,35	25,98
	CB-525	350	175	12	6	75,5	87,5	25,53	7,37	95,36	12,93	69,29	CB-525	53,9	65,9	24,23	5,55	40,69	7,34	39,16
	CB-600	400	200	12	6	88	100	29,28	8,50	145,15	17,08	96,66	CB-600	63,3	75,3	27,80	6,41	61,95	9,66	55,62
CB-630	420	200	12	9	93	105	32,37	8,54	234,25	27,42	119,67	CB-630	67,0	79,0	30,03	6,51	100,73	15,48	72,28	
CP	CB-210	140	140	9	6	26	35	14,16	2,86	5,98	2,09	9,30	CB-210	17,3	26,3	13,64	2,08	2,78	1,33	5,05
	CB-240	160	160	9	6	31	40	16,26	3,32	9,05	2,73	13,33	CB-240	21,1	30,1	15,67	2,44	4,08	1,67	7,14
	CB-270	180	180	9	6	36	45	18,36	3,79	13,07	3,45	18,29	CB-270	24,9	33,9	17,69	2,79	5,78	2,07	9,75
	CB-300	200	200	12	9	38	50	27,42	4,09	25,70	6,29	28,19	CB-300	25,6	37,6	26,31	3,00	11,59	3,87	15,16
	CB-330	220	220	12	9	43	55	30,27	4,55	34,66	7,62	36,42	CB-330	29,4	41,4	29,05	3,35	15,37	4,59	19,50
	CB-360	240	240	12	9	48	60	33,12	5,01	45,56	9,10	45,96	CB-360	33,2	45,2	31,78	3,70	19,98	5,39	24,60
	CB-390	260	260	12	9	53	65	35,97	5,47	58,61	10,72	56,85	CB-390	36,9	48,9	34,52	4,06	25,49	6,28	30,51

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Dimensiones y propiedades de la sección T, a partir de un perfil base
PROPERCA (serie petrolera)



Fy (kg/cm ²)	2530
Perfil original	Properca-Petrolera

Perfil		Perfil original				HEXAGONAL						Perfil	CIRCULAR							
		Dimensiones geométricas				Sección T							Sección T							
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	dt (mm)	ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)		Sxf (cm³)	dt (mm)	ht (mm)	A (cm²)	yo (cm)	Ix (cm⁴)	Sxw (cm³)	Sxf (cm³)
VP	CB-180	120	100	9	6	21	30	10,26	2,37	3,56	1,50	5,61	CB-177	13,58	22,6	9,81	1,71	1,68	0,98	3,10
	CB-210	140	100	9	6	26	35	10,56	2,79	5,56	1,99	7,84	CB-206	17,34	26,3	10,04	2,05	2,49	1,21	4,24
	CB-240	160	100	9	6	31	40	10,86	3,21	8,26	2,58	10,43	CB-236	21,11	30,1	10,27	2,37	3,59	1,51	5,65
	CB-270	180	100	9	6	36	45	11,16	3,61	11,76	3,25	13,28	CB-265	24,87	33,9	10,49	2,70	5,05	1,87	7,31
	CB-300	200	125	9	6	41	50	13,71	4,10	16,82	4,10	18,72	CB-295	28,63	37,6	12,97	3,06	7,21	2,35	10,31
	CB-300	200	125	12	9	38	50	18,42	3,94	23,32	5,93	21,92	CB-295	25,63	37,6	17,31	2,91	10,14	3,48	11,92
	CB-360	240	120	12	6	48	60	17,28	4,90	28,86	5,89	26,23	CB-354	33,16	45,2	16,39	3,64	12,46	3,42	14,26
	CB-360	240	120	12	9	48	60	18,72	4,71	39,93	8,48	30,90	CB-354	33,16	45,2	17,38	3,53	17,06	4,84	17,28
	CB-375	250	150	12	6	50,5	62,5	21,03	5,20	33,93	6,52	32,30	CB-369	35,04	47,0	20,10	3,86	14,72	3,82	17,41
	CB-375	250	150	12	9	50,5	62,5	22,55	5,02	47,26	9,41	38,42	CB-369	35,04	47,0	21,15	3,75	20,23	5,39	21,28
	CB-450	300	150	12	9	63	75	23,67	6,00	81,55	13,59	54,43	CB-442	44,45	56,4	22,00	4,53	34,82	7,68	31,28
	CB-525	350	175	12	9	75,5	87,5	27,80	7,08	133,06	18,79	79,70	CB-516	53,85	65,9	25,85	5,37	56,93	10,61	46,76
CB-600	400	200	12	9	88	100	31,92	8,16	202,86	24,86	110,22	CB-590	63,26	75,3	29,69	6,20	87,04	14,03	65,86	
CP	CB-240	160	160	12	9	28	40	21,72	3,17	12,86	4,06	15,46	CB-236	18,11	30,1	20,83	2,29	6,15	2,68	8,57
	CB-270	180	180	12	9	33	45	24,57	3,63	18,51	5,10	21,22	CB-265	21,87	33,9	23,57	2,65	8,55	3,23	11,53

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Relación ancho-espesor

La Norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para Construcciones de Acero” en su capítulo B, indica que se debe chequear la esbeltez local (relación ancho/espesor) de los elementos a compresión sometidos a flexión, estableciendo los límites de secciones compactas, no compactas o esbeltas de elementos atiesados o no atiesados.

Una sección compacta es aquella capaz de alcanzar su esfuerzo cedente y deformarse considerablemente sin pandeo local. Las secciones compactas son capaces de desarrollar una distribución de esfuerzos completamente plástica.

Una sección no compacta es aquella capaz de desarrollar cedencia limitada en compresión, sin pandeo local, pero no desarrollar una distribución plástica de esfuerzos en toda la sección.

Las secciones esbeltas poseen uno o más elementos comprimidos que pandean antes de alcanzar el límite de cedencia en la sección.

En vista de esto, se busca la sección alveolada (más propensa a problemas de esbeltez local) y se somete al estudio propuesto por dicha norma. Debido a la ausencia de la sección alveolada en la tabla B4.1b, se usará como referencia la correspondiente a una T.

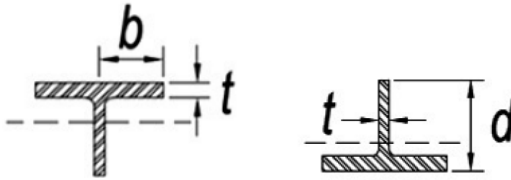


Figura 39 Elementos en compresión de miembro, con sección transversal T, sometido a flexión.

Fuente: ANSI/AISC 360-16 “Especificación para Construcciones de Acero”

Tabla 15 Límites de relación de esbeltez local, para una sección T, según la Norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para Construcciones de Acero”

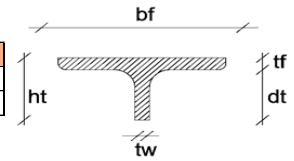
Elemento	Relación de esbeltez local	λ_p (Compacta/No compacta)	λ_r (No compacta/Esbelta)
Ala	$b_f/2t_f$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Alma	h_t/t_f	$0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las tablas con los límites de esbeltez para los perfiles modificados propuestos en este trabajo.

Tabla 16 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base IPN

Fy (kg/cm ²)	2530	Relación	λ_p	λ_r
E (kg/cm ²)	2100000	Ala	10,95	28,81
Perfil original	IPN	Alma	24,20	43,79

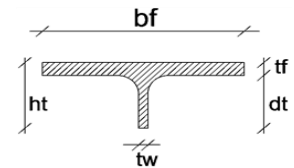


Perfil	Dimensiones geométricas				HEXAGONAL					Perfil	CIRCULAR				
	Original				Modificado	Ala		Alma			Modificado	Ala		Alma	
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw	Sección		ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw	Sección
CB-120	80	42	5,9	3,9	20	3,56	Compacta	5,13	Compacta	CB-118	15,05	3,56	Compacta	3,86	Compacta
CB-150	100	50	6,8	4,5	25	3,68	Compacta	5,56	Compacta	CB-147	18,82	3,68	Compacta	4,18	Compacta
CB-180	120	58	7,7	5,1	30	3,77	Compacta	5,88	Compacta	CB-177	22,58	3,77	Compacta	4,43	Compacta
CB-210	140	66	8,6	5,7	35	3,84	Compacta	6,14	Compacta	CB-206	26,34	3,84	Compacta	4,62	Compacta
CB-240	160	74	9,5	6,3	40	3,89	Compacta	6,35	Compacta	CB-236	30,11	3,89	Compacta	4,78	Compacta
CB-270	180	82	10,4	6,9	45	3,94	Compacta	6,52	Compacta	CB-265	33,87	3,94	Compacta	4,91	Compacta
CB-300	200	90	11,3	7,5	50	3,98	Compacta	6,67	Compacta	CB-295	37,63	3,98	Compacta	5,02	Compacta
CB-330	220	98	12,2	8,1	55	4,02	Compacta	6,79	Compacta	CB-324	41,39	4,02	Compacta	5,11	Compacta
CB-360	240	106	13,1	8,7	60	4,05	Compacta	6,90	Compacta	CB-354	45,16	4,05	Compacta	5,19	Compacta
CB-390	260	113	14,1	9,4	65	4,01	Compacta	6,91	Compacta	CB-383	48,92	4,01	Compacta	5,20	Compacta
CB-420	280	119	15,2	10,1	70	3,91	Compacta	6,93	Compacta	CB-413	52,68	3,91	Compacta	5,22	Compacta
CB-450	300	125	16,2	10,8	75	3,86	Compacta	6,94	Compacta	CB-442	56,45	3,86	Compacta	5,23	Compacta
CB-480	320	131	17,3	11,5	80	3,79	Compacta	6,96	Compacta	CB-472	60,21	3,79	Compacta	5,24	Compacta
CB-510	340	137	18,3	12,2	85	3,74	Compacta	6,97	Compacta	CB-501	63,97	3,74	Compacta	5,24	Compacta
CB-540	360	143	19,5	13	90	3,67	Compacta	6,92	Compacta	CB-531	67,74	3,67	Compacta	5,21	Compacta
CB-570	380	149	20,5	13,7	95	3,63	Compacta	6,93	Compacta	CB-561	71,50	3,63	Compacta	5,22	Compacta
CB-600	400	155	21,6	14,4	100	3,59	Compacta	6,94	Compacta	CB-590	75,26	3,59	Compacta	5,23	Compacta
CB-675	450	170	24,3	16,2	112,5	3,50	Compacta	6,94	Compacta	CB-664	84,67	3,50	Compacta	5,23	Compacta
CB-750	500	185	27	18	125	3,43	Compacta	6,94	Compacta	CB-738	94,08	3,43	Compacta	5,23	Compacta
CB-825	550	200	30	19	137,5	3,33	Compacta	7,24	Compacta	CB-812	103,49	3,33	Compacta	5,45	Compacta
CB-900	600	215	32,4	21,6	150	3,32	Compacta	6,94	Compacta	CB-885	112,89	3,32	Compacta	5,23	Compacta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base IPE

Fy (kg/cm ²)	2530	Relación	λ_p	λ_r
E (kg/cm ²)	2100000	Ala	10,95	28,81
Perfil original	IPE	Alma	24,20	43,79

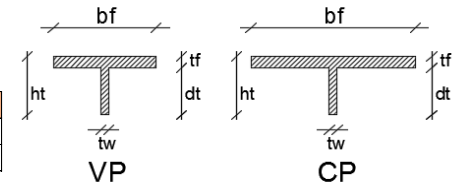


Perfil	Dimensiones geométricas				HEXAGONAL					Perfil	CIRCULAR				
	Perfil original				Modificado	Ala		Alma			Modificado	Ala		Alma	
	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw	Sección		ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw	Sección
CB-120	80	46	5,2	3,8	20	4,42	Compacta	5,26	Compacta	CB-118	15,05	4,42	Compacta	3,96	Compacta
CB-150	100	55	5,7	4,1	25	4,82	Compacta	6,10	Compacta	CB-147	18,82	4,82	Compacta	4,59	Compacta
CB-180	120	64	6,3	4,4	30	5,08	Compacta	6,82	Compacta	CB-177	22,58	5,08	Compacta	5,13	Compacta
CB-210	140	73	6,9	4,7	35	5,29	Compacta	7,45	Compacta	CB-206	26,34	5,29	Compacta	5,60	Compacta
CB-240	160	82	7,4	5	40	5,54	Compacta	8,00	Compacta	CB-236	30,11	5,54	Compacta	6,02	Compacta
CB-270	180	91	8	5,3	45	5,69	Compacta	8,49	Compacta	CB-265	33,87	5,69	Compacta	6,39	Compacta
CB-300	200	100	8,5	5,6	50	5,88	Compacta	8,93	Compacta	CB-295	37,63	5,88	Compacta	6,72	Compacta
CB-330	220	110	9,2	5,9	55	5,98	Compacta	9,32	Compacta	CB-324	41,39	5,98	Compacta	7,02	Compacta
CB-360	240	120	9,8	6,2	60	6,12	Compacta	9,68	Compacta	CB-354	45,16	6,12	Compacta	7,28	Compacta
CB-405	270	135	10,2	6,6	67,5	6,62	Compacta	10,23	Compacta	CB-398	50,80	6,62	Compacta	7,70	Compacta
CB-450	300	150	10,7	7,1	75	7,01	Compacta	10,56	Compacta	CB-442	56,45	7,01	Compacta	7,95	Compacta
CB-495	330	160	11,5	7,5	82,5	6,96	Compacta	11,00	Compacta	CB-487	62,09	6,96	Compacta	8,28	Compacta
CB-540	360	170	12,7	8	90	6,69	Compacta	11,25	Compacta	CB-531	67,74	6,69	Compacta	8,47	Compacta
CB-600	400	180	13,5	8,6	100	6,67	Compacta	11,63	Compacta	CB-590	75,26	6,67	Compacta	8,75	Compacta
CB-675	450	190	14,6	9,4	112,5	6,51	Compacta	11,97	Compacta	CB-664	84,67	6,51	Compacta	9,01	Compacta
CB-750	500	200	16	10,2	125	6,25	Compacta	12,25	Compacta	CB-738	94,08	6,25	Compacta	9,22	Compacta
CB-825	550	210	17,2	11,1	137,5	6,10	Compacta	12,39	Compacta	CB-812	103,49	6,10	Compacta	9,32	Compacta
CB-900	600	220	19	12	150	5,79	Compacta	12,50	Compacta	CB-885	112,89	5,79	Compacta	9,41	Compacta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base
PROPERCA (serie estándar)

Fy (kg/cm ²)	2530	Relación	λ _p	λ _r
E (kg/cm ²)	2100000	Ala	10,95	28,8104
Perfil original	Properca-Estándar	Alma	24,20	43,7918

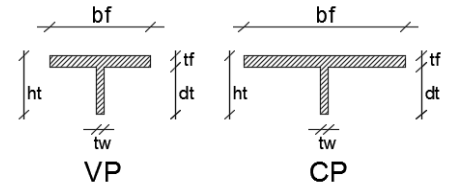


	Perfil	Dimensiones geométricas				HEXAGONAL					Perfil	CIRCULAR				
		Perfil original				Modificado	Ala		Alma			Modificado	Ala		Alma	
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)		ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw			Sección	ht (mm)	bf/2tf	Sección
VP	CB-180	120	100	4,5	3	30	11,11	No compacta	10,00	Compacta	CB-177	22,58	11,11	No compacta	7,53	Compacta
	CB-210	140	100	6	3	35	8,33	Compacta	11,67	No compacta	CB-206	26,34	8,33	Compacta	8,78	Compacta
	CB-240	160	100	6	6	40	8,33	Compacta	6,67	Compacta	CB-236	30,11	8,33	Compacta	5,02	Compacta
	CB-270	180	125	6	4,5	45	10,42	Compacta	10,00	Compacta	CB-265	33,87	10,42	Compacta	7,53	Compacta
	CB-300	200	125	9	4,5	50	6,94	Compacta	11,11	No compacta	CB-295	37,63	6,94	Compacta	8,36	Compacta
	CB-375	250	150	9	4,5	62,5	8,33	Compacta	13,89	No compacta	CB-369	47,04	8,33	Compacta	10,45	Compacta
	CB-450	300	150	12	6	75	6,25	Compacta	12,50	No compacta	CB-442	56,45	6,25	Compacta	9,41	Compacta
	CB-525	350	175	12	6	87,5	7,29	Compacta	14,58	No compacta	CB-516	65,85	7,29	Compacta	10,98	No compacta
	CB-600	400	200	12	6	100	8,33	Compacta	16,67	No compacta	CB-590	75,26	8,33	Compacta	12,54	No compacta
CB-630	420	200	12	9	105	8,33	Compacta	11,67	No compacta	CB-620	79,03	8,33	Compacta	8,78	Compacta	
CP	CB-210	140	140	9	6	35	7,78	Compacta	5,83	Compacta	CB-206	26,34	7,78	Compacta	4,39	Compacta
	CB-240	160	160	9	6	40	8,89	Compacta	6,67	Compacta	CB-236	30,11	8,89	Compacta	5,02	Compacta
	CB-270	180	180	9	6	45	10,00	Compacta	7,50	Compacta	CB-265	33,87	10,00	Compacta	5,64	Compacta
	CB-300	200	200	12	9	50	8,33	Compacta	5,56	Compacta	CB-295	37,63	8,33	Compacta	4,18	Compacta
	CB-330	220	220	12	9	55	9,17	Compacta	6,11	Compacta	CB-324	41,39	9,17	Compacta	4,60	Compacta
	CB-360	240	240	12	9	60	10,00	Compacta	6,67	Compacta	CB-354	45,16	10,00	Compacta	5,02	Compacta
	CB-390	260	260	12	9	65	10,83	Compacta	7,22	Compacta	CB-383	48,92	10,83	Compacta	5,44	Compacta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Relación ancho-espesor para sección T, a partir de partir de perfil base
PROPERCA (serie petrolera)

Fy (kg/cm ²)	2530	Relación	λ _p	λ _r
E (kg/cm ²)	2100000	Ala	10,95	28,81
Perfil original	Properca-Petrolera	Alma	24,20	43,79



	Perfil	Dimensiones geométricas				HEXAGONAL					Perfil	CIRCULAR				
		Perfil original				Modificado	Ala		Alma			Modificado	Ala		Alma	
		h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw	Sección		ht (mm)	bf/2tf	Sección	ht/tw	Sección
VP	CB-180	120	100	9	6	30	5,56	Compacta	5,00	Compacta	CB-177	22,58	5,56	Compacta	3,76	Compacta
	CB-210	140	100	9	6	35	5,56	Compacta	5,83	Compacta	CB-206	26,34	5,56	Compacta	4,39	Compacta
	CB-240	160	100	9	6	40	5,56	Compacta	6,67	Compacta	CB-236	30,11	5,56	Compacta	5,02	Compacta
	CB-270	180	100	9	6	45	5,56	Compacta	7,50	Compacta	CB-265	33,87	5,56	Compacta	5,64	Compacta
	CB-300	200	125	9	6	50	6,94	Compacta	8,33	Compacta	CB-295	37,63	6,94	Compacta	6,27	Compacta
	CB-300	200	125	12	9	50	5,21	Compacta	5,56	Compacta	CB-295	37,63	5,21	Compacta	4,18	Compacta
	CB-360	240	120	12	6	60	5,00	Compacta	10,00	Compacta	CB-354	45,16	5,00	Compacta	7,53	Compacta
	CB-360	240	120	12	9	60	5,00	Compacta	6,67	Compacta	CB-354	45,16	5,00	Compacta	5,02	Compacta
	CB-375	250	150	12	6	62,5	6,25	Compacta	10,42	Compacta	CB-369	47,04	6,25	Compacta	7,84	Compacta
	CB-375	250	150	12	9	62,5	6,25	Compacta	6,94	Compacta	CB-369	47,04	6,25	Compacta	5,23	Compacta
	CB-450	300	150	12	9	75	6,25	Compacta	8,33	Compacta	CB-442	56,45	6,25	Compacta	6,27	Compacta
	CB-525	350	175	12	9	87,5	7,29	Compacta	9,72	Compacta	CB-516	65,85	7,29	Compacta	7,32	Compacta
	CB-600	400	200	12	9	100	8,33	Compacta	11,11	No compacta	CB-590	75,26	8,33	Compacta	8,36	Compacta
CP	CB-240	160	160	12	9	40	6,67	Compacta	4,44	Compacta	CB-236	30,11	6,67	Compacta	3,35	Compacta
	CB-270	180	180	12	9	45	7,50	Compacta	5,00	Compacta	CB-265	33,87	7,50	Compacta	3,76	Compacta

Fuente: Elaboración propia

Si un elemento del miembro resulta no compacto o esbelto, toda la sección será considerada bajo la misma condición, ya que esta resultará la más desfavorable y condicionará el diseño.

Para las vigas modificadas, tabuladas en este trabajo, se puede observar de la relación ancho-espesor que, en su mayoría, las secciones resultan compactas. En los casos de elementos no-compactos no se alcanza la cedencia, F_y , por lo que, para garantizar el máximo aprovechamiento de la sección, la relación de esbeltez debe disminuir, modificando las dimensiones de dichos elementos. En el caso de alma no compacta, se requiere aumentar la abertura de corte “ d ”, de manera que la altura del alma disminuya y, por tanto, la relación de esbeltez. Si no se aplica modificaciones en las dimensiones de la sección y se diseña bajo la condición de no-compacto, se deberá considerar lo especificado en la norma ANSI/AISC 360-16.

3.3 Diseño por tensiones admisibles

En el capítulo III se indican una serie de parámetros para el diseño geométrico de las aberturas, más en esta sección se presenta lo propuesto por Blodgett (1991), relacionando las tensiones admisibles con las propiedades de la sección transversal, obteniendo así, las dimensiones de los alveolos.

Como se mencionó anteriormente, las tensiones admisibles representan una fracción de la cedencia del material, por lo que el mismo trabajará dentro del rango elástico y los diseños resultantes serán conservadores, por lo que, este procedimiento es completamente alternativo, siendo parte del grupo de propuestas ofrecidas en el presente trabajo.

Suponiendo una correa, o viga simplemente apoyada con las siguientes características, se muestra una serie de disposiciones para el pre-dimensionado de las aberturas, en función de las solicitaciones que ésta deba soportar.

- Luz viga = 6,00 m
- Separación entre vigas = 1,40 m
- $F_y = 2.530 \text{ kg/cm}^2$
- $E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$

- $\sigma_{sadm} = (0,60)(2530) = 1518 \text{ kg/cm}^2$
- $q_u = 1400 \text{ kg/m}$

El corte y momento resultante serán

$$V = \frac{qL}{2} \quad M(+) = \frac{qL^2}{8}$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{1400(6)}{2} = 4200 \text{ kg} \quad M_{\text{máx}} = \frac{1400(6)^2}{8} = 6300 \text{ kg-m}$$

Con el momento resultante se busca el módulo S_x

$$S_x = \frac{M}{0,60F_y} \quad S_x = \frac{(6300)}{0,60(2530)} = 415 \text{ cm}^3$$

Para un buen diseño la relación $\alpha \approx 1.5$

$$\alpha = \frac{hc}{h} = \frac{S_x}{S_{x_o}}$$

Donde S_{x_o} representa el módulo elástico de la viga base, el cual se desconoce. Haciendo uso de la relación α se obtiene dicho valor, con el que se ingresa a la tabla de perfiles laminados estándar y se selecciona el que cumpla con el requerimiento.

$$S_{x_o} = \frac{415}{1,5} \quad S_x = 277 \text{ cm}^3$$

A partir del módulo de sección elástico obtenido, se busca el perfil base, siendo para este caso, el IPE 240, $S_x = 354 \text{ cm}^3$

$$\alpha = \frac{415}{354} = 1,28 < 1,50$$

Dimensiones del perfil:

$$h(\text{mm}) = 240 \quad t_w(\text{mm}) = 6.20 \quad t_f(\text{mm}) = 9.80 \quad b_f(\text{mm}) = 120$$

La altura de corte vendrá dada por $d = h(\alpha - 1)$, pero este valor no debe exceder al derivado de la ecuación de corte vertical en el alma de la sección T

$$d = 24 (1,28 - 1) = 6,72 \text{ cm}$$

$$h_t \geq \frac{V}{2t_w\tau} \quad ; \quad d \leq h - 2h_t$$

$$h_t \geq \frac{(4200)}{2(0,62)(0,40(2530))} = 3,35 \text{ cm} \quad d \leq 24 - 2(3,35) = 17,30$$

$$9,6 \text{ cm} \leq 17,30 \text{ cm}$$

Blodgett (1991), explica que el corte en el primer panel de viga ubicado después de los apoyos puede ser tomado como el 95% $V_{m\acute{a}x}$, pero debido a la presencia de algunos esfuerzos de flexión en la sección, este se tomará en su totalidad.

Se obtiene las dimensiones de la viga, luego de obtener la altura de corte “ d ”.

$$h_c = h + d = 24 + 6,72 = 30,72 \text{ cm}$$

$$h_t = \frac{(h_c)}{2} - d = \frac{30,72}{2} - 6,72 \quad h_t = 8,64 \text{ cm}$$

$$d_t = h_t - t_f = 8,64 - 0,98 = 7,66 \text{ cm}$$

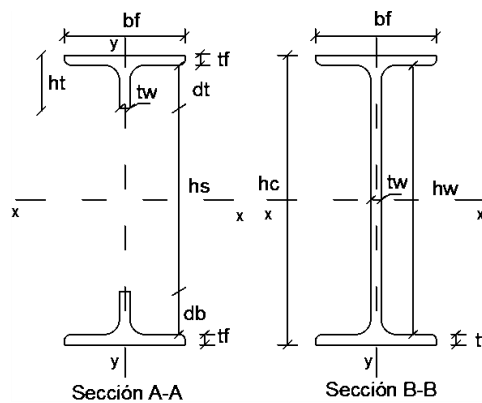


Figura 40 Partes de las secciones transversales de un mismo miembro

Fuente: Elaboración propia

Para vigas casteladas $h_s = 2d$

Para vigas celulares $D_o = 2d$

$$h_s = 2(6,72) = 13,44 \text{ cm}$$

El esfuerzo cortante máximo viene dado por

$$\tau_{max} = 1,16 \frac{V}{t_w h_c}$$

$$\tau_{max} = 1,16 \frac{4200}{(0,62)(24)} = 327,42 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo cortante admisible será el menor de

$$\begin{aligned} \circ \quad \tau_{adm} &= \frac{4\theta^2}{3\tan\theta} \left[0,60F_y - 1,02 \left(\frac{d}{t_w} \right)^2 \right]; \theta: \text{radianes} \\ \tau_{adm} &= \frac{4(1,05)^2}{3\tan(60^\circ)} \left[0,60(2530) - 1,02 \left(\frac{6,72}{0,62} \right)^2 \right] = 1186,64 \text{ kg/cm}^2 \\ \circ \quad \tau_{adm} &= 0,40F_y \\ \tau_{adm} &= 0,40(2530) = 1012 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Con el esfuerzo cortante máximo y admisible se crea la siguiente relación α_1 , con la cual se puede obtener la longitud horizontal del montante

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{e}{s} = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\tau_{adm}} \quad e = \frac{2d\tan\theta}{\frac{1}{\alpha_1}-2} \\ \alpha_1 &= \frac{327,42}{1012} = 0,32 \\ e &= \frac{2(6,72)\tan(60^\circ)}{\frac{1}{0,32}-2} = 20,69 \text{ cm} \end{aligned}$$

Para abertura hexagonal, con el ángulo y altura de corte se obtiene los valores restantes de la geometría del alveolo, además de la separación de los mismos, medida de centro a centro.

$$\begin{aligned} b &= \frac{d}{\tan\phi} \quad s = 2(b + e) \\ b &= \frac{6,72}{\tan(60^\circ)} = 3,88 \text{ cm} \\ s &= 2(3,88 + 20,69) = 49,14 \text{ cm} \end{aligned}$$

Conocida la separación, se debe calcular el número de alveolos que se ubicaran en el alma de la viga a lo largo de su longitud. Este cálculo permite conocer cuál es la distancia disponible entre el ultimo agujero y el apoyo de la viga, con la finalidad de que en estas zonas el alma de la viga sea llena, de manera que pueda soportar los altos esfuerzos cortantes.

$$\begin{aligned} N_{huecos} &= \frac{L}{s} \\ N_{huecos} &= \frac{6,00}{0,49} = 12 \end{aligned}$$

La separación s_o , medida desde el extremo de la viga hasta el punto central del primer alveolo será

$$s_o = \frac{6,00 - (12 - 1)(0,49)}{2} = 0,305 \text{ cm}$$

3.4 Diseño por estados límites

Este diseño permite el aprovechamiento óptimo del material, Haciendo uso de las tablas de propiedades que se proponen en este trabajo, el diseño de una viga y/o correa se puede simplificar notablemente, de manera que, seleccionando un perfil con geometría de corte dada, se procede a la verificación y cumplimiento de estados límites de resistencia y servicio.

Diseño de sistema vigas y correas pertenecientes a un sistema de losa mixta

Se realiza un diseño de dos sistemas de piso, de losa mixta, como ejemplo ilustrativo y práctico, para la consideración del uso de estos perfiles modificados en la práctica.

Consideraciones de diseño

Tabla 20 Propiedades de los materiales

Concreto	Acero
$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$	$F_y = 2.530 \text{ kg/cm}^2$
$E = 15100\sqrt{250} = 238751,96 \text{ kg/cm}^2$	$E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$

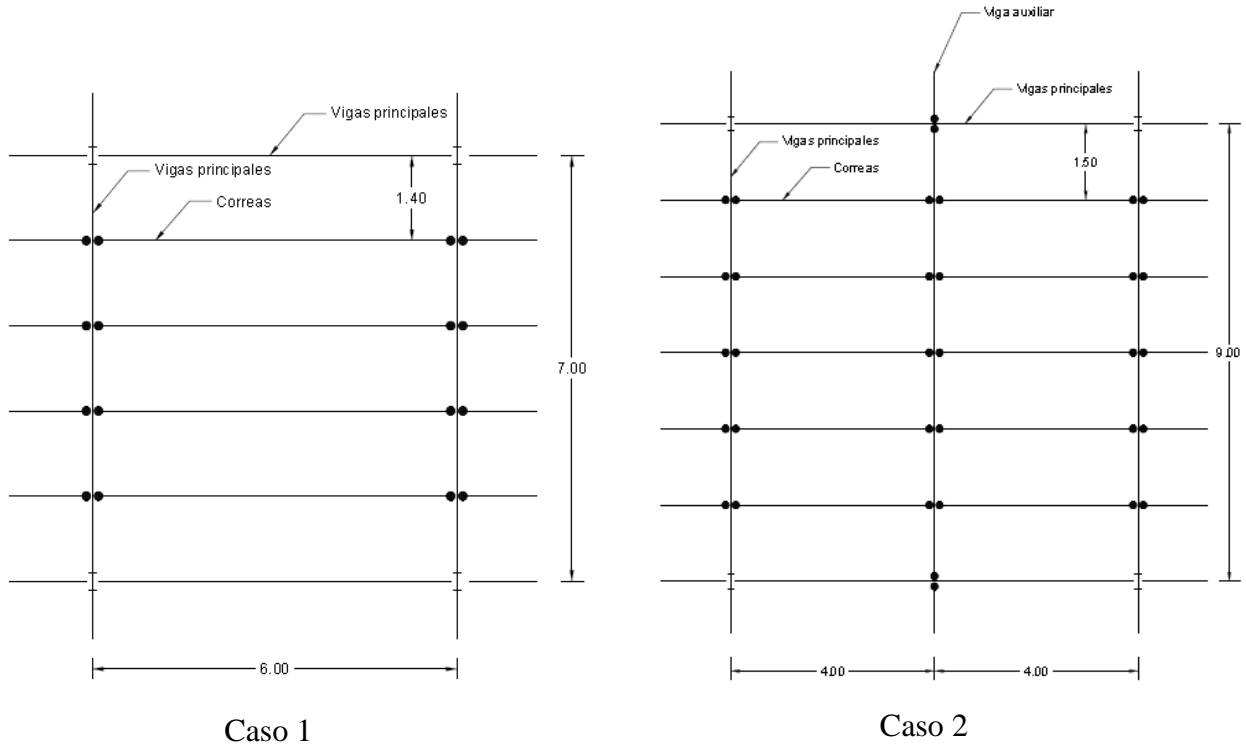
Fuente: Elaboración propia

Se establece las siguientes condiciones

- Se colocarán todos los conectores necesarios, que garanticen el cumplimiento de estructura mixta (su diseño no forma parte de los alcances de este trabajo).
- La sección transversal trabajará completamente mixta.
- Se propone una carga promedio para la consideración del peso propio de los miembros (peso propio de estructura).
- Altura de concreto $h_r = 4 \text{ cm}$ $t_c = 6 \text{ cm}$

El diseño cuenta con dos casos, los cuales se sub-dividirán en tres partes

- Correas y vigas con perfiles estándares
- Correas con perfil estándar y vigas con perfiles alveolados
- Correas y perfiles con perfiles alveolados



Caso 1

- Luz viga de diseño = 7,00 m
- Luz correa de diseño = 6,00 m
- Separación entre correas = 1,40 m

- Correas y vigas con perfiles estándares

Estado límite de servicio

Se busca la verificación de la deflexión, según las distintas etapas de diseño, comparando con la flecha máxima. Las cargas aplicadas a los miembros serán el producto de las cargas consideradas por el ancho tributario de cada miembro respectivamente.

Etapas de construcción

- Peso lámina = $7,74 \text{ kg/m}^2$
- Carga de servicio lámina = 288 kg/m

- Carga construcción = 100 kg/m²
- Carga de servicio correa = 459 kg/m
- Peso propio losa = 180 kg/m²
- Carga de servicio viga = 1968 kg/m
- Peso estructura = 40 kg/m²

Etapas de uso

- Pavimento = 80 kg/m²
- Carga de uso correa = 770 kg/m
- Cielo raso (plafond) = 30 kg/m²
- Carga de servicio viga = 3300 kg/m
- Tabiquería = 100 kg/m²
- Peso propio estructura = 40 kg/m²
- Carga variable = 300 kg/m²

Como se menciona en el apartado 4.1.3, las ecuaciones para las flechas variarán para cada elemento, según su condición de apoyo

Verificación calibre lámina $\delta = \frac{0,00521qL^4}{EI}$

Verificación correa $\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$

Verificación viga $\delta = \frac{qL^4}{384EI}$

Las inercias usadas en las ecuaciones variarán con las etapas. La etapa de construcción no considera el bloque de concreto, mientras que la etapa de uso si lo toma, por lo que la inercia resultante será la correspondiente a una sección mixta

Para la inercia de la sección mixta, se busca el área de concreto que conforma parte de la misma, afectándola por los módulos de elasticidad del concreto y acero

Ancho efectivo del concreto $b_{efect} = \min \{L/4, s\}$

Área de concreto $A_c = b_{efect}(t_c)$

Área efectiva de concreto $A_{cef} = \frac{A_c}{n}$

Donde

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 8,80$$

Se selecciona los siguientes perfiles

- Correa IPN 220, peso propio 31,10 kg/m
- Viga IPN 360, peso propio 76,20 kg/m

Tabla 21 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 1.a

Etapa	Inercia (cm ⁴)		
	Lámina	Correa	Viga
Construcción	17	3060	19610
Uso (mixta)	-	12166	53408

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22 Deflexiones de miembro, caso 1.a

Etapa	Deflexión de los miembros (cm)					
	Lámina	Y _{máx}	Correa	Y _{máx}	Viga	Y _{máx}
Construcción	0,16	0,70	1,21	3,00	0,30	3,50
Uso	-	-	0,51	1,67	0,18	1,94

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\delta < Y_{\max}$

Estado límite de resistencia

A partir del momento global último, obtenido con la ecuación correspondiente según el caso de distribución de carga y los apoyos de los miembros, se busca el momento plástico de la sección transversal y según el LRFD se verifica el cumplimiento de la resistencia.

Momento último correa $M_u = \frac{qL^2}{8}$

Momento último viga $M_u = \frac{qL^2}{11}$

Para la correa con perfil IPN 220, el módulo plástico es $Z_x = 324 \text{ cm}^3$

Para la viga con perfil IPN 360, el módulo plástico es $Z_x = 1276 \text{ cm}^3$

Tabla 23 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.a

Miembro	Resistencia (kg - m)	
	M_u	ϕM_n
Correa	6300	7377
Viga	27627	29055

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\phi M_n > M_u$

- b. Correas con perfiles estándares y vigas con perfiles alveolados

Estado límite de servicio

Del diseño anterior, se conserva el perfil obtenido para las correas (IPN 220). Para la viga, se evalúa la deflexión y resistencia del perfil alveolado, con corte circular, seleccionado de las tablas de propiedades propuestas en este trabajo.

Seleccionando el perfil con corte circular, CB 472 (IPN 320, peso propio = 61,10 kg/m), se tiene

Tabla 24 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 1.b

Etapa	Inercia (cm ⁴)		
	Lámina	Correa	Viga
Construcción	17	3060	29784
Uso (mixta)	-	12166	74766

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25 Deflexiones de miembro, caso 1.b

Etapa	Deflexión de los miembros (cm)					
	Lámina	Y _{máx}	Correa	Y _{máx}	Viga	Y _{máx}
Construcción	0,16	0,70	1,21	3,00	0,20	3,50
Uso	-	-	0,51	1,67	0,13	1,94

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\delta < Y_{\max}$

Etapas de resistencia

El momento último en el diseño de las vigas corresponde al generado en los apoyos. A pesar de que la sección transversal de un miembro alveolado, en su extremo, corresponde a una sección completamente sólida, la evaluación por resistencia del perfil corresponderá al área de la sección alveolada, esto permite aumentar el factor de seguridad en su diseño.

Para la viga con perfil CB 472, el módulo plástico es $Z_x = 1226 \text{ cm}^3$

Tabla 26 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.b

Miembro	Resistencia (kg - m)	
	Mu	ϕM_n
Correa	6300	7377
Viga	27627	27916

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\phi M_n > M_u$

Se busca el número de alveolos que tendrá la viga para posteriormente, estudiar el corte y momento global, así como los estados límites como pandeo local del alma, del ala, momento Vierendeel, en cada abertura, hasta el centro de la viga.

De la tabla 7, se obtiene la siguiente información

$$e = 176 \text{ mm} \quad D_o = 352 \text{ mm} \quad h_c = 472 \text{ mm} \quad h_t = 60,20 \text{ mm}$$

Para las vigas celulares $s = e + D_o$

$$s = 176 + 352 = 528 \text{ mm}$$

$$N_{huecos} = \frac{7,00}{0,528} = 13,26 \approx 13$$

$$s_o = \frac{7,00 - (13 - 1)(0,528)}{2} = 0,332 \text{ m}$$

Estados límites

Debido a que la sección es mixta, se debe buscar la distancia efectiva entre el centroide del bloque de concreto y el centroide de la sección de acero, esto con el fin de obtener la fuerza axial, al dividir el momento global entre dicha distancia.

La obtención de esta distancia se realiza mediante un proceso iterativo hasta alcanzar la convergencia. Inicialmente se asume que el bloque de concreto absorbe toda la compresión

$$y_{efmixt} = h_c - (h_t - y_o) + h_r - t_c/2 \quad y_{efmixt} = 528 \text{ mm}$$

Con el primer valor de fuerza axial calculado, comienza el proceso iterativo, buscando la altura del concreto requerida para resistir el momento global.

$$y_{efmixt} = \frac{T}{0,85f'_c A_c}$$

Tabla 27 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura (caso 1.b – viga CB 472)

Abertura N°	x (m)	Corte y Momento global		FUERZA AXIAL						
		Vr (kg)	Mr (kg-m)	PROCESO ITERATIVO						
				T(i) (kg)	dc(i) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+1) (kg)	dc(i+1) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+2) (kg)
Extremo	0,00	20916	0	0	0,00	55,80	0	0,00	55,80	0
1	0,33	18932	6615	12528	0,34	55,63	11890	0,32	55,64	11888
2	0,86	15777	15778	29882	0,80	55,40	28481	0,77	55,42	28471
3	1,39	12621	23275	44081	1,19	55,21	42159	1,13	55,23	42139
4	1,92	9466	29106	55125	1,48	55,06	52863	1,42	55,09	52834
5	2,44	6311	33271	63013	1,69	54,95	60545	1,63	54,99	60508
6	2,97	3155	35770	67746	1,82	54,89	65168	1,75	54,92	65127
7 - CL	3,50	0	36603	69324	1,86	54,87	66711	1,79	54,90	66668

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, se asumirá el uso de todos los conectores necesarios, garantizándose la capacidad de resistencia de los mismos. Y, por ende, el comportamiento de la sección transversal es completamente mixto.

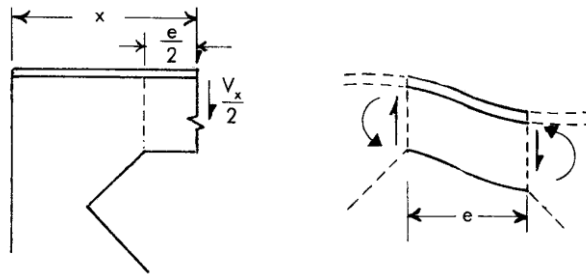


Figura 41 Evaluación de momentos secundarios

Fuente: Blodgett, 1991.

Tabla 28 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 1.b – viga CB 472)

Abertura N°	x (m)	T(i+2) (kg)	Condición	Vu (kg)	Mvr (kg-m)
Extremo	0,00	0	Mixta	12117	533
1	0,33	11888	Mixta	10133	446
2	0,86	28471	Mixta	6978	307
3	1,39	42139	Mixta	3822	168
4	1,92	52834	Mixta	667	29
5	2,44	60508	Mixta	-2488	0
6	2,97	65127	Mixta	-5644	0
7 - CL	3,50	66668	Mixta	-8799	0

Fuente: Elaboración propia

El cálculo del momento Vierendeel en cada abertura viene dado por el cortante último y la ecuación

$$M_{vr} = V_u \left(\frac{A_T}{A_n} \right) \left(\frac{e}{2} \right)$$

Donde $V_u = V_r - V_c$

El momento Vierendeel será nulo en las zonas donde el cortante sea negativo, esto significa que, el aporte del concreto está tomando todo el corte, por lo tanto, no habrá transmisión de dicha fuerza en los cordones.

Tabla 29 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 1.b – viga CB 472)

VERTICAL (ABERTURAS)			HORIZONTAL (MONTANTES)				
Abertura N°	x (m)	Vr (kg)	Montante N°	x (m)	Tr(i) (kg)	Tr(i+1) (kg)	Vrh (kg)
Extremo	0,00	12117	Extremo	0,00	-	-	-
1	0,33	10133	1	0,60	11888	28471	16583
2	0,86	6978	2	1,12	28471	42139	13668
3	1,39	3822	3	1,65	42139	52834	10695
4	1,92	667	4	2,18	52834	60508	7674
5	2,44	0	5	2,71	60508	65127	4618
6	2,97	0	6	3,24	65127	66668	1542
7 - CL	3,50	0	CL	3,50	66668	66052	616

Fuente: Elaboración propia

La fuerza cortante se presenta tanto en las zonas alveoladas como en los montantes. En las aberturas se evalúa el corte vertical, a partir del global, luego de considerar la fracción que es tomada por el concreto.

Los montantes reciben el corte horizontal, el cual viene producido por la diferencia de las fuerzas axiales aplicada entre dos cordones.

$$V_{rh} = |T_{r(i)} - T_{r(i+1)}|$$

Flexión del montante

El corte último horizontal será el máximo valor entre los evaluados en cada montante. Se calcula el momento último y se compara con el momento nominal afectado por el factor de resistencia, según las recomendaciones de LRFD.

$$M_u = (V_{uh}) \left(\frac{D_o}{2} \right) \quad M_u = (16583) \left(\frac{0,352}{2} \right) = 2919$$

Para obtener la flexión admisible, se debe calcular M_{max}/M_e

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[C1 \left(\frac{s}{D_o} \right) - C2 \left(\frac{s}{D_o} \right)^2 - C3 \right]$$

Donde

$$C1 = 5,097 + 0,1464 \left(\frac{352}{11,5} \right) - 0,00174 \left(\frac{352}{11,5} \right)^2 = 7,95$$

$$C2 = 1,441 + 0,0625 \left(\frac{352}{11,5} \right) - 0,000683 \left(\frac{352}{11,5} \right)^2 = 1,47$$

$$C3 = 3,645 + 0,0853 \left(\frac{352}{11,5} \right) - 0,00108 \left(\frac{352}{11,5} \right)^2 = 3,65$$

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[7,95 \left(\frac{528}{352} \right) - 1,47 \left(\frac{528}{352} \right)^2 - 3,65 \right] = 4,96$$

$$M_e = \frac{t_w F_y (s - D_o)^2}{6} \quad M_e = \frac{11,5 (2530) (528 - 352)^2}{6} = 6802 \text{ kg} - \text{m}$$

El momento flector admisible será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{max}}{M_e} \right) M_e$$

$$\phi M_n = 0,90 (4,96) 6802 = 30349 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u$$

Corte horizontal

Seleccionando como corte último el mayor obtenido de la evaluación en cada montante, tal y como se muestra en la tabla 29, se tiene

$$V_{uh} = 16583 \text{ kg}$$

El área para la evaluación de la capacidad de corte es la correspondiente al montante

$$\phi V_n = 0,60 A_w F_y$$

$$\phi V_n = 0,60 (17,6) (1,15) (2530) = 30724 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_u$$

Corte vertical

Como se puede observar en la tabla 29, el mayor cortante se produce en el apoyo de la viga, pero las zonas más susceptibles son los cordones, por lo que se toma el máximo

cortante que afecte las aberturas. A este valor se le deberá sumar la porción que absorbe el concreto, por lo que

$$V_{global} = V_{uv} + V_c$$

$$V_{global} = 10133 + 8799 = 18932 \text{ kg}$$

Se busca el corte correspondiente a un cordón de la zona alveolada

$$V_T = V_{global} \left(\frac{A_T}{A_A} \right)$$

$$V_T = 18932 \left(\frac{27,60}{55,20} \right) = 9466 \text{ kg}$$

Una vez obtenido el corte vertical global y de un cordón se busca la capacidad de corte de dichas secciones, verificando que su cumplimiento, según lo establecido en el capítulo G de la norma ANSI/AISC 360-16 “Especificación para construcción de acero”.

Para la sección de alma llena ($k_v = 5,34$)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{(472 - 2(17,3))}{11,5} = 38,03$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73,23 \quad c_{v1} = 1,0$$

$$A_g = (h_c - 2t_f)t_w \quad A_g = (47,2 - 2(1,73))1,15 = 50,30 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(50,30)(1,0) = 76357 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_w}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(76357) = 76357 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_{global}$$

Para la sección de alma alveolada ($k_v = 1,20$)

$$\frac{h_t}{t_w} = \frac{(42,9 + 17,3)}{11,5} = 5,23$$

$$\frac{h_t}{t_w} < 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 34,72 \quad c_{v2} = 1,0$$

$$A_T = h_t t_w \quad A_T = (42,9 + 17,3)1,15 = 6,923 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(6,923)(1,0) = 10509 \text{ kg}$$

Para $\frac{h_t}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(10509) = 10509 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_T$$

c. Correas y vigas con perfiles alveolados

Estado límite de servicio

La geometría del corte será hexagonal para los dos casos

Se selecciona los siguientes perfiles

- Correa CB 240, peso propio 17,90 kg/m
- Viga CB 480, peso propio 61,10 kg/m

Tabla 30 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 1.c

Etapa	Inercia (cm ⁴)		
	Lámina	Correa	Viga
Construcción	17	2364	31589
Uso (mixta)	-	8693	75138

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31 Deflexiones de miembro, caso 1.c

Etapa	Deflexión de los miembros (cm)					
	Lámina	Y _{máx}	Correa	Y _{máx}	Viga	Y _{máx}
Construcción	0,16	0,70	1,56	3,00	0,19	3,50
Uso	-	-	0,71	1,67	0,13	1,94

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\delta < Y_{\max}$

Etapa de resistencia

Para la correa con perfil CB 240 $Z_x = 199 \text{ cm}^3$

$$\phi M_n = 4531 \text{ kg} - \text{m} < M_u = 6300 \text{ kg} - \text{m}$$

Al evaluar la resistencia proporcionada por el perfil solo, este no cumple.

La sección de perfil no es suficiente para soportar el momento requerido, se considera el aporte del concreto para su cumplimiento, condicionando con la capacidad máxima del acero ya que será el que falle primero.

Falla total del concreto $f_c = 0,85f'_c b_{\text{efect}}t_c$

$$f_c = 178500\text{kgf}$$

Falla total del acero $f_s = F_y A_s$

$$f_s = 45540\text{kgf}$$

Para la falla total del acero, se toma el área más desfavorable de la viga, la alveolada.

Como se observa, el acero fallará primero, por lo que

$$45540\text{ kgf} = 0,85(250)(140)y$$

$y = 1,53\text{ cm} \rightarrow$ lo que se puede aprovechar del concreto

$$h_{\text{total mix}} = h + t_r + t_c$$

$$h_{\text{total mix}} = 34\text{ cm}$$

$$\text{brazo} = 34 - \frac{1,53}{2} - \frac{24}{2} = 21,235\text{ cm}$$

$$\phi M_n = 0,90(45540)(0,2124) = 8703\text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_n$$

Para la viga con perfil CB 480 $Z_x = 1325\text{ cm}^3$

Tabla 32 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.c

Miembro	Resistencia (kg - m)	
	M_u	ϕM_n
Correa	6300	7377
Viga	8703	30170

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\phi M_n > M_u$

Buscando el número de alveolos para el estudio en cada uno, se tiene lo siguiente.

De la tabla 3, se obtiene la siguiente información

Para correa CB 240

$$e = 40 \text{ mm} \quad d = 80 \text{ mm} \quad h_s = 160 \text{ mm} \quad b = 46,2 \text{ mm} \quad h_c = 240 \text{ mm}$$

$$h_t = 40 \text{ mm} \quad y_o = 31 \text{ mm}$$

Para las vigas casteladas $s = 2e + 2b$ $s = 172,4 \text{ mm}$

$$N_{huecos} = \frac{6,00}{0,1724} = 34,8 \approx 34$$

$$s_o = \frac{6,00 - (34 - 1)(0,1724)}{2} = 0.1554 \text{ m}$$

Para viga CB 480, de la tabla 3 se obtiene la siguiente información

$$e = 80 \text{ mm} \quad d = 160 \text{ mm} \quad h_s = 320 \text{ mm} \quad b = 92,4 \text{ mm} \quad h_c = 480 \text{ mm}$$

$$h_t = 80 \text{ mm} \quad y_o = 61,70 \text{ mm}$$

$$s = 344,80 \text{ mm}$$

$$N_{huecos} = \frac{7,00}{0,3448} = 20,3 \approx 20$$

$$s_o = \frac{7,00 - (20 - 1)(0,3448)}{2} = 0.2244 \text{ m}$$

Estados límites

- Correa

$$y_{efmixt} = h_c - (h_t - y_o) + h_r - t_c/2 \quad y_{efmixt} = 301 \text{ mm}$$

Se inicia el proceso iterativo para encontrar la altura del concreto colaborante.

$$y_{efmixt} = \frac{T}{0,85f_c A_c}$$

Tabla 33 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura (caso 1.c – correa CB 240)

Abertura N°	x (m)	Corte y Momento global		FUERZA AXIAL						
		Vr (kg)	Mr (kg-m)	PROCESO ITERATIVO						
				Tl(i) (kg)	dc(i) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+1) (kg)	dc(i+1) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+2) (kg)
Extremo	0,00	4183	0	0	0,00	33,10	0	0,00	33,10	0
1	0,16	3967	633	2104	0,07	33,06	1915	0,06	33,07	1915
2	0,33	3726	1296	4307	0,14	33,03	3925	0,13	33,03	3924
3	0,50	3486	1918	6372	0,21	32,99	5813	0,20	33,00	5812
4	0,67	3245	2498	8300	0,28	32,96	7579	0,25	32,97	7577
5	0,85	3005	3037	10090	0,34	32,93	9222	0,31	32,95	9218
6	1,02	2765	3534	11742	0,39	32,90	10742	0,36	32,92	10736
7	1,19	2524	3990	13256	0,45	32,88	12137	0,41	32,90	12130
8	1,36	2284	4405	14633	0,49	32,85	13407	0,45	32,87	13398
9	1,53	2043	4778	15873	0,53	32,83	14551	0,49	32,86	14541
10	1,71	1803	5109	16974	0,57	32,81	15570	0,52	32,84	15559
11	1,88	1563	5399	17938	0,60	32,80	16462	0,55	32,82	16450
12	2,05	1322	5648	18764	0,63	32,78	17227	0,58	32,81	17214
13	2,22	1082	5855	19452	0,65	32,77	17866	0,60	32,80	17851
14	2,40	841	6021	20003	0,67	32,76	18377	0,62	32,79	18362
15	2,57	601	6145	20416	0,69	32,76	18760	0,63	32,78	18744
16	2,74	361	6228	20692	0,70	32,75	19016	0,64	32,78	19000
17	2,91	120	6270	20829	0,70	32,75	19144	0,64	32,78	19127
CL	3,00	0	6275	20847	0,70	32,75	19160	0,64	32,78	19143

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 1.c – correa CB 240)

Abertura N°	x (m)	T(i+2) (kg)	Condición	Vu (kg)	Mvr (kg-m)
Extremo	0,00	0	Mixta	-2856	0
1	0,16	1915	Mixta	-3073	0
2	0,33	3924	Mixta	-3313	0
3	0,50	5812	Mixta	-3554	0
4	0,67	7577	Mixta	-3794	0
5	0,85	9218	Mixta	-4034	0
6	1,02	10736	Mixta	-4275	0
7	1,19	12130	Mixta	-4515	0
8	1,36	13398	Mixta	-4755	0
9	1,53	14541	Mixta	-4996	0
10	1,71	15559	Mixta	-5236	0
11	1,88	16450	Mixta	-5477	0
12	2,05	17214	Mixta	-5717	0
13	2,22	17851	Mixta	-5957	0
14	2,40	18362	Mixta	-6198	0
15	2,57	18744	Mixta	-6438	0
16	2,74	19000	Mixta	-6679	0
17	2,91	19127	Mixta	-6919	0
CL	3,00	19143	Mixta	-7039	0

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 34, el momento Vierendeel es nulo debido a que el aporte del concreto está tomando todo el cortante.

Tabla 35 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes
(caso 1.c – correa CB 240)

VERTICAL (ABERTURAS)			HORIZONTAL (MONTANTES)				
Abertura N°	x (m)	V _{ri} (kg)	Mont. N°	x (m)	Tr(i) (kg)	Tr(i+1) (kg)	V _{rh} (kg)
Extremo	0,00	-	Extremo	0,00	-	-	-
1	0,16	0	1	0,24	1915	3924	2009
2	0,33	0	2	0,41	3924	5812	1887
3	0,50	0	3	0,59	5812	7577	1765
4	0,67	0	4	0,76	7577	9218	1642
5	0,85	0	5	0,93	9218	10736	1518
6	1,02	0	6	1,10	10736	12130	1393
7	1,19	0	7	1,28	12130	13398	1269
8	1,36	0	8	1,45	13398	14541	1143
9	1,53	0	9	1,62	14541	15559	1017
10	1,71	0	10	1,79	15559	16450	891
11	1,88	0	11	1,97	16450	17214	764
12	2,05	0	12	2,14	17214	17851	637
13	2,22	0	13	2,31	17851	18362	510
14	2,40	0	14	2,48	18362	18744	383
15	2,57	0	15	2,66	18744	19000	255
16	2,74	0	16	2,83	19000	19127	128
17	2,91	0	CL	3,00	19127	19143	0
CL	3,00	0					

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido el corte vertical y horizontal, se procede a evaluar los estados límites de pandeo local.

Flexión del montante

Tomando el corte máximo horizontal, se calcula el momento último y se compara con el momento nominal afectado por el factor de resistencia, según las recomendaciones de LRFD.

$$M_u = (V_{uh}) \left(\frac{h_s}{2} \right) \quad M_u = (2009) \left(\frac{0,16}{2} \right) = 161 \text{ kg} - \text{m}$$

Para obtener la flexión admisible, se debe calcular M_{ocr}/M_p , que para un ángulo de 60° se hace uso de las siguientes ecuaciones

$$e/t_w = 10 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,587(0,917)^{\frac{h_s}{e}} \leq 0,493$$

$$\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,587(0,917)^{\frac{160}{40}} = 0,416$$

$$e/t_w = 20 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 1,96(0,699)^{\frac{h_s}{e}}$$

$$\frac{M_{ocr}}{M_p} = 1,96(0,699)^{\frac{160}{40}} = 0,468$$

$$e/t_w = 30 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 2,55(0,574)^{\frac{h_s}{e}}$$

$$\frac{M_{ocr}}{M_p} = 2,55(0,574)^{\frac{160}{40}} = 0,277$$

Se tomará el valor de $M_{ocr}/M_p = 0,468$ ya que este no supera el límite

La capacidad a flexión admisible del montante será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) M_p \quad \phi_b = 0,90$$

$$M_p = 0,25 t_w (s - e)^2 F_y$$

$$M_p = 0,25(6,3)(172,4 - 40)^2(2530) = 699 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n = 0,90(0,468)(699) = 294 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u$$

Corte horizontal

Seleccionando como corte último el mayor obtenido de la evaluación en cada montante, tal y como se muestra en la tabla 35, se tiene

$$V_{uh} = 2009 \text{ kg}$$

El área para la evaluación de la capacidad de corte es la correspondiente al montante

$$\phi V_n = 0,60 A_w F_y \quad \phi V_n = 0,60(4)(0,63)(2530) = 3825 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_u$$

Corte vertical

La sección de acero no recibe corte debido a que el concreto tiene capacidad para absorberlo por completo (tabla 35).

$$V_{global} = V_{uv} + V_c$$

$$V_{global} = 0 + 4183 = 4183 \text{ kg}$$

Se busca el corte correspondiente a un cordón de la zona alveolada

$$V_T = V_{global} \left(\frac{A_T}{A_A} \right)$$

$$V_T = 4183 \left(\frac{8,95}{17,90} \right) = 2092 \text{ kg}$$

Se busca la capacidad de corte en la sección de alma llena y en la sección alveolada

Para la sección de alma llena ($k_v = 5,34$)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{(240 - 2(9,5))}{6,3} = 35,08$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73,23 \quad c_{v1} = 1,0$$

$$A_g = (h_c - 2t_f)t_w \quad A_g = (24 - 2(0,95))0,63 = 13,92 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(13,92)(1,0) = 21135 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_w}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(21135) = 21135 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_{global}$$

Para la sección de alma alveolada ($k_v = 1,20$)

$$\frac{h_t}{t_w} = \frac{(40)}{6,3} = 6,35$$

$$\frac{h_t}{t_w} < 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 34,72 c_{v2} = 1,0$$

$$A_T = h_t t_w \quad A_T = (4)0,63 = 2,52 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(2,52)(1,0) = 3825 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(3825) = 3825 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_T$$

- Vigas

$$y_{\text{efmixt}} = h_c - (h_t - y_o) + h_r - t_c/2 \quad y_{\text{efmixt}} = 531,70 \text{ mm}$$

Con el primer valor de fuerza axial calculado, comienza el proceso iterativo, buscando la altura del concreto requerida para resistir el momento global.

$$y_{\text{efmixt}} = \frac{T}{0,85f'_c A_c}$$

Tabla 36 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura

(caso 1.c – viga CB 480)

Abertura N°	x (m)	Corte y Momento global		FUERZA AXIAL PROCESO ITERATIVO						
		Vr (kg)	Mr (kg-m)	Tl(i) (kg)	dc(i) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+1) (kg)	dc(i+1) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+2) (kg)
Extremo	0,00	20916	0	0	0,00	56,17	0	0,00	56,17	0
1	0,22	19575	4543	8544	0,23	56,06	8105	0,22	56,06	8104
2	0,57	17514	10937	20570	0,55	55,89	19568	0,53	55,91	19563
3	0,91	15454	16621	31260	0,84	55,75	29814	0,80	55,77	29803
4	1,26	13393	21594	40614	1,09	55,62	38822	1,04	55,65	38805
5	1,60	11333	25857	48631	1,31	55,52	46576	1,25	55,54	46553
6	1,95	9272	29410	55312	1,49	55,43	53061	1,43	55,46	53032
7	2,29	7212	32251	60657	1,63	55,35	58263	1,57	55,39	58230
8	2,64	5151	34383	64666	1,74	55,30	62174	1,67	55,33	62137
9	2,98	3091	35804	67338	1,81	55,26	64786	1,74	55,30	64746
10	3,33	1030	36514	68674	1,85	55,25	66093	1,78	55,28	66052
CL	3,50	0	36603	68841	1,85	55,24	66256	1,78	55,28	66215

Fuente: Elaboración propia

Garantizando la capacidad de resistencia de los conectores necesarios. Y, por ende, el comportamiento de la sección transversal es completamente mixto.

Tabla 37 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura

(caso 1.c – viga CB 480)

Abertura N°	x (m)	T(i+2) (kg)	Condición	Vu (kg)	Mvr (kg-m)
Extremo	0,00	0	Mixta	12117	207
1	0,22	8104	Mixta	10776	184
2	0,57	19563	Mixta	8715	149
3	0,91	29803	Mixta	6655	114
4	1,26	38805	Mixta	4594	78
5	1,60	46553	Mixta	2534	43
6	1,95	53032	Mixta	473	8
7	2,29	58230	Mixta	-1587	0
8	2,64	62137	Mixta	-3648	0
9	2,98	64746	Mixta	-5708	0
10	3,33	66052	Mixta	-7769	0
CL	3,50	66215	Mixta	-8799	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 1.c – viga CB 480)

VERTICAL (ABERTURAS)			HORIZONTAL (MONTANTES)				
Abertura N°	x (m)	Vri (kg)	Montante N°	x (m)	Tr(i) (kg)	Tr(i+1) (kg)	Vrh (kg)
Extremo	0,00	-	Extremo	0,00	-	-	-
1	0,22	9746	1	0,40	8104	19563	11460
2	0,57	7685	2	0,74	19563	29803	10240
3	0,91	5625	3	1,09	29803	38805	9002
4	1,26	3564	4	1,43	38805	46553	7748
5	1,60	1504	5	1,78	46553	53032	6479
6	1,95	237	6	2,12	53032	58230	5198
7	2,29	0	7	2,47	58230	62137	3907
8	2,64	0	8	2,81	62137	64746	2609
9	2,98	0	9	3,16	64746	66052	1306
10	3,33	0	CL	3,50	66052	66052	0
CL	3,50	0					

Fuente: Elaboración propia

Flexión del montante

El momento último de los montantes es

$$M_u = (11460) \left(\frac{0,32}{2} \right) = 1834 \text{ kg} - \text{m}$$

Se busca la flexión admisible con M_{ocr}/M_p , para un ángulo de 60°

Con $h_s/e = 320/80$

$$e/t_w = 10 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,416$$

$$e/t_w = 20 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,468$$

$$e/t_w = 30 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,277$$

Se tomará el valor de $M_{ocr}/M_p = 0,468$ ya que este no supera el límite

La capacidad a flexión admisible del montante será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) M_p \quad \phi_b = 0,90$$

$$M_p = 0.25 t_w (s - e)^2 F_y$$

$$M_p = 0.25(1,15)(34,48 - 8)^2(2530) \div 100 = 5100 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n = 0,90(0,468)(5100) = 2148 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u$$

Corte horizontal

Seleccionando como corte último el mayor obtenido de la evaluación en cada montante, tal y como se muestra en la tabla 38, se tiene

$$V_{uh} = 11460 \text{ kg}$$

$$\phi V_n = 0,60(8)(1,15)(2530) = 13966 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_u$$

Corte vertical

Tomando el corte máximo de la tabla 37, y se agregando el valor tomado por el bloque de concreto

$$V_{global} = 10776 + 8799 = 19575 \text{ kg}$$

Se busca el corte correspondiente a un cordón de la zona alveolada

$$V_T = V_{global} \left(\frac{A_T}{A_A} \right)$$

$$V_T = 19575 \left(\frac{29,87}{59,75} \right) = 8357 \text{ kg}$$

Se busca la capacidad de corte en la sección de alma llena y en la sección alveolada

Para la sección de alma llena ($k_v = 5,34$)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{(480 - 2(17,3))}{11,50} = 38,73$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73,23 \quad c_{v1} = 1,0$$

$$A_g = (48 - 2(1,73))1,15 = 51,22 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(51,22)(1,0) = 77753 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_w}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1.00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(77753) = 77753 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_{global}$$

Para la sección de alma alveolada ($k_v = 1,20$)

$$\frac{h_t}{t_w} = \frac{(80)}{11,5} = 6,96$$

$$\frac{h_t}{t_w} < 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 34,72 c_{v2} = 1,0$$

$$A_T = h_t t_w \quad A_T = (8)1,15 = 9,2 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(9,2)(1,0) = 13966 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1.00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(13966) = 13966 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_T$$

Caso 2

De manera análoga al caso 1, se realizan los cálculos para la segunda propuesta de un sistema de piso de losa mixta, presentándose los resultados obtenidos

- Luz viga de diseño = 9,00 m
- Luz correa = 4,00 m
- Separación entre correas = 1,50 m

a. Correas y vigas con perfiles estándares

Estado límite de servicio

Etapas de construcción

- | | |
|--|---------------------------------------|
| ○ Peso lámina = 7,74 kg/m ² | ○ Carga de servicio lámina = 288 kg/m |
| ○ Carga construcción = 100 kg/m ² | ○ Carga de servicio correa = 492 kg/m |
| ○ Peso propio losa = 180 kg/m ² | ○ Carga de servicio viga = 2624 kg/m |
| ○ Peso estructura = 40 kg/m ² | |

Etapas de uso

- | | |
|--|----------------------------------|
| ○ Pavimento = 80 kg/m ² | ○ Carga de uso correa = 825 kg/m |
| ○ Cielo raso (plafond) = 30 kg/m ² | ○ Carga de uso viga = 4400 kg/m |
| ○ Tabiquería = 100 kg/m ² | |
| ○ Peso propio estructura = 40 kg/m ² | |
| ○ C.V. (edif. Comercial) = 300 kg/m ² | |

Seleccionando los siguientes perfiles, se tiene

- Correa, perfil IPN 160, peso propio = 17,90 kg/m
- Viga, perfil IPN 500, peso propio = 141 kg/m

Tabla 39 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 2.a

Etapa	Inercia (cm ⁴)		
	Lámina	Correa	Viga
Construcción	17	935	68740
Uso (mixta)	-	5328	153649

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40 Deflexiones de miembros, caso 2.a

Etapa	Deflexión de los miembros (cm)					
	Lámina	Y _{máx}	Correa	Y _{máx}	Viga	Y _{máx}
Construcción	0,22	0,75	0,84	2,00	0,31	4,5
Uso	-	-	0,24	1,11	0,23	2,5

Fuente: Elaboración propia.

Etapa de resistencia

Al evaluar la correa, con $Z_x = 324 \text{ cm}^3$, se tiene lo siguiente

$$M_u = \frac{(1500)(4)^2}{8} = 3000 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n = 0,90 (324)(2530) = 3097 \text{ kg} - \text{m} > M_u$$

Ya que se encuentra muy cercano al límite se estudia el aporte del concreto

$$A_c = 600 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 22,80 \text{ cm}^2$$

Falla total del concreto $f_c = 0,85 f'_c b_{\text{efect}} t_c$

$$f_c = 127500 \text{ kgf}$$

Falla total del acero $f_s = F_y A_s$

$$f_s = 57684 \text{ kgf}$$

Se limita a el concreto por la falla del acero ya que será el primero en ceder.

$$57684 \text{ kgf} = 0,85(250)(100)y$$

$y = 2,71 \text{ cm} \rightarrow$ lo que se puede aprovechar del concreto

$$h_{\text{total comp}} = h + t_r + t_c$$

$$h_{\text{total comp}} = 26 \text{ cm}$$

$$\text{brazo} = 26 - \frac{2,71}{2} - \frac{16}{2} = 16,65 \text{ cm}$$

$$M_n = 57684 (0,1665)$$

$$M_n = 9602 \text{ kgf} - \text{m}$$

$$\phi M_n = 8641 \text{ kgf} - \text{m}$$

Tabla 41 Verificación de resistencia de los miembros, caso 2.a

Miembro	Resistencia (kg - m)	
	M_u	ϕM_n
Correa	3000	8641
Viga	58909	73775

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\phi M_n > M_u$

b. Correas con perfiles estándares y vigas con perfiles alveolados

Estado límite de servicio

Del diseño anterior, se conserva el perfil obtenido para las correas (IPN 160). Para la viga, la selección del perfil alveolado se hará a partir de las tablas de propiedades dispuestas en este trabajo.

Seleccionando el perfil CB 664, peso propio=76,20 kg/m

Tabla 42 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 2.b

Etapa	Inercia (cm ⁴)		
	Lámina	Correa	Viga
Construcción	17	935	109348
Uso (mixta)	-	5328	217043

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43 Deflexiones de miembros, caso 2.b

Etapa	Deflexión de los miembros (cm)					
	Lámina	$\Delta_{máx}$	Correa	$\Delta_{máx}$	Viga	$\Delta_{máx}$
Construcción	0,22	0,75	0,84	2,00	0,20	4,50
Uso	-	-	0,24	1,11	0,16	2,50

Fuente: Elaboración propia.

Etapas de resistencia

Conservando el valor de la correa del caso 2.a, se evalúa la viga, con $Z_x = 3187 \text{ cm}^3$.

Tabla 44 Verificación de resistencia de los miembros, caso 2.a

Miembro	Resistencia (kg - m)	
	Mu	ϕM_n
Correa	3000	8641
Viga	58909	72568

Se cumple que, $\phi M_n > M_u$

Se busca el número de alveolos que tendrá la viga para posteriormente, estudiar los estados límites en las aberturas

De la tabla 7, se obtiene la siguiente información

$$e = 247,50 \text{ mm} \quad D_o = 495 \text{ mm} \quad h_c = 664,30 \text{ mm} \quad h_t = 84,70 \text{ mm}$$

$$y_o = 64,40 \text{ mm}$$

Para las vigas celulares $s = e + D_o$

$$s = 247,50 + 495 = 742,5 \text{ mm}$$

$$N_{huecos} = \frac{9,00}{0,7425} = 12,10 \approx 12$$

$$s_o = \frac{9,00 - (12 - 1)(0,7425)}{2} = 0,416 \text{ m}$$

Estados límites

Se busca la distancia efectiva entre el centroide del bloque de concreto y el centroide de la sección de acero, esto con el fin de obtener la fuerza axial, al dividir el momento global entre dicha distancia.

$$y_{efmixt} = h_c - (h_t - y_o) + h_r - t_c/2 \quad y_{efmixt} = 714 \text{ mm}$$

Con el primer valor de fuerza axial calculado, comienza el proceso iterativo, buscando la altura del concreto requerida para resistir el momento global.

$$y_{efmixt} = \frac{T}{0,85f_c A_c}$$

Tabla 45 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura
(caso 2.b – viga CB 664)

Abertura N°	x (m)	Corte y Momento global		FUERZA AXIAL PROCESO ITERATIVO						
		Vr (kg)	Mr (kg-m)	Tl(i) (kg)	dc(i) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+1) (kg)	dc(i+1) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+2) (kg)
Extremo	0,00	35856	0	0	0,00	74,40	0	0,00	74,40	0
1	0,42	32539	14235	19937	0,42	74,19	19187	0,40	74,20	19185
2	1,16	26623	36199	50699	1,06	73,87	49004	1,02	73,89	48992
3	1,90	20707	53770	75308	1,58	73,61	73045	1,53	73,64	73021
4	2,64	14791	66948	93765	1,96	73,42	91186	1,91	73,45	91153
5	3,39	8874	75734	106070	2,22	73,29	103334	2,16	73,32	103293
6	4,13	2958	80127	112223	2,35	73,23	109423	2,29	73,26	109380
CL	4,50	0	80676	112992	2,36	73,22	110185	2,30	73,25	110141

Fuente: Elaboración propia

Asumiendo la capacidad de resistencia de todos los conectores. Y, por ende, el comportamiento de la sección transversal es completamente mixto.

Tabla 46 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 2.b – viga CB 664)

Abertura N°	x (m)	T (kg)	Condición	Vu (kg)	Mvr (kg-m)
Extremo	0,00	0	Mixta	24543	1519
1	0,42	19185	Mixta	21226	1313
2	1,16	48992	Mixta	15310	947
3	1,90	73021	Mixta	9394	581
4	2,64	91153	Mixta	3478	215
5	3,39	103293	Mixta	-2439	0
6	4,13	109380	Mixta	-8355	0
CL	4,50	110141	Mixta	-11313	0

Fuente: Elaboración propia

El cálculo del momento Vierendeel en cada abertura viene dado por el cortante último y la ecuación

$$M_{vr} = V_u \left(\frac{A_T}{A_n} \right) \left(\frac{e}{2} \right)$$

El momento Vierendeel será nulo en las zonas donde el cortante sea negativo, esto significa que, el aporte del concreto está tomando todo el corte, por lo tanto, no habrá transmisión de dicha fuerza en los cordones.

Tabla 47 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 2.b – viga CB 664)

VERTICAL (ABERTURAS)			HORIZONTAL (MONTANTES)				
Abertura N°	x (m)	Vr (kg)	Montante N°	x (m)	Tr(i) (kg)	Tr(i+1) (kg)	Vrh (kg)
Extremo	0,00	-	Extremo	0,00	-	-	-
1	0,42	18268	1	0,79	19185	48992	29807
2	1,16	12352	2	1,53	48992	73021	24030
3	1,90	6436	3	2,27	73021	91153	18132
4	2,64	1739	4	3,02	91153	103293	12141
5	3,39	0	5	3,76	103293	109380	6086
6	4,13	0	6	4,50	109380	110141	762
CL	4,87	0					

Fuente: Elaboración propia

La fuerza cortante se presenta tanto en las zonas alveoladas como en los montantes. En las aberturas se evalúa el corte vertical, a partir del global, luego de considerar la fracción que es tomada por el concreto.

Los montantes reciben el corte horizontal, el cual viene producido por la diferencia de las fuerzas axiales aplicada entre dos cordones.

$$V_{rh} = |T_{r(i)} - T_{r(i+1)}|$$

Flexión del montante

El corte último horizontal será el máximo valor entre los evaluados en cada montante. Se calcula el momento último y se compara con el momento nominal afectado por el factor de resistencia, según las recomendaciones de LRFD.

$$M_u = (V_{uh}) \left(\frac{D_o}{2} \right) \quad M_u = (29807) \left(\frac{0,495}{2} \right) = 7377 \text{ kg} - \text{m}$$

Para obtener la flexión admisible, se debe calcular M_{max}/M_e

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[C1 \left(\frac{s}{D_o} \right) - C2 \left(\frac{s}{D_o} \right)^2 - C3 \right]$$

Con $D_o/t_w = 495/16,20$

$$C1 = 7,95 \quad C2 = 12,71 \quad C3 = 5,24$$

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[7,95 \left(\frac{742,5}{495} \right) - 12,71 \left(\frac{742,5}{495} \right)^2 - 5,24 \right] = 0,57$$

$$M_e = \frac{16,20(2530)(742,50-495)^2}{6} = 18949 \text{ kg} - \text{m}$$

El momento flector admisible será

$$\phi M_n = 0,90(0,57)18949 = 9743 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u$$

Corte horizontal

De la tabla 47, se tiene

$$V_{uh} = 29807 \text{ kg}$$

El área para la evaluación de la capacidad de corte es la correspondiente al montante

$$\phi V_n = 0,60 A_w F_y$$

$$\phi V_n = 0,60(74,25)(1,62)(2530) = 60864 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_u$$

Corte vertical

Tomando el mayor cortante vertical de la tabla 46 y considerando el aporte de concreto

$$V_{global} = 21226 + 11313 = 32539 \text{ kg}$$

Se busca el corte correspondiente a un cordón de la zona alveolada

$$V_T = V_{global} \left(\frac{A_T}{A_A} \right)$$

$$V_T = 32539 \left(\frac{55,60}{111,20} \right) = 16270 \text{ kg}$$

Se evalúa la capacidad de corte

Para la sección de alma llena ($k_v = 5,34$)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{(664 - 2(17,3))}{16,20} = 38,01$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73,23 \quad c_{v1} = 1,0$$

$$A_g = (h_c - 2t_f)t_w \quad A_g = (6,64 - 2(1,73))1,62 = 99,74 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(99,74)(1,0) = 151410 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_w}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(151410) = 151410 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_{global}$$

Para la sección de alma alveolada ($k_v = 1,20$)

$$\frac{h_t}{t_w} = \frac{(84,7)}{16,20} = 5,23$$

$$\frac{h_t}{t_w} < 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 34,72 c_{v2} = 1,0$$

$$A_T = h_t t_w \quad A_T = (8,47)1,62 = 13,72 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(13,72)(1,0) = 20829 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1,00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(20829) = 20829 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_T$$

c. Correas y vigas con perfiles alveolados

Estado límite de servicio

La geometría del corte será hexagonal para los dos casos

Se selecciona los siguientes perfiles

- Correa CB 210, peso propio 14,40 kg/m
- Viga CB 675, peso propio 115 kg/m

Tabla 48 Inercias de las secciones transversales según la etapa de estudio, caso 2.c

Etapa	Inercia (cm ⁴)		
	Lámina	Correa	Viga
Construcción	17	1449	116174
Uso (mixta)	-	5575	230219

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49 Deflexiones de miembro, caso 2.c

Etapa	Deflexión de los miembros (cm)					
	Lámina	Y _{máx}	Correa	Y _{máx}	Viga	Y _{máx}
Construcción	0.22	0.75	0.49	2.00	0.18	4.50
Uso	-	-	0.16	1.11	0.15	2.50

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\delta < Y_{\max}$

Etapa de resistencia

Para la correa con perfil CB 210 $Z_x = 167 \text{ cm}^3$

Para la viga con perfil CB 675 $Z_x = 3457 \text{ cm}^3$

Tabla 50 Verificación de resistencia de los miembros, caso 1.c

Miembro	Resistencia (kg - m)	
	Mu	ϕM_n
Correa	3000	3803
Viga	58909	78715

Fuente: Elaboración propia.

Se cumple que, $\phi M_n > M_u$

Se busca el número de alveolos que tendrá la correa y viga respectivamente.

De la tabla 3, se obtiene la siguiente información

Para correa CB 210

$$e = 35 \text{ mm} \quad d = 140 \text{ mm} \quad h_s = 160 \text{ mm} \quad b = 40,4 \text{ mm}$$

$$s = 2(35) + 2(40,4) = 150,80 \text{ mm}$$

$$N_{\text{huecos}} = \frac{4,00}{0,158} = 26,5 \approx 26$$

$$s_o = \frac{4,00 - (26 - 1)(0,158)}{2} = 0,115 \text{ m}$$

Para viga CB 675

$$e = 112,50 \text{ mm} \quad d = 225 \text{ mm} \quad h_s = 450 \text{ mm} \quad b = 129,90 \text{ mm}$$

$$s = 2(112,50) + 2(129,90) = 484,80 \text{ mm}$$

$$N_{\text{huecos}} = \frac{9,00}{0,4848} = 18,60 \approx 18$$

$$s_o = \frac{9,00 - (18 - 1)(0,4848)}{2} = 0,3792 \text{ m}$$

Estados límites

- Correa

$$y_{\text{efmixt}} = h_c - (h_t - y_o) + h_r - t_c/2$$

$$y_{\text{efmixt}} = 210 - (35 - 27) + 60 - \frac{40}{2} = 99,60 \text{ mm}$$

Con el primer valor de fuerza axial calculado, comienza el proceso iterativo, buscando la altura del concreto requerida para resistir el momento global.

$$y_{\text{efmixt}} = \frac{T}{0,85f'_c A_c}$$

Tabla 51 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura (caso 2.c – correa CB 210)

Abertura N°	x (m)	Corte y Momento global		FUERZA AXIAL PROCESO ITERATIVO						
		Vr (kg)	Mr (kg-m)	Tl(i) (kg)	dc(i) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+1) (kg)	dc(i+1) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+2) (kg)
Extremo	0,00	2988	0	0	0,00	27,77	0	0,00	27,77	0
1	0,12	2816	334	3351	0,16	27,69	1205	0,06	27,74	1203
2	0,27	2591	741	7444	0,35	27,59	2687	0,13	27,71	2676
3	0,42	2366	1115	11196	0,53	27,51	4054	0,19	27,67	4030
4	0,57	2140	1455	14607	0,69	27,43	5305	0,25	27,65	5263
5	0,72	1915	1761	17677	0,83	27,35	6437	0,30	27,62	6375
6	0,87	1690	2032	20406	0,96	27,29	7448	0,35	27,59	7365
7	1,02	1464	2270	22794	1,07	27,23	8336	0,39	27,57	8233
8	1,17	1239	2474	24841	1,17	27,19	9101	0,43	27,56	8979
9	1,32	1014	2644	26546	1,25	27,15	9740	0,46	27,54	9600
10	1,47	789	2780	27911	1,31	27,11	10253	0,48	27,53	10098
11	1,62	563	2882	28934	1,36	27,09	10638	0,50	27,52	10472
12	1,77	338	2950	29616	1,39	27,07	10896	0,51	27,51	10721
13	1,92	113	2984	29957	1,41	27,07	11024	0,52	27,51	10846
CL	2,00	0	2988	30000	1,41	27,06	11040	0,52	27,51	10861

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura (caso 2.c – correa CB 210)

Abertura N°	x (m)	T(i+2) (kg)	Condición	Vu (kg)	Mvr (kg-m)
Extremo	0,00	0	Mixta	-2040	0
1	0,12	1203	Mixta	-2212	0
2	0,27	2676	Mixta	-2437	0
3	0,42	4030	Mixta	-2662	0
4	0,57	5263	Mixta	-2888	0
5	0,72	6375	Mixta	-3113	0
6	0,87	7365	Mixta	-3338	0
7	1,02	8233	Mixta	-3564	0
8	1,17	8979	Mixta	-3789	0
9	1,32	9600	Mixta	-4014	0
10	1,47	10098	Mixta	-4239	0
11	1,62	10472	Mixta	-4465	0
12	1,77	10721	Mixta	-4690	0
13	1,92	10846	Mixta	-4915	0
CL	2,00	10861	Mixta	-5028	0

Fuente: Elaboración propia

El momento Vierendeel es nulo debido a que el aporte del concreto está tomando todo el cortante

Flexión del montante

Tomando el corte máximo horizontal, de la tabla 53, se obtiene el momento actuante en el montante.

$$M_u = (1473) \left(\frac{0,14}{2} \right) = 103 \text{ kg} - \text{m}$$

Tabla 53 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes

(caso 2.c – correa CB 210)

VERTICAL (ABERTURAS)			HORIZONTAL (MONTANTES)				
Abertura N°	x (m)	Vr (kg)	Montante N°	x (m)	Tr(i) (kg)	Tr(i+1) (kg)	Vrh (kg)
Extremo	0,00	-	Extremo	0,00	-	-	-
1	0,12	0	1	0,19	1203	2676	1473
2	0,27	0	2	0,34	2676	4030	1354
3	0,42	0	3	0,49	4030	5263	1233
4	0,57	0	4	0,64	5263	6375	1112
5	0,72	0	5	0,79	6375	7365	990
6	0,87	0	6	0,94	7365	8233	868
7	1,02	0	7	1,10	8233	8979	745
8	1,17	0	8	1,25	8979	9600	622
9	1,32	0	9	1,40	9600	10098	498
10	1,47	0	10	1,55	10098	10472	374
11	1,62	0	11	1,70	10472	10721	249
12	1,77	0	12	1,85	10721	10846	125
13	1,92	0	CL	2,00	10846	10846	0
CL	2,00	0					

Fuente: Elaboración propia

Para obtener la flexión admisible, se debe calcular M_{ocr}/M_p , que para un ángulo de 60° se hace uso de las siguientes ecuaciones

Para $d/e = 140/35$

$$e/t_w = 10 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,416$$

$$e/t_w = 20 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,468$$

$$e/t_w = 30 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,277$$

Se tomará el valor de $M_{ocr}/M_p = 0,468$ ya que este no supera el límite

La capacidad a flexión admisible del montante será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) M_p \quad \phi_b = 0,90$$

$$M_p = 0.25 t_w (s - e)^2 F_y$$

$$M_p = 0.25(5,7)(150,80 - 35)^2(2530) = 483 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n = 0,90(0,468)(483) = 204 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u$$

Corte horizontal

Seleccionando como corte último el mayor obtenido de la evaluación en cada montante, tal y como se muestra en la tabla 53, se tiene

$$V_{uh} = 1473 \text{ kg}$$

El área para la evaluación de la capacidad de corte es la correspondiente al montante

$$\phi V_n = 0,60 A_w F_y$$

$$\phi V_n = 0,60(3,5)(0,63)(2530) = 3475 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_u$$

Corte vertical

La sección de acero no recibe corte, pero se considera lo tomado por el concreto (tabla 3)

$$V_{global} = 0 + 2988 = 2988 \text{ kg}$$

Se busca el corte correspondiente a un cordón de la zona alveolada

$$V_T = 2988 \left(\frac{7,18}{14,36} \right) = 1199 \text{ kg}$$

Se busca la capacidad de corte en la sección de alma llena y en la sección alveolada

Para la sección de alma llena ($k_v = 5,34$)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{(210 - 2(8,6))}{5,7} = 33,82$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73,23 \quad c_{v1} = 1,0$$

$$A_g = (h_c - 2t_f)t_w \quad A_g = (21 - 2(0,86))0,57 = 10,99 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(10,99)(1,0) = 16682 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_w}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1.00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1.0)(16682) = 16682 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_{global}$$

Para la sección de alma alveolada ($k_v = 1.20$)

$$\frac{h_t}{t_w} = \frac{(35)}{5.7} = 6.14$$

$$\frac{h_t}{t_w} < 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 34.72 c_{v2} = 1.0$$

$$A_T = h_t t_w \quad A_T = (3.5)0.57 = 2.00 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0.60(2530)(2.00)(1.0) = 3028 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1.00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1.0)(3028) = 3028 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_T$$

○ Vigas

$$y_{efmixt} = h_c - (h_t - y_o) + h_r - t_c/2$$

$$y_{efmixt} = 675 - (112.50 - 85.90) + 60 - \frac{40}{2} = 718.40 \text{ mm}$$

Con el primer valor de fuerza axial calculado, comienza el proceso iterativo, buscando la altura del concreto requerida para resistir el momento global.

$$y_{efmixt} = \frac{T}{0.85 f'_c A_c}$$

Tabla 54 Evaluación de corte, momento y fuerza axial actuante en cada abertura
(caso 2.c – viga CB 675)

Corte y Momento global				FUERZA AXIAL PROCESO ITERATIVO						
Abertura N°	x (m)	Vr (kg)	Mr (kg-m)	T(i) (kg)	dc(i) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+1) (kg)	dc(i+1) (cm)	Yefmixt (cm)	T(i+2) (kg)
Extremo	0,00	35856	0	0	0,00	74,84	0	0,00	74,84	0
1	0,38	32835	13024	18129	0,38	74,65	17446	0,36	74,66	17445
2	0,86	28972	28006	38983	0,82	74,43	37626	0,79	74,45	37618
3	1,35	25109	41115	57231	1,20	74,24	55380	1,16	74,26	55365
4	1,83	21246	52351	72872	1,52	74,08	70670	1,48	74,10	70648
5	2,32	17383	61715	85906	1,80	73,94	83464	1,75	73,97	83435
6	2,80	13520	69206	96333	2,01	73,83	93733	1,96	73,86	93699
7	3,29	9657	74824	104153	2,18	73,75	101455	2,12	73,78	101416
8	3,77	5794	78569	109367	2,29	73,70	106612	2,23	73,73	106570
9	4,26	1931	80442	111974	2,34	73,67	109194	2,28	73,70	109151
CL	4,50	0	80676	112300	2,35	73,67	109516	2,29	73,69	109473

Fuente: Elaboración propia

Garantizando la capacidad de resistencia de los conectores necesarios. Y, por ende, el comportamiento de la sección transversal es completamente mixto.

Tabla 55 Evaluación de momento Vierendeel actuante en cada abertura
(caso 2.c – viga CB 675)

Momento local Vierendeel					
Abertura N°	x (m)	T (kg)	Condición	Vu (kg)	Mvr (kg-m)
Extremo	0,00	0	Mixta	24543	690
1	0,38	17445	Mixta	21521	605
2	0,86	37618	Mixta	17659	497
3	1,35	55365	Mixta	13796	388
4	1,83	70648	Mixta	9933	279
5	2,32	83435	Mixta	6070	171
6	2,80	93699	Mixta	2207	62
7	3,29	101416	Mixta	-1656	0
8	3,77	106570	Mixta	-5519	0
9	4,26	109151	Mixta	-9382	0
CL	4,50	109473	Mixta	-11313	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56 Evaluación del cortante en las aberturas y montantes (caso 2.c – viga CB 675)

VERTICAL (ABERTURAS)			HORIZONTAL (MONTANTES)				
Abertura N°	x (m)	Vr (kg)	Montante N°	x (m)	Tr(i) (kg)	Tr(i+1) (kg)	Vrh (kg)
Extremo	0,00	-	Extremo	0,00	-	-	-
1	0,38	19590	1	0,62	17445	37618	20174
2	0,86	15727	2	1,11	37618	55365	17747
3	1,35	11864	3	1,59	55365	70648	15283
4	1,83	8001	4	2,08	70648	83435	12787
5	2,32	4138	5	2,56	83435	93699	10263
6	2,80	1104	6	3,05	93699	101416	7717
7	3,29	0	7	3,53	101416	106570	5154
8	3,77	0	8	4,02	106570	109151	2580
9	4,26	0	CL	4,50	109151	108108	0
CL	4,50	0					

Fuente: Elaboración propia

Flexión del montante

El corte último horizontal será el máximo valor entre los evaluados en cada montante. Se calcula el momento último y se compara con el momento nominal afectado por el factor de resistencia, según las recomendaciones de LRFD.

$$M_u = (V_{uh}) \left(\frac{h_s}{2} \right) \quad M_u = (20174) \left(\frac{0,45}{2} \right) = 4539 \text{ kg} - \text{m}$$

Para obtener la flexión admisible, se debe calcular M_{ocr}/M_p , que para un ángulo de 60° se hace uso de las siguientes ecuaciones

Para $d/e = 450/112,50$

$$e/t_w = 10 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,416$$

$$e/t_w = 20 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,468$$

$$e/t_w = 30 \quad \frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,277$$

Se tomará el valor de $M_{ocr}/M_p = 0,468$ ya que este no supera el límite

La capacidad a flexión admisible del montante será

$$\phi M_n = \phi_b \left(\frac{M_{ocr}}{M_p} \right) M_p \quad \phi_b = 0,90$$

$$M_p = 0,25 t_w (s - e)^2 F_y$$

$$M_p = 0,25(1,62)(48,48 - 11,25)^2(2530) \div 100 = 14202 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n = 0,90(0,468)(14202) = 14202 \text{ kg} - \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u$$

Corte horizontal

Seleccionando el máximo corte último en los montantes, de la tabla 56.

$$V_{uh} = 20174 \text{ kg}$$

El área para la evaluación de la capacidad de corte es la correspondiente al montante

$$\phi V_n = 0,60 A_w F_y$$

$$\phi V_n = 0,60(11,25)(1,62)(2530) = 13966 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_u$$

Corte vertical

De la tabla 55, se selecciona el mayor cortante vertical y se agrega el valor tomado por el bloque de concreto

$$V_{global} = 21521 + 11313 = 32835 \text{ kg}$$

Se busca el corte correspondiente a un cordón de la zona alveolada

$$V_T = 32835 \left(\frac{55,60}{111,20} \right) = 16417 \text{ kg}$$

Se busca la capacidad de corte en la sección de alma llena y en la sección alveolada

Para la sección de alma llena ($k_v = 5,34$)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{(675 - 2(24,30))}{16,20} = 38,67$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 73,23 \quad c_{v1} = 1,0$$

$$A_g = (67,5 - 2(2,43))1,62 = 101,48 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(101,48)(1,0) = 154042 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_w}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1.00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(154042) = 154042 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_{global}$$

Para la sección de alma alveolada ($k_v = 1,20$)

$$\frac{h_t}{t_w} = \frac{(112,50)}{16,20} = 6,94$$

$$\frac{h_t}{t_w} < 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} = 34,72 c_{v2} = 1,0$$

$$A_T = h_t t_w \quad A_T = (11,25)1,62 = 18,23 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0,60(2530)(18,23)(1,0) = 27666 \text{ kg}$$

$$\text{Para } \frac{h_t}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} ; \Phi_v = 1.00$$

$$V_n = \phi_v V_n$$

$$\phi V_n = (1,0)(27666) = 27666 \text{ kg}$$

$$\phi V_n > V_T$$

Soldadura de unión

En la norma ANSI/AISC360-16 “Especificación para construcción de estructuras de acero”, en el capítulo J, dentro de las disposiciones generales señalan “Los grupos de soldaduras y pernos en los extremos de cualquier momento que transmite carga axial deben ser dimensionados de manera tal que el centro de gravedad del grupo coincida con el centro de gravedad del miembro”. En las vigas casteladas, las uniones de montantes transmiten fuerzas axiales, por lo que se debe la ubicación de la coincidencia de los centros de gravedad.

El diseño de la soldadura dependerá del espesor de la lámina a unir.

- Para espesor de lámina $< 6 \text{ mm}$, la soldadura será de filete
- Para espesor de lámina $> 6 \text{ mm}$, la soldadura será de penetración completa

TABLA J2.5 (continuación)
Resistencia Disponible de Juntas Soldadas, T (kN)

Tipo de Carga y Dirección Relativa al Eje de Soldadura	Metal Pertinente	ϕ y Ω	Tensión Nominal (F_{tens} o F_{ax}) kgf/cm ² (MPa)	Área Efectiva (A_{tens} o A_{ax}) cm ² (mm ²)	Nivel de Resistencia Requerida del Metal de Aporte [1][2]
Compresión Columna a plancha base y empalmes de columna diseñados por Sección J1.4(a)	No se necesita considerar la tensión de compresión en el diseño de soldaduras que conectan las partes.				resistencia igual o menor que el metal de aporte compatible con el metal base.
Compresión Conexiones de miembros diseñados para soportar que no sean columnas como se describe en Sección J1.4(b)	Base	$\phi = 0,90$ $\Omega = 1,67$	F_y	Ver J4	
	Soldadura	$\phi = 0,80$ $\Omega = 1,88$	$0,60 F_{tens}$	Ver J2.1a	
Compresión Conexiones no terminadas para soporte	Base	$\phi = 0,90$ $\Omega = 1,67$	F_y	Ver J4	
	Soldadura	$\phi = 0,80$ $\Omega = 1,88$	$0,90 F_{tens}$	Ver J2.1a	
Tracción o Compresión Paralelo al eje de soldadura	No se necesita considerar la tracción o compresión paralela a una soldadura en el diseño de las soldaduras que unen las partes.				
Corte	Base	Gobernado por J4			
	Soldadura	$\phi = 0,75$ $\Omega = 2,00$	$0,60 F_{tens}$	Ver J2.1a	
SOLDADURAS DE FILETE INCLUYENDO FILETES EN AGUJEROS Y EN RANURAS Y JUNTAS T ESVIADAS					
Corte	Base	Gobernado por J4			Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que el metal de aporte compatible con metal base.
	Soldadura	$\phi = 0,75$ $\Omega = 2,00$	$0,60 F_{tens}$ [4]	Ver J2.2a	
Tensión o Compresión Paralelo al eje de soldadura	No se necesita considerar la tracción o la compresión paralela a una soldadura en el diseño de las soldaduras que unen las partes.				
SOLDADURAS DE TAPON Y DE RANURA					
Corte Paralelo a la superficie de contacto en el área efectiva	Base	Gobernado por J4			Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor que el metal de aporte compatible con metal base.
	Soldadura	$\phi = 0,75$ $\Omega = 2,00$	$0,60 F_{tens}$	Ver J2.3a	

[1] Para metal de soldadura compatible con metal base ver la Sección 3.3 de AWS D1.1.

[2] Se permite un metal de aporte con un nivel de resistencia un nivel mayor que aquel compatible con metal base.

[3] Se pueden usar metales de aporte con un nivel de resistencia menor que aquel compatible con metal base para soldaduras de tope entre las almas y alas de secciones armadas transfiriendo las cargas de corte, o en aplicaciones donde la alta condición de restricción es una preocupación. En estas aplicaciones, la junta soldada puede ser detallada y la soldadura puede ser diseñada utilizando el espesor del material como la garganta efectiva, $\phi = 0,80$, $\Omega = 1,88$ y $0,60 F_{tens}$ como resistencia nominal.

[4] Alternativamente, se permiten las disposiciones de la Sección J2.4(a) cuando se considera la compatibilidad de deformaciones de los variados elementos de soldadura. Alternativamente, las Secciones J2.4(b) y (c) son aplicaciones especiales de la Sección J2.4(a) que proveen la compatibilidad de deformación.

Tabla 57 Resistencia disponible de junta soldada

Fuente: norma ANSI/AISC360-16 “Especificación para construcción de estructuras de acero”

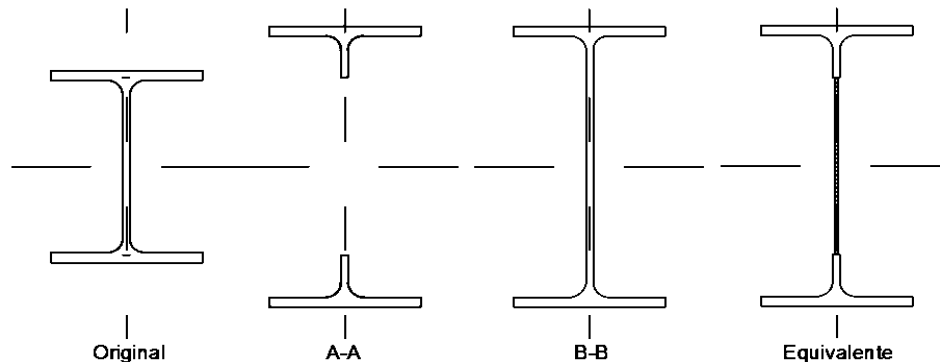
CAPÍTULO IV

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE VIGA DE ALMA LLENA Y VIGA ALVEOLADA

4.1 Análisis de resultados obtenidos mediante estudio de estados límites

En el capítulo IV se realizó el estudio de dos casos de un sistema de entrepiso de losa mixta, verificando, en las correas y vigas, los estados límites tanto por servicio como por resistencia. A continuación, se presentan los cuadros comparativos de estos casos, señalando momento de inercia, módulo de sección elástico y plástico, además del peso de cada miembro seleccionado.

Figura 42 Sección transversal de un perfil estándar y un perfil alveolado.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58 Cuadro comparativo entre la selección de perfiles estándares y alveolados para caso 1, correa de luz 6 m.

Caso 1	Perfil	Descripción	$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$	$S_x \text{ (cm}^3\text{)}$	$Z_x \text{ (cm}^3\text{)}$	Peso (kg/m)
a	IPN 220	Original	3060	278	324	31,1
		A-A	-	-	-	
		B-B	-	-	-	
		Equivalente	-	-	-	
b	IPN 220	Original	3060	278	324	31,1
		A-A	-	-	-	
		B-B	-	-	-	
		Equivalente	-	-	-	
c	CB 240 (IPN 160)	Original	935	117	136	17,9
		A-A	2220	185	199	
		B-B	2435	203	239	
		Equivalente	2357	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59 Cuadro comparativo entre la selección de perfiles estándares y alveolados para caso 1, viga de luz 7 m.

Caso 1	Perfil	Descripción	$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$	$S_x \text{ (cm}^3\text{)}$	$Z_x \text{ (cm}^3\text{)}$	Peso (kg/m)
a	IPN 360	Original	19610	1090	1276	76,2
		A-A	-	-	-	
		B-B	-	-	-	
		Equivalente	-	-	-	
b	CB 472 (IPN 320)	Original	12510	782	914	61,1
		A-A	27346	1158	1226	
		B-B	31526	1335	1583	
		Equivalente	29784	-	-	
c	CB 480 (IPN 320)	Original	12510	782	914	61,1
		A-A	29599	1233	1325	
		B-B	32739	1364	1618	
		Equivalente	31589	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60 Cuadro comparativo de caso 2, entre la selección de perfiles estándares y alveolados para correa de luz 4 m.

Caso 2	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
a	IPN 160	Original	935	117	136	17,9
		A-A	-	-	-	
		B-B	-	-	-	
		Equivalente	-	-	-	
b	IPN 160	Original	935	117	136	17,9
		A-A	-	-	-	
		B-B	-	-	-	
		Equivalente	-	-	-	
c	CB 210 (IPN 140)	Original	573	81,9	94,5	14,4
		A-A	1362	130	139	
		B-B	1492	142	167	
		Equivalente	1445	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61 Cuadro comparativo de caso 2, entre la selección de perfiles estándares y alveolados para viga de luz 9 m.

Caso 2	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
a	IPN 500	Original	68740	2750	3240	141
		A-A	-	-	-	
		B-B	-	-	-	
		Equivalente	-	-	-	
b	CB 664 (IPN 450)	Original	45850	2040	2400	115
		A-A	99796	3004	3187	
		B-B	116170	3497	4180	
		Equivalente	109348			
c	CB 675 (IPN 450)	Original	45850	2040	2400	115
		A-A	108375	3211	3457	
		B-B	120677	3576	4277	
		Equivalente	116174	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado anteriormente, estas vigas se caracterizan por tener un incremento de sus propiedades sin la necesidad de aumentar su peso inicial. Se presentan los porcentajes de ahorro en el peso del miembro, comparando el perfil estándar con el alveolado de los casos estudiados:

Tabla 62 Porcentaje de ahorro de peso para los casos estudiados

Caso	Correa	Viga
1	42%	19,82%
2	19,55%	18,44%

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que todos los casos superan el 18% de ahorro. Esto puede significar para la estructura una reducción de peso estructural y costos asociados significativos.

Los estados límites se evaluaron en función de las áreas más críticas de la viga, siendo las alveoladas. En base a esto, se evaluó la condición de cada viga, presentadas en las tablas 16 a 19. La mayoría de las secciones obtenidas resultaron compactas, lo que significa que, alcanza la cedencia y deformaciones sin sufrir pandeo local. Al chequear este mecanismo de falla cumplieron las secciones.

Respecto a los estados límites de servicio, al hacer uso de un perfil alveolado con un momento de inercia que garantice su cumplimiento, la deflexión puede disminuir como puede incrementar, más dicho incremento no deberá ser excesivo.

4.2 Análisis elástico mediante el uso de elementos finitos

4.2.1 Descripción general del software SAP 2000

SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento del más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

Este software considera un sistema de referencia y orientación principal espacial, de tres ejes, con dos grados de libertad asociados a cada uno (seis grados en total), tal que, los primeros tres grados están asociados a los desplazamientos en dirección de los ejes y los tres restantes esta asociados a las rotaciones en torno a los ejes principales y un sistema

de referencia secundario para cada uno de los elementos llamados ejes locales, los cuales se rigen por la regla de la mano derecha.



Figura 43 Imagen referencial del software de diseño SAP2000

Los objetos de área pueden definirse en el modelo con comportamiento de membrana, de placa y concha (*Shell*). A través de capas, se pueden definir *shells* que contienen diferentes materiales y, por consiguiente, un comportamiento mixto y no lineal.

4.2.2 Secciones y propiedades del material considerados en la modelación

A partir del estudio realizados del caso 1, en el capítulo IV, se obtuvieron perfiles alveolados y perfiles de alma llena, que bajo el sistema de cargas establecido cumplen con los requerimientos por estado límite de servicio y por estado límite de resistencia.

Los perfiles obtenidos se usarán para el modelado por medio de elementos finitos, con un mallado externo, de elementos rectangulares y trapezoidales, y una relación de forma igual a 1,05. El primero corresponderá al perfil con corte circular CB 472, de la viga de la sección 1.b, y el segundo modelado será para la viga de la sección 1.c, CB 480, con corte hexagonal. El tipo de acero es un acero estructural ASTM A36.

4.2.3 Cargas y condiciones de borde aplicadas

Una vez creadas las secciones de los perfiles que componen el modelo espacial y, asignadas las propiedades del material, se procedió a modelar la geometría de los alveolos y, asignar las cargas a partir de lo establecido en el capítulo IV.

Las vigas fueron sometidas a un sistema de carga nodal, aplicando las cargas, permanente y variable, en la intersección del eje central del ala superior con el eje central de cada montante, como se muestra en la 0.

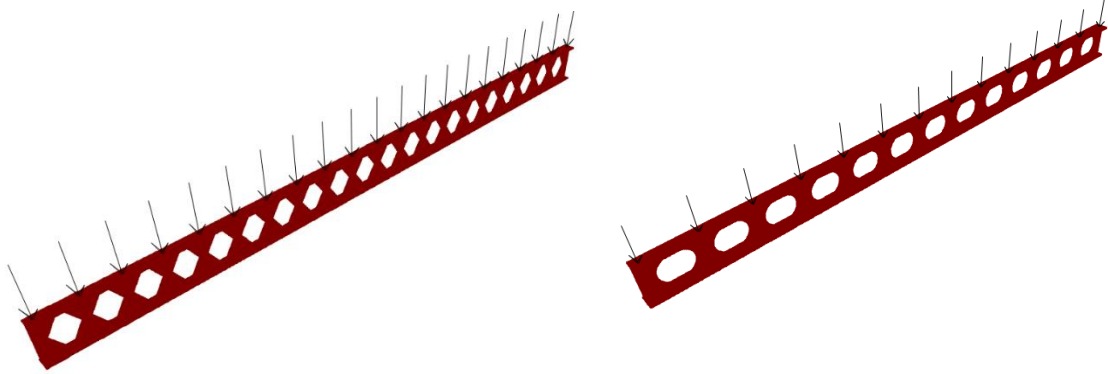
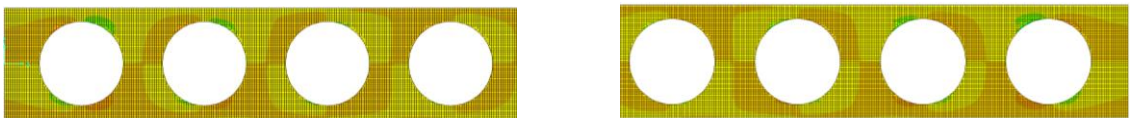


Figura 44 Carga sobre nodos principales de la viga, aplicadas a una separación “s” (izquierda viga castelada, derecha viga celular).

Fuente: Elaboración propia.

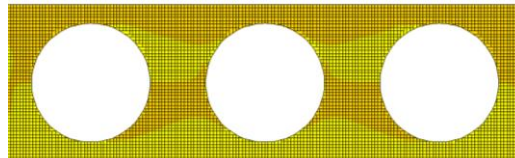
Con lo anteriormente expuesto y en base a la revisión bibliográfica presentada en el capítulo III, de manera general, se espera que se produzcan grandes concentraciones de esfuerzos en los contornos de las aberturas.

Figura 45 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en los extremos de la viga CB 472.



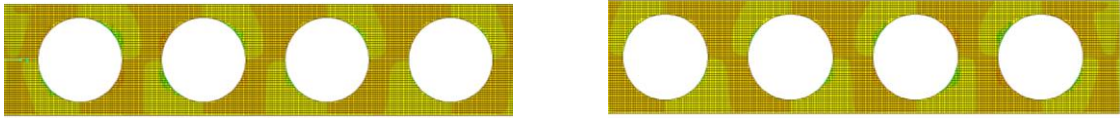
Fuente: Elaboración propia.

Figura 46 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en las aberturas centrales de la viga CB 472.



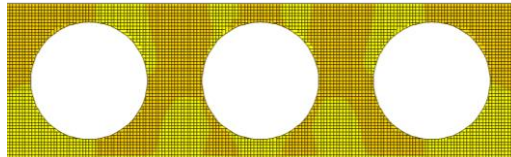
Fuente: Elaboración propia.

Figura 47 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en los extremos de la viga CB 472.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 48 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en las aberturas centrales de la viga CB 472.



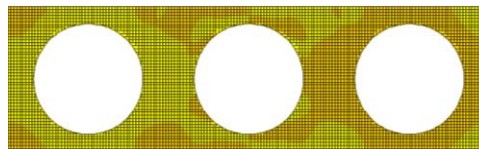
Fuente: Elaboración propia.

Figura 49 Distribución de esfuerzos cortantes en los extremos de la viga CB 472.



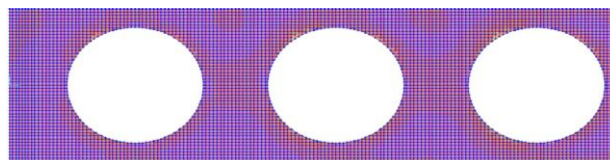
Fuente: Elaboración propia.

Figura 50 Distribución de esfuerzos cortantes en las aberturas centrales de la viga CB 472.



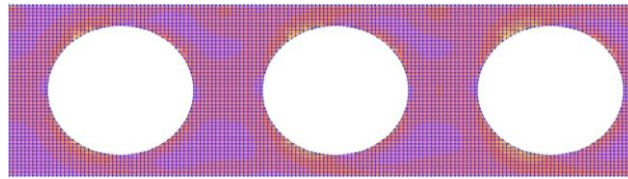
Fuente: Elaboración propia.

Figura 51 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) el extremo de la viga CB 472.



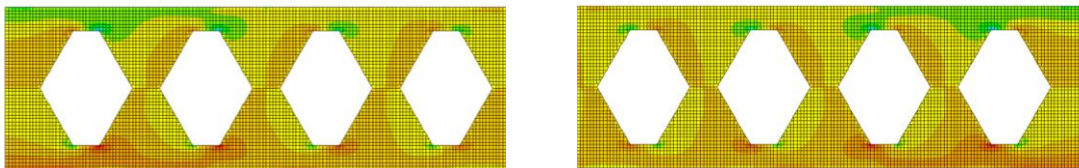
Fuente: Elaboración propia.

Figura 52 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) en las aberturas centrales de la viga CB 472.



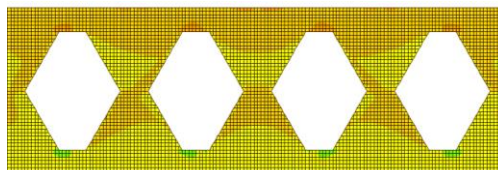
Fuente: Elaboración propia.

Figura 53 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en los extremos de la viga CB 480.



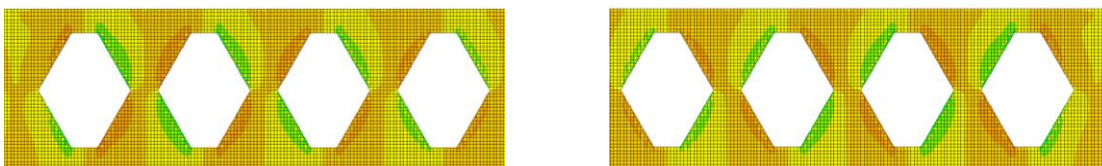
Fuente: Elaboración propia.

Figura 54 Distribución de esfuerzos principales en dirección x, en las aberturas centrales de la viga CB480.



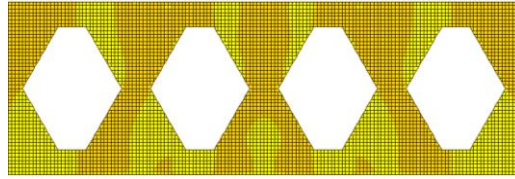
Fuente: Elaboración propia.

Figura 55 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en los extremos de la viga CB 480.



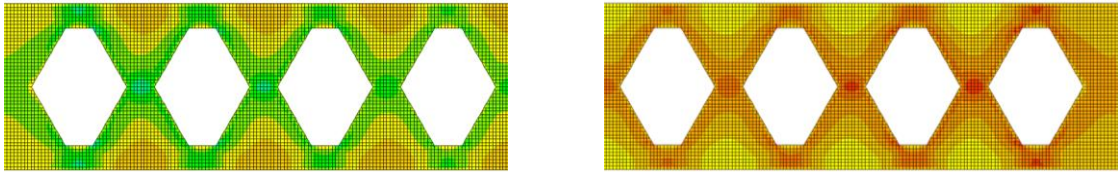
Fuente: Elaboración propia.

Figura 56 Distribución de esfuerzos principales en dirección y, en las aberturas centrales de la viga CB 480.



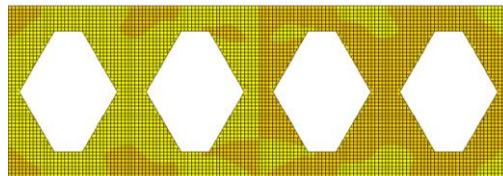
Fuente: Elaboración propia.

Figura 57 Distribución de esfuerzos cortantes en los extremos de la viga CB 480.



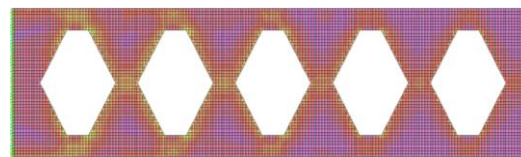
Fuente: Elaboración propia.

Figura 58 Distribución de esfuerzos cortantes en las aberturas centrales de la viga CB 480.



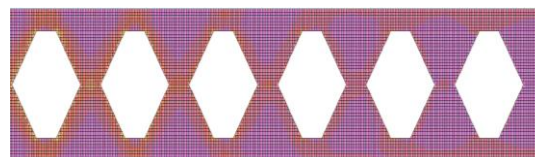
Fuente: Elaboración propia.

Figura 59 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) en el extremo de la viga CB 480.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 60 Distribución de esfuerzos Von Mises (VMS) en las aberturas centrales de la viga CB 480.



Fuente: Elaboración propia.

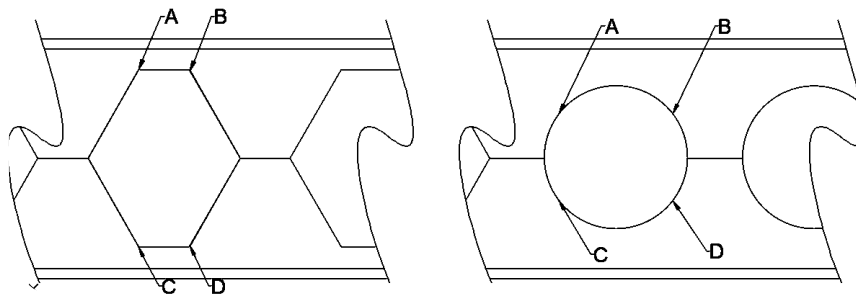


Figura 61 Identificación de los puntos de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 63 Valores de esfuerzos principales, viga CB 472

Punto	Esfuerzo σ_x (kg/cm ²)		Esfuerzo σ_y (kg/cm ²)		Esfuerzo τ_{xy} (kg/cm ²)		Esfuerzo SVM (kg/cm ²)	
	Extremo	Central	Extremo	Central	Extremo	Central	Extremo	Central
A	-3707,93	-309,36	-3304,45	33,19	1239,31	99,46	251,77	348,28
B	4311,89	-249,57	3240,21	36,26	1242,20	-100,82	256,6	151,81
C	2854,66	274,00	3617,95	-18,70	1833,02	90,20	174,74	275,51
D	-3067,30	216,48	-3066,28	-18,71	1550,52	-99,54	205,55	171,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 64 Valores de esfuerzos principales, CB 480

Punto	Esfuerzo σ_x (kg/cm ²)		Esfuerzo σ_y (kg/cm ²)		Esfuerzo τ_{xy} (kg/cm ²)		Esfuerzo SVM (kg/cm ²)	
	Extremo	Central	Extremo	Central	Extremo	Central	Extremo	Central
A	-3036,89	-803,33	-3179,49	-500,24	1521,76	318,83	43,62	13,11
B	5356,95	-1247,18	3803,33	-124,80	2010,97	-126,00	51,15	7,88
C	2973,84	753,25	3153,43	486,77	1505,97	309,32	43,05	12,53
D	-5386,74	1197,10	-3801,76	11,29	2012,74	-121,12	64,11	7,68

Fuente: Elaboración propia.

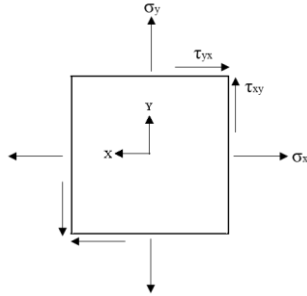


Figura 62 Representación de esfuerzos principales de compresión, tracción y esfuerzos cortantes, según los ejes principales establecidos por SAP2000.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras referentes al análisis de elementos finitos, se puede apreciar cómo se desarrolla la distribución de esfuerzos sobre el miembro. Se observa grandes concentraciones en los contornos de las aberturas.

En el caso de los esfuerzos a tracción y compresión, las mayores solicitaciones ocurren en los extremos, como consecuencia de los momentos producidos por la condición de empotramiento.

Las flechas máximas obtenidas para los casos de estudios por el software de diseño resultaron, para el perfil CB 472 0,78 cm mientras que para el CB 480 una deflexión de 0,98 cm

El estrés de Von Mises proporciona una medida del esfuerzo cortante proporcional a la energía de distorsión en el material. Este tipo de estrés tiende a causar la cedencia se identifica en términos de las tensiones principales

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presenta a continuación, las conclusiones obtenidas luego del desarrollo de este trabajo de investigación, partiendo de los objetivos específicos expuestos en el capítulo I.

Posteriormente, se proponen una serie de recomendaciones con la finalidad de ampliar la información de los perfiles alveolados, permitiendo ampliar el enfoque y obteniendo mejoras en trabajos futuros respecto a la presente investigación.

5.1 Conclusiones

Según los objetivos planteados en el capítulo I, se concluye lo siguiente

- Las vigas de alma aligerada, presentan un comportamiento muy similar a las vigas Vierendeel, caracterizándose por transmitir fuerzas axiales (análogo a una cercha) y momento.
- Los puntos críticos en este tipo de vigas, se presentan en las proximidades de las aberturas, en las zonas de los cordones, donde la distribución de esfuerzos es interrumpida debido a la ausencia de material en el alma.
- El análisis de los estados límites de servicio representan un estudio fundamental para estos miembros, debido a la relación peso/altura, estas vigas pueden ser ligeramente más susceptibles a la inestabilidad en procesos constructivos de sistemas de pisos.
- Sabiendo que estas vigas presentan una inercia variable entre la sección de alma llena y la sección alveolada, la deflexión de la misma se calcula con un momento de inercia equivalente, como valor intermedio.
- Debido a la falta de información en las normas, respecto a este tipo de vigas, la evaluación de los estados límites de resistencia se hacen en función de la sección más desfavorable para el caso de cedencia, pandeo lateral – torsional y pandeo local.

- La evaluación del cortante abarca las secciones alveoladas y de alma llena en el sentido vertical, mientras que para el corte horizontal se evalúa el cortante en las zonas de los montantes.
- Se puede apreciar que, bajo una relación $\alpha = 1,5$ (relación altura castelada versus altura original), las vigas tienen un incremento del 50% de su altura inicial y alcanzan valores de momento de inercia que representan más del doble de la del perfil base. Esto puede representar una disminución considerable en la deflexión de las mismas.
- Al comparar la selección entre un perfil estándar versus un perfil de alma aligerada, se puede visualizar que se alcanza un ahorro en el peso del material, y, por ende, en el peso total de la estructura del sistema de piso, hasta un 30% en promedio.
- El estudio por elementos finitos permitió verificar la concentración de esfuerzos alrededor de las aberturas, principalmente en las esquinas de las mismas (puntos A, B, C y D). Además, se observó cómo los rangos de esfuerzos son similares en las esquinas opuestas, lo que confirma que, a grandes solicitaciones, se puede generar pandeo local en el montante.

5.2 Recomendaciones

Una vez culminada la investigación, se propone

- Desarrollar ensayos experimentales con los dos patrones de corte de aberturas, buscando alcanzar la falla de los puntos críticos de las vigas.
- Evaluar el comportamiento de estas vigas bajo condiciones de diseño sismorresistente.
- Realizar un estudio económico detallado, respecto a los costos asociados al proceso de fabricación, basándose en estimaciones de cantidad de material requerido.
- Estudio del caso de sistemas de vigas alveoladas sin arriostramiento en el ala a compresión.

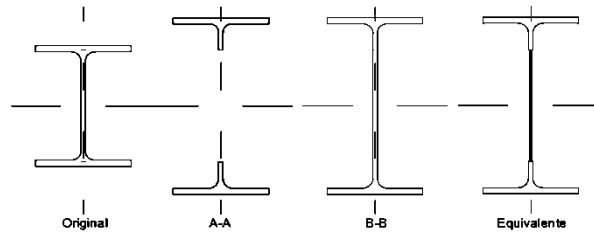
Anexo 1: Procedimiento de diseño de vigas alveoladas mediante el método de los estados límites

El diseño de vigas alveoladas sigue el procedimiento indicado a continuación

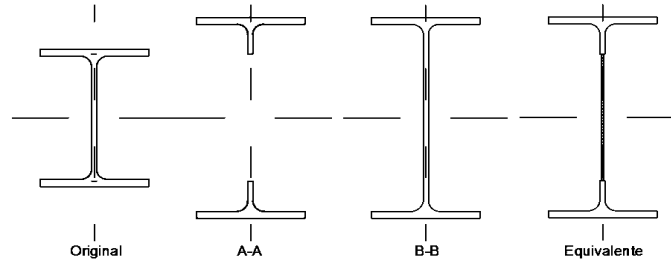
1. Determinar las condiciones de carga y su combinación, según lo establecido en la Norma Venezolana Covenin 1618-1998.
2. Establecer la distribución del sistema de piso, entre correas, vigas principales y secundarias.
3. Al diseñar vigas pertenecientes a un sistema de losa mixta, se busca el área de concreto que forma parte de dicho sistema.
4. Se establece un patrón de corte, hexagonal o circular. En base a dicho patrón, se selecciona un perfil de las tablas de propiedades ubicadas en el apartado 4.2.
5. Se realiza el chequeo de los estados límites
 - a. Estado límite de servicio, el perfil seleccionado debe cumplir con el momento de inercia requerido. Para la etapa de construcción, se considera la sección de acero, tomando como inercia la equivalente entre la sección alveolada y la sección de alma llena (ver tablas en Anexo 2). Para la etapa de uso, se considera el concreto dentro de la sección, por lo que, el momento de inercia corresponderá al de la combinación del concreto con el acero. En este caso, el área de concreto será la equivalente en acero, haciendo uso de la relación de los módulos de elasticidad de los dos materiales.
 - b. Estado límite de resistencia, se busca el momento máximo obtenido de las combinaciones de carga. Para el caso de correa, con condición simplemente apoyada, el momento último será el correspondiente al centro de la luz de la viga (positivo), mientras que, para las vigas doblemente empotradas, el momento último será el de los apoyos (negativo).
6. Se calcula el corte y momento global en cada abertura. A partir del corte neto (resultante al considerar el aporte del concreto), se busca el momento Vierendeel en los cordones de la sección alveolada. Este mecanismo se genera en las zonas donde se produce mayor corte.

7. Mediante un proceso iterativo se obtiene la distancia efectiva entre el eje de aplicación de fuerza del concreto y el acero. El momento global es dividido entre dicha distancia obteniendo la fuerza axial en la sección.
8. Se busca el corte vertical en las aberturas y el corte horizontal en los montantes. El primero es el resultado de la diferencia entre el corte global y el aporte del concreto. El segundo es la diferencia de las fuerzas axiales entre dos aberturas.
9. Se clasifica la sección según el pandeo local evaluando la relación de esbeltez de la sección establecidos en la tabla B4.1b de la norma ANSI/AISC 360-16 “*Especificación para construcción de estructuras de acero*”. Se considera el caso más desfavorable, el cual corresponde a la zona de los alveolos, tomando la sección T del cordón superior. Ver tablas de relación ancho – espesor, en el apartado 4.2.3.
10. En base a los estados límites establecidos en el capítulo F el cual está dedicado a al diseño de miembros en flexión de la norma ANSI/AISC 360-16 “*Especificación para construcción de estructuras de acero*” se evalúan los estados límites, comparando con las solicitaciones del miembro.

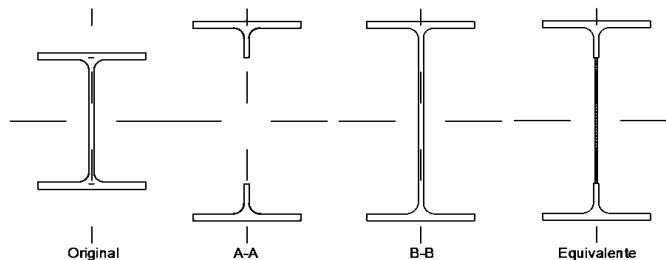
Anexo 2: Tablas resumen de las propiedades de una viga alveolada y su sección equivalente



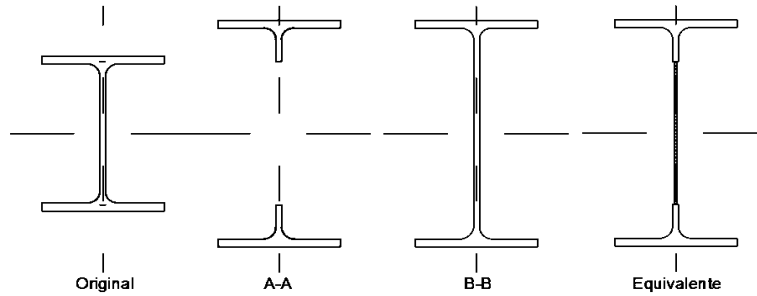
Perfil base IPN con corte hexagonal y ángulo de 60°											
Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
IPN 80	Original	77.8	19.5	22	6	IPN 300	Original	9800	653	762	54.2
	A-A	186	31	33			A-A	23187	1031	1106	
	B-B	203	34	40			B-B	25617	1139	1349	
	Equivalente	197	-	-			Equivalente	24727.15	-	-	
IPN 100	Original	171	34.2	39.4	8.32	IPN 320	Original	12510	782	914	61.1
	A-A	407	54	58			A-A	29599	1233	1325	
	B-B	444	59	70			B-B	32739	1364	1619	
	Equivalente	430.3	-	-			Equivalente	31589.38	-	-	
IPN 120	Original	328	54.7	63.1	11.2	IPN 340	Original	15700	161	1080	38.1
	A-A	779	87	93			A-A	37111	1455	1564	
	B-B	853	95	111			B-B	41107	1612	1916	
	Equivalente	826	-	-			Equivalente	39644.4	-	-	
IPN 140	Original	573	81.9	94.5	14.4	IPN 360	Original	19610	1090	1276	76.2
	A-A	1362	130	139			A-A	46359	1717	1846	
	B-B	1492	142	167			B-B	51414	1904	2267	
	Equivalente	1445	-	-			Equivalente	49563.77	-	-	
IPN 160	Original	935	117	136	17.9	IPN 380	Original	24010	1260	1482	84
	A-A	2220	185	189			A-A	56773	1992	2142	
	B-B	2435	203	239			B-B	63038	2212	2637	
	Equivalente	2356.55	-	-			Equivalente	60744.52	-	-	
IPN 180	Original	1450	161	187	21.9	IPN 400	Original	29210	1460	1714	92.6
	A-A	3430	254	273			A-A	69064	2302	2477	
	B-B	3765	279	329			B-B	76744	2558	3053	
	Equivalente	3642.24	-	-			Equivalente	73932.77	-	-	
IPN 200	Original	2140	214	250	26.3	IPN 450	Original	45850	2040	2400	115
	A-A	5075	338	363			A-A	108375	3211	3457	
	B-B	5575	372	438			B-B	120677	3576	4277	
	Equivalente	5391.52	-	-			Equivalente	116174	-	-	
IPN 220	Original	3060	278	324	31.1	IPN 500	Original	68740	2750	3240	141
	A-A	7248	439	471			A-A	162435	4332	4666	
	B-B	7967	483	569			B-B	181185	4832	5791	
	Equivalente	7703.96	-	-			Equivalente	174322.31	-	-	
IPN 240	Original	4250	354	412	36.2	IPN 550	Original	99180	3610	4240	167
	A-A	10053	559	559			A-A	234240	2679	6113	
	B-B	11056	614	724			B-B	260583	6317	7550	
	Equivalente	10688.78	-	-			Equivalente	250940.78	-	-	
IPN 260	Original	5740	442	514	41.9	IPN 600	Original	139000	4630	5452	199
	A-A	13595	697	748			A-A	328286	7295	7867	
	B-B	14972	768	907			B-B	367166	8159	9811	
	Equivalente	14467.88	-	-			Equivalente	352934.82	-	-	
IPN 280	Original	7590	542	632	48						
	A-A	17956	855	918							
	B-B	19804	943	1115							
	Equivalente	19127.79	-	-							



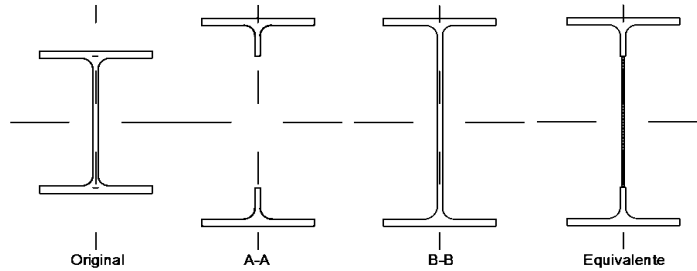
Perfil base IPE con corte hexagonal y ángulo de 60°											
Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
IPE 80	Original	80.1	20	23.2	6	IPE 270	Original	5790	429	484	36.1
	A-A	183	31	33			A-A	12780	631	667	
	B-B	199	33	39			B-B	13863	685	788	
	Equivalente	193	-	-			Equivalente	13466	-	-	
IPE 100	Original	171	34.2	39.4	8.1	IPE 300	Original	8360	557	628	42.2
	A-A	383	51	55			A-A	18551	824	871	
	B-B	418	56	65			B-B	20148	895	1031	
	Equivalente	405	-	-			Equivalente	19564	-	-	
IPE 120	Original	318	53	60.7	10.4	IPE 330	Original	11770	713	804	49.1
	A-A	717	80	85			A-A	25837	1044	1103	
	B-B	781	87	101			B-B	28083	1135	1307	
	Equivalente	757	-	-			Equivalente	27261	-	-	
IPE 140	Original	541	77.3	94.5	12.9	IPE 360	Original	16270	904	1019	57.1
	A-A	1228	117	125			A-A	35995	1333	1409	
	B-B	1335	127	148			B-B	39106	1448	1668	
	Equivalente	1296	-	-			Equivalente	37967	-	-	
IPE 160	Original	869	109	88.3	15.8	IPE 400	Original	23130	1160	1307	66.3
	A-A	1947	162	173			A-A	50697	1960	1787	
	B-B	2118	176	205			B-B	55284	1843	2131	
	Equivalente	2055	-	-			Equivalente	53605	-	-	
IPE 180	Original	1320	146	166	18.8	IPE 450	Original	33740	1500	1702	77.6
	A-A	2966	220	233			A-A	74461	2206	2336	
	B-B	3223	239	276			B-B	81599	2418	2812	
	Equivalente	3129	-	-			Equivalente	78986	-	-	
IPE 200	Original	1940	194	221	22.4	IPE 500	Original	48200	1930	2194	90.7
	A-A	4297	286	304			A-A	107052	2855	3026	
	B-B	4670	311	360			B-B	117677	3138	3663	
	Equivalente	4533	-	-			Equivalente	113788	-	-	
IPE 220	Original	2770	252	285	26.2	IPE 550	Original	67120	2440	2787	106
	A-A	6173	374	396			A-A	148187	3592	3813	
	B-B	6696	406	480			B-B	163577	3965	4652	
	Equivalente	6505	-	-			Equivalente	157944	-	-	
IPE 240	Original	3890	324	367	30.7	IPE 600	Original	92080	3070	3512	122
	A-A	8537	474	502			A-A	204693	4549	4832	
	B-B	9251	514	591			B-B	226293	5029	5912	
	Equivalente	8990	-	-			Equivalente	218387	-	-	



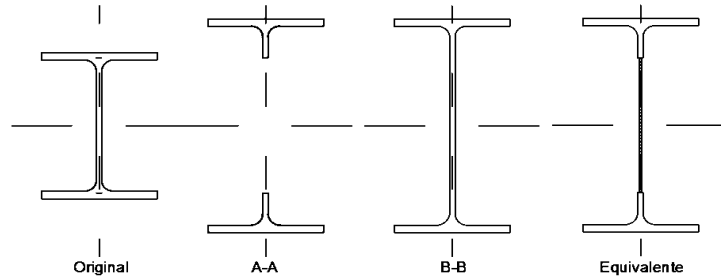
Perfil base VP, CP serie estándar con corte hexagonal y ángulo de 60°											
Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
VP 120	Original	335	55.7	61.2	9.7	VP 420	Original	24600	1170	1330	65.7
	A-A	775	86	90			A-A	56971	1809	1913	
	B-B	818	91	101			B-B	62528	1985	2309	
	Equivalente	803.76	-	-			Equivalente	60675.3	-	-	
VP 140	Original	592	84.5	92.7	12.4	CP 140	Original	1170	168	187	25.5
	A-A	1374	131	137			A-A	2764	263	279	
	B-B	1443	137	152			B-B	2901	276	309	
	Equivalente	1420.03	-	-			Equivalente	2855.13	-	-	
VP 160	Original	874	109	125	16.4	CP 160	Original	1790	223	248	29.3
	A-A	2031	169	180			A-A	4186	349	368	
	B-B	2236	186	218			B-B	4391	366	407	
	Equivalente	2167.39	-	-			Equivalente	4322.72	-	-	
VP 180	Original	1310	146	162	17.7	CP 180	Original	2580	287	316	33.1
	A-A	3039	225	226			A-A	6029	447	469	
	B-B	3258	241	273			B-B	6320	468	518	
	Equivalente	3185.16	-	-			Equivalente	6222.94	-	-	
VP 200	Original	2280	228	252	24.1	CP 200	Original	4660	466	521	50.1
	A-A	5306	354	372			A-A	10936	729	773	
	B-B	5606	374	417			B-B	11536	763	863	
	Equivalente	5505.79	-	-			Equivalente	11335.9	-	-	
VP 250	Original	4390	351	386	29.4	CP 220	Original	6280	571	636	55.3
	A-A	10164	542	567			A-A	14705	891	941	
	B-B	10750	573	637			B-B	15504	940	1050	
	Equivalente	10554.8	-	-			Equivalente	15237.5	-	-	
VP 300	Original	8520	568	633	41.3	CP 240	Original	8250	687	762	60.4
	A-A	19786	879	926			A-A	19254	1070	1127	
	B-B	21136	939	1061			B-B	20291	1127	1256	
	Equivalente	20685.7	-	-			Equivalente	19945.3	-	-	
VP 350	Original	13700	785	869	48.3	CP 260	Original	10600	815	900	65.7
	A-A	31782	1211	1270			A-A	24656	1264	1329	
	B-B	33925	1292	1454			B-B	25974	1333	1481	
	Equivalente	33210.8	-	-			Equivalente	25553.1	-	-	
VP 400	Original	20700	1040	1140	55.4						
	A-A	47850	1595	1669							
	B-B	51050	1702	1909							
	Equivalente	49983.5	-	-							



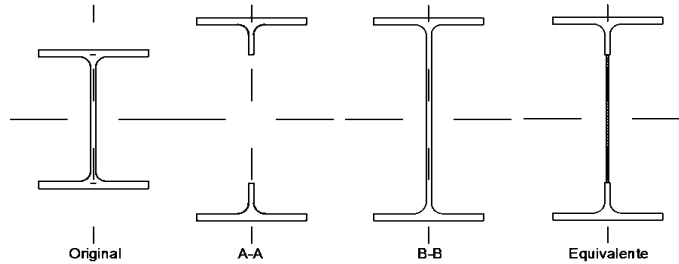
Perfil base VP, CP serie petrolera con corte hexagonal y ángulo de 60°											
Perfil	Descripción	$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$	$S_x \text{ (cm}^3\text{)}$	$Z_x \text{ (cm}^3\text{)}$	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$	$S_x \text{ (cm}^3\text{)}$	$Z_x \text{ (cm}^3\text{)}$	Peso (kg/m)
VP 120	Original	609	102	116	18.9	VP 250	Original	5680	454	505	38.9
	A-A	1443	160	172			A-A	13244	706	744	
	B-B	1530	170	193			B-B	14026	748	838	
	Equivalente	1498	-	-			Equivalente	13740	-	-	
VP 140	Original	864	124	140	19.9	VP 250	Original	5970	477	543	44.2
	A-A	2036	194	207			A-A	13935	743	790	
	B-B	2173	207	236			B-B	15107	806	931	
	Equivalente	2123	-	-			Equivalente	14678	-	-	
VP 160	Original	1170	146	166	20.8	VP 300	Original	9050	603	690	47.8
	A-A	2745	229	243			A-A	21043	935	994	
	B-B	2950	246	282			B-B	23068	1025	1197	
	Equivalente	2875	-	-			Equivalente	22327	-	-	
VP 180	Original	1530	170	193	21.8	VP 350	Original	14600	834	949	56
	A-A	3575	265	282			A-A	33854	1290	1366	
	B-B	3867	286	330			B-B	37069	1412	1642	
	Equivalente	3760	-	-			Equivalente	35892	-	-	
VP 200	Original	2350	236	265	26.2	VP 400	Original	22000	1100	1250	64.2
	A-A	5486	366	387			A-A	51028	1701	1798	
	B-B	5886	392	447			B-B	55828	1861	2158	
	Equivalente	5740	-	-			Equivalente	54071	-	-	
VP 200	Original	3060	306	352	36	CP 160	Original	2300	287	326	39.8
	A-A	7201	480	513			A-A	5444	454	485	
	B-B	7801	520	603			B-B	5751	749	543	
	Equivalente	7582	-	-			Equivalente	5638	-	-	
VP 240	Original	4250	354	398	32.8	CP 180	Original	3340	371	418	44.9
	A-A	9928	552	584			A-A	7873	583	621	
	B-B	10620	590	670			B-B	8311	616	693	
	Equivalente	10367	-	-			Equivalente	8151	-	-	
VP 240	Original	4500	375	433	37.8						
	A-A	10531	585	626							
	B-B	11568	643	755							
	Equivalente	11188	-	-							



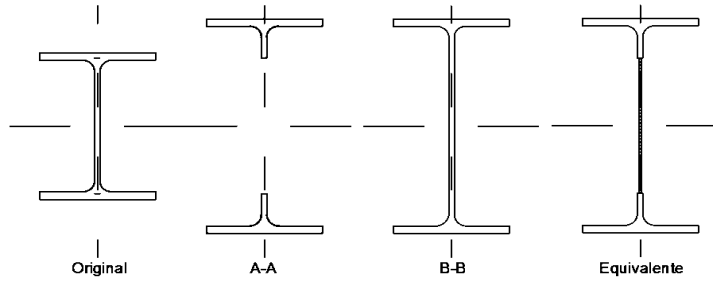
Perfil base IPN con corte circular											
Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
IPN 80	Original	77.8	19.5	22	6	IPN 300	Original	9800	653	762	54.2
	A-A	173	29	31			A-A	21434	968	1025	
	B-B	195	33	39			B-B	24669	1114	1319	
	Equivalente	186	-	-			Equivalente	13321	-	-	
IPN 100	Original	171	34.2	39.4	8.32	IPN 320	Original	12510	782	914	61.1
	A-A	378	51	54			A-A	27376	1158	1226	
	B-B	428	58	68			B-B	31526	1325	1583	
	Equivalente	407	-	-			Equivalente	29784	-	-	
IPN 120	Original	328	54.7	63.1	11.2	IPN 340	Original	15700	161	1080	38.1
	A-A	724	82	87			A-A	34263	1365	1446	
	B-B	822	93	109			B-B	39581	1577	1873	
	Equivalente	781	-	-			Equivalente	37365	-	-	
IPN 140	Original	573	81.9	94.5	14.4	IPN 360	Original	19610	1090	1276	76.2
	A-A	1264	122	130			A-A	42775	1610	1706	
	B-B	1437	139	164			B-B	49503	1863	2216	
	Equivalente	1365	-	-			Equivalente	46669	-	-	
IPN 160	Original	935	117	136	17.9	IPN 380	Original	24010	1260	1482	84
	A-A	2059	174	185			A-A	52353	1866	1979	
	B-B	2346	199	234			B-B	60691	2164	2577	
	Equivalente	2226	-	-			Equivalente	57217	-	-	
IPN 180	Original	1450	161	187	21.9	IPN 400	Original	29210	1460	1714	92.6
	A-A	3180	239	254			A-A	63663	2156	2286	
	B-B	3626	273	321			B-B	73685	2502	2983	
	Equivalente	3440	-	-			Equivalente	69625	-	-	
IPN 200	Original	2140	214	250	26.3	IPN 450	Original	45850	2040	2400	115
	A-A	4704	319	337			A-A	99796	3004	3187	
	B-B	5369	364	428			B-B	116170	3497	4180	
	Equivalente	5092	-	-			Equivalente	109348	-	-	
IPN 220	Original	3060	278	324	31.1	IPN 500	Original	68740	2750	3240	141
	A-A	6617	414	438			A-A	149449	4049	4297	
	B-B	7674	473	556			B-B	174405	4725	5659	
	Equivalente	7275	-	-			Equivalente	16407	-	-	
IPN 240	Original	4250	354	412	36.2	IPN 550	Original	99180	3610	4240	167
	A-A	9315	526	556			A-A	215798	5315	5639	
	B-B	10649	601	708			B-B	250860	6179	7378	
	Equivalente	10093	-	-			Equivalente	236250	-	-	
IPN 260	Original	5740	442	514	41.9	IPN 600	Original	139000	4630	5452	199
	A-A	12587	656	594			A-A	301635	6811	7232	
	B-B	14420	751	886			B-B	352384	7979	9584	
	Equivalente	13656	-	-			Equivalente	331822	-	-	
IPN 280	Original	7590	542	632	48						
	A-A	16613	804	851							
	B-B	19073	923	1091							
	Equivalente	18048	-	-							



Perfil base IPE con corte circular											
Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
IPE 80	Original	80.1	20	23.2	6	IPE 270	Original	5790	429	484	36.1
	A-A	171	29	31			A-A	11923	598	625	
	B-B	192	33	38			B-B	13364	671	771	
	Equivalente	183	-	-			Equivalente	12764	-	-	
IPE 100	Original	171	34.2	39.4	8.1	IPE 300	Original	8360	557	628	42.2
	A-A	357	48	51			A-A	17297	781	816	
	B-B	402	55	64			B-B	19427	807	109	
	Equivalente	383	-	-			Equivalente	18538	-	-	
IPE 120	Original	318	53	60.7	10.4	IPE 330	Original	11770	713	804	49.1
	A-A	668	75	80			A-A	24083	989	1032	
	B-B	752	85	99			B-B	27072	1111	1279	
	Equivalente	717	-	-			Equivalente	25827	-	-	
IPE 140	Original	541	77.3	94.5	12.9	IPE 360	Original	16270	904	1019	57.1
	A-A	1144	111	116			A-A	33559	1263	1319	
	B-B	1287	125	144			B-B	37699	1419	1632	
	Equivalente	1227	-	-			Equivalente	35974	-	-	
IPE 160	Original	869	109	88.3	15.8	IPE 400	Original	23130	1160	1307	66.3
	A-A	1814	154	161			A-A	47182	1598	1669	
	B-B	2041	173	200			B-B	53287	1805	2085	
	Equivalente	1947	-	-			Equivalente	50743	-	-	
IPE 180	Original	1320	146	166	18.8	IPE 450	Original	33740	1500	1702	77.6
	A-A	2764	208	218			A-A	69134	2081	2175	
	B-B	3107	234	270			B-B	78634	2367	2750	
	Equivalente	2964	-	-			Equivalente	74676	-	-	
IPE 200	Original	1940	194	221	22.4	IPE 500	Original	48200	1930	2194	90.7
	A-A	4004	271	284			A-A	99245	2689	2811	
	B-B	4501	305	352			B-B	103386	3072	3582	
	Equivalente	4294	-	-			Equivalente	107494	-	-	
IPE 220	Original	2770	252	285	26.2	IPE 550	Original	67120	2440	2787	106
	A-A	5758	355	371			A-A	137100	3377	3533	
	B-B	6455	397	458			B-B	157584	3882	4549	
	Equivalente	6165	-	-			Equivalente	149049	-	-	
IPE 240	Original	3890	324	367	30.7	IPE 600	Original	92080	3070	3512	122
	A-A	7968	450	471			A-A	189236	4263	4473	
	B-B	8918	503	579			B-B	217986	4922	5779	
	Equivalente	8522	-	-			Equivalente	206007	-	-	



Perfil base VP, CP serie estándar con corte circular											
Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	I_x (cm ⁴)	S_x (cm ³)	Z_x (cm ³)	Peso (kg/m)
VP 120	Original	335	55.7	61.2	9.7	VP 420	Original	24600	1170	1330	65.7
	A-A	732	83	86			A-A	52859	1705	1778	
	B-B	790	89	99			B-B	60255	1944	2259	
	Equivalente	766	-	-			Equivalente	57174	-	-	
VP 140	Original	592	84.5	92.7	12.4	CP 140	Original	1170	168	187	25.5
	A-A	1302	126	131			A-A	2617	253	267	
	B-B	1393	135	149			B-B	2800	271	302	
	Equivalente	1355	-	-			Equivalente	2723	-	-	
VP 160	Original	874	109	125	16.4	CP 160	Original	1790	223	248	29.3
	A-A	1881	159	167			A-A	3966	336	352	
	B-B	2154	182	214			B-B	4238	359	399	
	Equivalente	2040	-	-			Equivalente	4125	-	-	
VP 180	Original	1310	146	162	17.7	CP 180	Original	2580	287	316	33.1
	A-A	2852	215	223			A-A	5713	430	449	
	B-B	3143	237	267			B-B	6101	449	508	
	Equivalente	3022	-	-			Equivalente	5940	-	-	
VP 200	Original	2280	228	252	24.1	CP 200	Original	4660	466	521	50.1
	A-A	5011	339	354			A-A	10337	700	736	
	B-B	5410	366	409			B-B	11131	754	849	
	Equivalente	5244	-	-			Equivalente	10799	-	-	
VP 250	Original	4390	351	386	29.4	CP 220	Original	6280	571	636	55.3
	A-A	9596	520	540			A-A	13899	856	898	
	B-B	10376	562	625			B-B	14962	921	1029	
	Equivalente	10051	-	-			Equivalente	14519	-	-	
VP 300	Original	8520	568	633	41.3	CP 240	Original	8250	687	762	60.4
	A-A	18593	840	875			A-A	18204	1028	1075	
	B-B	20390	921	1039			B-B	19584	1105	1231	
	Equivalente	19641	-	-			Equivalente	19009	-	-	
VP 350	Original	13700	785	869	48.3	CP 260	Original	10600	815	900	65.7
	A-A	29879	1157	1202			A-A	23317	1215	1267	
	B-B	32732	1267	1424			B-B	25072	1306	1451	
	Equivalente	31554	-	-			Equivalente	24341	-	-	
VP 400	Original	20700	1040	1140	55.4						
	A-A	45001	1524	1579							
	B-B	49260	1668	1870							
	Equivalente	47485	-	-							



Perfil base VP, CP serie petrolera con corte circular											
Perfil	Descripción	Ix (cm ⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Peso (kg/m)	Perfil	Descripción	Ix (cm ⁴)	Sx (cm³)	Zx (cm³)	Peso (kg/m)
VP 120	Original	609	102	116	18.9	VP 250	Original	5680	454	505	38.9
	A-A	1360	154	163			A-A	12495	667	708	
	B-B	1475	167	189			B-B	13534	733	821	
	Equivalente	1427	-	-			Equivalente	13101	-	-	
VP 140	Original	864	124	140	19.9	VP 250	Original	5970	477	543	44.2
	A-A	1913	185	196			A-A	13002	705	741	
	B-B	2096	203	231			B-B	14562	789	911	
	Equivalente	2020	-	-			Equivalente	13912	-	-	
VP 160	Original	1170	146	166	20.8	VP 300	Original	9050	603	690	47.8
	A-A	2571	218	229			A-A	19532	882	925	
	B-B	2844	241	276			B-B	22227	1004	1170	
	Equivalente	2730	-	-			Equivalente	21104	-	-	
VP 180	Original	1530	170	193	21.8	VP 350	Original	14600	834	949	56
	A-A	3339	251	264			A-A	31443	1217	1273	
	B-B	3728	281	323			B-B	35723	1383	1606	
	Equivalente	3566	-	-			Equivalente	33939	-	-	
VP 200	Original	2350	236	265	26.2	VP 400	Original	22000	1100	1250	64.2
	A-A	5144	348	365			A-A	47417	1606	1675	
	B-B	5677	385	437			B-B	53806	1822	2111	
	Equivalente	5455	-	-			Equivalente	51144	-	-	
VP 200	Original	3060	306	352	36	CP 160	Original	2300	287	326	39.8
	A-A	6720	455	482			A-A	5138	435	462	
	B-B	7518	509	590			B-B	5547	470	532	
	Equivalente	7186	-	-			Equivalente	5377	-	-	
VP 240	Original	4250	354	398	32.8	CP 180	Original	3340	371	418	44.9
	A-A	9322	526	552			A-A	7436	560	591	
	B-B	10242	578	657			B-B	8018	603	680	
	Equivalente	9859	-	-			Equivalente	7775	-	-	
VP 240	Original	4500	375	433	37.8						
	A-A	9763	551	582							
	B-B	11143	629	738							
	Equivalente	10568	-	-							

Anexo 3: Ecuaciones de las propiedades de la sección transversal

Sección de alma llena

- Inercia alrededor del eje X

$$I_x = 2 \left[\frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\frac{h_c}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_w (h_c - 2t_f)^3}{12}$$

$$I_x = \frac{b_f t_f^3}{6} + \frac{b_f t_f (h_c - t_f)^2}{2} + \frac{t_w (h_c - 2t_f)^3}{12}$$

- Módulo de sección elástico alrededor del eje X

$$y_{máx} = \frac{h_c}{2} \rightarrow S_x = \frac{I_x}{y_{máx}} \quad ; \quad S_x = \frac{2I_x}{h_c}$$

$$S_x = \frac{1}{h_c} \left[\frac{b_f t_f^3}{3} + b_f t_f (h_c - t_f)^2 + \frac{t_w (h_c - 2t_f)^3}{6} \right]$$

- Inercia alrededor del eje Y

$$I_y = 2 \left(\frac{t_f b_f^3}{12} \right) + \frac{(h_c - 2t_f) t_w^3}{12}$$

$$I_y = \frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{(h_c - 2t_f) t_w^3}{12}$$

- Módulo de sección elástico alrededor del eje Y

$$x_{máx} = \frac{b_f}{2} \rightarrow S_y = \frac{I_y}{x_{máx}} \quad ; \quad S_y = \frac{2I_y}{b_f}$$

$$S_y = \frac{1}{b_f} \left[2t_f b_f^2 + \frac{(h_c - 2t_f) t_w^3}{b_f} \right]$$

- Módulo de sección plástico alrededor del eje X

$$Z_x = 2(b_f t_f) \left(\frac{h_c}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + 2t_w \left(\frac{h_c}{2} - t_f \right) \left[\frac{\left(\frac{h_c}{2} - t_f \right)}{2} \right]$$

$$Z_x = b_f t_f (h_c - t_f) + \frac{(h_c - 2t_f)^2 t_w}{4}$$

- Módulo de sección plástico alrededor del eje Y

$$Z_Y = 2(h_c - 2t_f) \frac{t_w}{2} \left(\frac{t_w}{4} \right) + 2(2)t_f \frac{b_f}{2} \left(\frac{b_f}{4} \right)$$

$$Z_Y = \frac{(h_c - 2t_f)t_w^2}{4} + \frac{t_f b_f^2}{2}$$

Sección de alma alveolada

- Inercia alrededor del eje X

$$I_x = 2 \left[\frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\frac{h_c}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + 2 \left[\frac{t_w d_t^3}{12} + t_w d_t \left(\frac{h_s}{2} + \frac{d_t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_x = \frac{b_f t_f^3}{6} + b_f t_f \left(\frac{h_c - t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w d_t^3}{6} + t_w d_t \left(\frac{h_s + d_t}{2} \right)^2$$

- Módulo de sección elástico alrededor del eje X

$$y_{máx} = \frac{h_c}{2} \rightarrow S_x = \frac{I_x}{y_{máx}} \quad ; \quad S_x = \frac{2I_x}{h_c}$$

$$S_x = \frac{1}{h_c} \left[\frac{b_f t_f^3}{3} + b_f t_f (h_c - t_f)^2 + \frac{t_w d_t^3}{3} + t_w d_t (h_s + d_t)^2 \right]$$

- Inercia alrededor del eje Y

$$I_y = 2 \frac{d_t t_w^3}{12} + 2 \frac{t_f b_f^3}{12}$$

$$I_y = \frac{d_t t_w^3}{6} + \frac{t_f b_f^3}{6}$$

- Módulo de sección elástico alrededor del eje Y

$$x_{máx} = \frac{b_f}{2} \rightarrow S_y = \frac{I_y}{x_{máx}} \quad ; \quad S_y = \frac{2I_y}{b_f}$$

$$S_y = \frac{1}{3} \left[\frac{d_t t_w^3}{b_f} + t_f b_f^2 \right]$$

- Módulo de sección plástico alrededor del eje X

$$Z_x = 2(b_f t_f) \left(\frac{h_c}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + 2d_t t_w \left(\frac{h_s}{2} + \frac{d_t}{2} \right)$$

$$Z_x = (b_f t_f)(h_c - t_f) + d_t t_w (h_s + d_t)$$

- Módulo de sección plástico alrededor del eje Y

$$Z_Y = 2(2)d_t \frac{t_w}{2} \left(\frac{t_w}{4} \right) + 2(2)t_f \frac{b_f}{2} \left(\frac{b_f}{4} \right)$$

$$Z_Y = \frac{1}{2} (d_t t_w^2 + b_f^2 t_f)$$

Sección T

- Inercia alrededor del eje X, ubicado en el extremo inferior del alma

Para la obtención del momento de inercia alrededor del eje que pasa por el centro de gravedad de la sección T, los cálculos iniciales se realizaron en base al eje que pasa por el extremo inferior del alma de la misma.

$$I_{Tx} = \left[\frac{t_w d_t^3}{12} + t_w d_t \left(\frac{d_t}{2} \right)^2 \right] + \left[\frac{b_f t_f^3}{12} + (b_f t_f) \left(d_t + \frac{t_f}{2} \right)^2 \right]$$

Desarrollando la ecuación se obtiene

$$I_{Tx} = \frac{t_w d_t^3}{3} + b_f t_f \left[d_t^2 + d_t t_f + \frac{t_f^2}{3} \right]$$

- Módulo de sección plástico alrededor del eje X, ubicado en el extremo inferior del alma

$$Z_{Tx} = b_f t_f \left(d_t + \frac{t_f}{2} \right) + d_t t_w \left(\frac{d_t}{2} \right)$$

- Distancia del centro de gravedad de la sección T al eje ubicado en el extremo inferior del alma en dicha sección

$$y_t = \frac{b_f t_f (2d_t + t_f) + t_w d_t^2}{2(b_f t_f + t_w d_t)}$$

- Inercia alrededor del eje neutro que pasa por del centro de gravedad de la sección T

$$I_{Tg} = I_{Tx} - y_t Z_{Tx}$$

- Módulo de sección elástico del alma, alrededor del eje neutro que pasa por el centro de gravedad de la sección T

$$S_{xw} = \frac{I_{Tg}}{y_t}$$

- Módulo de sección elástico del ala, alrededor del eje neutro que pasa por el centro de gravedad de la sección T

$$S_{xf} = \frac{I_{Tg}}{(h_t - y_t)}$$

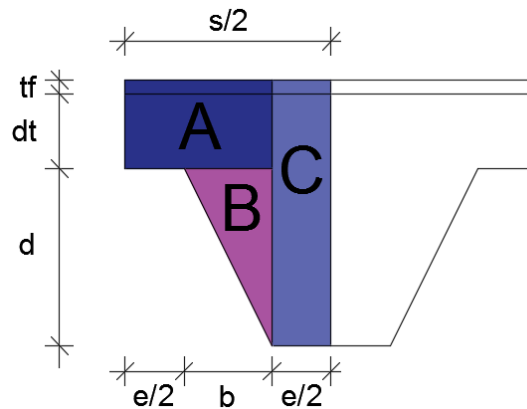
Inercia equivalente

Basándose en la propuesta de Gomes (2011), se hace un estudio de una sección equivalente, la cual involucre las propiedades tanto de las secciones alveoladas como las de alma llena, de manera que, se pueda obtener una inercia que cumpla con las mismas condiciones.

Se realiza una integración de un segmento de viga que incluya las tres secciones, con la siguiente ecuación

$$I_e = \int_0^{s/2} I(x) dx$$

Para facilitar el estudio se divide la sección en tres secciones A, B y C.



Subdivisión del segmento de estudio para la integración de la ecuación de inercia equivalente.

Fuente: Adaptación de Gomes (2011).

- Inercia alrededor del eje fuerte (Viga castelada)

$$A = \int_0^{b+e/2} I_x dx$$

$$A = I_x \left[b + \frac{e}{2} \right]$$

$$B = \int_0^b 2 \left[\frac{t_w}{12} \left(\frac{dx}{b} \right)^3 + \frac{t_w dx}{b} \left(d - \frac{dx}{2b} \right)^2 \right] dx$$

$$B = 2 \left[\frac{t_w d^3 x^4}{48 b^3} + \frac{t_w d^3 x^2}{2b} - \frac{t_w d^3 x^3}{3b^2} + \frac{t_w d^3 x^4}{16b^3} \right]_0^b$$

$$B = \frac{t_w d^3 b^4}{24} + \frac{t_w d^3 b^2}{b} - \frac{2t_w d^3 b^3}{3b^2} + \frac{t_w d^3 b^4}{8b^3}$$

$$B = \frac{t_w d^3 b}{24} + t_w d^3 b - \frac{2t_w d^3 b}{3} + \frac{t_w d^3 b}{8}$$

$$B = \frac{1}{2} t_w d^3 b$$

$$C = \int_0^{e/2} I_x dx$$

$$C = I_x \left[\frac{e}{2} \right]$$

$$I_e = \frac{2}{s} \left[I_{xA} \left(b + \frac{e}{2} \right) + \frac{1}{2} t_w d^3 b + I_x \left(\frac{e}{2} \right) \right]$$

- Inercia alrededor del eje fuerte (Viga celular)

Esta ecuación es adaptada del trabajo realizado por Gomes (2011)

$$I_e = 2(A_t y_o^2 + I_t) + \frac{t_w D o^3}{8} \left(\frac{1}{2} - \frac{e}{3(D o + e)} \right)$$

Inercia de sección mixta

Se considera el aporte del concreto, por lo que se estima el área correspondiente al ancho efectivo del eslabón de concreto

$$A_c = b_{efec} t_c$$

Para obtener lo que equivale un (1) cm² de concreto en acero, esta área es dividida entre la relación de los módulos de elasticidad de los dos materiales, por lo que

$$n = E_s / E_c \quad A_{cef} = A_c / n$$

- Ubicación del eje neutro para la sección mixta

$$y_{mix} = \frac{A_{cef}(h_c + h_r + t_c/2) + b_f t_f(h_c) + (h_c - 2t_f)t_w(h/2)}{A_{cef} + 2b_f t_f + (h_c - 2t_f)t_w}$$

La distancia del centro de gravedad del bloque de concreto al eje neutro de la sección mixta será

$$y_{conc} = h_c + h_r + \frac{t_c}{2} - y_{mix}$$

La distancia del centro de gravedad de la sección I del perfil al eje neutro de la sección mixta será

$$y_{steel} = y_{mix} - y_{cgl}$$

$$I_{mix} = I_t + A_{steel}(y_{steel})^2 + \frac{A_{cef} t_c^2}{12} + A_{cef}(y_{conc})^2$$

BIBLIOGRAFÍA

- Blodgett O.W. (1991), *Design of Welded Structures*, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation
- Boyer J.P. (1964), *Castellated Beams – New Developments*, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction.
- Bradley, T.P., *Stability of Castellated Beam During Erection*, Master Thesis, Virginia Tech University.
- Demirdjian S. (1999), *Stability of Castellated Beam Webs*, McGill University
- Dougherty, B.K. (1993), *Castellated beams: A state of the art report*, Technical Report, J. SA Inst Civ Eng, Vol 35, N° 2.
- FABSEC Ltd (2006), *Design of FABSEC Cellular Beams in Non-composite and Composite Applications for both Normal Temperature and Fire Engineering conditions*
- Jamadar A. M., Kumbhar P.D. (2015), *Parametric Study of Castellated Beam with Circular and Diamond Shaped Openings*, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 02, pp. 715-722.
- Lawson P.M., Hicks S.J. (2006) *Design of Beams with Large Openings for services*. Steel Construction Institute, SCI, Pre-publication.
- Panedpojaman P. (2012), *Buckling Analysis for Web Post of Cellular Beams*, Prince of Songkla University
- Shaikh A.S., Autade P.B. (2016), *Structural Analysis and Design of Castellated Beam in Fixed Action*, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering
- Showkati H. (2008), *Lateral-torsional Buckling of Castellated Beams*, Iranian Journal of Science and Technology, Vol. 32.
- Verweij J.G. (2010), *Cellular Beam-Columns in Portal Frame Structures*, Master Thesis, Delft University of Technology