

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**“ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA NAVE INDUSTRIAL CON
PERFILES LAMINADOS EN FRÍO SEGÚN LA NORMA AISI
EDICIÓN 2007”**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

IVÁN SAAVEDRA TAMATA

Lima- Perú

2014

RESUMEN.....	4
LISTA DE CUADROS.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE SIMBOLOS Y DE SIGLAS.....	9
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	13
1.1 ANTECEDENTES.....	13
1.2 JUSTIFICACION.....	13
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.4 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	14
1.4.1 Objetivos Generales.....	14
1.4.2 Objetivos Específicos.....	14
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 COMENTARIOS GENERALES.....	15
2.1.1 Principales Ventajas de los perfiles conformados en frío.....	15
2.1.2 Tipos y Usos de los perfiles laminados en frío.....	16
2.2 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO.....	18
2.2.1 Límite de Fluencia.....	18
2.2.2 Módulo de Elasticidad.....	20
2.2.3 Incremento de la resistencia por la conformación en frío.....	20
CAPITULO III: CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE PERFILES CONFORMADOS EN FRIO SEGÚN LA NORMA AISI EDICION 2007.....	23
3.1 COMENTARIOS GENERALES.....	23

3.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS ATIESADOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN UNIFORME	27
3.2.1 Pandeo Elástico y Resistencia Post Pandeo.....	27
3.2.2 Ancho efectivo de un elemento a compresión atiezado.....	29
3.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS ATIESADOS SOMETIDOS A UNA GRADIENTE DE ESFUERZOS	32
3.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS NO ATIESADOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN UNIFORME	34
3.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS NO ATIESADOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON UNA GRADIENTE DE ESFUERZOS	34
3.4.1 Elementos sin atiesadores de borde sometidos a gradiente de esfuerzos	35
CAPITULO IV: DISEÑO DE ELEMENTOS SUJETOS A COMPRESIÓN AXIAL	44
4.1 CONSIDERACIONES GENERALES	44
4.2 MIEMBROS COMPRIMIDOS CON CARGA CONCÉNTRICA	45
CAPITULO V: DISEÑO DE ELEMENTOS SUJETOS A FLEXIÓN, CORTE Y LA COMBINACIÓN DE AMBOS.....	47
5.1 CONSIDERACIONES GENERALES	47
5.2.1 Momento nominal por flexión según el procedimiento I.....	47
5.2.2 Momento nominal por pandeo lateral torsional.	47
5.2.3 Momento nominal por pandeo Distorsional.	49
5.3 DISEÑO POR CORTE.....	51
5.3.1 Resistencia para flexión y corte según el método LRFD	53
5.3.2 Resistencia para combinación de flexión y compresión según el método LRFD.....	53
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE UNA NAVE INDUSTRIAL CON PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO.....	55
6.1 _GENERALIDADES	55
6.2.1 Cargas Gravitacionales	55
6.2.2 Cargas de Viento.....	56
6.2.3 Cargas de Sismo.....	57
6.4 MODELAMIENTO EN SAP 2000	58

6.5 ANÁLISIS DEL PÓRTICO PRINCIPAL.....	58
6.5.1 Análisis por compresión.....	59
6.5.2 Análisis por flexión y corte de la viga y columna.....	64
6.5.3 Análisis por flexo-compresión y combinación de flexión y corte.....	65
6.5.4 Control de desplazamientos verticales y horizontales.....	65
6.6 ANÁLISIS DE LAS COSTANERAS DE TECHO DE SECCIÓN Z.....	66
6.6.1 Metrado y combinaciones de cargas.....	66
6.6.2 Cálculo de las capacidades nominales por corte y flexión.....	67
6.6.3 control de deformaciones verticales por cargas de servicio.....	71
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
7.1 CONCLUSIONES.....	72
7.2 RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFIA.....	74
ANEXOS.....	75

RESUMEN

Los perfiles conformados en frío pueden traer un gran ahorro en comparación con los perfiles conformados en caliente debido a su buena relación resistencia espesor, a su fácil manipuleo y transporte debido a ser estructuras muy livianas, es por eso que por los años 1939, la American Iron and Steel Institute (A.I.S.I) empezó con las investigaciones para poder elaborar un reglamento de diseño para este tipo de perfiles estructurales.

Es necesario entender que la manera como fue fabricado cada elemento estructural (conformado en frío o conformado en caliente), influye significativamente en el comportamiento estructural de este, es por eso que para cada tipo de elementos se tiene su propia normativa de diseño, que son la AISC para los conformados en caliente y la AISI para los conformados en frío.

Los perfiles conformados en frío presentan distintas limitantes de diseño debido al pequeño espesor y a la gran variabilidad geometría que presentan, el más importante es el pandeo local y resistencia post pandeo, rigidez torsionante y pandeo flexo-torsionante.

El contenido de este informe se inicia con un breve resumen de cómo fue evolucionando el estudio de los perfiles conformados en frío así como sus principales ventajas. Posteriormente se explica el comportamiento que presentan los perfiles conformados en frío debido a los efectos de conformado, luego se analizará los criterios de diseño ante cargas de compresión, flexión, cortante y flexo-compresión.

Conjuntamente se realizará un diseño de una nave industrial sometida a cargas gravitacionales, de viento y sísmicas, verificando, con el uso de la Norma Peruana de cargas E.020, la Norma Sismorresistente E.030 y la AISI Edición 2007 con el método de diseño LRFD.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N°3.1. Valores de Coeficiente de pandeo de placas (sa= simplemente apoyado)	28
Cuadro N°3.2. Determinación del coeficiente de pandeo de placa "k"	39
Cuadro N° 6. 1. Determinación del coeficiente de pandeo de placa "k"	56
Cuadro N° 6. 2. Combinaciones de carga según el método LRFD.....	58
Cuadro N° 6. 3. Capacidades últimas de los elementos	65
Cuadro N°6. 4. Control de desplazamientos horizontales	66
Cuadro N°6. 5. Control de desplazamientos Verticales.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura N°2.1 Tipos de miembros estructurales	16
Figura N°2.2 Tipos de Paneles y Planta Molitalia con muros de panel laminado en frío.	17
Figura N°2.3. Colegio Emblemático Melitón Carbajal - Estructura Tubest.	17
Figura N°2.4. Alcantarillas Metálicas Corrugadas.	18
Figura N°2.5.(a) Curva esfuerzo-deformación de una plancha o fleje de acero al carbono de fluencia brusca. (b) Curva esfuerzo-deformación de una plancha o fleje de acero al carbono de fluencia gradual.....	19
Figura N°2.6.Diagramas de esfuerzo-deformación que ilustran los métodos para la determinación del punto de fluencia y la resistencia de fluencia.....	19
Figura N°2.7. Efecto del conformado en frío sobre las propiedades mecánicas de los perfiles metálicos de acero conformado en frío. (a) Perfil de forma Canal, (b) Cordón de una vigueta	20
Figura N°2.8. Efecto del endurecimiento por deformación y envejecimiento por deformación sobre las características de la curva esfuerzo-deformación.....	22
Figura N°3. 1. Perfiles con elementos no atiesados.....	23
Figura N°3. 2. Perfiles con elementos atiesados.....	23
Figura N°3. 3. Perfiles con múltiples atiesadores.....	24
Figura N°3. 4. Ancho Plano	24
Figura N°3.5.Anchos efectivos de perfiles con elementos a compresión atiesados	26
Figura N°3.6.Anchos efectivos de perfiles con elementos a compresión no atiesados	27
Figura N°3.7. (a) Perfil Omega sometido a compresión, (b) Ala del perfil omega idealizado como una membrana apoyada en sus dos extremos y sometida a compresión.....	29
Figura N°3. 8 Fases consecutivas de la distribución de esfuerzos en elementos atiesados sometidos a compresión.....	29
Figura N°3. 9 Distribución de esfuerzos uniformes en un ancho efectivo ficticio.	30

Figura N°3. 10. Factor de reducción ρ vs factor de esbeltez λ	31
Figura N°3. 11. Elementos a compresión atiesados, (a) Dimensiones reales, (b) Dimensiones efectivas.....	31
Figura N°3. 12. Elementos rigidizados con gradiente de esfuerzos	33
Figura N°3.13. Dimensiones de extremo a extremo de almas en elementos sometidos bajo un gradiente de esfuerzos.....	33
Figura N°3. 14. Elemento no atiesado sujeto a compresión uniforme.	34
Figura N°3.15. Labio no atiesado sujeto a gradiente de esfuerzos.	34
Figura N°3.16. Elementos sin rigidizar bajo gradiente de tensión, Ambos bordes longitudinales en compresión	36
Figura N°3.17. Elementos sin rigidizar bajo gradiente de tensión, un borde longitudinal en la compresión y el otro borde longitudinal en tensión.....	37
Figura N°3.18. Elementos sin rigidizar de sección C bajo gradiente de esfuerzos según el método alternativo 1 y 2	38
Figura N°3. 19. Elementos con atiesador simple de borde.....	40
Figura N°3.20. Ancho Plano y Ubicación del rigidizador	42
Figura N°3.21. Localización del Ancho efectivo	42
Figura N°5. 1. Cuadro de propiedades geométricas del ala de secciones C y Z	51
Figura N°6.1. Análisis de Viento (a) Viento en dirección X, con un ancho tributario de 6m, (b) Viento en dirección Y, con un ancho tributario de 5m	56
Figura N°6.2. Espectros de Diseño (a) Espectro en X, para R=6 (b) Espectro en Y, para R=9.5	57
Figura N°6.3. Modelo 3D de la nave industrial en Sap 2000	58
Figura N°6.4. Cargas últimas en toneladas, de la COMB3 en Sap 2000 (a) Momentos últimos, (b) Fuerzas axiales últimos.	58
Figura N°6. 5. Cálculo de la longitud efectiva para las columnas empotradas en la base, sin arriostramiento lateral.	59
Figura N°6.6. Esquema de dimensiones del perfil Tubest.....	59
Figura N°6. 7. Esquema de dimensiones del alma de la sección Tubest.	61

Figura N°6. 8. Desplazamientos obtenidos en SAP 2000, (a) Desplazamientos por Sismo, (b) Desplazamientos por cargas de servicio66

LISTA DE SIMBOLOS Y DE SIGLAS

- Area** = Superficie total no reducida
- Ag** = Área bruta del elemento incluyendo rigidizadores
- As** = Área bruta de un rigidizador
- Aw** = Área del alma del elemento
- b** = Ancho efectivo de un elemento
- B** = Longitud de la base del perfil Ohm
- bo** = Ancho plano total de un elemento rigidizado
- ci** = Distancia Horizontal desde el borde del elemento hasta el baricentro del rigidizador
- C** = Coeficiente de amplificación dinámica
- Cb** = Coeficiente de flexión que depende del gradiente de momento
- Cm** = Coeficiente de momento extremo en la fórmula de interacción
- CM** = Carga Muerta
- CV** = Carga Viva
- D** = Longitud del labio rigidizador de la sección Z
- E** = Módulo de elasticidad del material
- Et** = Módulo de elasticidad tangencial del material
- eo** = Espesor del elemento Sigma
- es** = Espesor del elemento Ohm
- f** = Esfuerzo a una determinada altura respecto al eje neutro
- Fcr** = Esfuerzo crítico de pandeo elástico
- Fe** = Esfuerzo de Euler
- Fy** = Esfuerzo de fluencia del material
- Fu** = Esfuerzo último de rotura
- Fv** = Esfuerzo cortante
- G** = Módulo de corte del material
- h** = Ancho de elementos adyacentes a un elemento rigidizado (por ejemplo, la altura del alma de una sección omega con múltiples rigidizadores intermedios en el ala comprimida es igual a h, si los elementos adyacentes tienen diferentes anchos, utilizar el menor)

H	=	Peralte de la sección
ho	=	Peralte total de la sección Z
la	=	Momento de inercia del atiesador de borde requerido para que el elemento a compresión se comporte como un elemento atiesado.
Is	=	Momento de inercia del atiesador de borde con respecto a su propio eje centroidal paralelo al plano del elemento que se desea atiesar
Isp	=	Momento de inercia del rigidizador respecto del baricentro de la parte plana del elemento. Se debe incluir la parte curva que une el rigidizador con la parte plana.
Ix	=	Momento de Inercia respecto al eje X
Iy	=	Momento de Inercia respecto al eje Y
J	=	Constante torsional de la sección
k	=	Coefficiente de pandeo
kd	=	Coefficiente de pandeo distorsional
K	=	Coefficiente de longitud efectiva
kloc	=	Coefficiente de pandeo para un sub elemento
kv	=	Coefficiente de pandeo por corte
L	=	Longitud del elemento
Lbr	=	Longitud arriostrada lateralmente del elemento
Mn	=	Momento nominal de diseño
Mu	=	Momento último de diseño
n	=	Número de rigidizadores
Pn	=	Capacidad nominal por compresión
Pu	=	Capacidad última por compresión
R	=	Coefficiente de reducción sísmica
rx	=	Radio de giro respecto al eje X
ry	=	Radio de giro respecto al eje Y
S	=	Coefficiente del tipo de suelo de la cimentación
Sc	=	Módulo elástico de la sección efectiva calculado para una tensión M_c/S_f en la fibra extrema comprimida
Sf	=	Módulo elástico de la sección no reducida

- V_n** = Cortante nominal de diseño
- V_u** = Cortante última de diseño
- S_e** = Módulo de la sección reducida
- S_x,S_y**= Carga de sismo en la dirección X e Y respectivamente
- Z** = Coeficiente de zonificación de sísmica
- W** = Carga de viento
- θ** = Ángulo de inclinación del labio atiezador
- λ** = Factor de esbeltez
- ρ** = Coeficiente de reducción
- ω** = Longitud del ancho plano
- μ** = Coeficiente de Poisson = 0.3 para acero en el rango elástico
- φ_b** = Coeficiente de reducción por flexión = 0.90
- φ_c** = Coeficiente de reducción por compresión = 0.85
- φ_v** = Coeficiente de reducción por corte = 0.90

INTRODUCCIÓN

Debido al gran crecimiento económico del Perú, existe la gran demanda de estructuras como de almacenes industriales, supermercados, pesqueras y otros, las cuales requieren grandes luces, sin la colocación de columnas intermedias ya sea por acceso, maniobras, etc. Para poder cumplir con estos requerimientos, en el mercado existen distintos perfiles estructurales, los cuales pueden ser diferenciados mediante el proceso de formación: los perfiles conformados en frío, es decir a temperatura ambiente y los perfiles conformados en caliente a temperaturas elevadas, debido al tipo de conformación cada perfil adquiere un distinto comportamiento ante cargas, y debido a esto se tiene una normativa de diseño para cada tipo de elementos, siendo en nuestro medio para los perfiles conformados en caliente el AISC (American Institute of Steel Construction), y para los elementos conformados en frío el AISI (American Iron and Steel Institute).

Una diferencia resaltante de los perfiles conformados en frío es que se puede obtener una buena resistencia con un pequeño espesor (espesores típicos de 0.4mm hasta 6.4mm) en comparación con los perfiles conformados en caliente que en su mayoría se requiere un mayor espesor para obtener la misma capacidad.

Una limitante del uso de perfiles conformados en frío en el Perú es la poca familiarización de los ingenieros con su normativa de diseño, debido a que estamos más familiarizados con el AISC, incluso la norma peruana, E.090 de diseño en acero, en su gran mayoría es una copia del AISC y para el caso de perfiles laminados en frío solo indica revisar la norma AISI, sin brindar mayor información, es por eso que este informe busca aportar las pautas necesarias para poder hacer un correcto diseño de los perfiles conformados en frío mediante el uso del reglamento AISI edición 2007, además de dar una explicación, de porqué el cambio en el comportamiento estructural del material ante distintas cargas debido al procedimiento de conformación.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los orígenes de la producción de los perfiles laminados en frío, radican en los años 1784, en Inglaterra para el uso de cobertura ligera de techos, pero es en el año de 1939, en que la American Iron and Steel Institute (A.I.S.I), conjuntamente con la Universidad de Cornell y a cargo del Profesor George Winter, realizo los estudios pertinentes para poder empezar a crear una normativa de diseño.

1.2 JUSTIFICACION

El uso de perfiles laminados en frío en la construcción puede llegar a dar grandes ahorros tanto en material como en instalación debido a que estos perfiles en comparación con los perfiles tradicionales (tijerales y vigas W), poseen espesores más delgados brindando igual o mejor capacidad para resistir los distintos esfuerzos a los que será sometido la estructura; pero debido al poco conocimientos de su normativa de diseño es muy pocas veces especificado, pudiendo tal vez ser esta la alternativa más económica.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad en el Perú, debido al buen crecimiento económico de los últimos años, especialmente en el rubro minero, industrial e incluso comercial, existe la necesidad de construir estructuras metálicas que abarquen grandes luces sin la necesidad de columnas intermedias. En el mercado existen distintas alternativas estructurales para cumplir estos requerimientos, como el uso de cerchas, perfiles W, una combinación de cerchas con perfiles W y los perfiles conformados en frío.

Este último tiene como norma de diseño al AISI, la cual no es conocida en nuestro medio, pero la norma E.090 la hace referencia para el diseño de este tipo de elementos. Se debe resaltar que en comparación con los espesores de los otros sistemas mencionados, los perfiles laminados en frío poseen espesores muy delgados que podrían minimizar costos de material así como de instalación. Es por eso que este informe trata de dar las pautas de diseño necesarias para un correcto diseño de este tipo de perfiles bajo la normativa AISI 2007.

1.4 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.4.1 Objetivos Generales

- Mostrar cuales son las consideraciones de diseño que plantea la norma AISI 2007, para el diseño de los elementos laminados en frío, que estarán sometidos a distintos tipos de esfuerzos como carga axial, cortante y flexión.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer las principales diferencias entre los perfiles conformados en frío contra los perfiles conformados en caliente.

- Identificar las ventajas y desventajas que pueden presentar este tipo de elementos en la construcción de naves industriales de grandes luces.

- Poder brindar las pautas iniciales sobre el estudio de este tipo de perfiles para futuras investigaciones que quieran profundizar más en el tema.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Para el presente Informe de Suficiencia se propone dar los conceptos necesarios para poder hacer un correcto diseño de los distintos perfiles estructurales conformados en frío, bajo la normativa AISI Edición 2007, para luego poder aplicarlo en el diseño de una nave industrial de 20m de Luz libre, con altura de 6m, con una separación entre pórticos de 6m y completamente cerrado, ubicado en la ciudad de Lima, los componentes de los pórticos principales serán elementos tubulares con rigidizadores intermedios en las almas, las viguetas o costaneras que soportarán el techo estarán conformado por perfiles Z, el arriostramiento de pared será con perfiles tubulares en X y con una viga amarre de sección tubular, la nave industrial estará sometido a cargas estáticas (carga viva y carga muerta) y a cargas dinámicas (cargas de viento y sísmicas)

Para la elaboración del informe se adoptará los criterios y definiciones estipuladas en los códigos de diseño del AISI Edición 2007 con el método LRFD, el Suplemento No 2 Edición 2007 del AISI, la norma sismorresistente E.030 y la Norma de Cargas E.020.

2.1 COMENTARIOS GENERALES

Puede parecer contradictorio que con perfiles muy delgados se pueda llegar a tener una mejor capacidad que con el uso de perfiles de un mayor espesor, pero esta propiedad radica principalmente en los dobleces que se le efectúa a la lámina, estos dobleces actúan como rigidizadores que incrementan considerablemente la capacidad de carga de los perfiles. También el propio proceso de doblado hace que se incremente en ciertas zonas el esfuerzo de fluencia, lo cual también aporta en la capacidad de carga del perfil. De esto podemos deducir que en los perfiles laminados en frío, la capacidad para poder resistir mejor las cargas está más ligada a su geometría que a su espesor.

2.1.1 Principales Ventajas de los perfiles conformados en frío

Las principales ventajas de los perfiles laminados en frío son:

Son perfiles mucho más livianos debido al pequeño espesor con que se fabrican.

- Son más fáciles de maniobrar y transportar reduciendo así costos de flete y montaje.
- Tiene una mayor gama con respecto a su geometría pudiendo así adaptarse mejor a los distintos requerimientos del cliente.
- Su fabricación puede hacer en masa a bajo costo.
- Se puede llegar a tener una buena capacidad de resistencia con espesores delgados.

2.1.2 Tipos y Usos de los perfiles laminados en frío.

Los perfiles conformados en frío tienen los siguientes usos:

- Para soporte de coberturas ligeras de techo, en este caso los perfiles más conocidos son los perfiles canales "C", los perfiles "Z", los perfiles omega o sombreros, también se pueden formar elementos compuestos mediante la unión de dos perfiles (Ver Fig N°2.1).

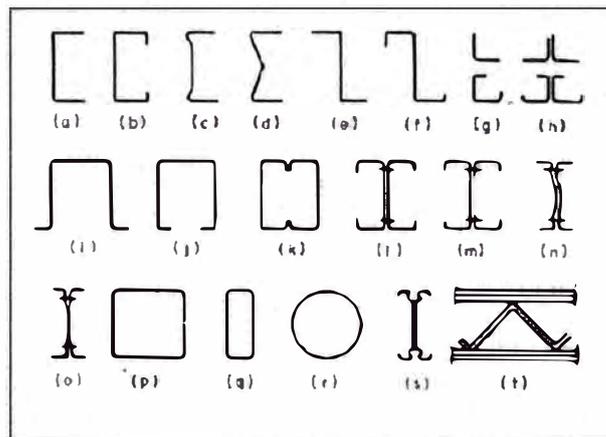


Figura N°2.1 Tipos de miembros estructurales

- Para el uso de cubierta se tienen los paneles de techo o pared. (Ver Fig N°2.2).

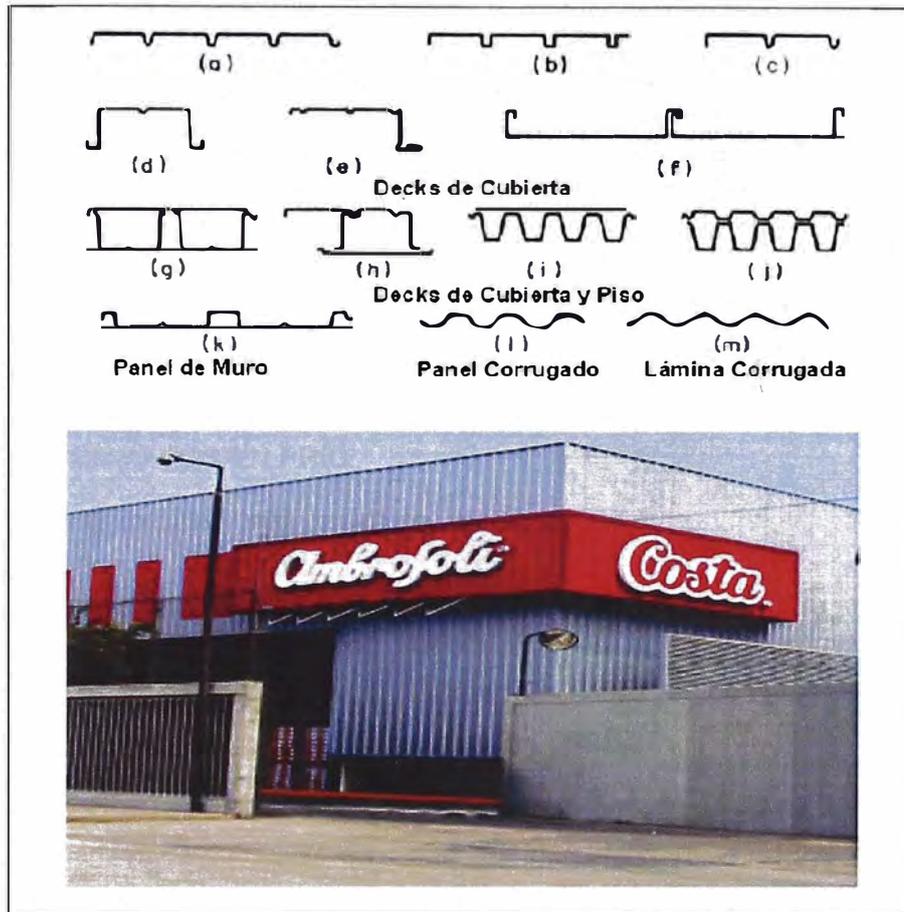


Figura N°2.2 Tipos de Paneles y Planta Molitalia con muros de panel laminado en frío.

- Para el soporte principal de estructuras tenemos, los perfiles cajón con y sin rigidizadores intermedios (Ver Fig N° 2.3).



Figura N°2.3. Colegio Emblemático Melitón Carbajal - Estructura Tubest.

- También se pueden usar en la fabricación de alcantarillas metálicas, para evacuación de aguas, transporte de material, acceso vehicular o peatonal, en este caso se usan láminas corrugadas (Ver Fig N° 2.4).

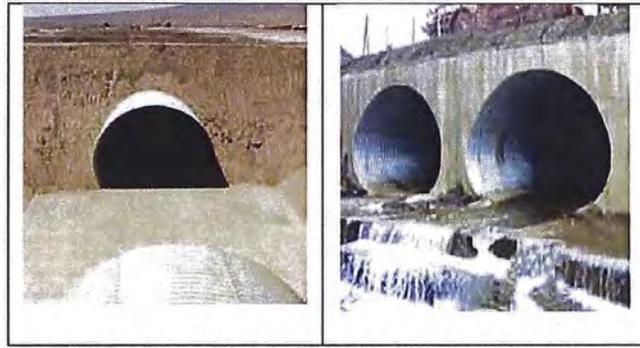


Figura N°2.4. Alcantarillas Metálicas Corrugadas.

2.2 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO

Entre las propiedades más relevantes tenemos:

2.2.1 Límite de Fluencia.

La resistencia de los miembros estructurales de acero conformado en frío depende del punto de fluencia, excepto en los casos en los cuales el pandeo elástico localizado o el pandeo global resultan críticos.

Según ensayos realizados se observó que las curvas de esfuerzo-deformación para los perfiles conformados en caliente y los conformados en frío presentan una gran diferencia como se ve en la Fig N° 2.5, en la cual se puede notar que para los perfiles laminados en caliente tiene una etapa con una fluencia pronunciada [Fig N° 2.5 (a)] y de la cual es fácil obtener el límite de fluencia siguiendo lo indicado en la Norma ASTM A370 (ASTM, 1994) [Fig N° 2.6 (a)], pero para el caso de los perfiles conformados en frío, se presenta una curva con una suave transición que forma como un “codo” [Fig N° 2.5 (b)], es debido a esta transición que no se puede obtener fácilmente el límite de fluencia y se tiene que optar por un método de aproximación, entre los métodos propuestos por el AISI tenemos dos que son el método de corrimiento [Fig N° 2.6 (b)], y el método de alargamiento bajo carga [Fig N° 2.6 (c)].

El método de corrimiento consiste en trazar una línea paralela a la parte recta inicial de la curva y cuyo origen será “om” igual a 0.1% de la deformación unitaria y en el punto donde intercepta con la curva esfuerzo-deformación será el punto de fluencia, en el caso del método de aproximación consiste en trazar una recta horizontal a partir de un desfaseamiento “om”, pero AISI para este caso no brinda a qué porcentaje se debe trazar dicha recta, algunos autores recomiendan trazarla a 0.5% de la deformación unitaria

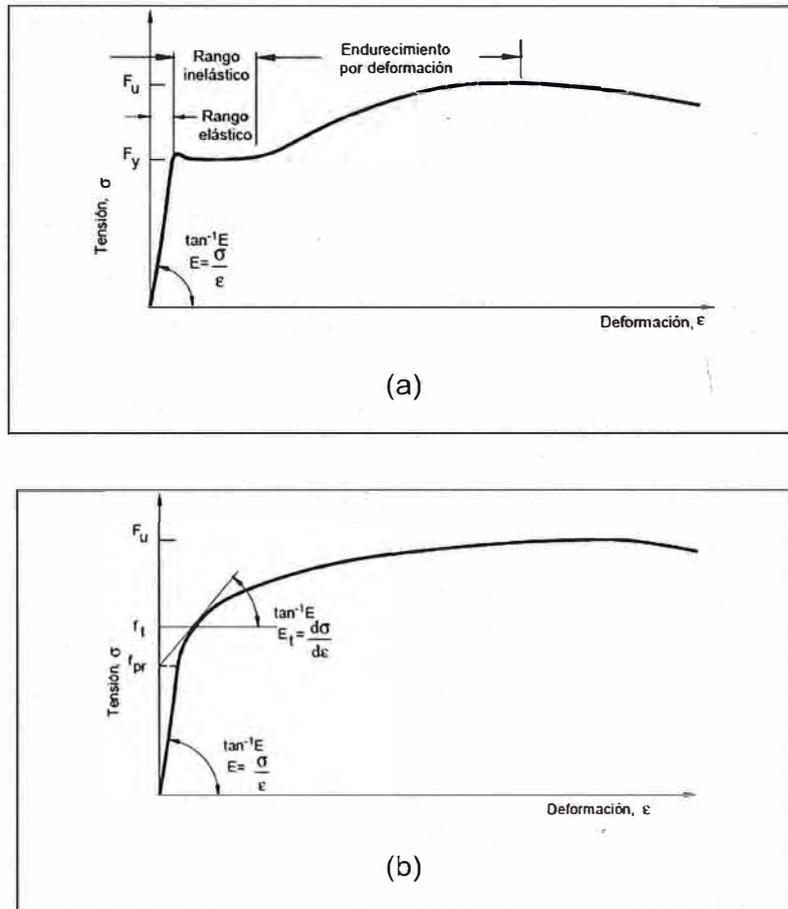


Figura N°2.5. (a) Curva esfuerzo-deformación de una plancha o fleje de acero al carbono de fluencia brusca. (b) Curva esfuerzo-deformación de una plancha o fleje de acero al carbono de fluencia gradual.

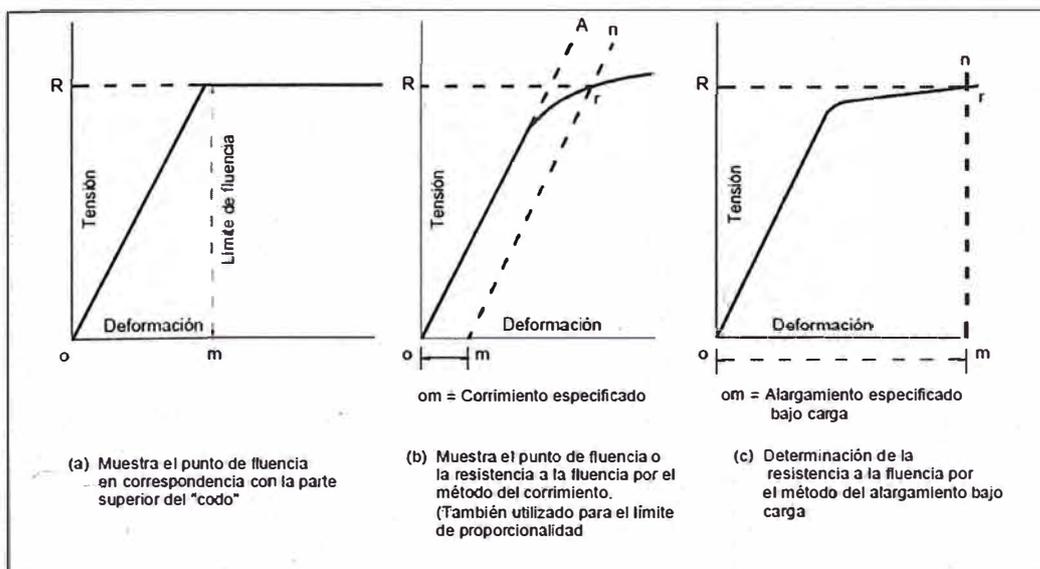


Figura N°2.6. Diagramas de esfuerzo-deformación que ilustran los métodos para la determinación del punto de fluencia y la resistencia de fluencia.

2.2.2 Módulo de Elasticidad

Una propiedad también importante de la que depende el diseño, es el módulo de elasticidad que según métodos normalizados generalmente están comprendidos entre 2.038×10^6 kg/cm² (29000 ksi) a 2.108×10^6 kg/cm² (30000ksi), pero para efectos de cálculo el AISI establece un valor de 2.073×10^6 kg/cm² (29500 ksi), también se define un valor de Et que viene a ser el valor de la pendiente esfuerzo deformación como se ve en la Fig N° 2.5.b

2.2.3 Incremento de la resistencia por la conformación en frío

Los perfiles conformados en frío después de ser doblados presentan un cambio con respecto a sus propiedades mecánicas de las láminas o cintas de las cuales fueron formados, presentándose incrementos del esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción con respecto al material virgen en ciertas zonas como se ve en la Fig N° 2.7, en la cual se analiza a un perfil canal y a un cordón de un cordón de una viga de acero conformado en frío.

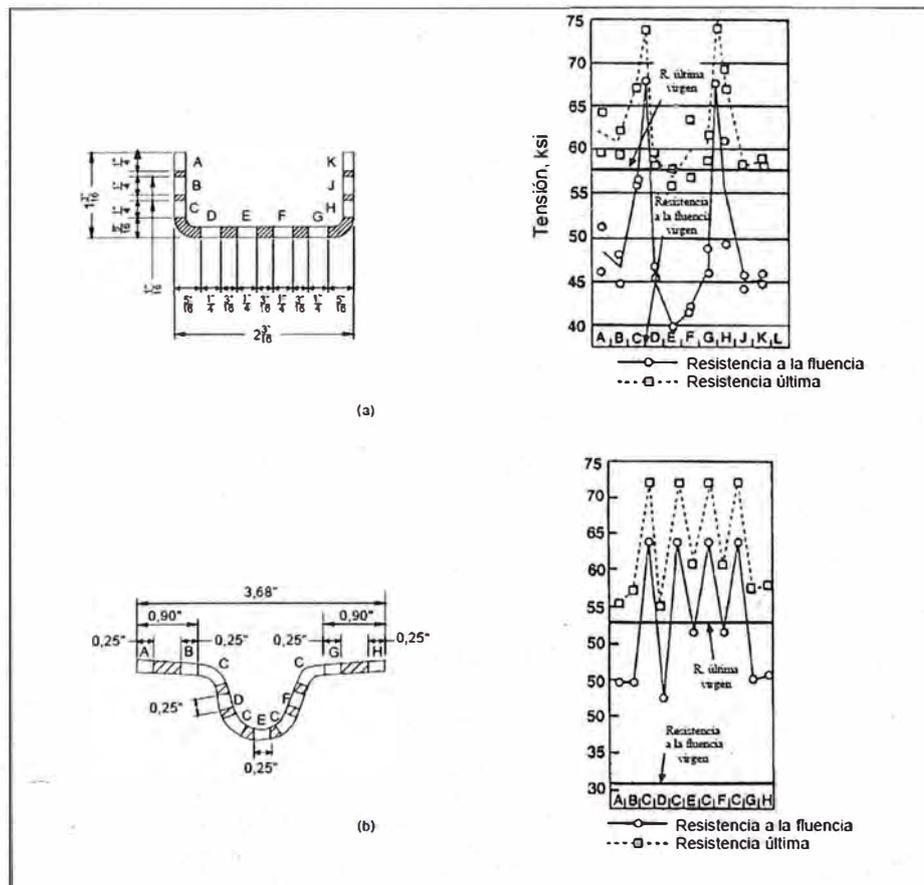


Figura N°2.7. Efecto del conformado en frío sobre las propiedades mecánicas de los perfiles metálicos de acero conformado en frío. (a) Perfil de forma Canal, (b) Cordón de una viga

De la Fig N° 2.7 podemos deducir lo siguiente:

- Las zonas achuradas presenta el mayor incremento tanto del esfuerzo de fluencia F_y como del esfuerzo último F_u y las zonas sin achurar son zonas con un incremento mínimo del esfuerzo F_y y del esfuerzo F_u .
- Para el caso del perfil canal el mayor incremento se da en las esquinas y el menos incremento en las zonas planas, lo cual explica porque ocurre primero el pandeo en las zonas planas y a medida que la carga se va incrementando el pandeo va ocurriendo luego en las esquinas.
- El incremento porcentual del valor del F_y es mayor que el incremento porcentual del valor de F_u , y esto conduce a que la relación F_u/F_y disminuya y reduzca la ductilidad del material.
- Según el AISI y basándose en las investigaciones hechas por Cornell, identificaron que los efectos de conformado en frío sobre las propiedades de las esquinas dependen de los siguientes 6 factores: (1) el tipo de acero, (2) el tipo de esfuerzo (compresión o tracción), (3) la dirección del esfuerzo con respecto a la dirección del trabajo de conformado en frío (transversal o longitudinal), (4) la relación F_u/F_y , (5) la relación entre el radio interior y el espesor (R/t) y (6) la cantidad de trabajo en frío, de los cuales los tres últimos factores son los más importantes, debido a que si la relación F_u/F_y aumenta, el trabajo de conformado en frío para el aumento del límite de fluencia también aumenta y así se incrementaría el límite de fluencia con respecto al material virgen. Es fácil darnos cuenta que para realizar pequeños radios el trabajo de conformado en frío es mayor, es por eso que a pequeñas relaciones (R/t) se obtendrá un mayor incremento del esfuerzo de fluencia. Con lo cual concluimos que los últimos 3 factores tienen una relación directamente proporcional, con respecto al incremento de la resistencia del material.

En busca de tratar de entender por qué el efecto de conformado incrementaba las propiedades mecánicas de los perfiles laminados en frío un grupo de investigadores Chajes, Britvec, Winter, Karren y Uribe en los años 1960 a 1968 realizaron investigaciones en la Universidad de Cornell, llegando a la conclusión de que el cambio de las propiedades mecánicas debido a la etapa de conformación o estiramiento del material en frío son provocados

principalmente por dos factores, (1) el endurecimiento por deformación, (2) el envejecimiento por deformación, como se ilustra en Fig N° 2.8

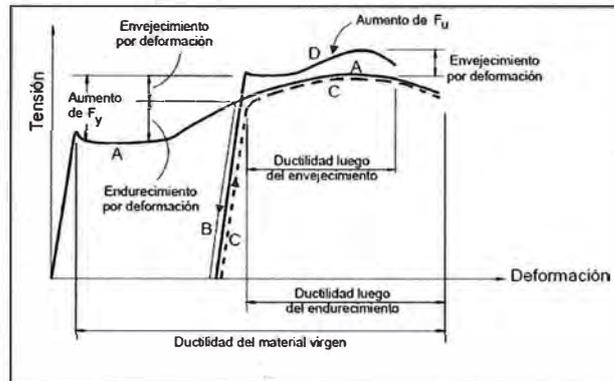


Figura N°2.8. Efecto del endurecimiento por deformación y envejecimiento por deformación sobre las características de la curva esfuerzo-deformación

En la Fig N°2.8, la curva A representa la curva esfuerzo deformación del material virgen, la curva B representa la etapa de descarga en el rango de endurecimiento por deformación, la curva C representa la recarga inmediata y la curva D es la curva esfuerzo deformación posterior al envejecimiento por deformación. Se puede observar que los límites de fluencia de las curvas C y D son más elevados que al límite de fluencia del material virgen, pero la relación F_u/F_y disminuye debido a que hay un mayor incremento porcentual en el F_y que en el F_u , lo cual conlleva a una disminución en la ductilidad del material.

CAPITULO III: CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO SEGÚN LA NORMA AISI EDICIÓN 2007

3.1 COMENTARIOS GENERALES

En este capítulo se explicará más al detalle la fundamentación teórica y experimental bajo la cual se rige el comportamiento y diseño estructural de los perfiles conformados en frío.

Para poder entender mejor los siguientes conceptos es necesario primero familiarizarnos con la terminología usada por el reglamento AISI, como se indica a continuación:

- a) *Elementos No atiesados*, un elemento no atiesado es aquel elemento plano con un solo borde atiesado paralelo a la dirección del esfuerzo ya sea por un alma, un ala o un atiesador, como se observa en la Fig.N° 3.1 (ena= elemento no atiesado).

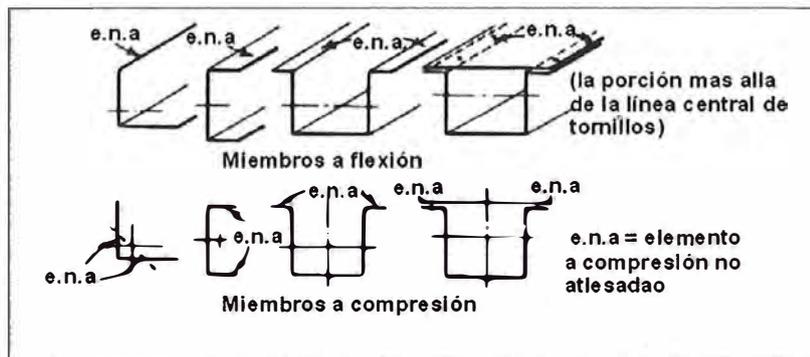


Figura N°3. 1. Perfiles con elementos no atiesados

- b) *Elementos atiesados*, un elemento atiesado es un elemento plano en el cual sus dos bordes paralelos a la dirección del esfuerzo, ya sea por un ala un alma, un rigidizador intermedio, labio atiesador, entre otros, así como se indica en la Fig.N° 3.2

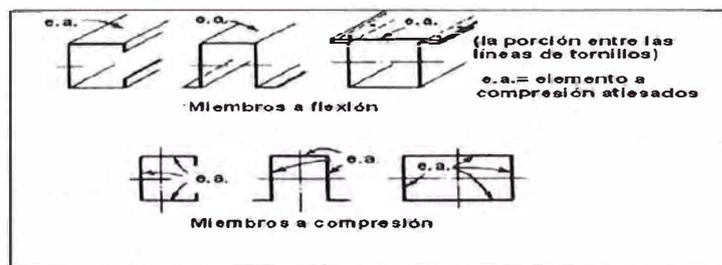


Figura N°3. 2. Perfiles con elementos atiesados

- c) *Elementos con múltiples atiesadores*, los elementos con múltiples atiesadores, paralelos a la dirección del esfuerzo, son aquellos en los cuales se ubica entre un ala o un alma un atiesador, como se indica en la Fig.N° 3.3. Estos atiesadores intermedios incrementan la capacidad de resistencia de los perfiles.

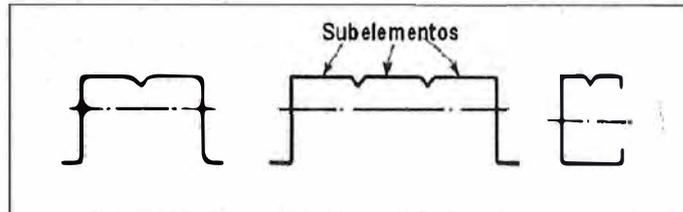


Figura N°3. 3.Perfiles con múltiples atiesadores

- d) *Ancho planos w* , este parámetro viene a ser un parámetro de diseño el cual es el ancho plano del elemento sin incluir la parte doblada, como se indica en la Fig.N° 3.4.

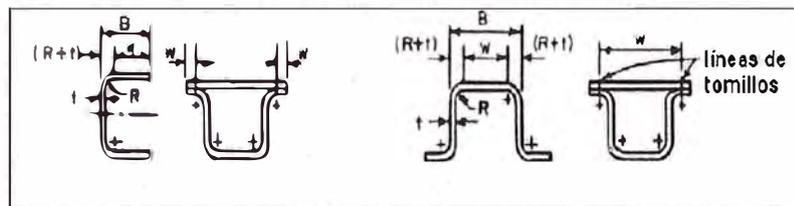


Figura N°3. 4. Ancho Plano

- e) *Ancho efectivo de diseño b* , es un parámetro de diseño que tiende a simplificar la variable distribución de esfuerzos debido al proceso de conformado en frío, idealizando que en un ancho b dicha distribución de esfuerzos será igual en todo su largo, esta reducción se usa cuando la relación w/t excede ciertos límites, en la Fig.N° 3.5 y 3.6 se muestra los anchos efectivos de perfiles sometidos a compresión y flexión, con elementos atiesados y no atiesados. Se indica en forma achurada las porciones "no efectivas" del perfil.
- f) *Pandeo lateral torsional*, se define el pandeo lateral torsional como un modo de pandeo debido a cargas de compresión en la que se presentará simultáneamente una deformación lateral y torcimiento, este tipo de pandeo es más considerable cuando en perfiles en los cuales el centro de corte no coincide con el centro de gravedad.

g) *Relación Ancho espesor w/t y h/t* , es necesario limitar los valores de w/t y h/t para poder asegurar que las consideraciones de diseño indicadas en el AISI sean válidas, estos valores se indican a continuación:

1. Valores máximos de w/t para alas

Según el AISI las máximas relaciones para w/t despreciando los rigidizadores intermedios son:

i. Elemento comprimido rigidizado que posee un borde longitudinal conectado al alma o ala, y el otro rigidizado por:

-Labio rigidizador simple 60

-Cualquier otro rigidizador

. Cuando $l_s < l_a$ 60

. Cuando $l_s \geq l_a$ 90

ii. Elemento comprimido rigidizado con ambos bordes

longitudinales conectados a otros rigidizadores 500

iii. Elementos comprimidos no rigidizados y elemen-

tos con un rigidizador de borde en el cual $l_s < l_a$

y $D/w \leq 0.8$ 60

2. Valores máximos de h/t para almas

Según el AISI las máximas relaciones h/t para almas sometidas a flexión son:

i. Para almas no reforzadas 200

ii. Para almas con atiesadores transversales que satisfacen los requisitos de la sección C3.7.1 del AISI Edición 2007

-Cuando usan solamente atiesadores de carga 260

-Cuando se usan atiesadores de carga intermedios 300

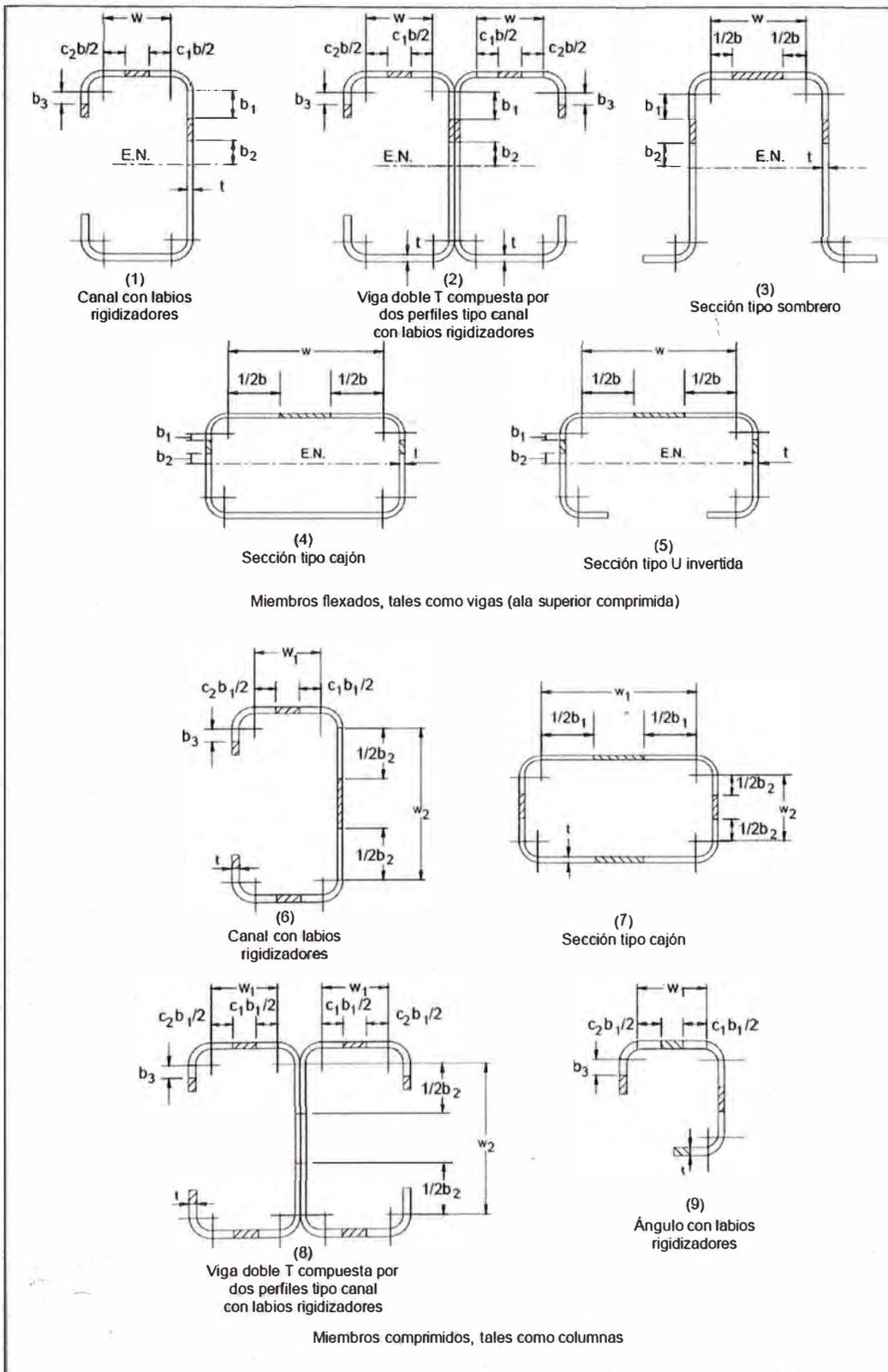


Figura N°3. 5. Anchos efectivos de perfiles con elementos a compresión atiesados

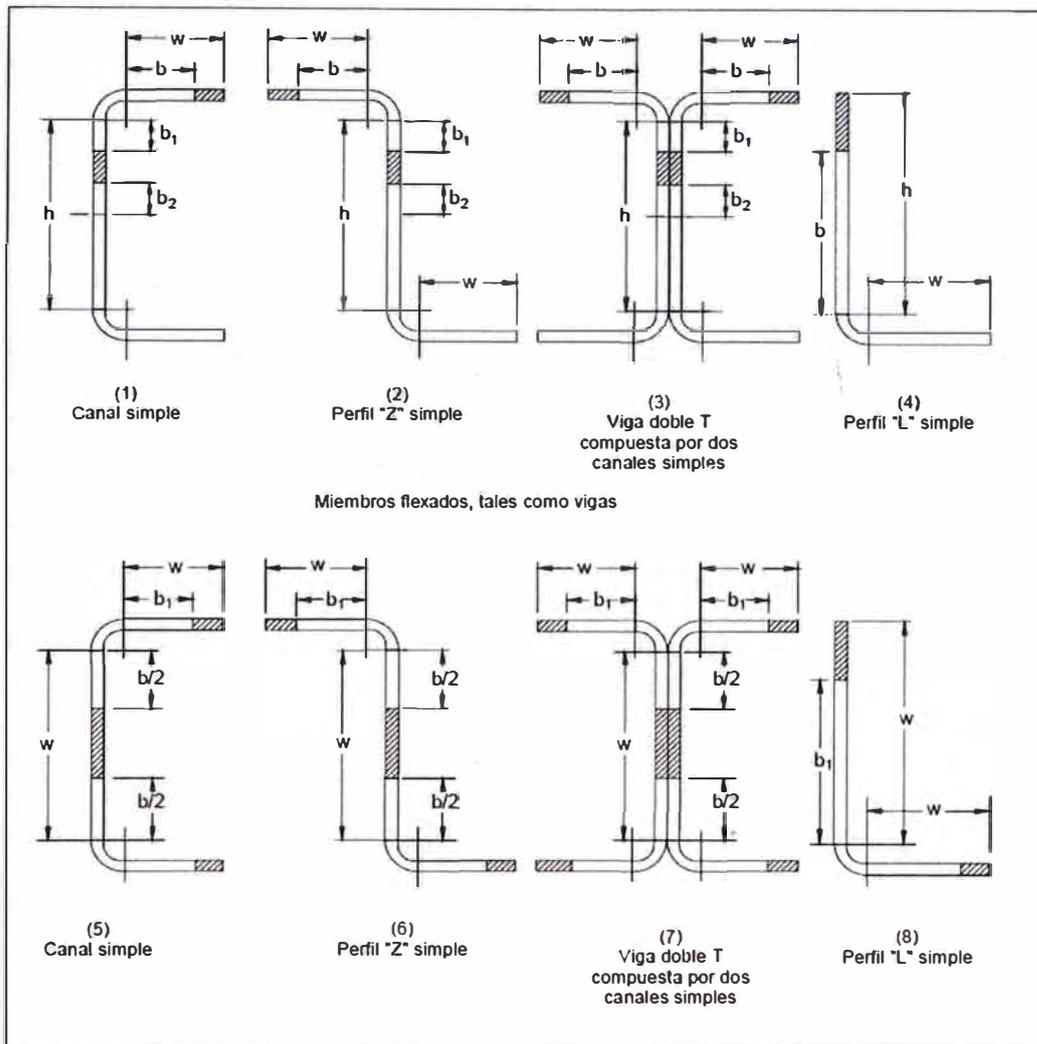


Figura N°3. 6. Anchos efectivos de perfiles con elementos a compresión no atiesados

3.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS ATIESADOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN UNIFORME

3.2.1 Pandeo Elástico y Resistencia Post Pandeo

Es importante entender que debido a la gran esbeltez de los perfiles conformados en frío pueden existir problemas de inestabilidad, es decir, para casos en que la relación w/t sea pequeña es posible que el perfil pueda alcanzar primero la fluencia antes que comience la falla por pandeo, pero ya para relaciones w/t grandes el perfil tiende a fallar primero por pandeo antes de que este empiece a fluir.

- Pandeo elástico

Según el AISI podemos obtener el esfuerzo crítico de pandeo elástico para una placa rectangular o cuadrada según la siguiente expresión:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad \text{Ec 3.1}$$

Dónde:

E= Módulo de Elasticidad del acero (2.073×10^6 kg/cm²)

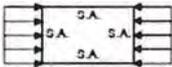
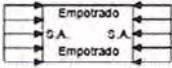
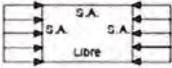
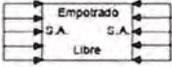
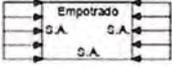
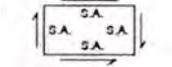
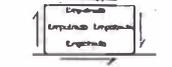
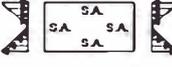
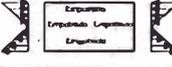
k= Coeficiente de Pandeo de placas (Tabla N° 3.1)

k=4 para elementos comprimidos rigidizados con cada uno de sus bordes longitudinales por un alma (Caso a Tabla N° 3.1).

t= Espesor del elemento comprimido

w= Ancho plano del elemento comprimido

μ = Coeficiente de Poisson = 0.3 para acero en el rango elástico

Caso	Condición de borde	Tipo de esfuerzo	Valor de k para placa larga
(a)		Compresión	4,0
(b)		Compresión	6,97
(c)		Compresión	0,425
(d)		Compresión	1,277
(e)		Compresión	5,42
(f)		Corte	5,34
(g)		Corte	8,98
(h)		Flexión	23,9
(i)		Flexión	41,8

Cuadro N°3. 1. Valores de Coeficiente de pandeo de placas (sa= simplemente apoyado)

- Resistencia Post Pandeo

Es importante entender que después de que un elemento a pandeado o llegado al esfuerzo crítico de pandeo, este aún puede seguir resistiendo carga debido a

una redistribución de esfuerzos y es más notoria aún en elementos más esbeltos con valores grandes de w/t .

Para poder entender con más claridad este fenómeno analizaremos un perfil omega sometido a carga axial (Ver Fig. N°3.7.a) y analizaremos específicamente su ala idealizándola como se muestra en la Fig N°3.7.b mediante una parrilla similar a una membrana y observamos que a medida que el ala comienza a pandear los cables horizontales tratan de contrarrestar el pandeo estirándose.

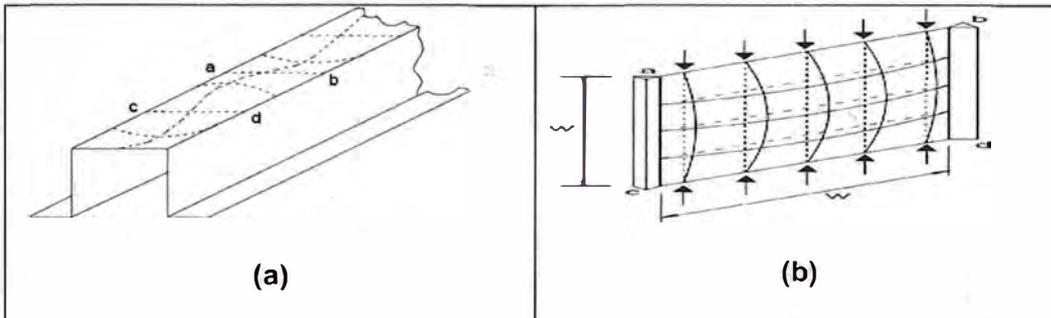


Figura N°3. 7. (a) Perfil Omega sometido a compresión, (b) Ala del perfil omega idealizado como una membrana apoyada en sus dos extremos y sometida a compresión

3.2.2 Ancho efectivo de un elemento a compresión atezado

En la sección 3.2.1 vimos que antes que el elemento llegue al esfuerzo crítico de pandeo la distribución de esfuerzos a lo largo de toda la sección es uniforme (Fig. N°3.8.a), luego posterior al pandeo hay una redistribución de esfuerzos de la parte central a las partes extremas que poseen una mayor resistencia de fluencia debido al proceso de conformado en frío, debido a esto la distribución de esfuerzos ya no es uniforme (Fig. N°3.8.b), y si seguimos incrementando la carga los extremos del elemento llegan a su esfuerzo de fluencia y es entonces recién cuando podemos decir que el perfil inicia la falla.

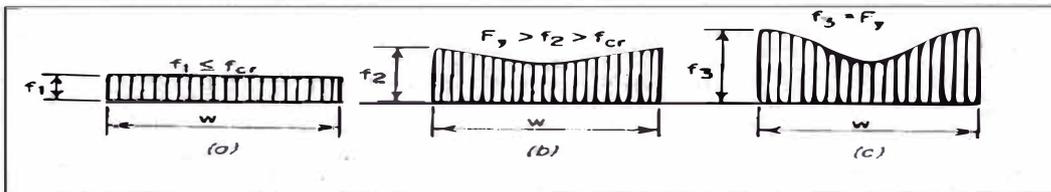


Figura N°3. 8 Fases consecutivas de la distribución de esfuerzos en elementos atezados sometidos a compresión

Para poder obtener los esfuerzos de Post-pandeo el investigador Von Karman, propuso una solución, pero debido a su complejidad tiene muy poca aplicación,

y es por eso que el introdujo el concepto de “**Ancho Efectivo**”, el cual consiste que en vez de considerar una distribución no uniforme de esfuerzos en la totalidad del ancho w , se distribuya un esfuerzo constante similar pero sobre un ancho efectivo b , dicho esfuerzo uniforme será igual al esfuerzo máximo ubicado en los extremos del perfil como se indica en la Fig. N°3.9.

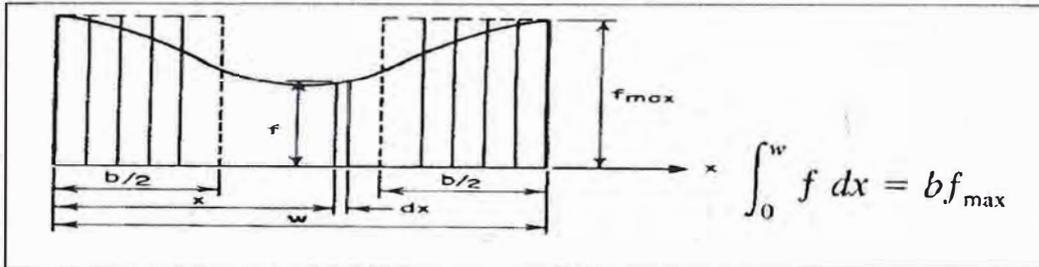


Figura N°3. 9 Distribución de esfuerzos uniformes en un ancho efectivo ficticio.

El AISI Edición 2007 en su sección B.2.1, explica la forma como obtener el ancho efectivo de un elemento atiesado sometido a compresión la cual es la siguiente:

a) Determinación de la capacidad de carga

El ancho efectivo “ b ” se debe determinar utilizando las siguientes ecuaciones:

$$b=w \text{ cuando } \lambda \leq 0.673 \quad \text{Ec.3.2}$$

$$b= \rho w \text{ cuando } \lambda > 0.673 \quad \text{Ec.3.3}$$

donde:

w =ancho plano que se indica en la Fig 3.4

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} \leq 1 \quad \text{Ec 3.4}$$

λ es un factor de esbeltez que se determina de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t}\right) \sqrt{\frac{f}{E}} \quad \text{Ec 3.5}$$

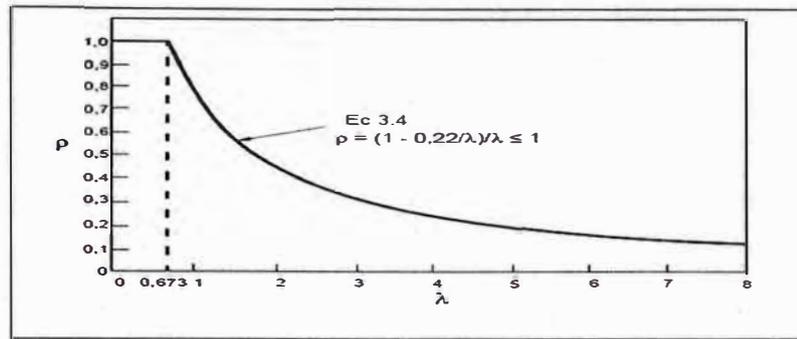


Figura N°3. 10. Factor de reducción ρ vs factor de esbeltez λ .

Donde:

t = espesor del elemento sujeto a compresión uniforme

f = esfuerzo en el acero que se obtiene de la siguiente manera:

Para miembros flexados:

(1) Si se utiliza el procedimiento I de la Sección 5.2.1.

Cuando en el elemento considerado la fluencia inicial es en compresión, considerar $f = F_y$

Cuando la fluencia inicial es en tracción, el esfuerzo a compresión " f " del elemento, se debe de determinar en base a la sección efectiva bajo M_y (Momento de flexión que cause la fluencia inicial)

(2) Si se utiliza el procedimiento II de la sección 5.2.1 " f " es el esfuerzo del elemento considerado bajo M_n (momento Nominal) determinado en base a la sección efectiva.

(3) Si la sección 5.2.1 no es usada, entonces $f = M_c / S_r$, tal como se describe en dicha sección al determinar S_c .

E = Módulo de Elasticidad.

k = Coeficiente de pandeo para placas.

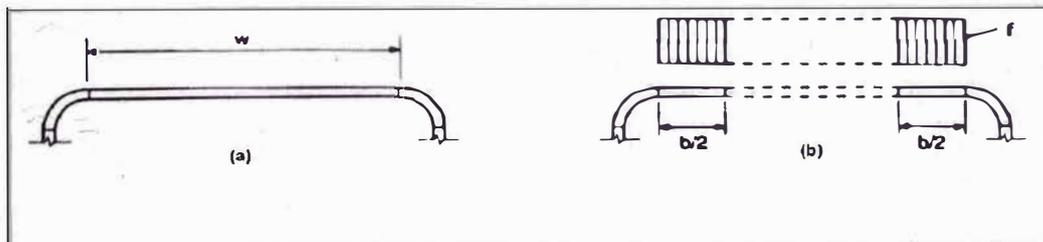


Figura N°3. 11. Elementos a compresión atiesados, (a) Dimensiones reales, (b) Dimensiones efectivas

3.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS ATIESADOS SOMETIDOS A UNA GRADIENTE DE ESFUERZOS

Esto generalmente ocurre en las almas de los elementos sometidos a flexión, en la cual, los esfuerzos de compresión no serán uniformes, y debido a esto el análisis de pandeo resulta un poco más complejo que el caso en que se tenía una distribución uniforme de esfuerzos.

El esfuerzo crítico de pandeo según el AISI puede ser calculada con la misma expresión indicada en la Ec 3.1 sustituyendo el valor de w/t por h/t y el coeficiente de pandeo k por el valor de 23.9, para apoyos simples como se indica en la Tabla N° 3.1

El AISI Edición 2007 también adoptó el mismo concepto de ancho efectivo para el caso de almas sometidas a gradiente de esfuerzos, pero con el nombre de “**Peralte efectivo de alma**” e indica la manera como calcular dicho peralte según la sección B.2.3 la cual mostramos a continuación:

Determinación de la capacidad de carga:

Los anchos efectivos, b_1 y b_2 se ilustran en la Fig N° 3.12 y se deben determinar según lo siguiente:

$$k = 4 + 2(1 + \Psi)^3 + 2(1 + \Psi) \quad \text{Ec 3.6}$$

Para $h_o / b_o \leq 4$

$$b_1 = b_e / (3 + \Psi) \quad \text{Ec 3.7}$$

$$b_2 = b_e / 2 \quad \text{Cuando} \quad \Psi > 0.236 \quad \text{Ec 3.8}$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad \text{Cuando} \quad \Psi \leq 0.236 \quad \text{Ec 3.9}$$

Para $h_o / b_o > 4$

$$b_1 = b_e / (3 + \Psi) \quad \text{Ec 3.10}$$

$$b_2 = b_e / (1 + \Psi) - b_1 \quad \text{Ec 3.11}$$

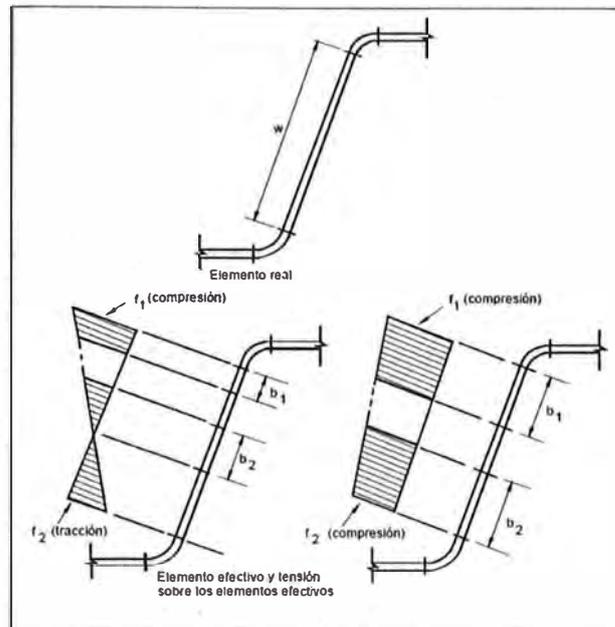


Figura N°3. 12. Elementos rigidizados con gradiente de esfuerzos

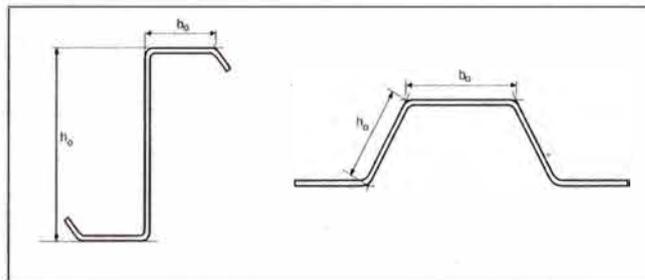


Figura N°3. 13. Dimensiones de extremo a extremo de almas en elementos sometidos bajo un gradiente de esfuerzos.

Donde:

$$\Psi = |f_2 / f_1|$$

b_e = Ancho efectivo b determinado según la sección B2.1 y sustituyendo f_1 por f con el valor de k según la Ec B2.3-2 (AISI Edición 2007) o con la Ec 3.6

f_1, f_2 = Según lo ilustrado en la Fig N 3.12, y en el caso que f_1 y f_2 sean ambos compresión, $f_1 \geq f_2$

Para otros elementos atiesados y sometidos a un gradiente de esfuerzos (con f_1 y f_2 en compresión) aplicar:

$$k = 4 + 2(1 - \Psi)^3 + 2(1 - \Psi) \quad \text{Ec 3.6.1}$$

$$b_1 = b_e / (3 - \Psi) \quad \text{Ec 3.7.1}$$

$$b_2 = b_e - b_1$$

Ec 3.9.1

Adicionalmente, $b_1 + b_2$ no debe ser mayor que la porción comprimida del alma calculada en base a la sección efectiva

3.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS NO ATIESADOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN UNIFORME

En el caso de perfiles no atiesados sometidos a compresión su comportamiento estructural con respecto a los elementos atiesados es similar, ya que la tensión puede llegar a límite de fluencia del acero si la relación w/t es pequeña, pero debemos aclarar que las relaciones ancho/espesor limitantes de los elementos no atiesados es menor que la de los elementos atiesados.

El AISI Edición 2007 incluye en la Sección B.3.1 el cálculo del ancho efectivo para elementos no atiesados que están sujetos a una compresión uniforme y las mostramos a continuación:

Determinación de la capacidad de carga:

El ancho efectivo, b , se determina de acuerdo con la sección B.2.1 excepto que k toma el valor de 0.43 según la Tabla N° 3.1 caso (c) y w como se define en la Fig N° 3.14.

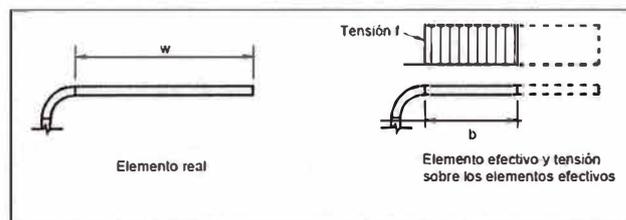


Figura N°3. 14. Elemento no atiesado sujeto a compresión uniforme.

3.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS NO ATIESADOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON UNA GRADIENTE DE ESFUERZOS

Este tipo de casos se da en su mayoría en los casos en que se presentan labios atiesadores perpendiculares al eje neutro como se indica en la FigN°3.15

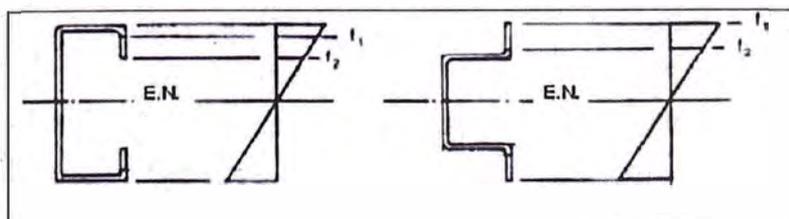


Figura N°3.15. Labio no atiesado sujeto a gradiente de esfuerzos.

Para el cálculo del ancho efectivo de elementos no atiesados sometidos a compresión con gradiente e esfuerzos El AISI Edición 2007 da las indicaciones en la Sección B.3.2 y es la siguiente:

La siguiente notación será usada en la presentación de las siguientes ecuaciones:

b = Ancho efectivo determinado con lo indicado en la Sección B2.1 (a) con f igual a f_1 y k y p se determina de acuerdo con lo indicado en esta sección

b_o = Ancho total no atiesado para perfiles de sección C como se ilustra en la Fig. N° 3.18

f_1, f_2 = Esfuerzos indicados en las Fig N° 3.16 , 3.17 y 3.18. Cuando f_1 y f_2 estén en compresión, $f_1 \geq f_2$.

h_o = Altura total de miembros sin atiesar para miembros de sección C ilustrados en la Fig. N° 3.18.

k = Coeficiente de pandeo que se define en esta sección o, de lo contrario, tal como se define en la Sección B2.1 (a)

t = Espesor del elemento

w = Ancho plano del elemento no atiesado, donde $w/t \leq 60$

$$\Psi = |f_2 / f_1|$$

λ = Factor de Esbeltez definido en la Sección B2.1 (a) con $f = f_1$

p = Factor de reducción definido en esta sección o, de lo contrario, tal como se definió en la Sección B2.1 (a)

3.4.1 Elementos sin atiesadores de borde sometidos a gradiente de esfuerzos

Determinación de la capacidad de resistencia

El ancho efectivo, b , de un elemento no atiesado bajo gradiente de tensión será determinado de acuerdo con la Sección B2.1 (a) con f igual a f_1 y el coeficiente de pandeo de la placa "k", determinado de acuerdo con esta sección, a menos que se indique lo contrario. Para el los casos en que f_1 esté compresión y f_2 en tensión, se determinará p de la Sección B2.1 (a) se determina de acuerdo con esta sección.

- (1) Cuando ambos f_1 y f_2 están en compresión (Fig. N° 3.16), el coeficiente de pandeo de las placas se calculará de acuerdo con cualquiera de la ecuación. Ec 3.12 o Ec 3.13 de la siguiente manera:

Si la tensión disminuye hacia el borde no compatible (Figura N° 3.16 (a)):

$$k = \frac{0.578}{\Psi + 0.34} \quad \text{Ec 3.12}$$

Si la tensión aumenta hacia el borde no compatible (Figura N° 3.16 (b)):

$$k = 0.57 - 0.21\Psi + 0.07\Psi^2 \quad \text{Ec 3.13}$$

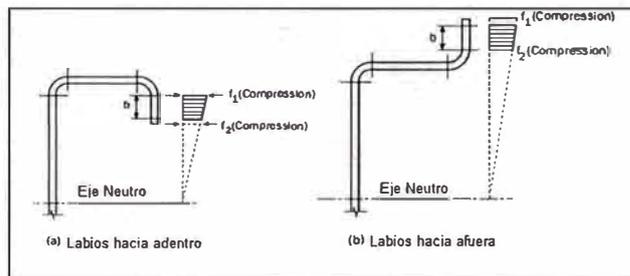


Figura N° 3. 16. Elementos sin rigidizar bajo gradiente de tensión, Ambos bordes longitudinales en compresión

- (2) Cuando f_1 esté en compresión y f_2 en tensión (Fig. N° 3.17), el factor de reducción y el coeficiente de pandeo de placas se calcula de la siguiente manera:

(i) Si el borde no apoyado está en compresión (Figura N° 3.17 (a)):

Cuando $\lambda \leq 0.673(1 + \Psi)$

$$\rho = 1$$

Cuando $\lambda > 0.673(1 + \Psi)$

$$\rho = (1 + \Psi) \left(\frac{1 - \frac{0.22(1 + \Psi)}{\lambda}}{\lambda} \right) \quad \text{Ec 3.14}$$

$$k = 0.57 + 0.21\Psi + 0.07\Psi^2 \quad \text{Ec 3.15}$$

(ii) Si el borde apoyado está en compresión (Figura N° 3.17 (b)):

Para $\Psi < 1$

Cuando $\lambda \leq 0.673$

$$\rho = 1$$

Cuando $\lambda > 0.673$

$$\rho = (1 + \Psi) \left(\frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} \right) + \Psi \quad \text{Ec 3.16}$$

$$k = 1.7 + 5\Psi + 17.1\Psi^2 \quad \text{Ec 3.17}$$

Para $\Psi \geq 1$

$$\rho = 1$$

El ancho efectivo, b , de los elementos atiesados para miembros de sección C sin atiesadores se permitirá utilizar los siguientes métodos alternativos, según sea el caso:

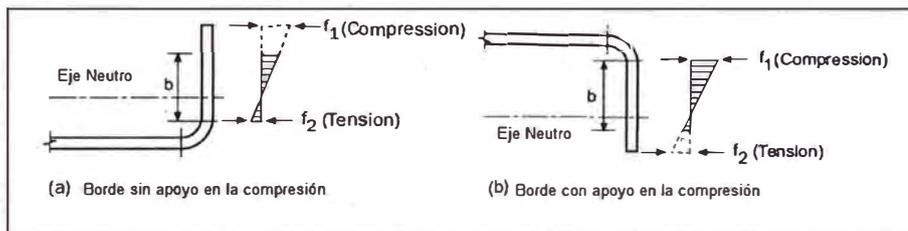


Figura N°3. 17 Elementos sin rigidizar bajo gradiente de tensión, un borde longitudinal en la compresión y el otro borde longitudinal en tensión

Alternativa 1 para miembros de sección C: Cuando el borde sin apoyo está en compresión y el borde de apoyo está en tensión (Figura N° 3.18 (a)):

Cuando $\lambda \leq 0.856$

$$b = w \quad \text{Ec 3.18}$$

Cuando $\lambda > 0.856$

$$b = \rho w \quad \text{Ec 3.19}$$

Donde:

$$\rho = 0.925 / \lambda \quad \text{Ec 3.20}$$

$$k = 0.145(b_o / h_o) + 1.256 \quad \text{Ec 3.21}$$

$$0.1 \leq b_o / h_o \leq 1.0$$

Alternativa 2 para perfiles C no atiesados: Cuando el borde apoyado está en compresión y el borde no apoyado en tensión (Figura N° 3.18 (b)), se determina el ancho efectivo en conformidad con la Sección B2.3.

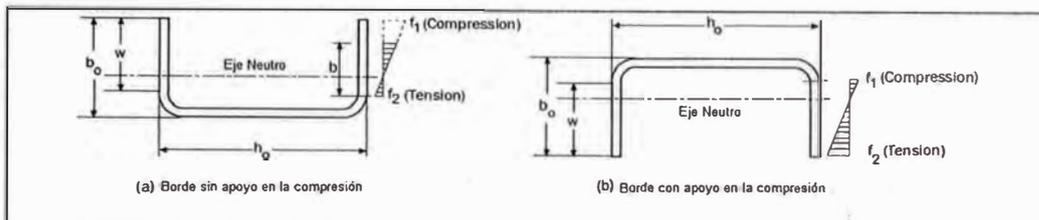


Figura N°3. 18. Elementos sin rigidizar de sección C bajo gradiente de esfuerzos según el método alternativo 1 y 2

3.4.1 Ancho efectivo de elementos uniformemente comprimidos con un labio simple de refuerzo

Los anchos efectivos de los elementos comprimidos uniformemente con un refuerzo del borde simple estarán calculados de acuerdo con (a) para la determinación de resistencia.

(a) Determinación de la resistencia

Para $w/t \leq 0.328S$

$I_a = 0$ (No necesita atiesador de borde)

$$b = w \quad \text{Ec 3.22}$$

$$b_1 = b_2 = w/2 \quad \text{(Ver Fig N° 3.19)} \quad \text{Ec 3.23}$$

$$d_s = d'_s \quad \text{Ec 3.24}$$

Para $w/t > 0.328S$

$$b_1 = (b/2)R_f \quad \text{(Ver Fig N° 3.19)} \quad \text{Ec 3.25}$$

$$b_2 = b - b_1 \quad \text{(Ver Fig N° 3.19)} \quad \text{Ec 3.26}$$

$$d_s = d'_s (R_f) \quad \text{Ec 3.27}$$

Donde:

$$S = 1.28 \sqrt{E/f} \quad \text{Ec 3.28}$$

w = Dimensión del ala ilustrada en la Fig. N° 3.19

t = Espesor de la sección

I_a = Momento de inercia del atiesador de borde requerido para que el elemento a compresión se comporte como un elemento atiesado.

$$= 399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right] \quad \text{Ec 3.29}$$

b=Ancho efectivo de diseño

b_1, b_2 =Porción efectiva del ancho de diseño definido en la Fig. N° 3.19

d_s = ancho efectivo reducido del atiesador de borde calculado acorde a ésta Sección; se deberá usar para calcular las propiedades efectivas del elemento.

d'_s = ancho efectivo del atiesador calculado acorde a la Sección B3.2 (ver Fig. 4.36).

$$R_f = I_s / I_a \leq 1 \quad \text{Ec 3.30}$$

Donde:

I_s = momento de inercia del atiesador de borde con respecto a su propio eje centroidal paralelo al plano del elemento que se desea atiesar; la esquina redondeada entre el atiesador y el elemento a ser atiesado, no se considera como parte del atiesador. = $(d^3 t \sin 2\theta) / 12$ Ec. 3.31

Ver Fig. N° 3.19 para las definiciones de otras variables dimensionales.

La anchura efectiva, b, en las Ecs. 3.25 y 3.26 se calculará de acuerdo con la Sección B2.1 con el coeficiente de pandeo de placa, k, como se indica en la Tabla 3.2 a continuación:

Rigidizador Simple ($140^\circ \geq \theta \geq 40^\circ$)	
$D/w \leq 0.25$	$0.25 < D/w \leq 0.8$
$3.57(R_f)^n + 0.43 \leq 4$	$\left(4.82 - \frac{5}{w}\right)(R_f)^n + 0.43 \leq 4$

Cuadro N°3.2. Determinación del coeficiente de pandeo de placa "k"

Donde:

$$n = \left(0.582 - \frac{w/t}{4S} \right) \geq \frac{1}{3} \quad \text{Ec 3.32}$$

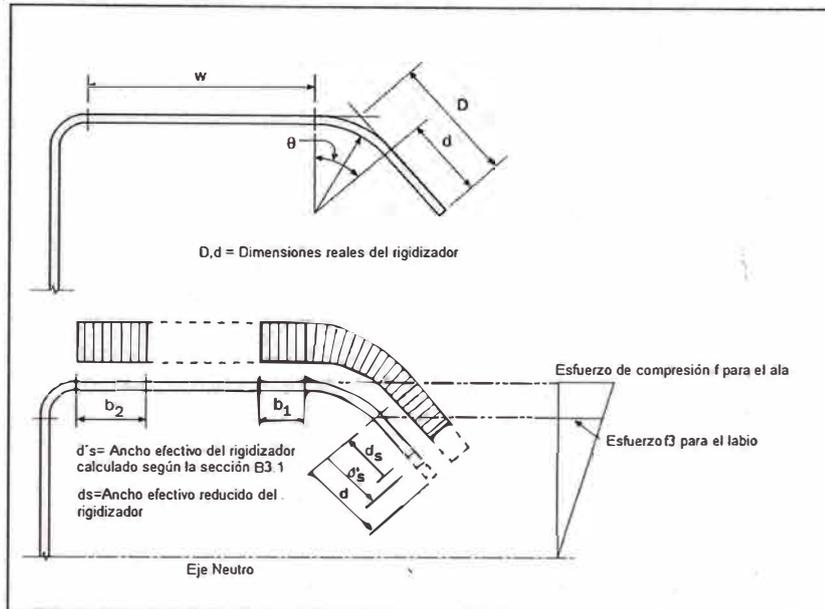


Figura N°3. 19. Elementos con atiesador simple de borde

3.4.2 Ancho efectivo de elementos atiesados en sus bordes con un rigidizador intermedio o más sujetos a compresión uniforme

Este tipo de elementos son muy importantes para poder obtener una mejor resistencia en los perfiles con relaciones w/t grandes, ya que se pueden reducir dicha relación lo cual según la Ec. 3.5 disminuye el valor de λ , pero para la Ec 3.4 daría un incremento en el valor de r que es el factor de reducción del elemento, esto lógicamente daría unos perfiles más económicos.

Pero uno de los inconvenientes de los rigidizadores intermedios es que tienen que poseer una rigidez inercial mínima para que puedan atiesar al elemento, en caso no se cumpla con ese mínimo momento de inercia, el efecto del rigidizador debe despreciarse y analizar el tubo como un perfil plano sin tomar en cuenta al rigidizador.

El AISI Edición 2007 en la Sección B5.1 da las consideraciones necesarias para poder calcular el ancho efectivo para este tipo de elementos y las mostramos a continuación:

Determinación de la resistencia

Para la siguiente sección se aplicara la siguiente notación:

Ag = área bruta del elemento incluyendo rigidizadores

As = área bruta de un rigidizador

be = Ancho efectivo de elemento, situado en el baricentro del elemento
incluyendo rigidizadores; ver Fig. N°3.20

bo = Ancho plano total del elemento rigidizado, ver Fig. N° 3.20

bp = máximo ancho plano de un sub-elemento, Ver Fig. N° 3.20

ci = Distancia horizontal desde el borde del elemento hasta el baricentro del
rigidizador, Ver Fig. N° 3.20

Fcr = Esfuerzo de pandeo crítico elástico

f = Esfuerzo uniforme de compresión que actúa sobre elemento plano

h = Ancho de elementos adyacentes a un elemento rigidizado (por ejemplo, la
altura del alma de una sección omega con múltiples rigidizadores intermedios
en el ala comprimida es igual a h, si los elementos adyacentes tienen diferentes
anchos, utilizar el menor)

Isp = Momento de inercia del rigidizador respecto del baricentro de la parte
plana del elemento. Se debe incluir la parte curva que une el rigidizador con la
parte plana.

k = Coeficiente de pandeo del elemento

kd = Coeficiente de pandeo distorsional

kloc = Coeficiente de pandeo para el sub-elemento.l

Lbr = Longitud libre entre puntos de arriostamiento u otros dispositivos que
restringen el pandeo distorsional del elemento

R = factor de modificación el coeficiente de pandeo distorsional

n = Número de rigidizadores en un elemento

t = espesor del elemento

i = índice del rigidizador "i"

λ = factor de esbeltez

ρ = Factor de reducción

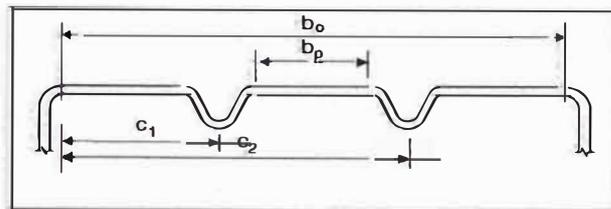


Figura N°3.20. Ancho Plano y Ubicación del rigidizador

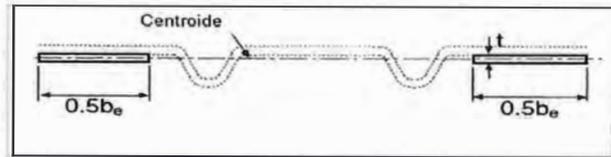


Figura N°3.21. Localización del Ancho efectivo

El ancho efectivo se determina de la siguiente forma:

$$b_e = \rho \left(\frac{A_g}{t} \right) \quad \text{Ec 3.33}$$

$$\rho = 1 \quad \text{Cuando } \lambda \leq 0.673 \quad \text{Ec 3.34}$$

$$\rho = (1 - 0.22/\lambda) / \lambda \quad \text{Cuando } \lambda > 0.673 \quad \text{Ec 3.35}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad \text{Ec 3.36}$$

$$F_{cr} = k \left(\frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \right) \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad \text{Ec 3.37}$$

El coeficiente de pandeo k se determina como el menor valor entre $R \cdot k_d$ y K_{loc} de acuerdo a las Secciones B5.1.1 o B5.1.2 según corresponda.

$$R = 2 \quad \text{Cuando } (b_o/h) < 1 \quad \text{Ec.B5.1-6(AISI Edición 2007)}$$

$$R = \frac{11 - b_o/h}{5} \geq \frac{1}{2} \quad \text{Cuando } (b_o/h) \geq 1 \quad \text{Ec.B5.1-6(AISI Edición 2007)}$$

Para nuestro caso en que solo analizaremos con un rigidizador tomamos lo indicado en la sección B5.1.1 y es lo siguiente:

Para caso general: Rigidizadores con ubicación tamaño y cantidad arbitraria.

Para determinar la resistencia

$$k_{loc} = 4 \left(b_o / b_p \right)^2 \quad \text{Ec 3.38}$$

$$k_d = \frac{(1 + \beta^2)^2 + 2 \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i}{\beta^2 \left(1 + 2 \sum_{i=1}^n \delta_i \omega_i \right)} \quad \text{Ec 3.39}$$

Donde:

$$\beta = \left(2 \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_i + 1 \right)^{1/4} \quad \text{Ec 3.40}$$

Donde:

$$\gamma_i = \frac{10.92 (I_{sp})_i}{b_o t^3} \quad \text{Ec 3.41}$$

$$\omega_i = \text{sen}^2 \left(\pi \frac{c_i}{b_o} \right) \quad \text{Ec 3.42}$$

$$\delta = \frac{(A_s)_i}{b_o t} \quad \text{Ec 3.43}$$

Si $L_{br} < \beta b_o$ entonces (L_{br} / b_o) podrá ser reemplazado por β para tener en cuenta el incremento de capacidad debido al arriostamiento

CAPITULO IV: DISEÑO DE ELEMENTOS SUJETOS A COMPRESIÓN AXIAL

4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el presente capítulo se analizará el comportamiento de los elementos sometidos únicamente a compresión axial pura. El comportamiento o tipo de falla gobernante, de un elemento sometido a compresión depende de muchas consideraciones como es: la esbeltez del elemento con respecto a su eje débil (KL/r), la forma de la sección, y del espesor del elemento, dependiendo de cada uno de estas limitantes se puede considerar los siguientes tipos de falla:

(i) Falla por fluencia de la sección, podría ocurrir en el caso de columnas cortas y compactas

(ii) Falla por pandeo global de la columna,

- *Pandeo por flexión*, el pandeo por flexión podemos diferenciar en dos tipos de pandeo el pandeo elástico y el pandeo inelástico:

Pandeo Elástico, este tipo de falla es el que está gobernado por la fórmula de Euler y ocurre en elementos esbeltos, debido a que el elemento primero falla por pandeo antes que empiece la fluencia (rango elástico). También es importante mencionar que para que este tipo de falla gobierne en el diseño, depende mucho la geometría del elemento, tenga una simetría doble como secciones cajón, sección tipo I, secciones en cruz, etc., ya que para secciones con simetría simple o asimétricas el pandeo por flexión puede no ser el que ocurra primero si no puede ser un posible modo de pandeo de lo tantos que pueda haber.

Pandeo Inelástico, en este tipo de falla ya la fórmula de Euler no es válida, debido a que el elemento primero fluye (rango inelástico) y luego patea, este tipo de falla ocurre generalmente en secciones de simetría doble pero que no son tan esbeltas (KL/r pequeño).

- *Pandeo torsional*, es una falla por torsión con respecto al centro cortante, que ocurre mayormente en elementos en los que el centro de gravedad y centro de corte no coinciden (Perfiles de sección abierta), los perfiles cerrados poseen usualmente un alta rigidez torsionante y no están gobernados por este tipo de falla.

- *Pandeo Flexotorsionante*, este tipo de falla es cuando ocurre simultáneamente los efectos de flexión y torsión.

(iii) Falla por pandeo local de elementos individuales.

El AISI Edición 2007 en la Sección C4 indica las especificaciones de diseño para los elementos únicamente sometidos a compresión axial la cual la indicamos a continuación:

4.2 MIEMBROS COMPRIMIDOS CON CARGA CONCÉNTRICA

Esta sección se aplica a miembros en los cuales la resultante de todas las cargas que actúan sobre el miembro es una carga axial que pasa a través del baricentro de la sección efectiva calculada a la tensión, F_n , definida en esta sección.

(a) La resistencia axial nominal P_n , se debe calcular según lo siguiente:

$$P_n = A_e F_n \quad \text{Ec 3.44}$$

A_e = Superficie efectiva a la tensión F_n . En el caso de secciones con perforaciones circulares, A_e se debe determinar de acuerdo con la Sección B2.2a, con sujeción a las limitaciones de dicha sección.

F_n se determina de la siguiente manera:

$$\text{Para } \lambda_c \leq 1.5 \quad F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad \text{Ec 3.45}$$

$$\text{Para } \lambda_c > 1.5 \quad F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad \text{Ec 3.46}$$

Donde:

$$\text{Para } \lambda_c > \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad \text{Ec 3.47}$$

F_e = La menor de las tensiones del pandeo elástico, torsional y flexotorsional de las secciones C.4.1.1 o C.4.1.5

El valor de F_e para el caso de secciones no sujetas a pandeo torsional o pandeo flexo-torsional que son el caso de secciones doblemente simétricas, de sección cerrada o alguna otra sección en la que se pueda comprobar que no está afectada por dichos esfuerzos, será:

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

Ec 3.48

Donde:

E= Módulo de elasticidad del acero

K= Factor de longitud efectiva

L= Longitud del elemento sin arriostramiento

r= Radio de giro de la sección en dirección del eje débil

CAPITULO V: DISEÑO DE ELEMENTOS SUJETOS A FLEXIÓN, CORTE Y LA COMBINACIÓN DE AMBOS

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el presente capítulo se presentará las formulaciones que propone el AISI Edición 2007 en la sección C.3, para calcular la capacidad de un elementos sujeto a esfuerzos de flexión pura, esfuerzos de cortante pura y a la combinación de esfuerzos de flexión y corte. Es necesario indicar que en este informe los elementos que se diseñarán a flexión los pórticos principales de sección cajón y las costaneras o viguetas de techo de sección Z, es por eso que daremos más énfasis en esos dos elementos.

5.2 DISEÑO A FLEXIÓN

En el caso de las secciones cajón o cerradas debido a su gran rigidez torsional el tipo de falla predominante es el de flexión, pero el AISI Edición 2007 menciona que cuando la distancia entre apoyos laterales L , excede un valor crítico L_u los efectos de pandeo lateral torsional deben de ser considerados.

Para obtener el momento nominal de una sección el AISI Edición 2007 propone dos procedimientos, el "Procedimiento I" está basado en que el momento nominal será cuando en la fibra extrema empieza la fluencia, y el "Procedimiento II" está basado en la capacidad inelástica de reserva que trata de analizar hasta cuanto más puede resistir el elemento después de haber iniciado la fluencia, en esta investigación nos basaremos en el primer método.

5.2.1 Momento nominal por flexión según el procedimiento I

Según la Sección C3.1.1 del AISI Edición 2007, el momento nominal de flexión será:

$$M_n = S_e F_y \quad \text{Ec 3.49}$$

Donde:

S_e = Módulo elástico de la sección efectiva calculado con la fibra extrema comprimida o traccionada a F_y

F_y = Esfuerzo de fluencia

5.2.2 Momento nominal por pandeo lateral torsional.

Elementos de Sección Cerrada

Para asegurar que una sección cerrada no falle por pandeo lateral torsional el AISI edición 2007 indica en la Sección C3.1.2.2 en limitar la longitud de soporte "L" lateral con respecto a "Lu" como se muestra a continuación:

- Si $L \leq L_u$ Determinar la resistencia nominal según la sección C3.1.1 (Ec 3.47)
- Si $L > L_u$ Determinar la resistencia nominal según la sección C3.1.2.1 donde el esfuerzo crítico elástico de pandeo lateral torsional F_e , está dado por la Ec C3.1.2.2-2 (Ec 3.49)

$$L_u = \frac{0.36C_b\pi}{F_y S_f} \sqrt{EGJ_y} \quad \text{Ec 3.50}$$

$$F_e = \frac{C_b\pi}{K_y L_y S_f} \sqrt{EGJ_y} \quad \text{Ec 3.51}$$

S_f = Módulo elástico de la sección total, no reducida, calculado para la fibra extrema comprimida

$C_b=1$ (Conservadoramente)

Elementos de Sección Abierta

Para el caso de perfiles de sección abierta tipo I, Z, C se calcula el momento nominal por pandeo lateral torsional según lo indicado en la sección C3.1.2.1 del AISI Edición 2007 que dice:

$$M_n = S_c F_c \quad \text{Ec 3.52}$$

S_c = Módulo elástico de la sección efectiva calculado para una tensión M_c/S_f en la fibra extrema comprimida

F_c puede ser determinado de la siguiente manera:

Para $F_e \geq 2.78F_y$

$$F_c = F_y \quad \text{Ec3 .53}$$

Para $2.78F_y > F_e > 0.56F_y$

$$F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_e} \right) \quad \text{Ec3 .54}$$

Para $F_e \leq 0.56F_y$,

$$F_c = F_e \quad \text{Ec3 .55}$$

Donde F_e para el caso de secciones con simetría doble Z se obtiene de la Ec C3.1.2.1-15 del AISI Edición 2007 (Ec 3.54):

$$F_e = \frac{C_b \pi^2 E I_{yc}}{2 S_f (K_y L_y)^2} \quad \text{Ec3 .56}$$

5.2.3 Momento nominal por pandeo Distorsional.

El AISI Edición 2007 en esta versión agrega por primera este tipo de análisis para perfiles I, Z, C y otros perfiles de sección abierta, además existen algunas correcciones indicadas en el Suplemente 2 del AISI Edición 2010 que son establecidas en las formulaciones siguientes, todo esto lo indica en la sección D6.1.1 y D6.1.2 y es como sigue:

Para $\lambda_d \leq 0.673$

$$M_n = M_y \quad \text{Ec3 .57}$$

Para $\lambda_d > 0.673$

$$M_n = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad \text{Ec3 .58}$$

Donde

$$\lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}} \quad \text{Ec 3.59}$$

S_{fy} = Módulo elástico de la sección no reducida con respecto al fibra extrema en fluencia

$$M_{crd} = S_f F_d \quad \text{Ec 3.60}$$

S_f = Módulo elástico de la sección no reducida con respecto al fibra extrema en compresión

F_d = Esfuerzo elástico por pandeo distorsional calculado de acuerdo a la sección C3.1.4(a) o (b)

Para perfiles de sección C o Z el valor de F_d se calcula con la Ecuación C3.1.4-6 (Ec 3.59), que se indican a continuación:

$$F_d = \beta \frac{K_{\phi ve} + K_{\phi ve} + K_{\phi}}{K_{\phi S} + K_{\phi vg}} S_f F_d \quad \text{Ec 3.61}$$

$$\text{Donde: } \beta = 1 \leq 1 + 0.4(L / L_m)^{0.7} (1 + M_1 / M_2)^{0.7} \leq 1.3 \quad \text{Ec 3.62}$$

$$\text{Donde: } L = \text{Min}(L_{cr}, L_m)$$

$$\text{Donde: } L_{cr} = \left(\frac{4\pi^4 h_o (1 - \mu^2)}{t^3} \left(I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) + \frac{\pi^4 h_o^4}{720} \right)^{1/4}$$

Ec 3.63

h_o = Altura del alma Ver Fig N° 3.13

μ = Módulo de Poisson

t = Espesor del perfil

I_{xf} = Momento de inercia respecto al eje axial X del ala

x_{of} = Distancia entre el centro de gravedad y el centro de corte del ala

h_{xf} = Distancia entre el centro de gravedad del ala al punto de unión del ala y el alma

C_{wf} = Constante de alabeo torsional del ala

I_{xf} = Producto de Inercia del ala

I_{yf} = Momento de inercia respecto al eje axial Y del ala

L_m = Separación lateral de la longitud no arriostrada

$M_1 = M_2$ Momento mínimo y momento máximo respectivamente en el segmento L_m , para curvaturas simple (M_1/M_2) es positivo y para curvaturas en dos direcciones en negativo

$$K_{\phi e} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \left(EI_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 GJ_f \quad \text{Ec 3.64}$$

$$K_{\phi ve} = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{3}{h_o} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{19h_o}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \frac{h_o^3}{240} \right) \quad \text{Ec 3.65}$$

$$K_{\phi} = 0 \quad \text{Ec 3.66}$$

$$K_{\phi S} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left[A_f \left((x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} (x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right] \quad \text{Ec 3.67}$$

$$\bar{K}_{\phi_{vg}} = \frac{h_0 t \pi^2}{13440} \left(\frac{[45360(1 - \xi_{web}) + 62160 \left(\frac{L}{h_0}\right)^2 + 448\pi^2 + \left(\frac{h_0}{L}\right)^2 [53 + 3(1 - \xi_{web})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left(\frac{L}{h_0}\right)^2 + 420 \left(\frac{L}{h_0}\right)^4} \right)$$

Ec 3.68

$\xi_{web} = (f1 - f2) / f1$, gradiente de tensión en el alma, donde f1 y f2 son las tensiones en el extremos opuestos de la banda, $f1 > f2$, la compresión es positiva, la tensión es negativa, y las tensiones se calculan sobre la base de la sección bruta, (por ejemplo, para flexión pura simétrica, $f1 = f2$, $\xi_{web} = 2$)

El cálculo de cada una de estas propiedades geométricas son indicadas en la Fig N 5.1.

$A_f = (b+d)t$	$A_f = (b+d)t$
$I_f = \frac{1}{3}bt^3 + \frac{1}{3}dt^3$	$I_f = \frac{1}{3}bt^3 + \frac{1}{3}dt^3$
$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b+d)}$	$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 - 4bd^3 \cos^2(\theta) + t^2bd + d^4 - d^4 \cos^2(\theta))}{12(b+d)}$
$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b+d)}$	$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3 + 6d^2b^2 \cos(\theta) + 4d^3b \cos^2(\theta) + d^4 \cos^2(\theta))}{12(b+d)}$
$I_{xyf} = \frac{tb^2d^2}{4(b+d)}$	$I_{xyf} = \frac{tb d^2 \sin(\theta)(b + d \cos(\theta))}{4(b+d)}$
$C_{wxf} = 0$	$C_{wxf} = 0$
$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)}$	$x_{of} = \frac{b^2 - d^2 \cos(\theta)}{2(b+d)}$
$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b+d)}$	$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db + d^2 \cos(\theta))}{2(b+d)}$
$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)}$	$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2 \sin(\theta)}{2(b+d)}$

Figura N°5. 1. Cuadro de propiedades geométricas del ala de secciones C y Z

5.3 DISEÑO POR CORTE

Según la Sección C3.2 del AISI Edición 2007, la resistencia Nominal al corte V_n , de cualquier sección debe calcularse de la siguiente manera:

$$V_n = A_w F_v \quad \text{Ec 3.69}$$

(a) Para $h/t \leq \sqrt{E k_v / F_y}$

$$F_v = 0.6 F_y \quad \text{Ec 3.70}$$

(b) Para $\sqrt{E k_v / F_y} < h/t \leq 1.51 \sqrt{E k_v / F_y}$

$$F_v = \frac{0.6 \sqrt{E k_v F_y}}{h/t} \quad \text{Ec 3.71}$$

(c) Para $h/t > 1.51 \sqrt{E k_v / F_y}$

$$F_v = \frac{\pi^2 E k_v}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad \text{Ec 3.72}$$

Donde:

V_n = Resistencia nominal al corte de la viga

A_v = Area del alma del elemento

t = Espesor del alma

h = Altura de la porción plana del alma medida a lo largo del plano del alma

k_v = Coeficiente de pandeo por corte determinado de la siguiente manera:

1. Para almas no reforzadas, $k_v = 5,34$
2. Para almas de vigas con rigidizadores transversales que satisfacen los requisitos de la Sección C3.7

Cuando $a/h \leq 1$

$$k_v = 4 + \frac{5.34}{(a/h)^2} \quad \text{Ec 3.73}$$

Cuando $a/h > 1$

$$k_v = 5.34 + \frac{4}{(a/h)^2} \quad \text{Ec 3.74}$$

a = longitud del panel de corte en el caso de elementos de almas no reforzadas

= distancia libre entre rigidizadores transversales en el caso de elementos
 con almas reforzadas

Para un alma compuesta por dos o más planchas, cada plancha se debe considerar como un elemento independiente que soporta su parte del esfuerzo de corte.

5.3.1 Resistencia para flexión y corte según el método LRFD

Para vigas con almas no reforzadas, la resistencia flexional requerida, M_u , y la resistencia al corte requerida, V_u , deben satisfacer la siguiente ecuación de interacción:

$$\sqrt{\left(\frac{M_u}{\phi_b M_{nx}}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{\phi_v V_n}\right)^2} \leq 1.0 \quad \text{Ec 3.75}$$

5.3.2 Resistencia para combinación de flexión y compresión según el método LRFD

Las resistencias requeridas, P_u , M_{ux} y M_{uy} deben satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{C_{mx} M_{ux}}{\phi_b M_{nx} \alpha_x} + \frac{C_{my} M_{uy}}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0 \quad \text{Ec 3.76}$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_{no}} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad \text{Ec 3.77}$$

Cuando $P_u / \phi_c P_n \leq 0.15$ en vez de las dos ecuaciones anteriores solo se puede utilizar la siguiente Ec

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad \text{Ec 3.78}$$

Donde:

- P_u = Resistencia a la compresión axial requerida
- M_{ux}, M_{uy} = Momentos flexionales últimos respecto a los ejes baricéntricos de la sección efectiva determinada solo para la resistencia a la compresión axial requerida
- ϕ_b = Factor de reducción por flexión =0.95
- M_{nx}, M_{ny} = Momentos nominales con respecto al eje baricéntrico
- x_{of} = Distancia entre el centro de gravedad y el centro de corte del ala
- h_{xf} = Distancia entre el centro de gravedad del ala al punto de unión del ala y el alma
- C_{wf} = Constante de alabeo torsional del ala
- I_{xf} = Producto de Inercia del ala
- I_{yf} = Momento de inercia respecto al eje axial Y del ala
- L_m = Separación lateral de la longitud no arriostrada
- $M_1 = M_2$ Momento mínimo y momento máximo respectivamente en el segmento L_m , para curvaturas simple (M_1/M_2) es positivo y para curvaturas en dos direcciones en negativo

$$\alpha_x = 1 - \frac{P_{ux}}{P_{Ex}} > 0 \quad \text{Ec 3.79}$$

$$\alpha_y = 1 - \frac{P_{uy}}{P_{Ey}} > 0 \quad \text{Ec 3.80}$$

$$P_{Ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad \text{Ec 3.81}$$

$$P_{Ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad \text{Ec 3.82}$$

$P_{no} =$ Fuerza axial determinada según la sección C4 (Sección 4.2) con $F_n = F_y$

C_{mx} , C_{my} Coeficientes cuyos valores se deben tomar de la siguiente manera:

1. Para miembros comprimidos en pórticos sujetos a traslación conjunta (desplazamiento lateral) $C_m = 0,85$
2. Para miembros comprimidos restringidos en pórticos arriostrados contra la traslación conjunta y no sometidos a cargas transversales entre sus apoyos en el plano de flexión $C_m = 0,6 - 0,4 (M_1/M_2)$
 Donde M_1/M_2 es la relación entre el menor y el mayor momento en los extremos de la porción del miembro analizado que no está arriostrado en el plano de flexión. M_1/M_2 es positivo cuando el miembro se flexiona con curvatura inversa y negativo cuando se flexiona con curvatura simple.
3. Para miembros comprimidos en pórticos arriostrados contra la traslación conjunta en el plano de carga y sometidos a cargas transversales entre sus apoyos, el valor de C_m se puede determinar mediante análisis racional. Sin embargo, en vez de este análisis se pueden utilizar los siguientes valores:
 - (a) para miembros cuyos extremos están restringidos,
 $C_m = 0,85$
 - (b) para miembros cuyos extremos no están restringidos,
 $C_m = 1,0$

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE UNA NAVE INDUSTRIAL CON PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO

6.1 GENERALIDADES

En el presente capítulo analizaremos una nave industrial de 20m de Luz libre, con altura de 6m, con una separación entre pórticos de 6m y completamente cerrado, ubicado en la ciudad de Lima, los componentes de los pórticos principales serán elementos tubulares con rigidizadores intermedios en las alas, las viguetas o costaneras que soportarán el techo estarán conformado por perfiles Z, el arriotramiento de pared será con perfiles tubulares en X y con una viga amarre de sección tubular, la nave industrial estará sometido a cargas de estáticas (carga viva y carga muerta) y a cargas dinámicas (cargas de viento y sísmicas). Se usará el programa Sap 2000 Vs 15.0 para modelar y obtener los esfuerzos de flexión, compresión y corte, y el diseño se hará con una hoja de cálculo en Excel.

Para una corroboración de resultados se usará el manual de diseño de perfiles Tubest, en el cual indican las capacidades nominales de los perfiles tubulares y costaneras.

6.2 ANÁLISIS DE CARGAS

6.2.1 Cargas Gravitacionales

	(Luz=	20.0	m)
	(Altura de hombro=	6.0	m)
(i) Cargas muertas			
<u>Carga muerta de techo</u>			
Peso estructura de techo	10	kg/m ²	
Peso Panel metálico	5	kg/m ²	
Instalaciones	10	kg/m ²	
Total Carga Muerta	25	kg/m ²	
Separación de pórticos @	6	m	
Carga distribuida W_D	150	kg/m	
<u>Carga muerta de pared</u>			
Peso estructura de techo	10	kg/m ²	
Peso Panel metálico	5	kg/m ²	
Otros	5	kg/m ²	
Total Carga Muerta	20	kg/m ²	
Separación de pórticos @	6	m	
Carga distribuida W_D	120	kg/m	
(i) Carga viva			
S/C	30	kg/m ²	

Separación @ 6 m
Carga distribuida W_L 180.0 kg/m

6.2.2 Cargas de Viento

(i) Carga de Viento

$Ph = 0.005 \cdot C \cdot V^2$ (Cap. 12.4- RNE E.020)
 Pendiente 15.0 % 8.5 °
 V = Velocidad del Viento 80 kph (Cap. 12.3- RNE E.020)
 h = Altura sobre el terreno en m 10.0 m
 V_h = Velocidad de diseño en la altura h 80 kph (Cap. 12.3- RNE E.020)

Cálculo de los coeficientes de presión externa y presión interna según la Norma Peruana E.020, para estructuras con aberturas uniformes o completamente cerrada						
	Cpe	Cpi	Cpi	C1	C2	C
Pared Barlovento	0.8	0.3	-0.3	0.5	1.1	1.1
Pared Sotavento	-0.6	0.3	-0.3	-0.9	-0.3	-0.9
Techo Barlovento	0.3	0.3	-0.3	0	0.6	0.6
	-0.7	0.3	-0.3	-1	-0.4	-1
Techo Sotavento	-0.6	0.3	-0.3	-0.9	-0.3	-0.9

Cuadro N° 6. 1. Determinación del coeficiente de pandeo de placa "k"

Casos de vientos W

Presión de Diseño

	C	Ph(kg/m ²)	W(kg/m)	
Pared Barlovento	1.1	35.20	211.2	(Tabla 4- RNE E.020)
Pared Sotavento	-0.9	-28.80	-172.8	(Para pendientes menores de 15°)
Techo Barlovento	0.6	19.20	115.2	
	-1	-32.00	-192.0	
Techo Sotavento	-0.9	-28.80	-172.8	

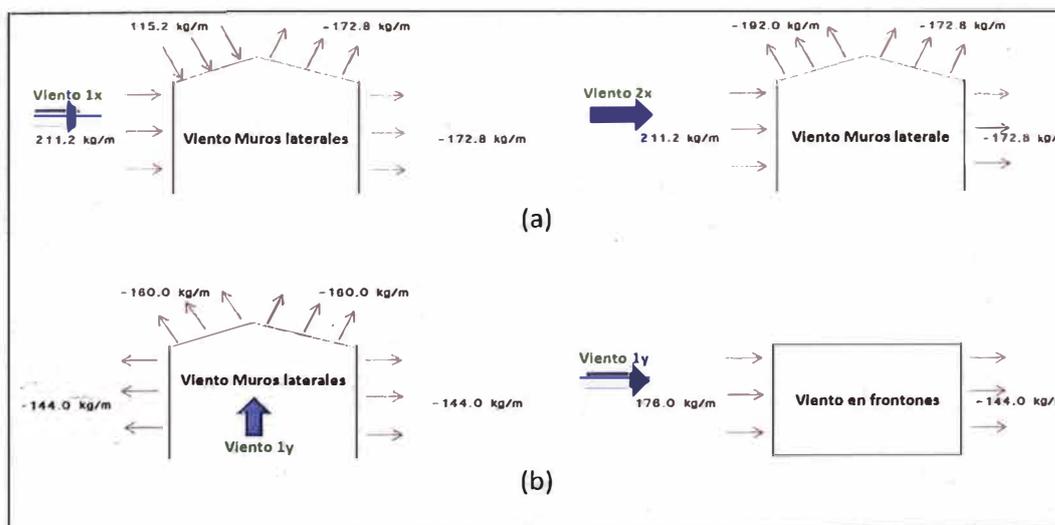


Figura N°6. 1. Análisis de Viento (a) Viento en dirección X, con un ancho tributario de 6m
(b) Viento en dirección Y, con un ancho tributario de 5m

6.2.3 Cargas de Sismo

Para el análisis Sísmico se tomarán los siguientes parámetros establecidos según la Norma Peruana Sismorresistente E-030 y son:

Z=Factor de Zona	0.4	(Zona 3)
U=Coefficiente de Uso	1	(Clase C)
S=Factor de Suelo	1.2	(Tipo de Suelo S2)
R _x =Factor de Reducción	6.0	
R _y =Factor de Reducción	9.5	

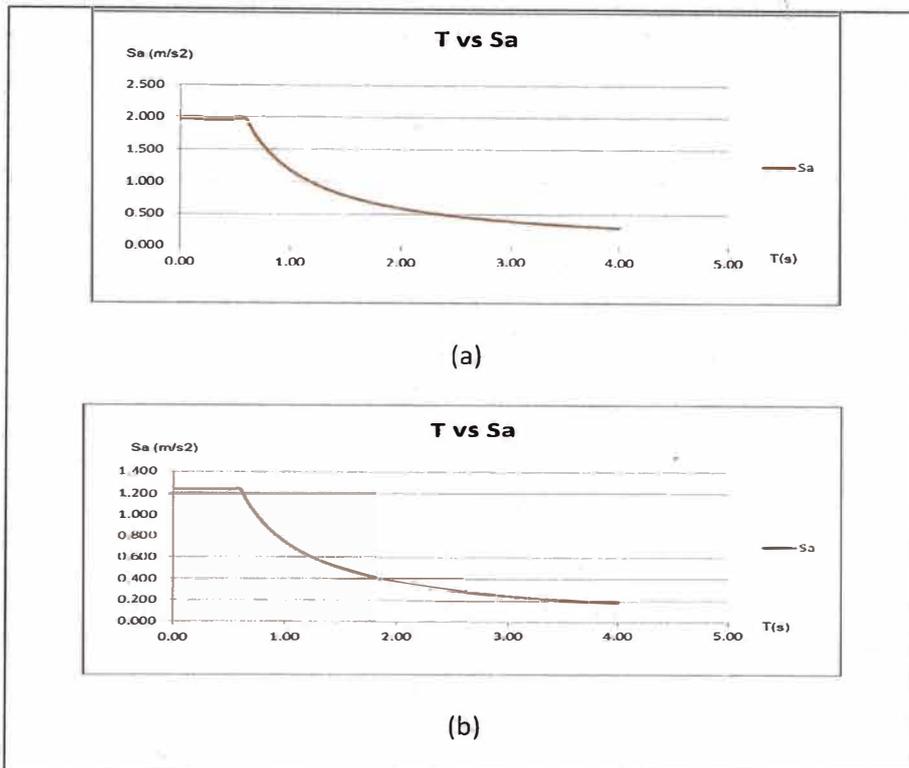


Figura N°6. 2. Espectros de Diseño (a) Espectro en X, para R=6 (b) Espectro en Y, para R=9.5

6.3 COMBINACIONES DE CARGAS

Las combinaciones de carga usadas según el método LRFD y son:

	CM	CV	W	SX	SY
COMB1	1.4				
COMB2	1.2	1.6			
COMB3	1.2	1.6	0.8W1		
COMB4	1.2	1.6	0.8W2		
COMB5	1.2	1.6	0.8W3		
COMB6	1.2	1.6	0.8W4		
COMB7	1.2	0.5	1.3W1		
COMB8	1.2	0.5	1.3W2		
COMB9	1.2	0.5	1.3W3		

COMB10	1.2	0.5	1.3W4		
COMB11	1.2	0.5		1	1
COMB12	1.2	0.5		-1	-1
COMB13	0.9		1.3W1		
COMB14	0.9		1.3W2		
COMB15	0.9		1.3W3		
COMB16	0.9		1.3W4		
COMB17	0.9			1	1
COMB18	0.9			-1	-1

Cuadro N° 6. 2. Combinaciones de carga según el método LRFD

6.4 MODELAMIENTO EN SAP 2000

El modelamiento de la Nave industrial se hizo en Sap 2000 con el uso de elementos frame de sección tubular, a los cuales se les modificó las propiedades geométricas como inercia, área y otros según las inercias encontradas para cada perfil, en la Fig 6.1 se ve un esquema 3D del modelo.



Figura N°6.3. Modelo 3D de la nave industrial en Sap 2000

6.5 ANÁLISIS DEL PÓRTICO PRINCIPAL.

Del análisis de combinaciones la combinación que predomina es la combinación $COMB3=1.2CM+1.6CV+0.8W1$.

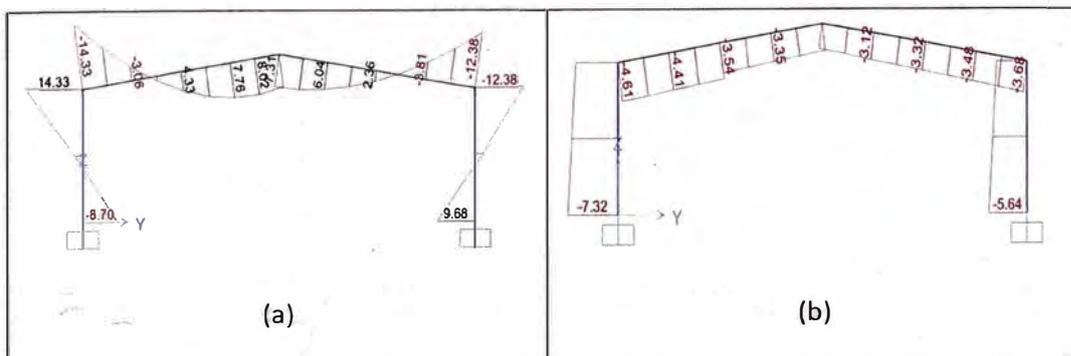


Figura N°6.4. Cargas últimas en toneladas, de la COMB3 en Sap 2000 (a) Momentos últimos, (b) Fuerzas axiales últimos.

6.5.1 Análisis por compresión

Para el análisis por compresión debemos de calcular las longitudes efectivas tanto de la vigas como de las columnas, para el caso de las vigas se asumirá una valor de $K_x=K_y=1$ y para el caso de las columnas se tomara como $K_y=1$ y K_x se obtendrá según Fig N 6.5.

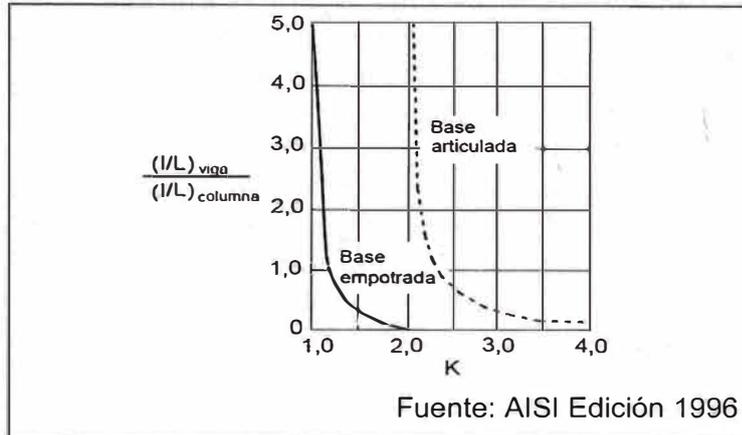


Figura N°6. 5. Cálculo de la longitud efectiva para las columnas empotradas en la base, sin arriostramiento lateral.

(i) *Propiedades geométricas y mecánicas del material*

Para las columnas y vigas utilizaremos un perfil TB 500x200x4x3 que a continuación se indican sus propiedades geométricas:

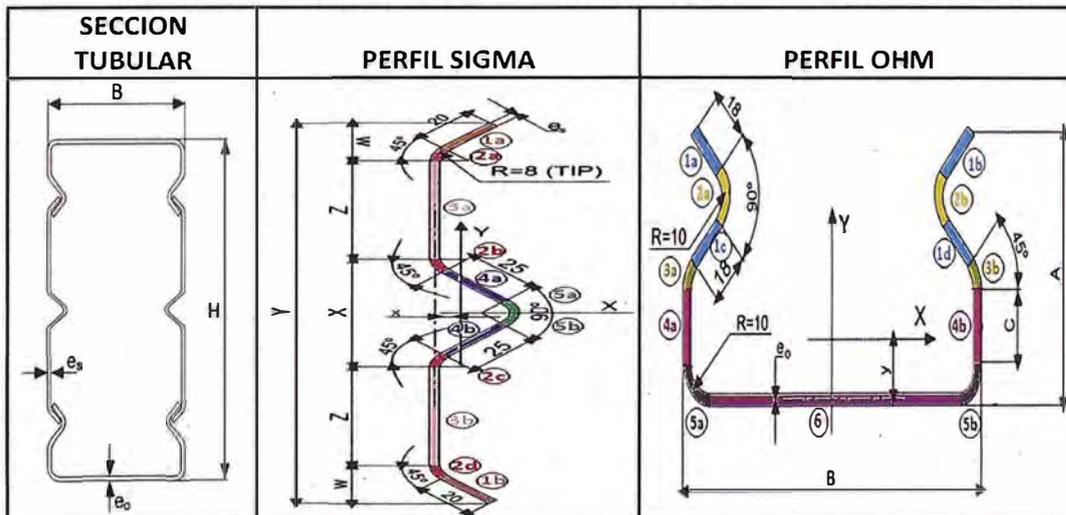


Figura N°6.6. Esquema de dimensiones del perfil Tubest.

H=	50 cm	Peralte de la sección
B=	20 cm	Ancho de la sección
es=	0.3 cm	Espesor del perfil Sigma
eo=	0.4 cm	Espesor del perfil Ohm

Z=	13.2 cm	Dato perfil Sigma
w=	2.2 cm	Dato perfil Sigma
Y=	37 cm	Dato perfil Sigma
X=	6.2 cm	Dato perfil Sigma
A=	8.9 cm	Dato perfil Ohm
C=	2.61 cm	Dato perfil Ohm
Area=	54.84 cm ²	Área de la sección tubular TB500x200x4x3
I_x=	18509.4 cm ⁴	Inercia respecto al Eje X
I_y=	3929.5 cm ⁴	Inercia Respecto al Eje Y
r_x=	18.37 cm	Radio de giro con respecto al eje X
r_y=	8.46 cm	Radio de giro con respecto al eje Y
S_x=	740.4 cm ³	Módulo de sección sin reducir en X
S_y=	392.9 cm ³	Módulo de sección sin reducir en Y
J=	8898.8 cm ⁴	Constante torsional
*S_{xe}=	716.51 cm ³	Módulo de sección efectiva en X

* El procedimiento de cálculo del módulo de sección efectiva se ilustra en el Anexo B

Todas las propiedades geométricas fueron calculadas según lo indicado en el Anexo A.

Las propiedades mecánicas del material son las siguientes:

F_y=	2530 kg/cm ²	Esfuerzo de fluencia del material
E=	2040000 kg/cm ²	Módulo de elasticidad.
G=	784600 kg/cm ²	Módulo de corte.

(ii) *Verificación por pandeo lateral torsional y pandeo elástico por flexión*

Esfuerzo efectivo por Pandeo Lateral Torsional en la columna.

Para verificar que el pandeo lateral torsional debe ser analizado o no tenemos que verificar que el valor de L_u indicado en la Ec 3.50 no sea menor que el valor de la longitud de arriostamiento lateral que tiene la viga o la columna.

$$L_c = 740.4\text{cm}, C_b = 1, S_f = 740.4\text{cm}^3$$

$$L_u = \frac{0.36C_b\pi}{F_y S_f} \sqrt{EGJ_y} = 4517\text{cm} \quad \text{Ec 3.50}$$

$L_u > L_c$, Por lo tanto no es necesario verificar el pandeo lateral torsional del elemento.

Esfuerzo efectivo por Pandeo elástico por flexión en la columna.

$L = 600 \text{ cm}$

$(I/L)_{Viga} / (I/L)_{Columna} = (I_x / 1000) / (I_x / 600) = 0.6$

Insertando el valor de 0.6 en la Fig 6.5 el valor de $K_x = 1.4$

$K_x = 1.4 \quad r_x = 18.37 \text{ cm} \quad K_x L / r_x = 45.7$

$K_y = 1 \quad r_y = 8.46 \text{ cm} \quad K_y L / r_y = 70.9$

Para el cálculo del esfuerzo elástico por flexión se procederá a calcular los valores de Área efectiva en "X" y en "Y"

Cálculo del área del alma del elemento de la sección Tubest

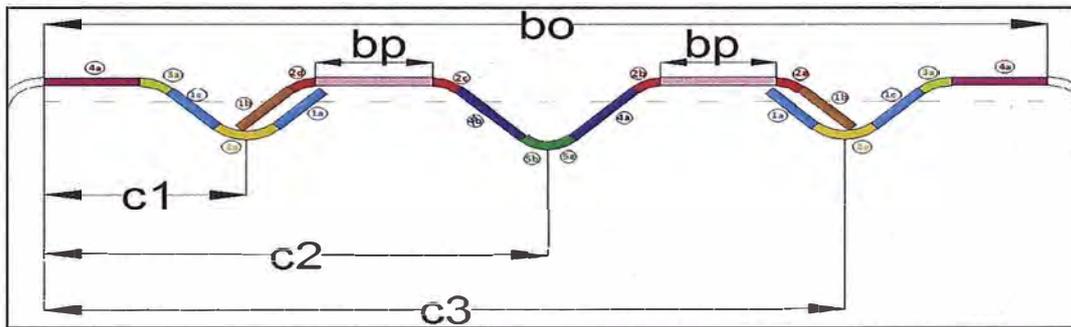


Figura N°6. 7. Esquema de dimensiones del alma de la sección Tubest.

Elemento	Área (mm ²)
Ohm	
4a	192.706
3a	75.398
1c,1a	288.000
2a	150.796
Sigma	
1b	120.000
2a,2b,2c,2d	89.535
3a,3b	792.000
4a,4b	150.000
5a,5b	44.768
Suma	1903.204

-Rigidizador 1 y 3

Elemento	Area (mm ²)	y(mm)	Ay(mm ³)	Ay ² (mm ⁴)	Ixx(mm ⁴)
----------	-------------------------	-------	----------------------	------------------------------------	-----------------------

Ohm					
3a	37.699	1.196	45.096	53.944	115.681
1c,1a	144.000	9.879	1422.530	14052.717	972.000
2a	75.398	18.561	1399.478	25975.931	84.040
Sigma					
1b	60.000	9.854	591.213	5825.551	1000.000
2d	22.384	0.947	21.197	20.074	15.637
Suma	339.481		3479.514	45928.216	2187.358

ycgr 1= 10.25 mm
Ir1xx = 12452.27 mm⁴

Ir1 baricentro=	48115.6	mm ⁴
Ir3 baricentro=	48115.6	mm ⁴

-Rigidizador 2

Elemento	Area (mm ²)	y(mm)	Ay(mm ³)	Ay ² (mm ⁴)	Ixx(mm ⁴)
Sigma					
2c,2b	44.768	0.947	42.395	40.148	31.273
4b,4a	150.000	11.621	1743.198	20258.263	3906.250
5b,5a	44.768	22.296	998.125	22253.834	31.273
Suma	239.535		2783.718	42552.245	3968.797

ycgr 2= 11.6 mm
Ir2xx = 14170.6 mm⁴
Ir2 baricentro= 46521.0 mm⁴

Cálculo del ancho efectivo del Alma

a.1 Cálculo del coeficiente de abolladura (k)

Datos

Area de los rigidizadores

Distancia de los rigidizadores

Ar1=	3.39 cm ²	c1=	53.787 mm	Ver Fig N 6.7
Ar2=	2.40 cm ²	c2=	236.00 mm	Ver Fig N 6.7
Ar3=	3.39 cm ²	c3=	418.21 mm	Ver Fig N 6.7
bo=	472.00 mm	bp=	132.00 mm	Ver Fig N 6.7

$\gamma_1=$	41.23 Ec. 3.41	$\omega_1=$	0.123 Ec. 3.42	$\delta_1=$	0.240 Ec. 3.43
$\gamma_2=$	39.86 Ec. 3.41	$\omega_2=$	1.000 Ec. 3.42	$\delta_2=$	0.127 Ec. 3.43
$\gamma_3=$	41.23 Ec. 3.41	$\omega_3=$	0.123 Ec. 3.42	$\delta_3=$	0.240 Ec. 3.43
$\Sigma \delta_i \omega_i=$	0.19				
$\Sigma \gamma_i \omega_i=$	49.99				

$\beta=$	3.17	Ec. 3.40			
Lbr=	6000.00	mm			
$\beta_{bo}=$	1496.22	mm			
$\beta=$	3.17	$L_{br} > \beta_{bo}$			
kd=	16.11	Ec. 3.39			
kloc=	51.14	Ec. 3.38			
$h=B-2*(R+eo)=$	172.00	mm			
bo/h=	2.74				
R=	1.65	Ec.B5.1-6(AISI Edición 2007)			
k=	26.60				
Fcr=	1981.52	kg/cm ²	Ec. 3.37		
Análisis para el eje X			Análisis para el eje Y		
f _{nx} =	2266.57	kg/cm ²	f _{ny} =	1942.50	Ec.3.45 o Ec.3.46
$\lambda_x=$	1.07	Ec 3.4	$\lambda_y=$	0.99	Ec 3.4
$\rho_x=$	0.74	Ec 3.5	$\rho_y=$	0.79	Ec 3.5
Ag=	19.03	cm ²	Ag=	19.03	Area bruta del alma incluyendo rigidizadores
b _{ex} = ρ_x Ag=	14.13	cm ²	b _{ey} = ρ_y Ag	14.95	Area efectiva de un alma

(b) Cálculo del ancho efectivo ala

Análisis para el eje X		Análisis para el eje Y	
$w=B-2*(eo+R)=$	172.00 mm	$w=B-2*(eo+R)=$	172 mm
w/t=	43.00 <90 Ok	w/t=	43 <90 Ok
k=	4.00	k=	4
$\lambda_x=$	0.75 Ec 3.4	$\lambda_y=$	0.70 Ec 3.4
$\rho_x=$	0.94 Ec 3.5	$\rho_y=$	0.98 Ec 3.5
b _{ex} = $\rho_x w=$	161.57 mm	b _{ey} = $\rho_y w=$	168.76 mm

(c) Cálculo del Área efectiva del elemento 5a del perfil Ohm

Area 5a= 0.75 cm²

(d) Cálculo del Área efectiva de la sección Tubest 500x200x4x3

$$A_{ex} = 2(b_{ex})_{Alma} + 2(b_{ex})_{Ala} + 4 A_{Elemento 5a} = 44.21 \text{ cm}^2$$

$$A_{ey} = 2(b_{ey})_{Alma} + 2(b_{ey})_{Ala} + 4 A_{Elemento 5a} = 46.42 \text{ cm}^2$$

(iii) Determinación del esfuerzo efectivo por pandeo elástico flexionante

F _{ex} =	9630.88	kg/cm ²	Ec.3.48		
F _{ey} =	4007.40	kg/cm ²	Ec.3.48		
$\lambda_{cx}=$	0.51	$\lambda_c < 1.5$	Ec.3.47	$\lambda_{cy}= 0.79$	$\lambda_c < 1.5$
F _{nx} =	2266.57	kg/cm ²	Ec.3.45	F _{ny} =	1942.50 kg/cm ²
A _{ex} =	44.21	cm ²			
A _{ey} =	46.42	cm ²			
P_{nx}=	100.21	ton	Ec.3.44		

Pny= 90.17 ton Ec.3.44

Si comparamos con los valores indicados en el manual de diseño Tubest indicados en el Anexo C, notamos que las capacidades axiales nominales son muy parecidas y de esta manera corroboramos que nuestro procedimiento fue el correcto.

Siguiendo el mismo procedimiento anteriormente indicado calculamos la capacidad nominal de la viga para los valores de $K_x=K_y=1$, $L=10m$, teniendo en cuenta que será de la misma sección TB 500x200x4x3 y se obtuvo los siguientes valores:

Pnx=97.13 ton

Pny=62.82 ton

6.5.2 Análisis por flexión y corte de la viga y columna

(i) Análisis por flexión

Para el análisis por flexión nos vamos a basar el procedimiento I indicado en la sección C3.1.1 del AISI Edición 2007, calculado el momento nominal de flexión para el caso en que la fibra extrema llega al esfuerzo de fluencia F_y , y para esto tendremos que calcular el Módulo de sección efectiva S_e , para el caso en que la fibra extrema en compresión llega al valor de F_y , este procedimiento de cálculo del valor S_e , está indicado en el Anexo B y nos dio como resultado $S_{xe}=716.51cm^3$

$$M_n = S_e F_y = 716.51 \times 2530 = 1812770 kg - cm = 18.13 t - m \quad \text{Ec 3.49}$$

(ii) Análisis por corte

$$E = 2040000 \text{ kg/cm}^2$$

$$k_v = 5.34$$

$$F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$$

$$t = 0.3 \text{ cm}$$

$$\sqrt{E k_v F_y} = 65.62$$

$$1.51 \sqrt{E k_v F_y} = 99.08$$

$$h = \text{Max}(Z, C) = 13.2 \text{ cm}$$

$$h/t = 44.00$$

$$F_v = 1518 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_w = 19.03 \text{ cm}^2$$

$$V_n = A_w \cdot F_v = 28.89 \text{ ton}$$

Caso:
 $h/t \leq \sqrt{E k_v F_y} = \text{Ec.3.70}$

Ec.3.69

A continuación mostramos un cuadro de resumen de capacidades últimas y nominales, establecidas en la Fig. N°6.4 y en la sección 6.5.1, 6.5.2 respectivamente y son:

Elemento	Pu(ton)	Mu(ton-m)	Vu(ton)	Pn(ton)	Mn(ton-m)	Vn(ton)
Columna	6.15	14.33	4.35	90.17	18.13	28.89
Viga	4.61	14.33	5.22	62.82	18.13	28.89

Cuadro N° 6. 3. Capacidades últimas de los elementos

6.5.3 Análisis por flexo-compresión y combinación de flexión y corte

(i) Análisis por flexo-compresión.

Elemento Columna

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{6.15}{0.85 \times 90.17} = 0.08 \leq 0.15, \text{ por lo tanto podemos usar la Ec.3.78}$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{6.15}{0.85 \times 90.17} + \frac{14.33}{0.9 \times 18.13} = 0.96 \leq 1.0 \quad !Ok$$

Elemento Viga

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{4.61}{0.85 \times 62.82} = 0.086 \leq 0.15, \text{ por lo tanto podemos usar la Ec.3.78}$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = \frac{4.61}{0.85 \times 62.82} + \frac{14.33}{0.9 \times 18.13} = 0.964 \leq 1.0 \quad !Ok$$

(ii) Análisis por combinación de flexión y corte.

Elemento Columna

$$\sqrt{\left(\frac{M_u}{\phi_b M_{nx}}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{\phi_v V_n}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{14.33}{0.9 \times 18.13}\right)^2 + \left(\frac{4.35}{0.9 \times 28.89}\right)^2} = 0.89 \leq 1.0 \quad !Ok$$

Elemento Viga

$$\sqrt{\left(\frac{M_u}{\phi_b M_{nx}}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{\phi_v V_n}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{14.33}{0.9 \times 18.13}\right)^2 + \left(\frac{5.22}{0.9 \times 28.89}\right)^2} = 0.9 \leq 1.0 \quad !Ok$$

6.5.4 Control de desplazamientos verticales y horizontales.

En el cuadro N° 6.4 y 6.5 se muestra un resumen de los desplazamientos obtenidos en el programa SAP 2000 y mostrados en la Fig N° 6.7 para cada condición de carga.

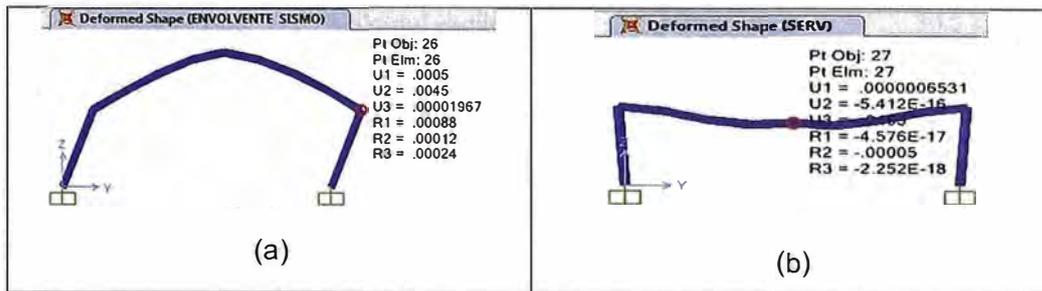


Figura N°6. 8. Desplazamientos obtenidos en SAP 2000, (a) Desplazamientos por Sismo, (b) Desplazamientos por cargas de servicio

Carga	Dirección	Máx. desplaz. Relativo entre piso (m)	Altura de entrepiso (m)	Deriva	Límite de Distorsión	
SISMO	X	0.0005	6.0	0.0004	0.02	Ok!
	Y	0.0045	6.0	0.005	0.02	Ok!
VIENTO	X	0.0107	6.0		H/200=0.03m	Ok!

Cuadro N°6. 4. Control de desplazamientos horizontales

Carga	Dirección	Máx. desplaz. vertical (m)	Luz (m)	Límite de distorsión (m)	
MUERTA + VIVA	Z	0.0465	20.00	L/300=0.067	Ok!

Cuadro N°6. 5. Control de desplazamientos Verticales

Con lo cual concluimos que la sección TB 500x200x4x3 cumple con todas las restricciones.

6.6 ANÁLISIS DE LAS COSTANERAS DE TECHO DE SECCIÓN Z.

6.6.1 Metrado y combinaciones de cargas.

(Longitud =6 m.)

METRADO DE CARGAS

(i) Carga muerta

Peso propio	5.00	kg/m ²
Peso Panel metálico	10	kg/m ²
Otros	5	kg/m ²
Total Carga Muerta	20	kg/m ²
Separación @	2	m
Carga distribuida W_D	40	kg/m

(ii) Carga viva

S/C	30	kg/m ²
Separación @	2	m
Carga distribuida W_L	60	kg/m

(iii) Carga de Viento

$$P_h = 0.005 \cdot C \cdot V^2$$

C = Factor de Forma

V = Velocidad del Viento

h = Altura sobre el terreno en m

Vh = Velocidad de diseño en la altura h

Compresión

-1

80 kph

10.0 m

80 kph

Succión

0.6

80 kph

10 m

80 kph

Ph = Presión de diseño del viento	-32.0 kg/m ²	19.2 kg/m ²
Separación @	2 m	
Carga distribuida W _w	-64.0 kg/m	38.4 kg/m

CALCULO DE FUERZAS ÚLTIMAS

(i) Combinaciones cargas (LRFD)

$W_1 = 1.2W_D + 1.6 W_L$	=	144.0 kg/m
$W_2 = 1.2W_D + 1.6 W_L + 0.8 W_w$	=	195.2 kg/m
$W_3 = 0.9W_D + 1.3 W_w$	=	119.2 kg/m
$W_4 = 1.2W_D + 1.6 W_L - 0.8 W_w$	=	105.6 kg/m
$W_5 = 0.9W_D - 1.3W_w$	=	-13.9 kg/m
$W_6 = 1.2W_D + 1.6S + 0.5W_L$	=	78.0 kg/m

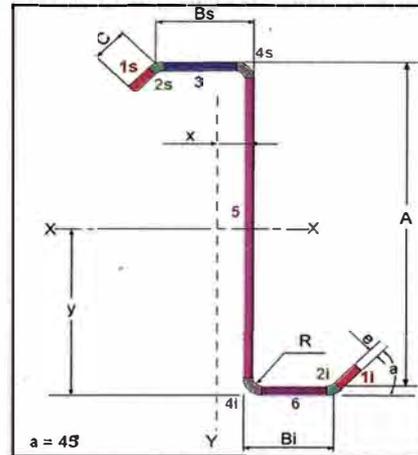
Controla

$\therefore M_u = wL^2 / 8 = 878.4 \text{ kg} - \text{m} \quad \wedge \quad V_u = wL / 2 = 585.6 \text{ kg}$

6.6.2 Cálculo de las capacidades nominales por corte y flexión.

1. Propiedades geométricas

Tipo de Perfil:	Z175x75x20x2.5
A=	175 mm
B _s =	75 mm
B _i =	70 mm
C=	20 mm
e=	2.5 mm
R=	3 mm
a=	45°
x _{cg} =	-0.253 cm
y _{cg} =	8.999 cm
Area=	8.785 cm ²
I _x =	437.922 cm ⁴
I _y =	117.494 cm ⁴
r _x =	7.060 cm
r _y =	3.657 cm
S _x =	48.661 cm ³
S _y =	13.181 cm ³



2. Cálculo del Momento Nominal

2.1 Cálculo del Momento Nominal por pandeo flexional local

$F_y =$	2530	kg/cm ²	
$E =$	2040000	kg/cm ²	
$G =$	784600	kg/cm ²	
$M_u =$	878.4	kg-m	
$L =$	6	m	
$Fact = M_u / S_x =$	1805.151	kg/cm ²	
-Ala superior 3 (Compresión)			
$w =$	67.22	mm	
$w/t =$	26.89	< 60	Ok!
$S = 1.28 \sqrt{E/f} =$	43.03	Ec.3.28	
$0.328S =$	14.11	Caso $w/t > 0.328S$	
$I_s =$	579.77	mm ⁴	Ec.3.31
$I_a =$	407.86	mm ⁴	Ec.3.29
$R_I =$	1.00		Ec.3.30
$D =$	20.00	mm	

Cuadro de resumen de secciones efectivas del perfil Z					
Elemento	Area Efect.(mm ²)	y(mm)	Ay(mm ³)	Ay ² (mm ⁴)	Ixx(mm ⁴)
1s	44.3	168.7	7475.9	1261486.1	579.8
2s	8.3	175.8	1467.2	257980.4	1.2
3	168.1	176.3	29619.6	5220457.5	0.0
4s	16.7	174.7	2915.8	509404.3	28.6
5	416.3	88.8	36942.2	3278619.1	961615.5
4i	16.7	2.8	46.6	130.3	28.6
6	155.6	1.3	194.4	243.1	0.0
2i	8.3	1.7	14.0	23.4	1.2
1i	44.3	8.8	388.1	3400.1	579.8
Suma	878.5		79063.9	10531744.3	962834.5

$$y_{cg} = 89.99 \text{ mm} \quad y_{cg}' = A + e - y_{cg} = 87.51 \text{ mm}$$

$$I_X = \sum I_{xx} + \sum A y^2 - y_{cg}^2 \sum A = 437.92 \text{ cm}^4$$

$$S_{xe} = 48.66 \text{ cm}^3$$

n=	0.43		Ec.3.32
k=	3.76		Cuadro 3.2
l=	0.43	$\lambda > 0.673$	Ec 3.5
r=	1.00		Ec 3.4
b=	67.22	mm	
b1=	33.61	mm	Ec.3.25
b2=	33.61	mm	Ec.3.26
be=b1+b2=	67.22	mm	Ala reducida

-Rigidizador de borde

f1=	1753.69	kg/cm2	Fig 3.16.a
f2=	1495.18	kg/cm2	Fig 3.16.a
y= f2/f1 =	0.85		
k=	0.48		Ec.3.12
ds=	17.72	mm	
ds/t=	7.09		
l=	0.31	$\lambda < 0.673$	Ec 3.5
r=	0.95		Ec 3.4
ds'=	17.72	mm	Ala 100% efectiva Ok!
ds=	17.72	mm	

-Revisión de la efectividad del alma

h=	166.50	mm	
h/t=	66.60		
d1=ycg'-(r+eo/2)=	82.01	mm	
d2=d1-h=	-84.49	mm	
f1=Fy*(d1/ycg)=	1691.69	kg/cm2	Compresión
f2=Fy*(d2/ycg)=	-1743.06	kg/cm2	Tracción
Cálculo del peralte efectivo			
$\psi= f2/f1 =$	1.03		
k=	24.80		Ec.3.6
l=	0.41		Ec 3.5
r=	1.00		Ec 3.4
be=	166.50	mm	$\lambda < 0.673$
ho/bo=(A+e)/bs=	2.37	ho/bo<4	
b1=	41.31	mm	Ec.3.7
b2=	83.25	mm	Ec.3.8
bc (comprimida)=	82.01	mm	
b1+b2=	124.56	mm	Alma 100% efectiva b1+b2>bc
h=	166.50	mm	
Sxe=	48.66	cm3	
Mn=Sxe.Fy=	1231.1	kg-m	Ec.3.49

2.2. Cálculo del Momento Nominal por pandeo lateral-torsional

			Sección arriostrada cada	L/3
Cb=	1	d= 17.75 cm		
Sf=Sx=	48.66 cm ⁴	I _{yc} =I _y /2= 58.75 cm ⁴	Ly=	200 cm
Fe=	5393.19 kg/cm ²	Eq. 3.56	KyLy=	200 cm
0.56Fy=	1416.80 kg/cm ²			
2.78Fy=	7033.40 kg/cm ²			
Caso:	0.56Fy < Fe < 2.78Fy			
Fc=	2444.8 kg/cm ²	Ec.3.54		
Sxe=	47.95 cm ³	Calcular la sección efectiva para un esfuerzo Fc como se hizo en el paso 2.1		
Mn=	1172.37 kg-m	Ec.3.52		

2.3. Cálculo del Momento Nominal por pandeo distorsional

Datos:

h _o =	177.5 mm	I _{xyf} =	12440.73 mm ⁴
A _f =	237.5 mm ²	C _{wf} =	0.00
J _f =	494.79 mm ⁴	x _{of} =	28.12 mm
I _{xf} =	2904.67 mm ⁴	h _{xf} =	-46.88 mm
I _{yf} =	167141.6 mm ⁴	h _{yf} =y _{of} =	-1.49 mm

Reemplazando tenemos

L _{cr} =	460.49 mm	Ec.3.63	
L _m	2000 mm		
L=min(L _{cr} ,L _m)=	460.49 mm		
M ₁ =	0 kg-m	M ₂ =	878.40 kg-m
β=	1.14	Ec.3.62	
f ₁ =f ₂ →	x _{web} =	2.00	
K _{φfe} =	672.56 (mm-kg)/mm	Ec.3.64	
K _{φwe} =	571.18 (mm-kg)/mm	Ec.3.65	
K _φ =	0.00	Ec.3.66	
Ķ _{φfg} =	32.76 (mm-kg)/kg	Ec.3.67	
Ķ _{φwg} =	1.84 (mm-kg)/kg	Ec.3.68	
F _d =	4108.87 kg/cm ²	Ec.3.61	
M _{crd} =S _f .F _d =	1999.41 kg-m	Ec.3.60	
M _y =S _x .F _y =	1231.12 kg-m		
I _d =√(M _y /M _{crd})=	0.78	Ec.3.59	
Caso:	λ _d > 0.673 kg/cm ²		
M _n =	1129.05 kg-m	Ec.3.58	

El Momento nominal de diseño será el menor calor de los 3 casos analizados

M_n = 1129.05 kg-m

φM_n = 1016.15 kg-m > Mu=878.4kg-m	Ok!
--	------------

3. Cálculo del Cortante Nominal

E=	2040000 kg/cm ²	
k _v =	5.34	
F _y =	2530 kg/cm ²	
t	2.50 mm	
$\sqrt{E k_v / F_y}$ =	65.62	
1.51 $\sqrt{E k_v / F_y}$ =	99.08	
h=	166.50 mm	
h/t	66.60	
$\sqrt{E k_v / F_y} < h/t < 1.51 \sqrt{E k_v / F_y}$		
F _v =	1495.63 kg/cm ²	Ec.3.71
A _w =	4.16 cm ²	
V _n =A _w .F _v =	6225.54 kg	Ec.3.69
$\phi V_n = 5603 \text{ kg} > V_u = 585.6 \text{ kg}$ Ok!		

6.6.3 control de deformaciones verticales por cargas de servicio.

$$q = 5wL^4 / 384EI = 1.9 \text{ cm} < 600/250 = 2.4 \text{ cm} \quad \text{Cumple} \quad (\text{Flecha por carga servicio } L/250)$$

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

1. Las propiedades mecánicas de los perfiles conformados en frío varían con respecto a los perfiles laminados en caliente, por lo cual deben regirse bajo sus propias condiciones de diseño indicadas en el reglamento AISI Edición 2007.
2. Debido a que los perfiles conformados en frío son de espesores muy delgados una de las principales formas de falla es por pandeo local, ya sea por esfuerzos de compresión, flexión y cortante.
3. El incremento significativo de resistencia de los perfiles conformados en frío radica principalmente en la colocación de rigidizadores intermedios en elementos esbeltos lo cual hace que disminuya la longitud de ancho plano de los elementos y conlleva a un incremento significativo de la resistencia.
4. Otro factor que también interviene en el incremento de resistencia de los perfiles conformados en frío es el proceso de formado, que incrementa los esfuerzos de fluencia y esfuerzos últimos del material, principalmente en las zonas curvas como las esquinas y en los rigidizadores intermedios.
5. Para el caso de perfiles sección abierta como los perfiles Z que hemos analizado, es importante verificar la longitud de arriostramiento lateral, ya que una mala disposición puede llevar a una falla a esfuerzos muy bajos debido a pandeo flexotorsionales o pandeo distorsional.
6. En el caso de las secciones tubulares, se vio que una sección tubular posee una gran resistencia torsional, pero siempre es necesario verificar que la longitud de arriostramiento lateral no sobrepase los valores de L_u (longitud crítica de arriostramiento lateral, [Ver Ec. 3.50]), para asegurar que el modo de falla sea primero por flexión antes que por pandeo torsional.
7. Es importante que los ingenieros proyectistas estén más relacionados con el diseño de este tipo de perfiles bajo la normativa AISI Edición 2007, ya que se puede lograr estructuras mucho más livianas que soporten grandes demandas de esfuerzos y aun menor costo. También se debe tener en cuenta que una estructura más liviana conlleva a menores costos de traslado y montaje.

7.2 RECOMENDACIONES.

1. Para poder calcular la capacidad nominal por flexión de la sección tubular nos hemos basado en el procedimiento I indicado en la Sección 5.2.1, el cual se basa en que la capacidad máxima del perfil se da cuando la fibra extrema sometida a compresión empieza a fluir, pero el procedimiento II aprovecha la capacidad post pandeo, lo cual puede llevar a incrementos significativos en la capacidad del perfil.
2. Es necesario que la Norma Peruana de acero la E.090, implemente una sección para el diseño de este tipo de perfiles como otros reglamentos a nivel de Sudamérica lo han venido haciendo.
3. También es recomendable profundizar en lo referente a las conexiones o uniones de este tipo de perfiles, ya que su diseño también varía con respecto a los perfiles laminados en caliente.

BIBLIOGRAFIA

- American Iron and Steel Institute. "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members". Washington. Edición 1996. Junio 1997
- American Iron and Steel Institute. "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members". Washington. Edición 2001. Febrero 2001.
- American Iron and Steel Institute. "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members". Washington. Edición 2007. Octubre 2007.
- American Iron and Steel Institute. "Supplement No 2 to the North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Edición 2007". Washington. Febrero 2010.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. "Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma E.020 Cargas". Perú. 2006.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. "Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma E.030 Diseño Sismorresistente". Perú. 2006.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. "Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma E.090 Estructuras Metálicas". Perú. 2006.
- Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. "CIRSOC 303 - Reglamento Argentino de Elementos Estructurales de Acero de Sección Abierta Conformados en Frío", Buenos Aires – Argentina. Julio 2009
- Tupemesa. "Manual de diseño Tubest". Primera Edición. Lima-Perú. 2011.

ANEXO A

CALCULO DE PROPIEDADES GEOMETRICAS DE PERFILES

A continuación se presentan las ecuaciones de propiedades geométricas de perfiles laminados en frío típicos derivadas a partir del Método Lineal. Dichas ecuaciones fueron tomadas del Manual del Diseño del AISI 1996, salvo ciertas modificaciones que se realizaron a algunas de las ecuaciones con el propósito de simplificar sus expresiones.

A1 Método Lineal para Calcular las Propiedades Geométricas

El cálculo de las propiedades geométricas de perfiles puede ser simplificado mediante el uso del método lineal. Dicho método considera que el material del perfil se concentra a través de la línea central de la lámina de acero, por lo que los elementos "área" que constituyen al perfil son reemplazados por elementos "línea" curvos y/o rectos. La dimensión de espesor, t , se introduce ya que se hayan determinado las propiedades geométricas de los elementos lineales.

Por ejemplo, el área total del perfil se obtiene de la ecuación: $A = L \times t$, donde L es la suma de longitudes de todos los elementos línea constitutivos del perfil. Así mismo, el momento de inercia del perfil, I , se obtiene de la ecuación: $I = I' \times t$, donde I' es el momento de inercia de los elementos línea. Es importante aclarar que el módulo de sección se obtiene de dividir a I o a $I' \times t$ entre la distancia existente del eje neutro a la fibra extrema y no a la línea central del elemento extremo.

Las dimensiones en primera potencia, como x , y y r (radio de giro) se obtienen de manera exacta por el método lineal, ya que la dimensión t no está involucrada en los cálculos de dichas dimensiones. Cuando las especificaciones del AISI requieran reducir el ancho plano, w , para obtener el ancho efectivo de diseño, b , el valor de b debe usarse para obtener las propiedades geométricas efectivas de los elementos lineales.

Los dos tipos de elementos constitutivos en que se puede subdividir un perfil para el uso del método lineal son las líneas rectas y los arcos circulares. Las Figs. A.1 a la A.6 muestran dichos elementos y las ecuaciones para calcular las propiedades geométricas relevantes se incluyen en el Art. A2.

Las ecuaciones de propiedades geométricas para elementos lineales son exactas, ya que las líneas no tienen una dimensión de espesor; sin embargo, cuando se usan para calcular las propiedades del perfil real, que si tiene la dimensión de espesor, los resultados serán solo aproximaciones debido a las siguientes razones:

1. El momento de inercia con respecto al eje longitudinal de los elementos rectos del perfil se considera despreciable. El error es pequeño ya que dicho momento de inercia es directamente proporcional a t^3 y los valores de t típicamente considerados en perfiles laminados en frío son pequeños.
2. El momento de inercia de un elemento recto inclinado con respecto a los ejes de referencia es ligeramente mayor que el del elemento lineal correspondiente, pero para elementos de longitudes similares, el error introducido es aun menor al error involucrado en despreciar el momento de inercia del elemento con respecto a su eje longitudinal.
3. Se introducen pequeños errores al considerar las propiedades de un arco lineal para modelar las propiedades de las esquinas reales del perfil; sin embargo, debido a que los radios de curvatura de las esquinas son usualmente pequeños, el error en la determinación de la ubicación del centroide de la esquina es de poca importancia y su momento de inercia es en general despreciable. Cuando el radio de curvatura de un elemento circular es mayor que cuatro veces su espesor, como sucede en perfiles tubulares cilíndricos y en láminas con

curvaturas circulares, los errores introducidos al usar las propiedades de arcos lineales prácticamente desaparecen.

A2 Propiedades Geométricas de Elementos Lineales

A2.1 Elementos Lineales Rectos

Los momentos de inercia del elemento recto representado en la Fig. A.1 pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$I_1 = \frac{l^3}{12} \quad (\text{A.1})$$

$$I_2 = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$I_3 = la^2 + \frac{l^3}{12} = l \left(a^2 + \frac{l^2}{12} \right) \quad (\text{A.3})$$

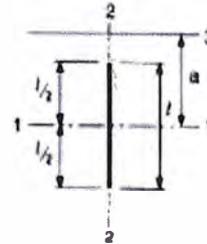


Fig A.1 Elemento lineal vertical⁽⁴⁾

Los momentos de inercia del elemento recto representado en la Fig. A.2 pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$I_1 = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$I_2 = \frac{l^3}{12} \quad (\text{A.5})$$

$$I_3 = la^2 \quad (\text{A.6})$$

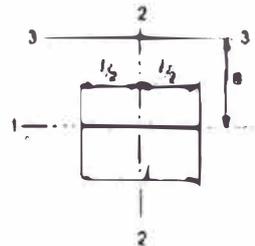


Fig A.2 Elemento lineal horizontal⁽⁴⁾

Los momentos de inercia del elemento recto representado en la Fig. A.3 pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$I_1 = \left[\frac{\cos^2 \theta}{12} \right] l^3 = \frac{l}{12} n^2 \quad (\text{A.7})$$

$$I_2 = \left[\frac{\sin^2 \theta}{12} \right] l^3 = \frac{l}{12} m^2 \quad (\text{A.8})$$

$$I_{12} = \left[\frac{\sin \theta \cos \theta}{12} \right] l^3 = \frac{l}{12} mn \quad (\text{A.9})$$

$$I_3 = la^2 + \frac{l}{12} n^2 = l \left[a^2 + \frac{n^2}{12} \right] \quad (\text{A.10})$$

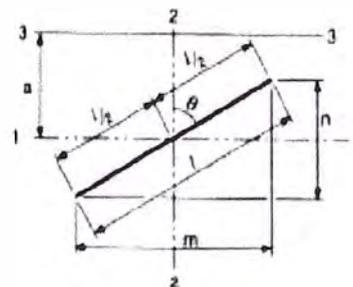


Fig. A.3 Elemento lineal inclinado⁽⁴⁾

A2.2 Elementos Lineales Circulares

Los momentos de inercia del elemento lineal circular mostrado en la Fig. A.4 con respecto a los ejes 1 y 2 pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$I_1 = \left[\frac{\theta_2 - \theta_1 + \text{sen}\theta_2 \cos\theta_2 - \text{sen}\theta_1 \cos\theta_1}{2} - \frac{(\text{sen}\theta_2 - \text{sen}\theta_1)^2}{\theta_2 - \theta_1} \right] r^3 \quad (\text{A.11})$$

$$I_2 = \left[\frac{\theta_2 - \theta_1 - \text{sen}\theta_2 \cos\theta_2 + \text{sen}\theta_1 \cos\theta_1}{2} - \frac{(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)^2}{\theta_2 - \theta_1} \right] r^3 \quad (\text{A.12})$$

El producto de inercia con respecto a los ejes 1 y 2, los momentos de inercia y producto de inercia con respecto a los ejes 3 y 4, así como los momentos de inercia con respecto a los ejes 3 y 4 para el elemento lineal circular mostrado en la Fig. A.4 se dan a continuación:

$$I_{12} = \left[\frac{\text{sen}^2\theta_2 - \text{sen}^2\theta_1}{2} + \frac{(\text{sen}\theta_2 - \text{sen}\theta_1)(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \right] r^3 \quad (\text{A.13})$$

$$I_3 = \left[\frac{\theta_2 - \theta_1 + \text{sen}\theta_2 \cos\theta_2 - \text{sen}\theta_1 \cos\theta_1}{2} \right] r^3 \quad (\text{A.14})$$

$$I_4 = \left[\frac{\theta_2 - \theta_1 - \text{sen}\theta_2 \cos\theta_2 + \text{sen}\theta_1 \cos\theta_1}{2} \right] r^3 \quad (\text{A.15})$$

$$I_{34} = \left[\frac{\text{sen}^2\theta_2 - \text{sen}^2\theta_1}{2} \right] r^3 \quad (\text{A.16})$$

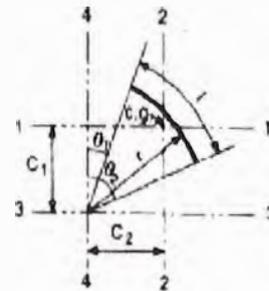


Fig. A.4 Elemento Circular Genérico⁽⁴⁾

donde θ = ángulo interior (en radianes) de los radios en los extremos del elemento circular

= $\pi\theta/180 = 0.01745\theta$, si θ está expresado en grados (ver Fig. A.4).

R = distancia radial del centro de curvatura al paño interior de la esquina circular.

r = distancia radial del centro de curvatura al centro de línea del elemento circular.

= $R + t/2$

Los valores de l , C_1 y C_2 mostrados en la Fig. A.4 están dados por las siguientes expresiones:

$$l = (\theta_2 - \theta_1)r \quad (\text{A.17})$$

$$C_1 = \frac{(\text{sen}\theta_2 - \text{sen}\theta_1)r}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{A.18})$$

$$C_2 = \frac{(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)r}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{A.19})$$

Las ecuaciones de propiedades geométricas de elementos circulares pueden simplificarse significativamente si se consideran los siguientes casos:

Caso I: $\theta_1 = 0; \theta_2 = 90^\circ$ (Ver Fig. A.5)

$$l = \pi r / 2 = 1.57r$$

$$C = 0.637r$$

$$I_1 = I_2 = 0.149r^3; I_{12} = -0.137r^3$$

$$I_3 = I_4 = 0.785r^3; I_{34} = 0.50r^3$$

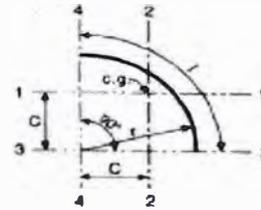


Fig. A.5 Elemento Circular de 90° ¹⁴⁾

Caso II; $\theta_1 = 0; \theta_2 = \theta$ (Ver Fig. A.6)

$$l = \theta r$$

$$C_1 = \frac{r \operatorname{sen} \theta}{\theta}; C_2 = \frac{r(1 - \cos \theta)}{\theta}$$

$$I_1 = \left[\frac{\theta + \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{2} - \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{\theta} \right] r^3 \quad (\text{A.20})$$

$$I_2 = \left[\frac{\theta - \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{2} - \frac{(1 - \cos \theta)^2}{\theta} \right] r^3 \quad (\text{A.21})$$

$$I_{12} = \left[\frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{2} + \frac{\operatorname{sen} \theta (\cos \theta - 1)}{\theta} \right] r^3$$

$$I_3 = \left[\frac{\theta + \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{2} \right] r^3; I_4 = \left[\frac{\theta - \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{2} \right] r^3; I_{34} = \left[\frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{2} \right] r^3$$

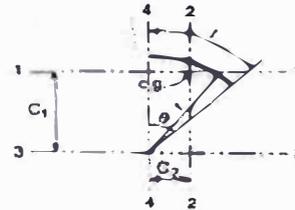
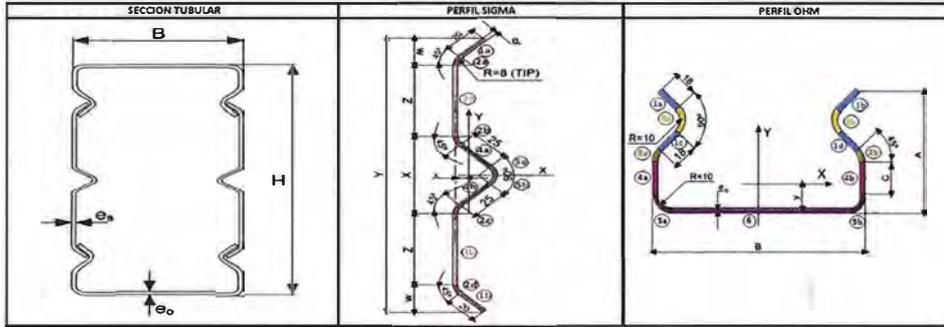


Fig A.6 Elemento Circular de θ°

ANEXO B

CÁLCULO DE LA SECCIÓN EFECTIVA DEL PERFIL TUBEST

Tipo de Perfil: TB500x200x4x3



1. Perfil Sigma

H ₀	500	mm
w ₀	3	mm
Z ₀	132	mm
w ₁	22	mm
Y ₀	370	mm
R	8	mm
X	62	mm

1.1 Cálculo de las propiedades geométricas del perfil Sigma (Según Anexo 1)

Elemento 1	
Area ₁	20.000 mm ²
I _{x1}	333.333 mm ³
I _{y1}	333.333 mm ³
m ₁	14.142 mm
n ₁	14.142 mm

θ ₁	45°	0.785
θ ₂	90°	1.571
r ₁	9.500	mm
Area ₂	7.461	mm ²
I _{x2}	28.698	mm ³
I _{y2}	5.212	mm ³
C _{1x}	3.543	mm
C _{2x}	8.553	mm

Elemento 3		
Area ₃	132.000	mm ²
I _{x3}	191664.000	mm ³
I _{y3}	0.000	mm ³

Area ₄	25.000	mm ²
I _{x4}	651.042	mm ³
I _{y4}	651.042	mm ³
m ₄	17.678	mm
n ₄	17.678	mm

θ ₁	45°	0.785
θ ₂	90°	1.571
r ₁	9.500	mm
Area ₂	7.461	mm ²
I _{x2}	28.698	mm ³
I _{y2}	5.212	mm ³
C _{1x}	3.543	mm
C _{2x}	8.553	mm

1.2 Cuadro de resumen de todos los elementos del perfil Sigma

Elemento	Area [mm ²]	x [mm]	y [mm]	Y [mm]	I _x [mm ³]	I _y [mm ³]	A _x [mm ²]	AK ² [mm ³]	AY ² [mm ³]
1a	20.000	9.854	6.503	177.929	333.333	333.333	197.071	845.723	633174.098
1b	20.000	9.854	6.503	-177.929	333.333	333.333	197.071	845.723	633174.098
2a	7.461	0.947	-2.404	166.543	28.698	5.212	7.066	43.112	206949.822
2b	7.461	0.947	-2.404	-27.457	28.698	5.212	7.066	43.112	5625.057
2c	7.461	0.947	-2.404	-27.457	28.698	5.212	7.066	43.112	5625.057
2d	7.461	0.947	-2.404	-166.543	28.698	5.212	7.066	43.112	206949.822
3a	132.000	0.000	-3.351	97.000	191664.000	0.000	0.000	1482.033	1241988.000
3b	132.000	0.000	-3.351	-97.000	191664.000	0.000	0.000	1482.033	1241988.000
4a	25.000	11.621	8.271	15.556	651.042	651.042	290.533	1710.049	6050.000
4b	25.000	11.621	8.271	-15.556	651.042	651.042	290.533	1710.049	6050.000
5a	7.461	22.296	18.945	0.000	28.698	5.212	166.354	2677.916	0.000
5b	7.461	22.296	18.945	0.000	28.698	5.212	166.354	2677.916	0.000
Suma	398.768				385468.940	2000.023	1336.180	13603.932	4187578.934

I _{xg}	0.335	cm
I _{yg}	0.000	cm
Area _c	11.963	cm ²
I _{x_c}	1371.913	cm ⁴
I _{y_c}	4.681	cm ⁴

2. Perfil Ohm

w ₀	4	mm
A ₀	89	mm
B ₀	200	mm
C ₀	14.1	mm
R ₀	10	mm

2.1 Cálculo de las propiedades geométricas del perfil Ohm (Según Anexo 1)

Elemento 1		
Area ₁	18	mm ²
I _{x1}	243	mm ³
I _{y1}	243	mm ³
m ₁	12.72792206	mm
n ₁	12.72792206	mm

Elemento 2		
θ ₁	45°	0.785398163
θ ₂	90°	1.570796327
r ₁	12	mm
Area ₂	9.424777961	mm ²
I _{x2}	493.1680164	mm ³
I _{y2}	21.01009305	mm ³
C _{1x}	4.475078743	mm
C _{2x}	10.80379579	mm

Elemento 3		
θ ₁	45°	0.785398163
θ ₂	90°	1.570796327
r ₁	12	mm
Area ₂	9.424777961	mm ²
I _{x2}	57.84030186	mm ³
I _{y2}	10.50504652	mm ³
C _{1x}	4.475078743	mm
C _{2x}	10.80379579	mm

Elemento 4	
Area=	24.1 mm
Ix=	1164.763744 mm ³
Iy=	0 mm ³

Elemento 5	
h1=	0'
h2=	90'
I=	1.570796327
I=	12 mm
Area=	18.84955592 mm
Ix=	257.0890597 mm ³
Iy=	257.0890597 mm ³
C1=	7.639437268 mm
C2=	7.639437268 mm

Area=	172.0 mm
Ix=	917.3333333 mm ³
Iy=	424037.3333 mm ³

2.2 Cuadro de resumen de todos los elementos del perfil Ohm

Elemento	Area(mm)	X'(mm)	Y'(mm)	Ix(mm ³)	Iy(mm ³)	Ay'(mm ²)	AX'^2(mm ³)	AY'^2(mm ³)
1a	18.000	-88.121	80.636	56.559	243.000	243.000	1451.449	139776.608
1b	18.000	88.121	80.636	56.559	243.000	243.000	1451.449	139776.608
1c	18.000	-88.121	50.938	26.860	243.000	243.000	916.876	139776.608
1d	18.000	88.121	50.938	26.860	243.000	243.000	916.876	139776.608
2a	18.850	-79.439	65.787	41.709	493.168	21.010	1240.052	118950.690
2b	18.850	79.439	65.787	41.709	493.168	21.010	1240.052	118950.690
3a	9.425	-96.804	40.563	16.486	57.840	10.505	382.301	88319.358
3b	9.425	96.804	40.563	16.486	57.840	10.505	382.301	88319.358
4a	24.088	-98.000	24.044	-0.033	1164.764	0.000	579.183	231344.146
4b	24.088	98.000	24.044	-0.033	1164.764	0.000	579.183	231344.146
5a	18.850	-93.639	-4.361	-19.717	257.089	257.089	82.195	165279.395
5b	18.850	93.639	-4.361	-19.717	257.089	257.089	82.195	165279.395
6	172.000	0.000	0.000	-14.077	0.000	424037.333	0.000	0.000
Suma	386.424				4917.722	423586.542	9304.111	1766693.607

Ixcg=	2.41	cm
A=	15.46	cm ²
Ixc=	132.45	cm ⁴
Iyc=	876.99	cm ⁴

3. Sección Cajón Tubest TB500x200x4x3

A=	54.84	cm ²
Ix=	18509.4	cm ⁴
Iy=	3929.5	cm ⁴
ix=	18.37	cm
iy=	8.46	cm
Ixc=	740.4	cm ³
Iyc=	392.9	cm ³
Jz=	8898.8	cm ⁴

4. Cálculo de la sección efectiva

Fy=	2530 kg/cm ²
E=	2040000 kg/cm ²
G=	784600 kg/cm ²

Ala superior 6s (Compresión)

k=	4	
w=	172 mm	
w/1=	43.000	
λ=	0.797	Ec 3.5
ρ=	0.909	Ec 3.4
b=	156.296 mm	λ>0.673

Revisión de la efectividad del alma

1) Elemento 3b superior (Ohm)

h=C=	24.088 mm
d1=ycg-(f+eo)/2=	238.874 mm
d2=d1-C=	214.785 mm
f1=Fy*(d1/ycg)=	2389.930 kg/cm ²
f2=Fy*(d2/ycg)=	2148.927 kg/cm ²

Cálculo del peralte efectivo

ψ=f2/f1=	0.899
----------	-------

k=	4.204	Ec 3.6.1
b1=	11.466 mm	
b2=	12.622 mm	
b1+b2=	24.088 mm	Alma 100% efectiva

2) Elemento 3a Superior (Sigma)

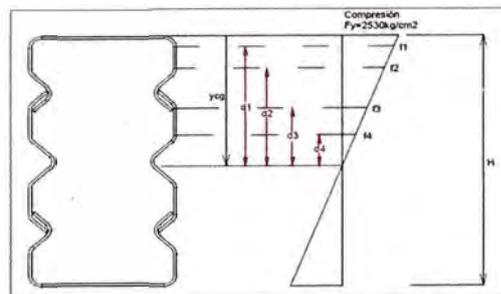
h=Z=	132.000 mm
d3=ycg-H/2+X/2+Z=	165.874 mm
d4=d1-Z=	33.874 mm
f3=Fy*(d3/ycg)=	1659.565 kg/cm ²
f4=Fy*(d4/ycg)=	338.905 kg/cm ²

Cálculo del peralte efectivo

ψ=f2/f1=	0.204	
k=	6.599	Ec 3.6.1
b1=	47.214 mm	
b2=	84.786 mm	
b1+b2=	132.000 mm	Alma 100% efectiva

Elemento	Area Efect.(mm ²)	y(mm)	Ay'(mm ³)	Ay2'(mm ⁴)	Ixc(mm ⁴)
5 Sigma					
2 Sigmas	2392.606	250.000	598151.543	149537885.743	27438257.368
Ohm					
5a3,5b3	150.796	6.361	959.150	6100.735	2056.712
5a1,5b1	150.796	493.639	74439.073	36746062.315	2056.712
6s(compre)	625.184	*2.000	1250.368	2500.736	0.000
6s(Tension)	688.000	498.000	342624.000	170626752.000	0.000
4a5,4b5	192.706	26.044	5018.878	130712.440	9318.110
4a1,4b1	192.706	473.956	91334.369	43288457.980	9318.110
3a5,3b5	75.398	42.563	3209.204	136594.605	462.722
3a1,3b1	75.398	457.437	34489.908	15776946.489	462.722
1c5,1d5	144.000	52.938	7623.008	403543.368	1944.000
1a5,1b5	144.000	82.636	11899.590	983334.951	1944.000
1c1,1d1	144.000	447.062	64376.992	28780535.589	1944.000
1a1,1b1	144.000	417.364	60100.410	25083745.339	1944.000
2a5,2b5	150.796	67.787	10222.008	692917.184	3945.344
2a1,2b1	150.796	432.213	65176.216	28170020.926	3945.344
Suma	5421.185		1370874.717	500366110.420	27477599.146

ycg=	252.87 mm
Ixc1+c+Iay' ² +Iycg' ² =	18118.57 cm ⁴
Ixc=	716.51 cm ⁴



ANEXO C

Tabla de capacidades nominales del manual de perfiles TUBEST de la empresa Tupemesa

PERFIL TUBEST 500x200											
CARGAS AXIALES NOMINALES										P_{xx}^F	P_{yy}^F
H altura	mm	500	500	500	500						
B ancho	mm	200	200	200	200						
eo espesor OHM	mm	3	4	5	6						
es espesor SIGMA	mm	3	3	3	3						
Peso	Kg/m	37.1	43.0	48.9	54.8						
Pmax	t	86.5	107	127	144						
Cargas	t	P_{xx}^F	P_{yy}^F								
LONGITUD KL (m)	1.00	86.5	86.3	107	107	127	126	144	143		
	1.50	86.4	85.8	107	106	127	125	143	142		
	2.00	86.3	85.1	107	105	126	124	143	140		
	2.50	86.1	84.3	107	104	126	122	143	138		
	3.00	85.8	83.2	106	103	126	121	142	136		
	3.50	85.5	82.1	106	101	125	118	142	134		
	4.00	85.2	80.7	106	99	125	116	141	131		
	4.50	84.8	79.2	105	97	124	113	141	127		
	5.00	84.4	77.5	105	95.1	123	110	140	124		
	5.50	83.9	75.7	104	92.7	123	107	139	120		
	6.00	83.4	73.7	103	90.1	122	103	138	116		
	6.50	82.8	71.7	103	87.4	121	100	137	112		
	7.00	82.2	69.5	102	84.3	120	95.8	136	107		
	7.50	81.6	67.2	101	80.9	119	91.8	135	102		
	8.00	80.9	64.8	101	77.6	118	87.8	134	98		
	8.50	80.2	62.4	100	74.1	117	83.7	133	93.0		
	9.00	79.5	59.9	99	70.6	116	79.5	132	88.2		
	9.50	78.7	57.3	98	67.0	115	75.3	130	83.3		
	10.00	77.9	54.7	97	63.4	114	71.1	129	78.5		
	10.50	77.0	52.0	96	59.9	112	66.9	127	73.7		
11.00	76.1	49.3	95	56.3	111	62.7	126	68.9			
11.50	75.2	46.6	93.7	52.8	110	58.5	124	64.1			
12.00	74.2	43.6	92.6	49.2	108	54.5	123	59.3			
12.50	73.2	40.9	91.4	45.7	107	50.3	121	54.6			
13.00	72.2	37.8	90.2	42.3	105	46.5	120	50.5			
13.50	71.2	35.1	88.9	39.2	104	43.1	118	46.8			
14.00	70.1	32.6	87.7	36.4	102	40.1	116	43.5			
14.50	69.0	30.4	86.3	34.0	100	37.3	114	40.6			
15.00	67.9	28.4	84.8	31.7	99	34.9	113	37.9			
15.50	66.8	26.6	83.3	29.7	97	32.7	111	35.5			
16.00	65.6	25.0	81.8	27.9	95.4	30.7	109	33.3			
16.50	64.4	23.5	80.3	26.2	93.7	28.8	107	-			
17.00	63.2	22.1	78.7	-	91.9	-	105	-			
17.50	62.0	-	77.1	-	90.2	-	103	-			
18.00	60.8	-	75.5	-	88.4	-	101	-			
18.50	59.6	-	73.9	-	86.6	-	99	-			
19.00	58.3	-	72.3	-	84.7	-	97	-			
19.50	57.0	-	70.7	-	82.9	-	95.0	-			
20.00	55.7	-	69.0	-	81.1	-	93.0	-			
PROPIEDADES											
A	cm ⁴	47.2	54.8	62.3	69.8						
I _x /100	cm ⁴	147	185	223	260						
I _y /100	cm ⁴	35.2	39.3	43.2	46.9						
i _x	cm	17.6	18.4	18.9	19.3						
i _y	cm	8.63	8.46	8.32	8.20						
S _x /100	cm ³	5.87	7.40	8.90	10.4						
S _y /100	cm ³	3.52	3.93	4.32	4.69						
V _n	t	28.8	29.9	30.7	31.3						
M _{na}	t-m	13.6	18.1	22.5	26.3						
L ₃₀₀	m	11.4	11.2	11.1	11.1						
M _{ny}	t-m	7.19	8.31	9.30	10.3						