

UNIVERSIDAD DE CUENCA



**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL**

ELABORACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE PERFILES EN FRÍO DE PRODUCCIÓN NACIONAL EN FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN

**MONOGRAFÍA PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN ANÁLISIS Y
DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE
ACERO Y HORMIGÓN ARMADO**

AUTOR:

ING. XAVIER POLIBIO ROMERO TORRES

DIRECTOR:

ING. Phd. Msc. ROBERTO GAMÓN TORRES

CUENCA - ECUADOR

JULIO - 2015

RESUMEN

En virtud de la gran importancia que tiene el acero estructural, como material de construcción en el Ecuador y debido a que por años se ha dispuesto de la especificación AISI, sin que hayan sido aplicadas por la mayoría de los proyectistas, se encuentra necesario respaldar el diseño de los miembros conformados en frío con una herramienta (software) que permita facilitar el diseño de los mismos a los profesionales involucrados en esta especialidad.

Sabiendo que existen dos grandes grupos de perfiles de acero estructural, siendo estos los laminados en caliente (AISC) y los conformados en frío (AISI), y debido al incremento del uso de los últimos, se propone el mencionado software para que agilice resolver la complejidad que presentan las formulaciones matemáticas para calcular la capacidad resistente de los perfiles.

El presente trabajo hace énfasis en los dos tipos de secciones más empleadas para el diseño a flexión y a compresión como son los perfiles de tipo G y C, se involucra todos los parámetros de diseño con el respectivo procedimiento y se permite evaluar el miembro en un reporte de curvas en las cuales se dispone de la longitud no soportada versus el esfuerzo nominal del elemento estructural analizado.

Palabras claves: AISI, LRFD, PANDEO, DISTORSIONAL, SUPERFICIE EFECTIVA, PANDEO LATERAL TORSIONAL, ABOLLADURA, INERCIA, FLEXIÓN, ESBELTEZ.

ABSTRACT

By virtue of the great importance that you have the structural steel, like building material in Ecuador and because for years AISI has gotten ready of the specification, without that they had been applied by the majority of the designers, he finds himself necessary to buttress the members' design conformed in cold with a tool (software) that it allows making easy the you laid plans of the same to the professionals involved in this specialty.

Knowing that exist two big groups of profiles of structural steel, being these plies instantly (AISC) and the shaped in cold (AISI), and due to the increment of the use of the last ones, he is offered the mentioned software in order that he speeds up to solve the complexity that the mathematical formulations to calculate the resistant capacity of the profiles present.

The present work stresses the two types of more used sections for the design to flexion and to compression as guy's profiles are G and C, gets involved all the designing parameters with the respective procedure and it is allowed to evaluate the limb in a report of curves which he gets ready in of the length not borne versus the nominal effort of the structural analyzed element.

Keywords: AISI, LRFD, WARPING, DISTORSIONAL, EFFECTIVE SURFACE, LATERAL WARPING TORSIONAL, DENT, INERTIA, FLEXION, SLENDERNESS.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| Terminología..... | 10 |
| Glosario de Términos y Abreviaturas..... | 12 |
| Introducción..... | 14 |
| Situación Problemática..... | 15 |
| Objetivo General..... | 16 |
| Objetivos Específicos..... | 16 |
| Método de Investigación..... | 17 |
| Identificación de las Tareas de Investigación..... | 17 |
| Alcance..... | 18 |
| Estado del Arte..... | 19 |
| Hipótesis..... | 26 |

CAPÍTULO I

RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EL AISI Y EL MÉTODO LRFD PARA DISEÑO DE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO EN LO REFERENTE A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN

| | |
|--|----|
| 1.1 Introducción..... | 27 |
| 1.2 Tipos de Aceros..... | 28 |
| 1.3 El Método Lineal para el Cálculo de Propiedades de una Sección..... | 31 |
| 1.4 Esfuerzos en Estructuras Tridimensionales..... | 32 |
| 1.5 Especificaciones y Códigos de construcción..... | 34 |
| 1.6 Definición de los Métodos de Diseño Elástico y Plástico..... | 35 |
| 1.7 Diseño con Factores de Carga y Resistencia (LRFD) | 36 |
| 1.8 Diseño con Esfuerzos Admisibles (ASD)..... | 37 |
| 1.9 Factores de Carga..... | 38 |
| 1.10 Factores de Resistencia..... | 39 |
| 1.11 Requisitos de Servicio y Mantenimientos..... | 40 |
| 1.12 Ventajas del Método LRFD..... | 41 |
| 1.13 Diseño de Miembros a Compresión..... | 42 |
| 1.13.1 Perfiles Usados para Columnas..... | 42 |
| 1.13.2 Desarrollo de las Fórmulas para Columnas..... | 44 |
| 1.13.3 La Fórmula de Euler..... | 46 |
| 1.13.4 Restricciones en los extremos y longitud efectiva de una columna..... | 48 |
| 1.13.5 Columnas largas cortas e intermedias..... | 49 |
| 1.13.6 Razones ancho – espesor..... | 52 |
| 1.13.7 Resistencia de Diseño a Compresión..... | 54 |
| 1.13.8 Fórmulas para Columnas (AISI)..... | 56 |
| 1.14 Diseño de Miembros a Flexión..... | 58 |
| 1.14.1 Flexión Elástica de Vigas de Acero..... | 59 |
| 1.14.2 Comportamiento Inelástico de Vigas de Acero..... | 61 |
| 1.14.3 Estabilidad..... | 63 |
| 1.14.4 Resistencia por Flexión de Perfiles Compactos..... | 63 |
| 1.14.5 Resistencia por Flexión de Perfiles no compactos Diseño por Flexión de Vigas..... | 66 |
| 1.14.6 Diseño por Flexión de Vigas..... | 67 |
| 1.14.7 Requisitos de Soporte Lateral..... | 72 |
| 1.14.8 Limitaciones a las Deflexiones de Vigas..... | 73 |
| 1.14.9 Flexión Biaxial de Vigas..... | 74 |
| 1.14.10 Resistencia por Cortante..... | 76 |

CAPÍTULO II

DISEÑO MANUAL A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN, APLICADO EL MÉTODO LRFD Y LAS NORMAS AISI PARA DISTINTOS TIPOS DE PERFILES QUE SE ENCUENTRAN EN CATALOGOS DE PRODUCCIÓN NACIONAL

| | |
|---|----|
| 2.1 Catálogos de Perfiles de Producción Nacional..... | 78 |
| 2.2 Calculo por el Método Lineal de Varios Perfiles..... | 80 |
| 2.3 Calculo con el Sap 2000 de Varios Perfiles..... | 89 |
| 2.4 Comprobación con el Cálculo y los Catálogos..... | 91 |
| 2.5 Diseño a Compresión de Varios Perfiles..... | 93 |
| 2.6 Diseño a Flexión y Comprobación a Corte de Varios perfiles..... | 99 |

CAPÍTULO III

ELABORACIÓN DEL SOFTWARE PARA EL DISEÑO A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN Y COMPROBACIÓN CON EL DISEÑO MANUAL

| | |
|---|-----|
| 3.1 Desarrollo de los Diagramas de Flujo..... | 105 |
| 3.2 Desarrollo del Software en Lenguaje Visual Basic 6.0..... | 108 |
| 3.3 Ejercicios de Aplicación..... | 112 |
| 3.4 Comprobación con el Diseño Manual y el Software DISAISI V.10.0..... | 117 |
| CONCLUSIONES..... | 118 |
| RECOMENDACIONES..... | 118 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 119 |

INDICE DE IMÁGENES

| | |
|--|----|
| Gráfico No. 1 El Puente Eads..... | 19 |
| Gráfico No. 2 Home Insurance Building..... | 20 |
| Gráfico No. 3 Puente en Acero de Chorlaví-Ecuador..... | 20 |
| Gráfico No. 4 Mercado de Santa Clara, Quito..... | 21 |
| Gráfico No. 5 Mercado del Sur (Guayaquil-Ecuador)..... | 21 |
| Gráfico No. 6 Vivienda Unifamiliar en el Sistema Steel Framing..... | 22 |
| Gráfico No. 7 Edificio UNASUR..... | 22 |
| Gráfico No. 8 Curva Esfuerzo- Deformación del acero..... | 29 |
| Gráfico No. 9 Curva Esfuerzo- Deformación de distintos aceros..... | 30 |
| Gráfico No. 10 Miembro estructural de sección tipo “C” – Método Lineal..... | 31 |
| Gráfico No. 11 Esfuerzos en un Elemento del Conjunto Estructural Tridimensional | 32 |
| Gráfico No. 12 <i>Tipos de Secciones Conformadas en Frío y Laminadas en caliente...</i> | 43 |
| Gráfico No. 13 <i>Tipos de Secciones Comerciales Conformadas en Frío.....</i> | 43 |
| Gráfico No. 14 <i>Columna Larga y Corta – Euler.....</i> | 46 |
| Gráfico No. 15 <i>Columna Articulada.....</i> | 47 |
| Gráfico No. 16 <i>Módulo Tangente para Esfuerzos Residuales.....</i> | 50 |
| Gráfico No. 17 <i>Curva para determinar Fcr.....</i> | 51 |
| Gráfico No. 18 <i>Deformación en un Segmento de Viga.....</i> | 59 |
| Gráfico No. 19 Curva Esfuerzo – Deformación en el Rango Plástico..... | 61 |
| Gráfico No. 20 <i>Distribución de Esfuerzos en una Sección.....</i> | 62 |
| Gráfico No. 21 Flexión Biaxial en Vigas..... | 74 |
| Gráfico No. 22 <i>Perfiles Comerciales Nacionales “ tipo G” – Propiedades Geométricas.....</i> | 78 |
| Gráfico No. 23 <i>Perfiles Comerciales Nacionales “ tipo C” – Propiedades Geométricas.....</i> | 79 |

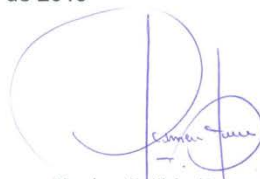


INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla No. 1 Tipos de Aceros y Propiedades..... | 30 |
| Tabla No. 2 Factores de Longitud Efectiva K, para Miembros Comprimidos con Carga Concéntrica..... | 49 |
| Tabla No. 3 Máxima Relación Admisible entre Ancho Efectivo de Cálculo y Ancho Real..... | 53 |

Xavier Polibio Romero Torres, autor/a de la tesis "**ELABORACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE PERFILES EN FRÍO DE PRODUCCIÓN NACIONAL EN FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN**", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de ESPECIALISTA EN ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO Y HORMIGÓN ARMADO. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a.

Cuenca, 15 de Julio de 2015



Xavier Polibio Romero Torres

C.I. 030152511-9

Xavier Polibio Romero Torres, autor/a de la tesis **"ELABORACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE PERFILES EN FRÍO DE PRODUCCIÓN NACIONAL EN FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 15 de Julio de 2015



Xavier Polibio Romero Torres

C.I. 030152511-9

AGRADECIMIENTO

Quiero dar las gracias a mis padres y a mi hija, quienes me apoyaron con su presencia y afecto, durante el tiempo dedicado a los estudios de postgrado, siendo estos un sueño anhelado de siempre por toda la familia y sabiendo que me serán útiles para mejorar como persona y profesional. Espero haberles cumplido, por lo cual este trabajo está dedicado para ellos.

De manera especial se agradece el esfuerzo y tiempo brindado de un gran maestro y amigo, el Doctor Roberto Gamón Torres, quien ha llegado el momento apropiado desde el hermano país de Cuba para brindarnos sin egoísmo y con la mayor explicites sus conocimientos científicos, a quien espero no haberle defraudado, habiendo cumplido a su satisfacción la investigación propuesta.

TERMINOLOGÍA

Miembros estructurales de acero conformado en frío. Los miembros estructurales de acero conformado en frío son perfiles que se fabrican plegando chapas metálicas, longitudes cortadas de bobinas o planchas o laminando bobinas o planchas laminadas en frío o laminadas en caliente; siendo ambas operaciones realizadas a temperatura ambiente, es decir, sin agregar calor del modo que sería necesario para un conformado en caliente.

Resistencia de cálculo. Resistencia factoreada, ϕR_n o resistencia admisible, R_n/Ω (fuerza, momento, según corresponda), proporcionada por el componente estructural.

Ancho efectivo de cálculo. Cuando por motivos de cálculo se reduce el ancho plano de un elemento, el ancho de cálculo reducido se denomina ancho efectivo o ancho de cálculo efectivo.

Relación entre el ancho plano de un miembro y su espesor. Ancho plano de un elemento medido sobre su plano, dividido por su espesor.

Pandeo local. Pandeo de elementos sólo dentro de una sección, en el cual las líneas de unión entre los elementos permanecen rectas y los ángulos entre los elementos no varían.

LRFD (Diseño por Factores de Carga y Resistencia). Método para dimensionar componentes estructurales (miembros, conectores, elementos de conexión y conjuntos ensamblados) de manera tal que cuando la estructura es sometida a todas las combinaciones de cargas que corresponda no se supera ninguno de los estados límites aplicables.

Resistencia nominal. Capacidad de una estructura o componente de resistir los efectos de las cargas. Se calcula utilizando las resistencias y dimensiones especificadas de los materiales y ecuaciones derivadas a partir de principios aceptados de la mecánica estructural, o bien mediante ensayos en obra o ensayos efectuados en laboratorio sobre modelos a escala, considerando los efectos del modelado y las diferencias entre las condiciones en obra y las condiciones de laboratorio.

Resistencia requerida. Efecto de las cargas (fuerza, momento, según corresponda) que actúa sobre un componente estructural. Se determina mediante un análisis estructural a partir de las cargas factoreadas en el caso de

LRFD o a partir de las cargas nominales en el caso de ASD (utilizando las combinaciones de cargas críticas más adecuadas).

Factor de resistencia. Factor que toma en cuenta las inevitables diferencias que existen entre la resistencia real y su valor nominal y los modos de falla y sus consecuencias.

Tensión. De acuerdo con el uso que se le da en esta Especificación (AISI), el término tensión significa fuerza por unidad de superficie.

Pandeo flexional torsional. El pandeo flexional torsional es un modo de pandeo en el cual los miembros comprimidos se pueden flexionar y torsionar simultáneamente sin que se modifique la forma de su sección transversal.

Límite de fluencia. De acuerdo con el uso que se le da en esta Especificación (AISI), el término límite de fluencia, F_y o F_{sy} significa límite de fluencia o resistencia de fluencia.

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

| Símbolo | Definición | Sección (AISI 1996) |
|---------------------------------|---|--|
| A | Superficie total no reducida de la sección transversal del miembro | C3.1.2, C4.4, C6.2, D4.1 |
| A _e | Superficie efectiva a la tracción F _n | B6.1, C4, C6.2, D4.1, D4 |
| b | Ancho de ala | C4.4, D3.2.1 |
| C _b | Coefficiente de flexión que depende del gradiente de momento | C3.1.2 |
| C _s | Coefficiente para pandeo lateral torsional | C3.1.2 |
| C _w | Constante de alabeo torsional de la sección transversal | C3.1.2 |
| C _θ , C ₁ | Coefficientes de abolladura del alma | C3.4 |
| C ₁ , C ₂ | Coefficientes de pandeo axial | C4.4 |
| d | Profundidad de una sección | B1.1, B4, C3.1.2, C3.1.3, C4.4, D1.1, D3.2.1, D3.2.2, D4, D4.1 |
| E | Módulo de elasticidad longitudinal del acero, 29.500 ksi(203.000 MPa) | C3.1.1, C3.1.2, C3.2, C3.4, C3.5.1, C3.5.2, C4.1, C4.4 |
| e _y | Alargamiento de rotura = F _y /E | C3.1.1 |
| F _e | Tracción de pandeo elástico | C4, C4.1, C4.2, C4.3 |
| F _n | Tracción nominal de pandeo | B2.1, C4, C5.2.1, C5.2.2, C6.2 |
| F _y | Límite de fluencia utilizado para el diseño | C3.1.1, C3.1.2, C3.1.3, C3.2, C3.4, C3.5.1, |
| G | Módulo de elasticidad transversal del acero, 11.300 ksi (78.000 MPa) | C3.1.2, D4.1 C3.5.2, C4 |
| h | Profundidad de una porción plana del alma medida a lo largo del plano del alma | B1.2, B6.2, C3.1.1, C3.2, C3.4, C3.5.1, C3.5.2 |
| I _x , I _y | Momento de inercia de la totalidad de la sección respecto al eje principal | C3.1.2, C5.2.1, C5.2.2 |
| I _{yc} | Momento de inercia de la porción comprimida de una sección respecto al eje baricéntrico de la totalidad de la sección paralelo al alma, utilizando la sección total no reducida | C3.1.2 |
| J | Constante de torsión de St. Venant | C3.1.2 |
| j | Propiedad de la sección para pandeo flexional-torsional | C3.1.2 |
| K | Factor de longitud efectiva | C4, C4.1, D4.1 |
| K _t | Factor de longitud efectiva para torsión | C3.1.2 |
| K _x | Factor de longitud efectiva para pandeo alrededor del eje x | C3.1.2, C5.2.1, C5.2.2 |
| K _y | Factor de longitud efectiva para pandeo alrededor del eje y | C3.1.2, C5.2.1, C5.2.2 |
| k | 894F _y /E | C3.4 |
| k _v | Coefficiente de pandeo por corte | B6.2, C3.2 |
| L | Longitud no arriostrada de un miembro | C3.1.2, C4, C4.1 |
| L _t | Longitud no arriostrada de un miembro comprimido Para torsión | C3.1.2 |



| | | |
|--------------------------|--|--|
| L_x | Longitud no arriostrada de un miembro comprimido Para flexión alrededor del eje x | C3.1.2 |
| L_y | Longitud no arriostrada de un miembro comprimido para flexión alrededor del eje y | C3.1.2 |
| M_{max}, M_A, M_B, M_C | Valor absoluto de los momentos en un segmento no arriostrado, utilizados para determinar C_b | C3.1.2 |
| M_c | Momento crítico | B2.1, C3.1.2 |
| M_e | Momento crítico elástico | C3.1.2 |
| M_n | Resistencia nominal a la flexión | C3.1, C3.1.1, C3.1.2, C3.1.3, C3.3.2, C6.1 |
| M_{nxo}, M_{nyo} | Resistencias nominales a la flexión respecto a los ejes baricéntricos determinadas de acuerdo con la Sección C3.1 excluyendo los requisitos de la Sección C3.1.2 | C3.3.2, C3.5.2 |
| M_u | Resistencia a la flexión requerida, para LRFD | C3.3.2, C3.5.2 |
| M_{ux}, M_{uy} | Resistencia a la flexión requerida respecto a los ejes baricéntricos, para LRFD | C4, C5.1.2, C5.2.2 |
| P_n | Resistencia nominal a la abolladura del alma de un miembro | C3.4, C3.5.1, C3.5.2 |
| P_u | Resistencia requerida para la carga concentrada o Reacción en presencia de momento flector, para LRFD | C3.5.2 |
| R | Factor de reducción | C3.1.3 |
| R | Radio interno de plegado | C3.4, C3.5.1, C3.5.2 |
| r | Radio de giro de la sección transversal total, no reducida | C4, C4.1 |
| S_e | Módulo resistente elástico de la sección efectiva calculado con la fibra extrema comprimida o traccionada a F_y | C3.1.1, C3.1.3 |
| t | Espesor del acero base de cualquier elemento o sección | C3.1.1, C3.2, C3.4, C3.5.1, C3.5.2, C4.4 |
| V_n | Resistencia al corte nominal | C3.2, C3.3.2 |
| V_u | Resistencia al corte requerida, para LRFD | C3.3.2 |
| β | Coficiente | C4.2 |
| λ, λ_c | Factores de esbeltez | C3.5.1, C3.5.2, C4 |
| λ_1, λ_2 | Parámetros utilizados para determinar el factor de deformación por compresión | C3.1.1 |
| μ | Coficiente de Poisson del acero = 0,30 | C3.2 |
| σ_{ex} | $(\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2$ | C3.1.2, C4.2 |
| σ_{ey} | $(\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2$ | C3.1.2 |
| ϕ_b | Factor de resistencia para resistencia a la flexión | C3.1.1, C3.1.2, C3.1.3, C3.3.2, C3.5.2 |
| Ω_b | Factor de seguridad para la resistencia a flexión | C3.1.1, C3.1.2, C3.1.3 |
| Ω_c | Factor de seguridad para miembros con carga de compresión concéntrica | C4 |

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudia la especificación AISI, que presenta procedimientos bien definidos para el cálculo de miembros portantes de acero conformado en frío, se realiza un enfoque objetivo de los requisitos generales, luego se determina las limitaciones y consideraciones sobre las dimensiones, y por último se estudia y aplica el procedimiento recomendado por la especificación para la determinación de la capacidad resistente a flexión y a compresión de los miembros estructurales, con énfasis en los perfiles de producción nacional.

El propósito del trabajo investigativo es desarrollar un programa computacional para diseñar perfiles de acero conformados en frío, cumpliendo la especificación AISI, para lo cual previamente se estudia y aplica el método lineal para el cálculo de las propiedades geométricas del perfil.

Se espera contribuir con los profesionales especializados en esta rama de la ingeniería para que optimicen el uso de los perfiles de producción nacional en cada uno de sus proyectos.

SITUACIÓN PROBLÉMICA

Se determina la falta de un programa computacional que nos presente las curvas de capacidad resistente de un miembro estructural con secciones dobladas en frío, como es el caso de los perfiles de producción nacional de tipo C y G.

Los perfiles de producción nacional presentan valores pequeños de relación ancho plano – espesor por lo cual no se comportan como perfiles ligeros, lo cual se demostrara en la aplicación del software, ya que nos agiliza el cálculo y se puede hacer el respectivo análisis.

OBJETIVO GENERAL

Elaborar un Software (DISAISI) para el diseño de perfiles en frío de producción nacional en flexión y a compresión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la teoría y aprender la metodología matemática de diseño para perfiles conformados en frío.
- Analizar la situación actual de los programas de análisis y diseño usados en el medio.
- Identificar su influencia en los profesionales dedicados a las estructuras.
- Identificar los distintos perfiles que producen las fábricas del Ecuador.
- Analizar cuáles son los perfiles estructurales más usados en la construcción
- Analizar los tipos de obras que más utilizan la perfilería de producción nacional.
- Realizar varios cálculos manuales y comprobaciones con hojas de cálculo previamente diseñadas, de las propiedades geométricas de los perfiles que proveen en catálogos los productores nacionales a sus clientes.
- Diseñar varios módulos y formularios independientes, con el lenguaje de programación Basic utilizando el Visual Basic 6.0 para luego enlazar todos los módulos en un solo software, para presentar una interfaz al usuario fácil de ser aplicada y como herramienta de diseño para perfilería conformada en frío y como complemento para cualquier programa de análisis estructural existente en el mercado.

METODO DE INVESTIGACIÓN:

Nivel de Investigación: La investigación a efectuarse será informativa, comparativa y explicativa en la que se procederá al estudio del diseño a flexión y a compresión de perfilería conformada en frío por el método LRFD con las normas AISI (American Iron and Steel Institute o Instituto Americano del Hierro y el Acero)

Tipo de Investigación: La investigación que se emprende será de oficina y de campo y se procederá con la recolección de datos, directamente de documentos técnicos como libros, papers científicos, revistas, tesis, manuales, internet y todo lo referente al AISI, y se realizará la visita y entrevista con los técnicos de la fábrica de perfiles en nuestro país (TUGALT).

Métodos de Investigación: El método será el análisis, pues con ello se examinará la separación de las partes de un todo, para estudiarlas de una manera más detallada, con modelos matemáticos y formulaciones demostradas que determinen los esfuerzos resistentes de las distintas secciones, para ser comparados con los esfuerzos actuantes.

Con toda la información obtenida, se procederá a sacar conclusiones, basadas en los objetivos planteados al inicio de la investigación, para con ello elaborar el software de diseño.

IDENTIFICACIÓN DE LAS TAREAS DE INVESTIGACIÓN

1. Análisis y Revisión del AISI 1996, 2001 y 2007 en lo referente a los capítulos A3, A5, A6, A7, C3 y C4.
2. Estudio y Revisión del Método Lineal para el cálculo de las propiedades geométricas de una sección.
3. Recopilación de información de perfiles delgados y conformados en frío de producción nacional (tablas comerciales).
4. Ejemplos de cálculo por el método lineal y comprobación con las tablas de perfiles nacionales.
5. Cálculos en programas comerciales (SAP 2000, ETABS) de las propiedades de distintos perfiles.
6. Análisis del método de diseño LRFD según las especificaciones AISI a compresión y a flexión.

7. Ejercicios resueltos paso a paso de forma manual y en hojas de cálculo.
8. Desarrollo de diagramas de flujo y código en el lenguaje Visual Basic 6.0 para la elaboración de un software, que nos presente la posibilidad de diseñar a compresión y a flexión perfiles tipo C y G.
9. Análisis comparativo entre los resultados de los cálculos manuales y el software.

ALCANCE

El presente trabajo se enmarca en el diseño de perfiles tipo C y G, conformados en frío con secciones comerciales producidas en el Ecuador. El diseño se hace únicamente a compresión y/o a flexión, aplicando las especificaciones AISI. El estudio se inicia con la recopilación de tablas de las propiedades geométricas de perfilería comercial existente en nuestro país, luego se aplica el método lineal para el cálculo de propiedades de una sección C ó G.

Con las propiedades geométricas se sigue el procedimiento propuesto en las especificaciones AISI (American Iron and Steel Institute) para determinar la carga axial nominal o el momento flector nominal de dichas secciones abiertas. Como resultado del presente trabajo se desarrolla un software, para facilitar y automatizar el diseño de estos dos tipos de secciones, el mismo que permite realizar curvas de diseño, que presentan la longitud no soportada versus el esfuerzo nominal del elemento, que puede ser comparado con los esfuerzos últimos del análisis estructural y tener un diseño eficiente de acuerdo al criterio de diseño por estados límite (LRFD).

ESTADO DEL ARTE

Sabiendo que a nivel mundial los primeros usos del hierro, fueron en la fabricación de pequeñas herramientas, aproximadamente 4000 años antes de la era cristiana. Este material se usaba en forma de hierro forjado, que se producía calentando el mineral en hornos de carbón. En la última parte del siglo XVIII y principio del XIX, el hierro colado y el hierro forjado se usaron en varios tipos de puentes. El acero, aleación principalmente de hierro y carbono, con menos impurezas y menos carbono que el hierro colado, fue primero usado en la construcción pesada en el siglo XIX. Con el advenimiento del convertidor Bessemer en 1855, el acero comenzó a desplazar al hierro forjado y el hierro colado en la construcción. En Estados Unidos, el primer puente ferroviario de acero estructural fue el puente Eads, construido en 1874 en Sr. Louis, Missouri. En 1884 fue terminado en Chicago el primer edificio con estructura de acero. (William T. Segui)



Fig. 1. El puente Eads es un puente ferroviario y de carretera que cruza el río Misisipi en la ciudad de San Luis, conectándola con East St. Louis en Illinois, Estados Unidos.

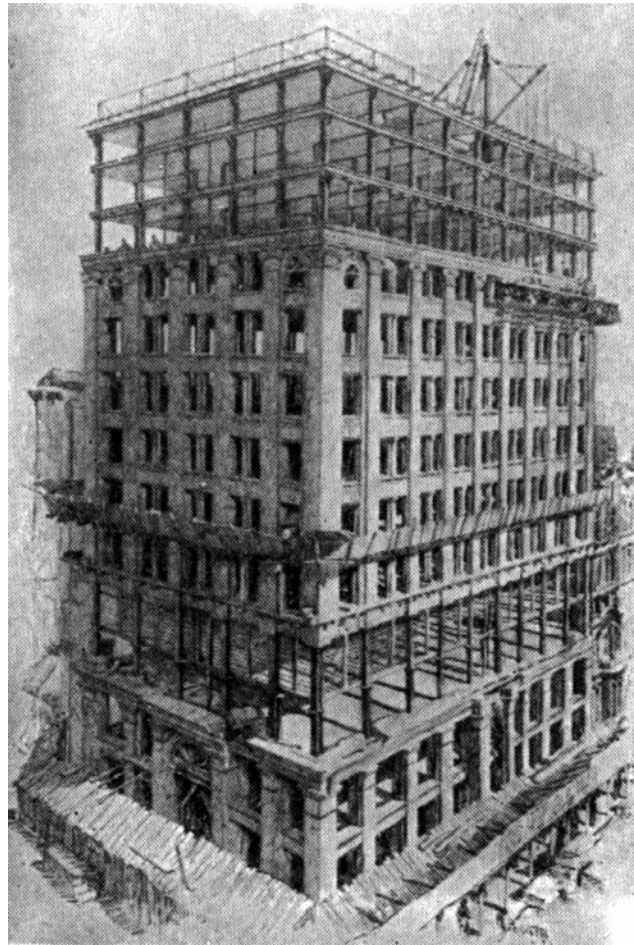


Fig. 2. Home Insurance Building, edificio construido en 1885, en Chicago, Illinois, USA y derribado en 1931, obra del arquitecto William Le Baron Jenney.

En el Ecuador el hierro forjado y el acero estructural llega con la construcción del ferrocarril, entre los años 1865 y 1871, que se construye los primeros kilómetros de líneas férreas, y los puentes para la red ferroviaria ecuatoriana.



Fig. 3. Puente en Acero de Chorlaví-Ecuador.

En la misma época se construyó el Mercado de Santa Clara en Quito, la estructura de hierro y zinc fue importada originalmente de Hamburgo, en Alemania, durante el gobierno del Gral. Eloy Alfaro en 1889. Por su increíble similitud con el famoso mercado de Las Halles, en París, fue destinado al mismo propósito y se convirtió en el Mercado de Santa Clara (1920), ubicado en una pequeña plaza frente al monasterio del mismo nombre, entre las calles Benalcázar, Cuenca y Rocafuerte.



Fig. 4. Mercado de Santa Clara, Quito (hoy conocido como el palacio de cristal de Itchimvía).

Posteriormente en Guayaquil fue construido como Mercado de abastos, entre los años 1905 y 1907 e inaugurado el 6 de Enero de 1908. Las reseñas narran que el Antiguo Mercado Sur fue diseñado y construido por los Ingenieros Francisco Manrique Pacanisy Carlos Van Ischot. Las piezas utilizadas para su construcción fueron traídas directamente desde Bruselas, Bélgica y fue prefabricado por la firma Verhaeren Cia Jager. Ingenierus Construiters de Bruxelles – See.



Fig. 5. Mercado del Sur (Guayaquil-Ecuador)

En el Ecuador actualmente se observan estructuras que utilizan el acero conformado en frío y/o laminado en caliente para su construcción, desplazando de una manera muy rápida a las estructuras tradicionales de madera como era el caso de las cubiertas, de igual forma las estructuras de viviendas y los edificios de tipo pórtico con losa nervada que se ejecutaban en Hormigón Armado.



Fig. 6. Vivienda Unifamiliar en el Sistema Steel Framing (Cuenca-Ecuador)

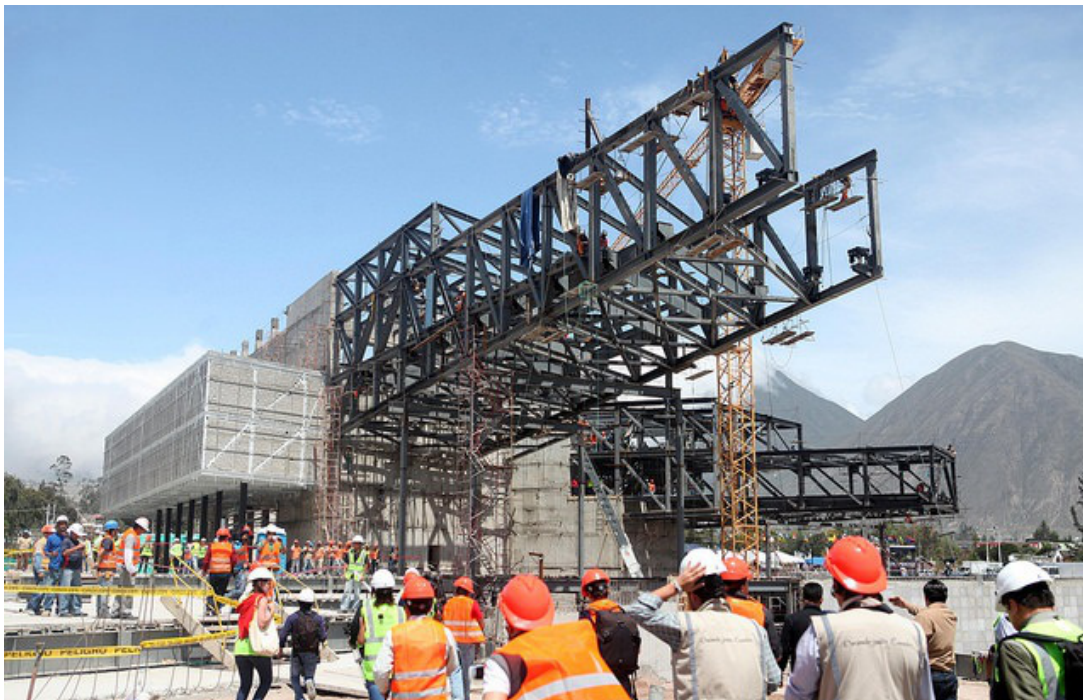


Fig. 7. Edificio UNASUR (Quito-Ecuador)

Debido a que el trabajo investigativo y software, están orientados a los perfiles conformados en frío y dentro de ellos están los perfiles ligeros de lámina delgada usados para el sistema Steel Framing, que consta en la especificación AISI, podemos decir al respecto que es un sistema heredero del “Wood Framing” empleado principalmente por los inmigrantes a Estados Unidos, basado en el empleo de montantes de madera a distancias reducidas y rematados en sus extremos por sendas soleras también de madera. Asimismo los entresijos son formados por viguetas de madera y los muros y entresijos recubiertos con revestimientos de diferentes tipos.

Este sistema fue adaptado a las construcciones de acero hace algunas décadas al crearse el sistema de Steel Framing, de perfiles galvanizados muy livianos, con los cuales se construyen estructuras de hasta varios pisos y que tiene una divulgación cada vez mayor por las ventajas de ser un material reciclable que si se compara con la madera ofrece notables ventajas.

En este sistema se emplean con poca frecuencia elementos tales como pórticos, vigas y columnas aisladas siendo las cargas gravitacionales distribuidas en forma uniforme en las viguetas y montantes, todos ellos ubicados a la distancia modular elegida, ya sea 40 o 60 cm, que son medidas submúltiplo de 1.20m (o de 1.22m si son revestimientos en medidas inglesas) que es la medida estándar de los paneles de revestimiento de 4 pies de ancho y 8 pies de alto.

Es útil explicar que tratándose de un sistema de entramados de elementos todos conectados entre sí, es de primera importancia que las conexiones entre dichos elementos sean confiables.

Actualmente en Latinoamérica se dispone de dos manuales del ILAFA (Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero), el manual de ingeniería y el de arquitectura. Cabe indicar que el ILAFA fue fundada en 1959 y cambio su denominación a ALACERO en el año 2011 y está formado por 50 miembros de 25 países entre ellos la mayoría latinoamericanos y está compuesto por varios comités.

Se conoce que en América del Sur se está utilizando este sistema principalmente en Argentina. En el caso de Ecuador únicamente dispone de este tipo de perfiles ligeros galvanizados la empresa TUGALT de la ciudad de Cuenca y se encuentra produciendo perfiles desde el año 2005. No se dispone

de información de grandes proyectos con el sistema Steel Framing dentro del país, ya que prácticamente es nuevo en nuestro medio y se conoce como el sistema SEL (Sistema Estructural Liviano), disponiendo de los perfiles de tipo G (cruce) y C (capa).

En lo referente a las especificaciones en América sobre el acero estructural podemos dar la siguiente evolución de las mismas durante el tiempo, principalmente en Canadá, Estados Unidos y México, para luego ser asumidas por la mayoría de país centro y suramericanos.

Las normas de diseño para el acero laminado en caliente, fueron adoptadas en el año 1930, pero no eran aplicables a las secciones en frío debido a sus paredes de acero relativamente delgadas, que fueron sensibles a la deformación. Las piezas de acero conformado en frío mantenían un espesor constante en torno a su sección transversal, mientras que las formas laminadas en caliente típicamente exhiben la disminución o filetes. El acero conformado en frío permitido para las formas, difiere mucho de las formas clásicas de los laminados en caliente. El material era fácilmente realizable, además podía ser deformado en muchas formas. Fue necesario establecer requisitos mínimos y leyes para controlar las características de pandeo y fuerza. También se observó que las delgadas paredes se sometieron al pandeo local, bajo cargas pequeñas en algunos tramos y que estos elementos fueron entonces capaces de llevar cargas más altas, incluso después de la abolladura de los miembros.

En los Estados Unidos, la primera edición de la especificación para el diseño de miembros estructurales de acero, fue publicado por el American Iron and Steel Institute (AISI) en el año 1946 (AISI, año 1946). La primera tracción admisible de Especificación de Diseño (ASD) se basó en el trabajo de investigación patrocinado por la AISI en la Universidad de Cornell, bajo la dirección del profesor George Winter, a finales del año 1939. Como resultado de este trabajo, George Winter es ahora considerado el abuelo del diseño del acero conformado en frío. La especificación ASD fue revisada posteriormente en los años 1956, 1960, 1962, 1968, 1980 y 1986 para reflejar los avances técnicos y los resultados de la investigación continuada en Cornell y otras universidades. En el año 1991, AISI publicó la primera edición del Factor de

Carga y Resistencia de las Especificaciones de Diseño, desarrollado en la Universidad de Missouri de Rolla y la Universidad de Washington, bajo la dirección de Wei-Wen Yu y Theodore V. Galambos (AISI, año 1991). Ambas especificaciones, ASD y LRFD, se combinaron en una única especificación en el año 1996 (AISI, año 1996).

En el año 2001, la primera edición de la Especificación de América del Norte, para el diseño de estampado en frío y los miembros de acero estructurales, fueron desarrollados por un esfuerzo conjunto de:

1. La Comisión sobre las Especificaciones AISI.
2. La Canadian Standards Association (CSA).
3. El Comité Técnico conformado en frío.
4. Los miembros estructurales de acero.
5. La Cámara Nacional de la Industria del Hierro y Acero (CANACERO) en México (AISI, año 2001).

Incluía los métodos CIA y LRFD para los Estados Unidos y México, junto con el método de diseño de los Estados Límite (LSD) para Canadá. Esta especificación de América del Norte, ha sido acreditada por el American National Standard Institute (ANSI) como un estándar ANSI para reemplazar a la especificación AISI del año 1996 y la norma del año 1994 de la CSA. Tras el éxito de la edición del año 2001, la Especificación de América del Norte, lo utilizó durante seis años, fue revisado y ampliado en el año 2007. Además de las especificaciones de AISI, el American Iron and Steel Institute ha publicado:

- a. Comentarios en varias ediciones de las especificaciones.
- b. Manuales de diseño.
- c. Elaboración de normas de diseño.
- d. Diversas guías de diseño.
- e. Las ayudas de diseño para el uso de acero conformado en frío.

HIPOTESIS

Los perfiles de producción nacional no se comportan como perfiles ligeros, debido a que las relaciones ancho plano – espesor de sus elementos tienen valores pequeños.

CAPITULO I

INFORMACIÓN SOBRE EL AISI Y EL MÉTODO LRFD PARA DISEÑO DE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO EN LO REFERENTE A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se estudia la composición del acero y se identifica los tipos de aceros normados por la ASTM y sus características mecánicas, según la aplicabilidad que se solicita en la sección A3.1 de la especificación AISI.

Se procede a describir la metodología del método lineal para la determinación de las propiedades del miembro estructural, calculando cada uno de los elementos que lo conforman.

Para proceder a los cálculos de la capacidad resistente estudiamos previamente las consideraciones sobre la relación ancho plano y su espesor de las alas, así como del alma.

Se inicia determinando la capacidad de carga de elementos rigidizados uniformemente comprimidos de acuerdo a la sección B2.1, aplicando el procedimiento I de la especificación AISI.

Antes de entrar en la determinación de la capacidad de un miembro, se define el diseño con factores de carga y resistencia, y el diseño por esfuerzos admisibles, de manera que se pueda identificar claramente los factores que serán usados para cada uno de los métodos, y con énfasis en el método LRFD, que se usará para la programación del software propuesto en este trabajo.

Por último se aplica el procedimiento para diseño de miembros a flexión y a compresión, que se encuentra en la sección C3 y C4 de la especificación AISI.

Como resultado de la investigación se realizan varios diseños manuales, diseños en hojas de cálculo electrónicas y en el software que se desarrolla como producto final del trabajo investigativo.

1.2 TIPOS DE ACEROS

Es importante indicar que el acero es fundamentalmente una aleación de hierro y carbono, pero contiene, además algo de silicio, manganeso, trazas de azufre y fósforo, pudiendo contener también elementos de aleación, como níquel y cromo.

El sistema de fabricación de acero es un proceso de oxidación, las impurezas presentes en el lingote de arrabio son oxidadas y los productos de la oxidación son recogidos en una capa de escoria.

Mientras que los minerales del hierro son fundidos en altos hornos, el hierro así producido es impuro. Las principales impurezas que contiene son carbono (aproximadamente 4%) que procede del coque, silicio (aproximadamente 2%), manganeso (aproximadamente 1%), que procede del mineral y azufre.

El hierro procedente del alto horno puede ser colado en moldes para dar pequeños y grandes lingotes, o ser transferido en forma líquida a hornos de fabricación de acero.

Los constituyentes de los aceros son: ferrita, austenita, cementita, perlita, martensita, sorbita, troostita y bainita.

La resistencia y dureza de los aceros puede variar considerablemente debido al contenido de carbono y al tipo de tratamiento térmico. Para denominar a los aceros se usan números que están en relación con el contenido de carbono de los mismos.

Aceros dulces son los que contienen hasta el 0,3 % de carbono.

Los aceros que contienen entre el 0,3 y el 0,6% se denominan aceros al carbono medios y pueden ser templados y revenidos.

Los aceros que contienen más del 0,6 % de carbono son usados siempre en estado de temple y revenido, siendo conocidos como aceros de alto contenido en carbono o aceros de herramientas.

Los aceros estructurales pueden agruparse como sigue:

Aceros simples al carbono: principalmente hierro y carbono, con menos de 1% de carbono.

Aceros de baja aleación: hierro, carbono y otras componentes (usualmente del 5%). Los componentes adicionales son principalmente para incrementar la resistencia, que se logra a costa de una reducción en la ductilidad.

Aceros especiales o de alta resistencia: similares en composición a los aceros de baja aleación, pero con un mayor porcentaje de componentes agregados al hierro y al carbono. Estos aceros son de resistencia superior a la de los aceros simples, al carbono y tienen también alguna cualidad especial como la resistencia a la corrosión.

Los diferentes grados de aceros estructurales son identificados por la designación asignada a ellos por la American Society for Testing and Materials (ASTM). Esta organización elabora normas para definir los materiales en términos de sus composiciones, propiedades, desempeño y prescriben las pruebas específicas para medir esos atributos (ASTM, 1996).

El acero estructural más comúnmente usado en la actualidad es un acero dulce designado como ASTM A36 o brevemente A36 y tiene las siguientes propiedades en tracción:

Esfuerzo de fluencia: $F_y=36.000,00$ psi (36 Ksi)

Resistencia en tracción: $F_u=58.000,00$ psi (58 Ksi)

Que son propiedades mecánicas que se usaran esencialmente en el diseño.

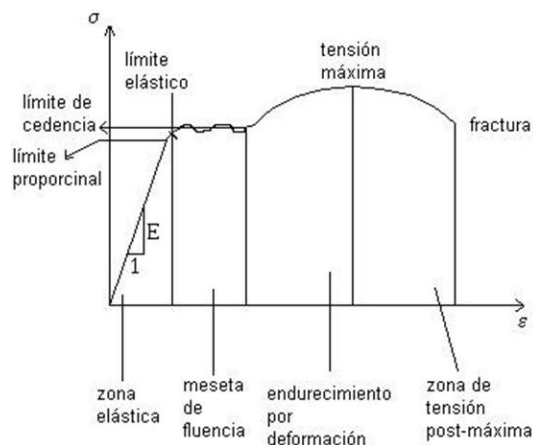


Fig. 8 Curva Esfuerzo- Deformación del acero

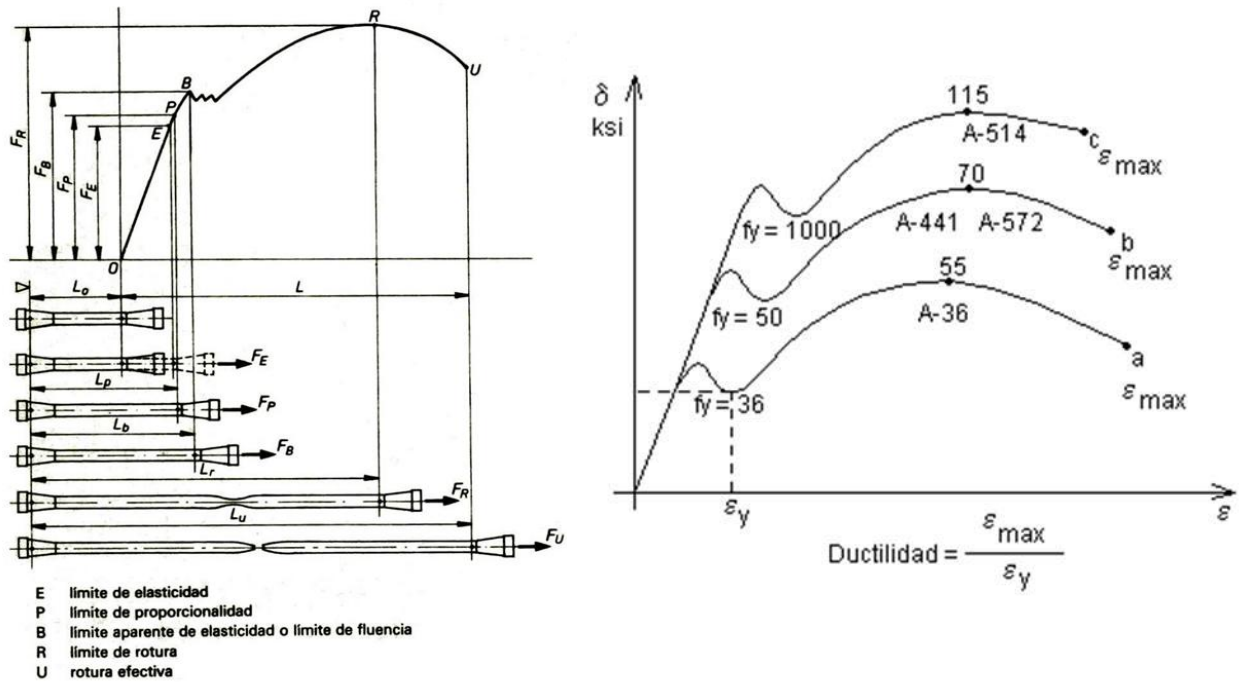


Fig. 9 Curva Esfuerzo- Deformación de distintos aceros

Tabla No.1 Tipos de aceros y sus propiedades

| Designación ASTM | Acero | Formas | Usos | Fy _{min} Ksi | FU _{min} Ksi |
|--------------------|---|----------------------------------|--|------------------------|-----------------------|
| A-36 NOM B-254 | Al carbono | Perfiles, barras y placas | Puentes, edificios estructurales en gral. Atornillados, remachados y soldados | 36 e < 8" 32 e > 8" | 58 – 80 |
| A-529 NOM B-99 | Al carbono | Perfiles y placas e < 1/2" | Igual al A-36 | 42 | 60-85 |
| A-441 NOM B-284 | Al magnesio, vanadio de alta resistencia y baja aleación | Perfiles, placas y barras e < 8" | Igual al A-36 Tanques | 40-50 | 60-70 |
| A-572 NOM B | Alta resistencia y baja aleación | Perfiles, placas y barras e < 6" | Construcciones atornilladas, remaches. No en puentes soldados cuando Fy > 55 ksi | 42-65 | 60-80 |
| A-242 NOM B-282 | Alta resistencia, baja aleación y resistente a la corrosión atmosférica | Perfiles, placas y barras e < 4" | Construcciones soldadas, atornillada, técnica especial de soldadura | 42-50 | 63-70 |
| A-514 | Templados y revenidos | Placas e < 4" | Construcciones soldada especialmente. No se usa si se requiere gran ductilidad | 90-100 | 100-150 |

Las especificaciones AISI, hacen referencia a los tipos de acero a utilizar para miembros estructurales de acero conformado en frío en la sección A3.1 y A3.2.

1.3 EL METODO LINEAL PARA EL CÁLCULO DE PROPIEDADES DE UNA SECCIÓN

Si los espesores de las secciones formadas en frío son uniformes, el cálculo de las propiedades geométricas de tales secciones puede ser simplificado por el uso del “Método Lineal”. En este método el material de la sección se considera que está concentrado a lo largo del centro medio del espesor de la chapa y los elementos de área son reemplazados por elementos lineales rectos o curvos.

El espesor (t) es introducido después que los cálculos lineales han sido determinados.

Entonces el área total será:

$$A = L * t$$

y el momento de inercia de la sección será :

$$I = I' * t$$

Donde:

L = Longitud total de todos los elementos lineales de la sección.

I' = Momento de inercia de la línea media de la sección.

t = Espesor de la plancha de la sección.

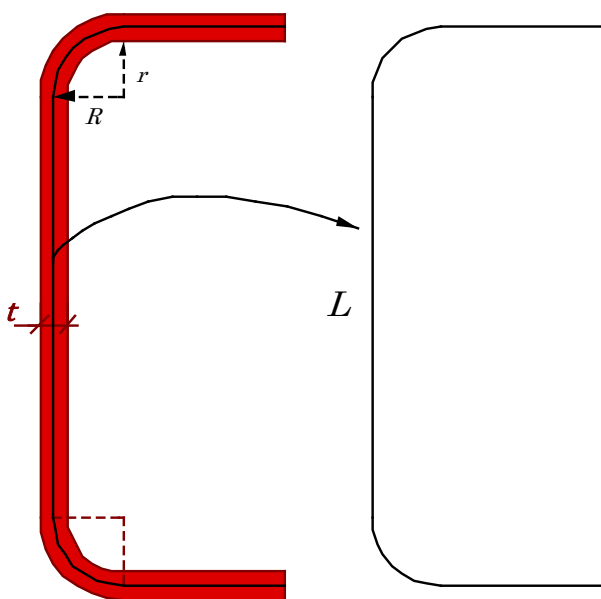


Fig. 10 Miembro estructural de sección tipo “C” – Método Lineal

1.4 ESFUERZOS EN ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES

La resistencia de materiales estudia la distribución interna de los esfuerzos que producen un sistema de fuerzas exteriores aplicadas.

En la resistencia de materiales se estudia y establece las relaciones entre las cargas exteriores aplicadas y sus efectos en el interior de los sólidos. Además, la resistencia de materiales, no supone que los sólidos son idealmente indeformables, como en la mecánica, sino que las deformaciones por pequeñas que sean tienen gran interés. Las propiedades del material del que se construye una estructura afectan tanto a su elección como a su diseño, ya que se deben satisfacer las condiciones de resistencia y rigidez.

Dentro de una estructura tridimensional formada por barras y sometida a cargas, se distinguen claramente los esfuerzos internos, para lo cual analizamos un elemento cualquiera del siguiente pórtico espacial.

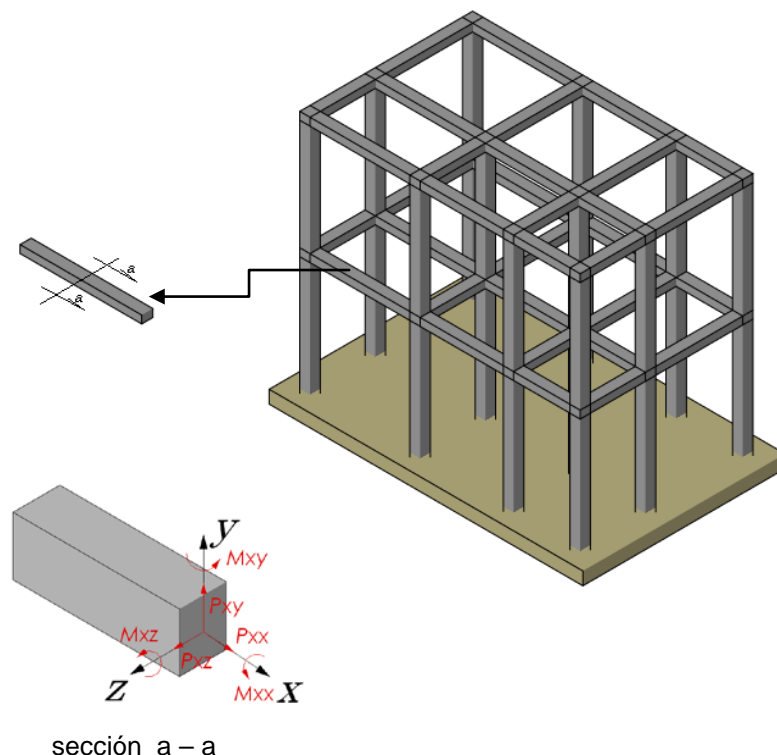


Fig. 11 Esfuerzos en un elemento del conjunto estructural tridimensional (elemento viga)

Cada componente representa un efecto distinto de las fuerzas aplicadas sobre el sólido, en esta sección y recibe un nombre especial que se indica a continuación:

P_{xx} Fuerza axial .- Esta componente corresponde a la Acción de tirar (o empujar) sobre la sección.

Que puede ser tracción o compresión.

P_{xy} Fuerza cortante .- Esta componente representa la resistencia total al deslizamiento de la porción de sólido a un lado de la sección de exploración respecto de la otra porción. La fuerza cortante se suele representar por V .

P_{xz} Fuerza cortante .- Esta componente representa la resistencia total al deslizamiento de la porción de sólido a un lado de la sección de exploración respecto de la otra porción. La fuerza cortante se suele representar por V .

M_{xx} Momento Torsionante .- Esta componente mide la resistencia a la torsión del sólido considerado, y se suele representar por T .

M_{xy} Momento Flexionante .- Esta componente mide la resistencia del cuerpo a curvarse o flexionarse respecto de los ejes Y o Z , y se suele expresar, simplemente por M .

M_{xz} Momento Flexionante.- Esta componente mide la resistencia del cuerpo a curvarse o flexionarse respecto de los ejes Y o Z , y se suele expresar, simplemente por M .

De lo anterior se concluye que en toda barra que forma parte de un sistema tridimensional, están presentes seis esfuerzos.

1.5 ESPECIFICACIONES Y CÓDIGOS DE CONSTRUCCIÓN

Los edificios deben diseñarse y construirse de acuerdo con las especificaciones de un reglamento de construcciones, que es un documento legal.

Un reglamento de construcción tiene fuerza legal y es administrado por una entidad gubernamental como en el caso de una ciudad, por un municipio, o por el gobierno de un país.

Los reglamentos modelos son escritos por varias organizaciones no lucrativas en una forma que puede ser fácilmente adoptada por un organismo gubernamental.

En contraste con los reglamentos de construcción, las especificaciones de diseño dan una guía más específica sobre el diseño de miembros estructurales y sus conexiones. Ellas son revisadas periódicamente y puestas al día en suplementos o ediciones nuevas.

Las especificaciones de mayor interés para el ingeniero estructural en el Continente Americano referentes al diseño en acero estructural, son aquellas publicadas por las siguientes organizaciones:

1. American Institute of Steel Construction (AISC): estas especificaciones se refieren al diseño de edificios de acero estructural y sus conexiones.
2. American Association of State Highway and transportation Officials (AASHTO): estas especificaciones se refieren al diseño de puentes carreteras y estructuras afines. Ellas se refieren a todos los materiales estructurales usados en puentes, como el acero, el concreto reforzado y la madera.
3. American Railway Engineering Association (AREA): este documento se refiere al diseño de puentes ferroviarios y estructuras afines.
4. American Iron and Steel Institute (AISI) : estas especificaciones tratan todo lo relativo al acero formado en frío, que tienen que ver con la presente monografía (William T. Segui)

Actualmente está vigente la versión de 2012 de la AISI S100-2012 “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members” AISI, corresponde a la tercera edición, basada en la anterior de 2007 y sus posteriores modificaciones.

En Europa se dispone del EUROCODIGO, dentro del cual se tiene la sección EC3 referente a perfiles conformados en frío.

Y de igual forma se dispone de la Norma Española EAE (Instrucción de Acero Estructural), la misma que desde el año 2011 es un marco legal reglamentario.

En nuestro país se dispone de la NEC 2011 (Norma Ecuatoriana de la Construcción) que entro en vigencia desde el 19 de Agosto del 2014 en la misma que se hace referencia un capitulo únicamente al acero estructural y dentro del mismo a las construcciones con steel framing.

1.6 DEFINICIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO ELÁSTICO Y PLÁSTICO

Casi todas las estructuras de acero existentes se diseñaron con métodos elásticos. El proyectista estima las cargas de trabajo o servicio, o sea, las cargas que la estructura tiene que soportar y diseña los miembros estructurales con base en ciertos esfuerzos permisibles. Estos usualmente son cierta fracción del esfuerzo mínimo de fluencia especificado del acero. Aunque el término “diseño elástico” se usa comúnmente para describir este método, los términos diseño por esfuerzos permisibles o diseño por esfuerzos de trabajo son más apropiados. Muchas de las especificaciones para este método se basan en el comportamiento plástico o en la resistencia última y no en el comportamiento elástico.

Se ha visto que la ductilidad del acero proporciona una reserva de resistencia y esta circunstancia es la base del diseño plástico. En este método, las cargas de trabajo se estiman y se multiplican por ciertos factores de carga o de sobrecapacidad y los elementos estructurales se diseñan entonces con base en sus resistencias al colapso.

Los proyectistas saben desde hace mucho tiempo que la mayor porción de la curva esfuerzo-deformación, yace más allá del límite elástico del acero. Los estudios experimentales de muchos años han mostrado que los aceros pueden

resistir esfuerzos considerablemente mayores que sus esfuerzos de fluencia y que en casos de sobrecargas, las estructuras estáticamente indeterminadas tienen la capacidad de repartir esta sobrecarga, gracias a la ductilidad del acero. Con base en esta información se han hecho muchas propuestas de diseño plástico en las últimas décadas. Indudablemente para cierto tipo de estructuras es verdad que con el diseño plástico, se puede lograr un uso más económico del acero que con diseño elástico. (Jack C. McCormac)

El diseño plástico se basa en una consideración de las condiciones de falla en vez de consideraciones de la carga de trabajo. Un miembro se selecciona usando el criterio de que la estructura fallará bajo una carga considerablemente mayor que la carga de trabajo. La falla en este contexto significa el colapso o deformaciones extremadamente grandes. Se usa el término plástico porque en la falla, las partes del miembro estarán sometidas a deformaciones muy grandes que introducen al miembro en el rango plástico. Cuando la sección transversal entera se plastifica en suficientes localidades, se forman “articulaciones plásticas” en estas, creándose un mecanismo de colapso. Como las cargas reales serán inferiores a las cargas de falla por un factor de seguridad conocido como factor de carga, los miembros diseñados de esta manera no son inseguros, a pesar de ser diseñados con base en lo que sucede en la falla. (William T. Segui)

1.7 DISEÑO CON FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA (LRFD)

En el diseño por factores de carga y resistencia (Load and resistance factor design LRFD) o diseño por estados límite, los factores de carga se aplican a las cargas de servicio y se selecciona un miembro que tenga suficiente resistencia frente a las cargas factorizadas. Además, la resistencia teórica del miembro es reducida por la aplicación de un factor de resistencia. El criterio que debe satisfacerse en la selección de un miembro es:

$$\Sigma (\text{Cargas} * \text{factores de carga}) \leq \text{resistencia} * \text{factor de resistencia.}$$

(William T. Segui)

En las especificaciones para acero conformado en frío, AISI 1996, artículo A6, se detalla los fundamentos de diseño por este método.

Un diseño satisface los requisitos de esta especificación cuando la resistencia de cálculo de cada uno de los componentes estructurales es mayor o igual que la resistencia requerida, determinada en base a las cargas nominales multiplicadas por los factores de carga correspondientes, para todas las combinaciones de cargas aplicables.

El diseño se debe efectuar de acuerdo con la ecuación (A6.1.1-1):

$$R_u \leq \phi R_n \quad (\text{Ec. A6.1.1-1})$$

donde

R_u = Resistencia requerida.

R_n = Resistencia nominal especificada en los Capítulos B a E.

ϕ = Factor de resistencia especificado en los Capítulos B a E.

ϕR_n = Resistencia de cálculo.

(AISI 1996)

1.8 DISEÑO CON ESFUERZOS ADMISIBLES (ASD)

El ASD (Allowable stress design), es el primer método que se utilizó para el diseño de elementos de acero laminados en caliente y conformados en frío. Y es aplicable dentro de los códigos y normas de diseño, en el AISI de 1996 consta en el artículo A5 (Diseño por tensiones admisibles) en el cual se detallan los fundamentos, requisitos y combinaciones de cargas.

Un diseño satisface los requisitos de esta especificación cuando la resistencia de cálculo admisible de cada uno de los componentes estructurales es mayor o igual que la resistencia requerida, determinada en base a las cargas nominales, para todas las combinaciones de cargas aplicables.

El diseño se debe efectuar de acuerdo con la ecuación (A5.1.1-1):

$$R \leq R_n / \Omega \quad (\text{Ec. A5.1.1-1})$$

donde

R = Resistencia requerida.

R_n = Resistencia nominal especificada en los Capítulos B a E.

Ω = Factores de seguridad especificados en los Capítulos B a E.

R_n/Ω = Resistencia de cálculo admisible.

(AISI 1996)

1.9 FACTORES DE CARGA

El propósito de los factores de carga es incrementar las cargas para tomar en cuenta las incertidumbres, implicadas al estimar las magnitudes de las cargas vivas y las cargas muertas. El valor del factor de carga usado para las cargas muertas es menor que el usado para las cargas vivas, ya que los proyectistas pueden estimar con más precisión las magnitudes de las cargas muertas.

Las magnitudes de las cargas deben obtenerse en los reglamentos de construcción vigentes (N.E.C 2011) o en la especificación ASCE 7.93.

Los factores de carga y combinaciones están en las especificaciones AISI 1996.

Sección A5.1.2 (ASD)

En ausencia de un código o especificación aplicable, o si estos no incluyen combinaciones de cargas para ASD, la estructura y sus componentes se deben diseñar de manera que las resistencias de cálculo admisibles sean mayores o iguales que los efectos de las cargas nominales para cada una de las siguientes combinaciones de cargas:

1. D
2. $D + L + (L_r \text{ o } S \text{ o } R_r)$
3. $D + (W \text{ o } E)$
4. $D + L + (L_r \text{ o } S \text{ o } R_r) + (W \text{ o } E)$

Sección A6.1.2 (LRFD)

En ausencia de un código o especificación aplicable, o si estos no incluyen combinaciones de cargas y factores de carga para LRFD, la estructura y sus componentes se deben diseñar de manera que las resistencias de cálculo sean mayores o iguales que los efectos de las cargas nominales factoradas para cada una de las siguientes combinaciones de cargas:

1. $1,4 D + L$
2. $1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ o } S \text{ o } R_r)$
3. $1,2 D + 1,6 (L_r \text{ o } S \text{ o } R_r) + (0,5 L \text{ ó } 0,8 W)$
4. $1,2 D + 1,3 W + 0,5 L + 0,5 (L_r \text{ o } S \text{ o } R_r)$
5. $1,2 D + 1,5 E + 0,5 L + 0,2 S$
6. $0,9 D - (1,3 W \text{ ó } 1,5 E)$

Excepciones:

1. En las combinaciones (5) y (6) el factor de carga correspondiente a E es igual a 1,0 cuando el modelo de cargas sísmicas especificado por el código o especificación aplicable se basa en estados límites.
2. En las combinaciones (3), (4) y (5) el factor de carga correspondiente a L es igual a 1,0, en el caso de cocheras para estacionamiento de vehículos, áreas ocupadas como lugares de concurrencia pública y todas las áreas en las cuales la sobrecarga es superior a 100 psf.
3. Para el caso de viento sobre correas, cintas, paneles de tabiques y tableros de cubiertas, multiplicar el factor de carga correspondiente a W por 0,9.
4. En la combinación (3) el factor de carga correspondiente a Lr es igual a 1,4 en vez de 1,6 cuando la sobrecarga de cubierta se debe a la presencia de trabajadores y materiales durante las tareas de reparación.

(AISI 1996)

1.10 FACTORES DE RESISTENCIA

Para estimar con precisión la resistencia última de una estructura es necesario tomar en cuenta las incertidumbres que se tienen en la resistencia de los materiales, en las dimensiones y en la mano de obra. Con el factor de resistencia, el proyectista reconoce implícitamente que la resistencia de un miembro no puede calcularse exactamente, debido a imperfecciones en las teorías de análisis (por ejemplo las hipótesis para analizar armaduras).

Para hacer esta estimación, se multiplica la resistencia última teórica (llamada resistencia nominal) de cada elemento por un factor Φ , de resistencia o de sobrecapacidad que es casi siempre menor que 1. Estos factores se encuentran en las especificaciones AISI 1996 en los capítulos B a E, de acuerdo al tipo de rigidizador y de sección del elemento estructural.

Para miembros traccionados:

$$\Omega_t = 1,67 \text{ (ASD)}$$

$$\Phi_t = 0,95 \text{ (LRFD)}$$

Para miembros flexionados:

Para secciones con alas comprimidas rigidizadas o parcialmente rigidizadas.

$$\Omega_b = 1.67 \text{ (ASD)}$$

$$\Phi_b = 0.95 \text{ (LRFD)}$$

Para secciones con alas comprimidas no rigidizadas.

$$\Omega_b = 1.67 \text{ (ASD)}$$

$$\Phi_b = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

Resistencia para corte exclusivamente.

Si tenemos : $h / t \leq 0,96 \sqrt{E_k / F_y}$

$$\Omega_v = 1.50 \text{ (ASD)}$$

$$\Phi_v = 1.00 \text{ (LRFD)}$$

Si tenemos : $0,96 \sqrt{E_k / F_y} < h / t \leq 1.415 \sqrt{E_k / F_y}$

$$\Omega_v = 1.50 \text{ (ASD)}$$

$$\Phi_v = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

Y si tenemos: $h / t > 1.415 \sqrt{E_k / F_y}$

$$\Omega_v = 1.50 \text{ (ASD)}$$

$$\Phi_v = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

1.11 REQUISITOS DE SERVICIO Y MANTENIMIENTO

Dentro de un proyecto de una edificación, las instalaciones de calefacción, iluminación, ventilación, cableado eléctrico, agua, gas, productos químicos, etc, deberán tener una planeación inicial adecuada con relación a la estructura, para evitar una posterior revisión en la distribución general y cambios costosos de diseño y materiales en el proceso constructivo o en la obra terminada.

Un requisito importante es también la vida útil deseada para la estructura, ya que se debe considerar problemas especiales de corrosión que se presente debido a las condiciones atmosféricas, humedad, etc.

Mediante un diseño adecuado el proyectista debe evitar las cavidades en las que pueda juntarse el polvo y el agua, por lo que deberá proporcionar el acceso a todas las partes de la estructura que vayan a requerir la aplicación de pintura. Y cuando no se pueda dar el debido mantenimiento se debe disponer de un espesor adicional suficiente de acero para efectos de corrosión.

Existen aceros especiales muy resistentes a la corrosión y otra alternativa es el uso de aceros resistentes a la intemperie, que no requieren pintura y desarrollan un óxido superficial que resiste la corrosión y presenta un color café quemado agradable a la vista.

El ingeniero debe considerar que se puede alterar o ampliar el uso de la estructura durante su vida, razón por la que se debe tener cierta flexibilidad con respecto a futuras remodelaciones y ampliaciones. Por esto se deberán hacer las paredes divisorias temporales.

Las estructuras se deben diseñar de manera que satisfagan las necesidades requeridas. Los límites de serviciabilidad se deben seleccionar en base a la función que cumplirá la estructura y se deben evaluar utilizando cargas y combinaciones de cargas reales.

Y por último el ingeniero deberá pensar en el fuego y proteger los elementos garantizando la seguridad de la vida humana, que es la prioridad.

1.12 VENTAJAS DEL MÉTODO LRFD

La AISI y AISC han introducido el método LRFD no con el propósito específico de obtener ventajas económicas inmediatas, sino porque ayuda a proporcionar una confiabilidad más uniforme para todas las estructuras de acero, sean cuales fueren las cargas; además, está escrito en una forma que facilita la incorporación de los avances que se logren en el transcurso de los años en el campo del diseño estructural.

En el método de diseño por esfuerzos permisibles (DEP) se usaba el mismo factor de seguridad para las cargas muertas y para las cargas vivas, en tanto que en el método LRFD se usa un factor de carga o de seguridad mucho menor para las cargas muertas, por la exactitud con las que estas se pueden determinar. En consecuencia, la comparación del peso que se obtiene para una

estructura diseñada con ambos métodos, depende necesariamente de la relación entre las cargas vivas y las cargas muertas.

En los edificios comunes, la relación de la carga viva con la muerta varía aproximadamente entre 0.25 y 4.0, presentándose valores aún mayores para estructuras muy ligeras. En los edificios de acero de poca altura por lo general se tienen valores altos para esta relación. En el método DEP se usaron los mismos factores de seguridad para ambas cargas, independientemente de la relación entre ellas; se obtenían así miembros estructurales más pesados que aumentaban los factores de seguridad cada vez más, conforme decrecía la relación de la carga viva con la muerta.

Puede demostrarse que para los valores pequeños de la relación de la carga viva con la muerta, digamos menores a 3, se tendrán ahorros en el peso del acero al usar el método LRFD de aproximadamente 1/6 en columnas y miembros a tracción y de cerca de 1/10 en vigas. Por otra parte, si se tiene una relación muy grande entre tales cargas, no habrá diferencia en los pesos resultantes al usar ambos métodos de diseño.

1.13 DISEÑO DE MIEMBROS A COMPRESIÓN

Existen varios tipos de miembros que trabajan a compresión, de los cuales la columna es el más conocido. Las columnas son miembros verticales rectos cuyas longitudes son considerablemente mayores que su ancho. Los miembros verticales cortos sujetos a cargas de compresión se denominan con frecuencia puntales o simplemente miembros a compresión.

1.13.1 Perfiles usados para Columnas:

En teoría puede seleccionarse varios perfiles para resistir con seguridad una carga de compresión en una estructura dada. Desde el punto de vista práctico, el número de soluciones posibles se ve limitado por el tipo de secciones disponibles, por problemas de conexión y el tipo de estructura en donde se va a usar la sección.

A continuación se presentan las distintas secciones transversales para miembros a compresión sean conformados en frío o laminados en caliente.

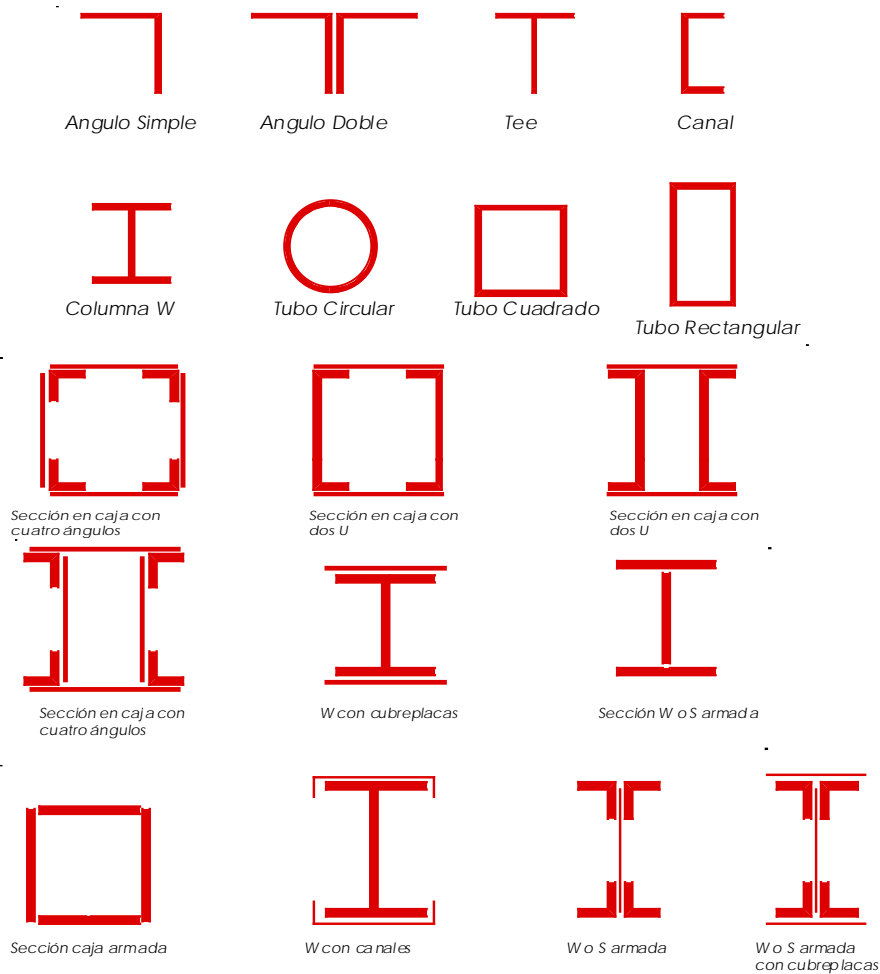


Fig. 12 Tipos de secciones conformadas en frío o laminados en caliente

En lo referente a la producción nacional se tienen varias empresas que fabrican perfiles conformados en frío, con las siguientes secciones simples y compuestas:

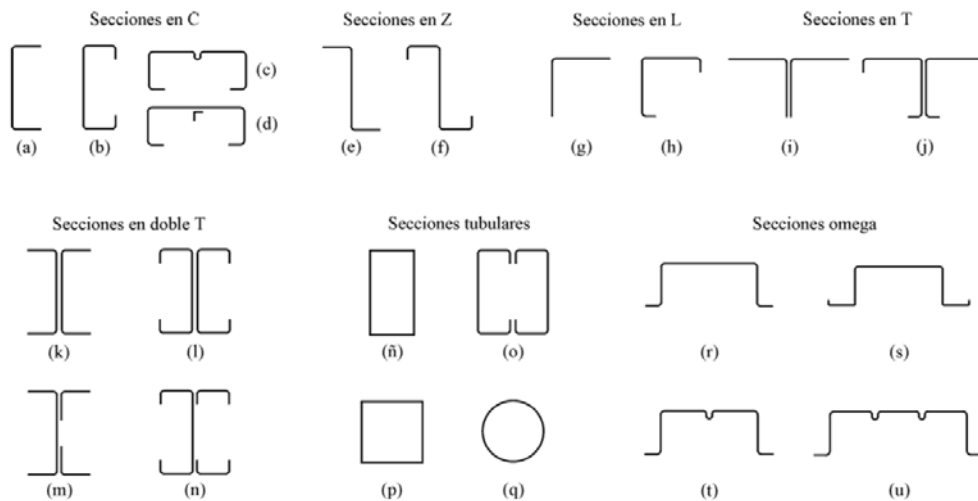


Fig. 13 Tipos de secciones comerciales conformadas en frío

El miembro a compresión más eficiente es aquel que tiene un radio de giro constante respecto a su centroide, propiedad que poseen los tubos circulares.

Los perfiles tubulares cuadrados son los siguientes en eficiencia.

Los tubulares estructurales de cuatro lados y redondos son más fáciles de pintar que las secciones abiertas de seis lados.

Los tubulares tienen menos área superficial para pintar o proteger contra el fuego.

Tienen excelente resistencia a la torsión.

Las superficies de los perfiles tubulares son muy atractivas y vistosas.

Cuando están expuestas, la resistencia al viento de los tubos circulares es aproximadamente de solo $2/3$ de la de las superficies planas del mismo ancho.

Si la limpieza es importante, los tubulares estructurales huecos no tienen el problema de la acumulación de basura entre los patines, lo cual si presentan los perfiles estructurales abiertos.

Para muchas situaciones en las columnas, el peso de las secciones tubulares cuadradas o rectangulares puede ser menor que la mitad de los pesos requeridos para secciones de perfil abierto.

Cuando se diseñan miembros a compresión para estructuras muy grandes puede ser necesario usar secciones armadas, las cuales deben conectarse en sus lados abiertos con algún tipo de celosía que mantenga sus partes unidas y les permita trabajar conjuntamente.

Las fuerzas cortantes laterales son insignificantes en las columnas a base de perfiles sencillos y en las secciones armadas sin celosía, pero de ninguna manera pueden desperdiciarse en las columnas armadas con celosía.

1.13.2 Desarrollo de las fórmulas para Columnas:

Es de vital importancia para el ingeniero estructural entender el comportamiento de una columna, ya que le proporciona una ayuda para el uso inteligente de las especificaciones de diseño.

La falla de columnas implica el fenómeno del pandeo, durante el cual un miembro experimenta deflexiones de un carácter totalmente diferente que las asociadas con la carga inicial.

Cuando una columna cargada axialmente se carga por primera vez, simplemente se acorta o se comprime en la dirección de la carga. Cuando se alcanza la carga de pandeo, cesa la deformación por acortamiento y ocurre entonces una deformación repentina lateral y/o rotacional en una dirección normal al eje de la columna, limitando así la capacidad por carga axial.

La resistencia de un miembro a tracción es independiente de su longitud, mientras que para una columna, tanto la resistencia como el modo de falla son marcadamente dependientes de la longitud.

Una columna compacta muy corta construida de cualquiera de los metales comunes desarrollará aproximadamente la misma resistencia en compresión que en tracción. Pero si la columna es larga, fallará una carga que es proporcional a la rigidez flexionante.

Sabiendo que los miembros en compresión son elementos estructurales sometidos sólo a fuerzas axiales de compresión; es decir, las cargas son aplicadas a lo largo de un eje longitudinal que pasa por el centroide de la sección transversal del miembro y el esfuerzo puede calcularse con $f_a = P/A$, donde f_a se considera uniforme sobre toda la sección transversal. En realidad, este estado ideal nunca se alcanza y alguna excentricidad de la carga es inevitable. Si la flexión es considerable se analizará el elemento a flexo-compresión como viga-columna, tema que no es de análisis del presente trabajo.

EL uso de columnas se remonta a la prehistoria, pero fue hasta 1729 que el matemático holandés Pieter Van Musschenbroek publicó un artículo científico sobre columnas; este artículo contenía una fórmula empírica para estimar la resistencia de columnas rectangulares. Unos años más tarde, en 1757, Leonhard Euler, un matemático suizo, escribió un artículo de gran valor, relativo al pandeo de columnas, probablemente él fue el primero en darse cuenta de la importancia del pandeo.

1.13.3 La fórmula de EULER:

Si observamos el miembro largo, esbelto, en compresión, de la figura a).

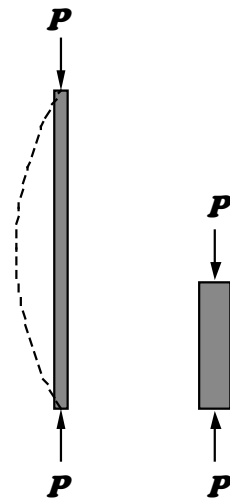


Fig. 14 Columna larga y corta - Euler

Si la carga axial P es aplicada lentamente, ella llegará a ser suficientemente grande y ocasionará que el miembro se vuelva inestable y tome la forma indicada por la línea punteada. Se dice que el miembro se ha pandeado y la carga correspondiente a esta situación se llama carga crítica de pandeo. Si el miembro es robusto como en la fig. b), se requerirá una carga mayor para que él se vuelva inestable. Para miembros sumamente robustos, la falla puede ocurrir por fluencia compresiva en vez de por pandeo. La carga bajo la cual ocurre el pandeo es una función de la esbeltez y para miembros muy esbeltos, esta carga puede ser muy pequeña.

Si el miembro es tan esbelto el esfuerzo justo antes del pandeo está por debajo del límite proporcional del material, es decir, el miembro es aún elástico, la carga crítica de pandeo está dada por la fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L^2}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad del material

I = momento de inercia del área transversal con respecto al eje principal menor

L = longitud del miembro entre puntos de soporte

Para que la ecuación anterior sea válida, el miembro debe ser elástico y sus extremos deben poder girar libremente pero no tener capacidad de trasladarse lateralmente.

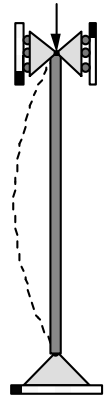


Fig. 15 Columna articulada

El esfuerzo bajo el cual una columna se pandea obviamente decrece conforme la columna se hace más larga.

La fórmula anterior se encuentra en varios libros como:

$$P_e = \frac{\pi^2 E I}{L^2}$$

El esfuerzo F_y , no aparece en la ecuación, es decir, no aparece en la determinación de la resistencia de una columna muy larga.

Sabiendo que el área de la columna es A , se introduce la relación $I = Ar^2$, en que r es el radio de giro de la sección transversal, la carga de pandeo se expresa en términos del esfuerzo de pandeo F_e o V_{CR} :

$$F_e = \frac{P_e}{A} = \frac{\pi^2 E I}{A L^2} = \frac{\pi^2 E}{(L \div r)^2}$$

Esta ecuación puede modificarse para aplicarla a otras condiciones de extremo como borde libre o empotramiento, por medio de factor K de longitud efectiva. Para pandeo flexionante puro, KL es la longitud entre puntos de inflexión y se conoce como la longitud efectiva. Así, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

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

L / r se denomina relación de esbeltez y es casi universalmente usada como un parámetro en términos del cual la curva de resistencia de columnas puede dibujarse o expresarse analíticamente por medio de una fórmula de resistencia de columna.

Se debe usar el momento de inercia y radio de giro mínimos de la sección transversal en las ecuaciones antes descritas, para estar del lado de la seguridad, ya que se toma la relación de esbeltez más grande.

K es el factor de longitud efectiva, del cual se habla en el siguiente numeral.

1.13.4 Restricciones en los extremos y longitud efectiva de una columna:

La restricción en los extremos y su efecto en la capacidad de carga de una columna es en verdad un concepto muy importante. Las columnas con apreciable restricción en sus extremos pueden soportar cargas mucho mayores que aquellas con poca restricción, como es el caso de columnas con extremos articulados. El procedimiento del factor K es un método para encontrar soluciones simples a complicados de pandeo en marcos.

Resulta claro que entre menor sea la longitud efectiva de una columna, menor será el peligro de que se pandee y mayor su capacidad de carga.

En realidad nunca se tienen ni articulaciones, ni empotramientos perfectos, por lo que las columnas quedan entre los dos casos extremos.

El uso de la longitud efectiva KL en lugar de la longitud real L no altera de ninguna manera cualquiera de las relaciones vistas hasta ahora.

La tabla C-C4-1 de las especificaciones AISI 1996, contiene los valores teóricos de K para seis condiciones ideales que corresponden a rotación y traslación totalmente impedida o restricción totalmente inexistente. La misma tabla también incluye los valores de K cuyo uso está recomendado por el Consejo de Investigación de la Estabilidad Estructural (Structural Stability Research Council, Galambos, 1988)

| | | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|-----|-----|------|-----|
| La geometría de la columna deformada por pandeo se indica en línea de puntos | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
| | | | | | | |
| Valor teórico de K | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
| Valor de K recomendado cuando la estructura se aproxima a las condiciones ideales | 0,65 | 0,80 | 1,2 | 1,0 | 2,10 | 2,0 |
| Referencia de las condiciones de los extremos | | Rotación impedida, traslación impedida | | | | |
| | Rotación libre, traslación impedida | | | | | |
| | Rotación impedida, traslación libre | | | | | |
| | Rotación libre, traslación libre | | | | | |

Tabla No.2 Factores de longitud efectiva K , para miembros comprimidos con carga concéntrica

1.13.5 Columnas Largas, Cortas e Intermedias.

Las columnas se clasifican en: largas, cortas e intermedias. A continuación explicamos cada una de ellas:

Columnas Largas: La fórmula de Euler predice muy bien la resistencia de las columnas largas, en las que el esfuerzo axial de pandeo permanece por abajo del límite proporcional. Dichas columnas fallan elásticamente.

Columnas Cortas: El esfuerzo de falla será igual al esfuerzo de fluencia y no ocurrirá el pandeo.

Columnas Intermedias: Algunas fibras alcanzarán el esfuerzo de fluencia y otras no; estas fallaran tanto por fluencia como por pandeo y su comportamiento se denomina inelástico. La mayoría de las columnas caen en este rango. (Para que la fórmula de Euler sea aplicable a esas columnas deberá modificarse de acuerdo al concepto de modulo reducido o al de modulo tangente para tomar en cuenta la presencia de esfuerzos residuales.)

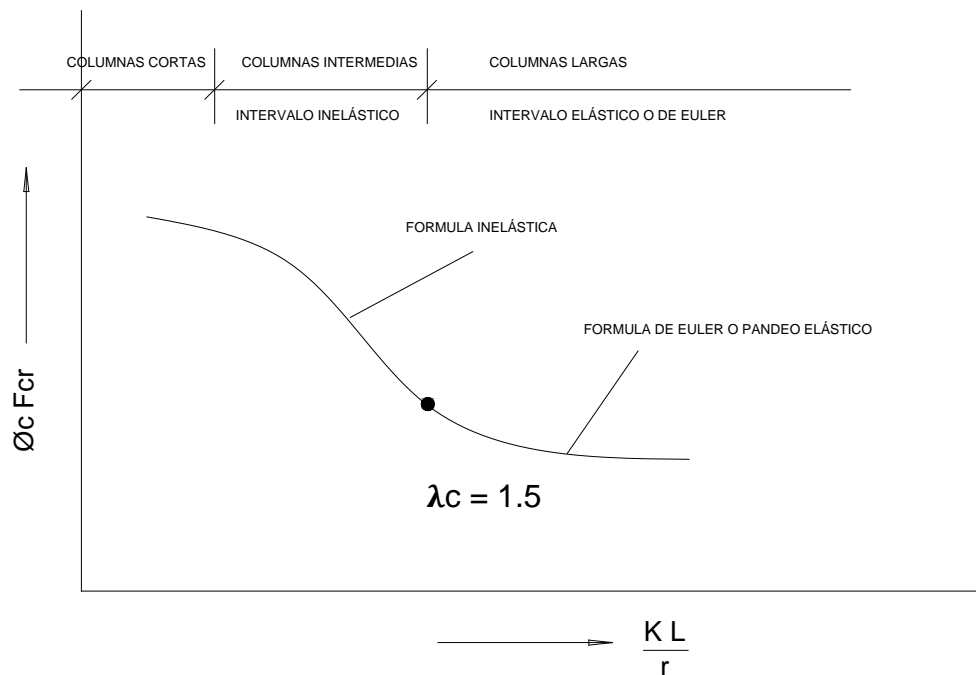


Fig. 16 Módulo tangente para esfuerzos residuales

Es importante indicar también que en vez de expresar el esfuerzo crítico de pandeo F_{cr} o F_e , como función de la relación de esbeltez KL/r , las especificaciones usan el parámetro de esbeltez:

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

Que incorpora las propiedades del material pero es adimensional. Para columnas elásticas, la ecuación anterior puede escribirse como:

$$F_e = F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL \div r)^2} = \frac{1}{\lambda_c^2} F_y$$

Para tomar en cuenta los efectos del des alineamiento inicial, este valor se reduce como sigue:

$$F_e = F_{cr} = \frac{0,877}{\lambda_c^2} F_y$$

Para columnas inelásticas, la ecuación del módulo tangente, es reemplazada por:

$$F_e = F_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y$$

Que también toma en cuenta un desalineamiento inicial. Si la frontera entre columnas elásticas e inelásticas se toma como $\lambda_c = 1,5$, las ecuaciones para el esfuerzo crítico de pandeo pueden resumirse como sigue:

Para $\lambda_c \leq 1,5$

$$F_e = F_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y$$

Para $\lambda_c > 1,5$

$$F_e = F_{cr} = \frac{0,877}{\lambda_c^2} F_y$$

Las ecuaciones se basan en estudios experimentales y teóricos que toman en cuenta los efectos de los esfuerzos residuales y un desalineamiento inicial de $L/1500$ o $L/1000$, donde L es la longitud del miembro.

Los requisitos mencionados son del AISI (y son los mismos para perfiles conformados en frío, ya que se adoptaron en el AISI 1996), y se representan en el siguiente gráfico:

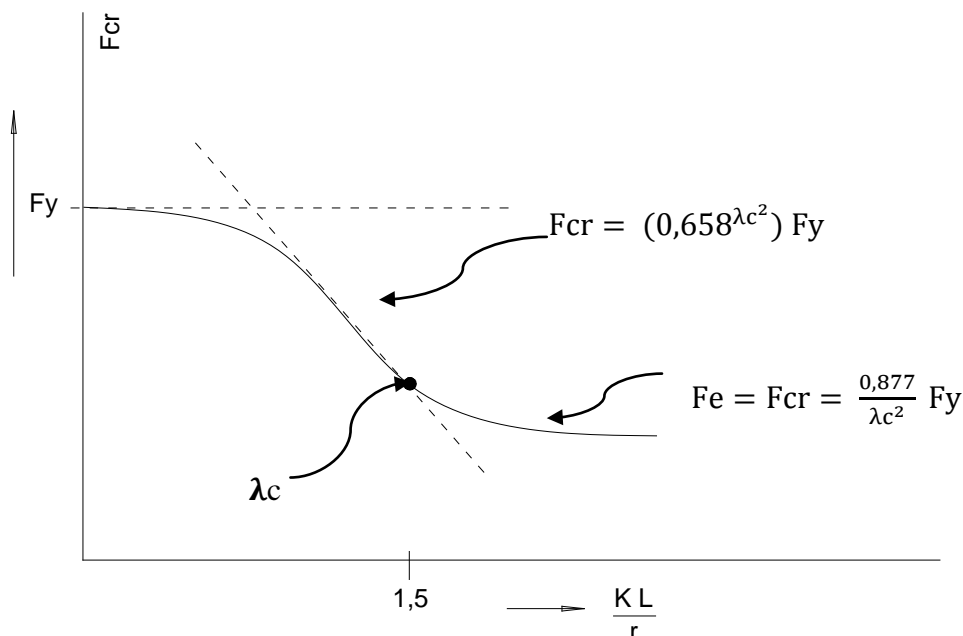


Fig. 17 Curva para determinar F_{cr}

En el AISI 1996, se usa F_n en vez de F_{cr} ó F_e , que se mencionó anteriormente, y es la tracción nominal de pandeo flexional.

F_n puede estar en el rango elástico o en el rango inelástico, dependiendo del valor de:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

Donde F_e se calcula:

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

1.13.6 Razones Ancho – Espesor:

De acuerdo a la sección B de la especificación AISI, tenemos las siguientes consideraciones:

B1.1 Consideraciones sobre la relación entre el ancho, plano de las alas y su espesor. (AISI 1996)

(a) Máximas relaciones entre el ancho, plano y el espesor:

Las máximas relaciones entre el ancho plano y el espesor, w/t , despreciando los rigidizadores intermedios y considerando t como el espesor real del elemento, deben ser las siguientes:

(1) Elemento comprimido rigidizado que posee un borde longitudinal conectado a un alma o ala, el otro rigidizado por:

| | |
|--|----|
| Labio rigidizador simple | 60 |
| Cualquier otro tipo de rigidizador en el cual $I_s \geq I_a$ y $D/w \leq 0,8$ de acuerdo con la Sección B4.2 | 90 |

(2) Elemento comprimido rigidizado con ambos bordes longitudinales conectados a otros elementos rigidizados

500

(3) Elemento comprimido no rigidizado y elementos con un rigidizador de borde en el cual $I_s < I_a$ y $D/w \leq 0,8$ de acuerdo con la Sección B4.2

60

Nota: Es probable que los elementos comprimidos no rigidizados que poseen relaciones w/t superiores a aproximadamente 30 y los elementos comprimidos rigidizados que poseen relaciones w/t superiores a aproximadamente 250 desarrollen una deformación considerable en la resistencia de cálculo total, sin que esto afecte la capacidad del miembro de desarrollar la resistencia requerida.

Los elementos rigidizados que poseen relaciones w/t mayores que 500 se pueden utilizar para soportar las cargas requeridas con una resistencia de cálculo adecuada. Sin embargo, las importantes deformaciones de estos elementos generalmente invalidan las ecuaciones de cálculo de esta Especificación.

(b) Desplazamiento Vertical de las alas

Cuando el ala de un miembro flexado es inusualmente ancha y se desea limitar la máxima cantidad de desplazamiento vertical o movimiento de ala hacia el eje neutro, se aplica la siguiente ecuación para alas comprimidas y traccionadas, ya sea rigidizadas o no rigidizadas:

$$w_f = \sqrt{0.061tdE/f_{av}} \sqrt[4]{(100c_f/d)} \quad (Ec. B1.1-1)$$

Donde

w = Ancho del ala que se proyecta más allá del alma; o a la mitad de la distancia entre las almas de vigas cajón o secciones en U.

t = Espesor del ala

d = Profundidad de la viga

c_f = Cantidad de desplazamiento vertical

f_{av} = Tensión media calculada en el ancho total, no reducido, del ala (cuando los miembros se diseñan utilizando el procedimiento del ancho efectivo de cálculo, la tensión media es igual a la tensión máxima multiplicada por la relación entre el ancho efectivo de cálculo y el ancho real.)

(c) Tramos cortos que soportan cargas concentradas

Cuando la viga tiene una longitud de menos de 30 w_f (donde w_f corresponde a lo definido a continuación) y soporta una carga concentrada, o varias cargas separadas más de 2w_f el ancho efectivo de cálculo de cualquier ala, ya sea traccionada o comprimida, se debe limitar a los siguientes valores:

Tabla B.1.1(c) AISI 1996
Alas Cortas y Anchas

| L / w _f | Relación | L/w _f | Relación |
|--------------------|----------|------------------|----------|
| 30 | 1 | 14 | 0.82 |
| 25 | 0.96 | 12 | 0.78 |
| 20 | 0.91 | 10 | 0.73 |
| 18 | 0.89 | 8 | 0.67 |
| 16 | 0.86 | 6 | 0.55 |

Tabla No.3 Máxima Relación Admisible entre Ancho Efectivo de Cálculo y Ancho Real

Donde:

L = Longitud total para las vigas simples; o distancia entre puntos de inflexión para las vigas continuas; o el doble de la longitud para las vigas en voladizo.

w_f = Ancho de la proyección del ala más allá del alma para las vigas doble T y secciones similares; o la mitad de la distancia entre las almas en el caso de vigas cajón secciones en U.

Para las alas de vigas doble T y secciones similares rigidizadas en sus bordes exteriores mediante labios rigidizadores, w_f se debe tomar como la suma de la proyección del ala más allá del alma más la profundidad del labio.

B1.2 Máxima relación entre la profundidad del alma y su espesor

La relación h/t de las almas de los miembros flexados no debe ser mayor que los siguientes límites:

(a) Para almas no reforzadas: $(h/t)_{\max} = 200$

(b) Para almas con rigidizadores transversales que satisfacen los requisitos de la Sección B6.1:

(1) Cuando sólo se utilizan rigidizadores de apoyo, $(h/t)_{\max} = 260$

(2) Cuando se utilizan rigidizadores de apoyo y rigidizadores intermedios, $(h/t)_{\max} = 300$ siendo

h = Profundidad de la porción plana del alma medida sobre el plano del alma

t = Espesor del alma

Si un alma está compuesta por dos o más planchas, la relación h/t se debe calcular para las planchas individuales.

1.13.7 Resistencia de Diseño a Compresión:

Antes de proceder con el diseño es importante mencionar algo que aún no se ha dicho, hay tres modos generales según los cuales las columnas cargadas axialmente pueden fallar. Estos son:

- El pandeo flexionante (llamado también pandeo de Euler) es el tipo primario de pandeo, que ya se analizó. Los miembros están sometidos a flexión cuando se vuelven inestables.

- El pandeo local ocurre cuando alguna parte o partes de la sección transversal de una columna son tan delgadas que se pandean localmente en compresión antes que los otros modos de pando puedan ocurrir. La susceptibilidad de una columna al pandeo local se mide por las relaciones ancho a grueso de las partes de su sección transversal.
- El pandeo torsionante puede ocurrir en columnas que tienen ciertas configuraciones en su sección transversal. Esas columnas fallan por torsión o por una combinación de pandeo torsional y flexionante.

La tendencia al pandeo depende también de factores como: tipo de conexión en los extremos, excentricidad de la carga, imperfecciones en el material, torceduras iniciales de la columna, esfuerzos residuales de fabricación, etc.

Como se vio en todo el documento precedente se habla del AISI 1996 e incluso del AISC para conformado al caliente; pero es importante indicar que las especificaciones que más se usaban internacionalmente eran las del AISI 2001, pero en la actualidad se dispone de las especificaciones AISI 2007, la cual contiene numerosos cambios con respecto a las especificaciones anteriores (1996, 2001), dentro de los cambios existen muchos que son simplemente de forma o de organización de textos, pero también hay cambios de forma y contenido en los cuales se modifican procedimientos de diseño y calculo, por lo que a continuación se comenta sobre uno de ellos.

El pandeo distorsional es un fenómeno de inestabilidad, que a pesar de ser ya ampliamente conocido entre los expertos del tema, recién se incorpora ahora en la norma AISI 2007, ya que en las ediciones anteriores solo se trata el pandeo flexo-torsional y el pandeo local. En la especificación del 2007 se incorporó el pandeo distorsional que es el que se produce en alas de perfiles abiertos, como los C y Z en los cuales las alas con pestañas cuando están comprimidas pasan a una respuesta inestable y tienden a rotar en conjunto produciendo una deformación general del ala. Siendo un tema bastante complejo, se ofrecen tres métodos distintos de la forma de verificar la tracción F_d de pandeo distorsional de alas de perfiles abiertos.

La norma ofrece un método simplificado de verificación en la cláusula C3.1.4 a), otro método más exacto en C3.1.4 b) y la determinación por el método de cálculo directo del Apéndice 1, según la cláusula C3.1.4 c).

Considerando los casos de perfiles flexionados es importante destacar que los tres fenómenos de pandeo que ahora se consideran en la norma.: pandeo general, pandeo distorsional y pandeo local, estas definen ondas de deformación de distintos largos, siendo las de pandeo general las más largas, las de pandeo local las más cortas y las distorsionales de largo intermedio.

1.13.8 Fórmulas para Columnas (AISI):

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 tracción, F_n , definida en esta sección.

(a) La resistencia axial nominal, P_n , se debe calcular de la siguiente manera:

$$P_n = A_e F_n \quad (\text{Ec. C4-1})$$

$$\Omega_c = 1,80 \quad (\text{ASD})$$

$$\Phi_c = 0,85 \quad (\text{LRFD})$$

dónde:

A_e = Superficie efectiva a la tracción 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. Si el número de perforaciones en la región de la longitud efectiva, multiplicado por el diámetro de la perforación, dividido por la longitud efectiva no es mayor que 0,015; A_e se puede determinar ignorando las perforaciones.

F_n se determina de la siguiente manera:

$$\text{Para } \lambda_c \leq 1,5 \quad F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (\text{Ec. C4-2})$$

$$\text{Para } \lambda_c > 1,5 \quad F_n = \left[\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad (\text{Ec. C4-3})$$

donde

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (\text{Ec. C4-4})$$

F_e = la menor de las tensiones de pandeo elástico flexional, torsional y torsional flexional determinadas de acuerdo con las Secciones C4.1 a C4.3.

(b) Las secciones cargadas de forma concéntrica se deben diseñar para un momento flector adicional según lo especificado en las definiciones de M_x , M_y (ASD) o M_{ux} , M_{uy} (LRFD), Sección C5.2

(c) Preferentemente la relación de esbeltez, KL/r , de todos los miembros comprimidos no debe ser mayor que 200, excepto que, exclusivamente durante la construcción, KL/r preferentemente no debe ser mayor que 300.

C4.1 Secciones no sometidas a pandeo torsional ni a pandeo torsional-flexional (AISI 1996)

En el caso de secciones con simetría doble, secciones cerradas y cualquier otra sección que se pueda demostrar que no está sujeta a pandeo torsional ni a pandeo torsional- flexional, la tracción de pandeo flexional elástico, F_e , se debe determinar de la siguiente manera:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (\text{Ec. C4.1-1})$$

donde:

E = Módulo de elasticidad longitudinal

K = Factor de longitud efectiva*

L = Longitud no arriestrada del miembro

r = Radio de giro de la sección transversal total no reducida

C4.2 Secciones con simetría doble o simetría simple sometidas a pandeo torsional o a pandeo flexional- torsional. (AISI 1996)

Para las secciones con simetría simple sometidas a pandeo torsional- flexional, F_e se debe tomar como el menor valor entre F_e calculada de acuerdo con la Sección C4.1 y F_e calculada de la siguiente manera:

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (\text{Ec. C4.2-1})$$

Alternativamente, se puede obtener una estimación conservadora de F_e utilizando la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\sigma_t \sigma_{ex}}{\sigma_t + \sigma_{ex}} \quad (Ec. C4.2-2)$$

donde σ_t y σ_{ex} corresponden a lo definido en la Sección C3.1.2:

$$\beta = 1 - (x_o / r_o)^2 \quad (Ec. C4.2-3)$$

En las secciones con simetría simple se supone que el eje x es el eje de simetría.

En las secciones con simetría doble sujetas a pandeo torsional, F_e , se debe tomar como el menor valor entre F_e calculada de acuerdo con la Sección C4.1 y $F_e = \sigma_t$, siendo σ_t como se define en la Sección C3.1.2.

1.14 DISEÑO DE MIEMBROS A FLEXIÓN

Existen varios tipos de miembros que trabajan a flexión, de los cuales la viga es el elemento más importante.

En el diseño de una viga se debe principalmente proporcionar resistencia a la flexión y suficiente para fuerza cortante en toda la longitud. En vigas laminadas el alma proporciona la mayor resistencia al cortante.

La mayor parte de las vigas se diseñan con la teoría simple de la flexión. El proceso de diseño es primeramente dibujar una sección con momento flexionante mayor o igual al que actúa y luego se revisa por cortante y de ser necesario la revisión por deflexión.

En las especificaciones LRFD, el momento M_u y la fuerza V_u requeridos en la sección transversal se calculan por análisis estructural y se revisan los criterios:

$$\phi M_n > M_u \quad \text{y} \quad \phi V_n > V_u$$

En el diseño de los miembros estructurales en flexión, estos deben estar provistos de suficiente resistencia a la flexión y al mismo tiempo la deformación del miembro estructural bajo carga de servicio, no debe exceder las limitaciones especificadas.

Antes de pasar a diseñar cualquier viga de acero de sección formada en frío es importante hacer notar que en la actualidad se usa un procedimiento de diseño, basado en el concepto de sección efectiva para determinar la resistencia a la flexión y deformación de las vigas con diferentes tipos de alas en compresión. El concepto de sección transversal efectiva es el que se utiliza en el diseño de

las vigas que tienen el ala en compresión rigidizada, no rigidizada, parcialmente rigidizada o con rigidizadores intermedios.

1.14.1 Flexión elástica de vigas de acero

El conocimiento de la teoría elemental de vigas, tal como se presenta en textos sobre mecánica o resistencia de materiales, es esencial para el estudio de vigas.

En la siguiente figura se muestra una longitud unitaria de viga cortada virtualmente de la viga completa en cualquier parte a lo largo de la misma. Sobre ella actúan el momento flexionante M y la fuerza cortante V , positivos como se indican, y se muestra en su posición recta no deflexionada antes de ser cargada y en su posición deflexionada y flexionada después de ser aplicada la carga.

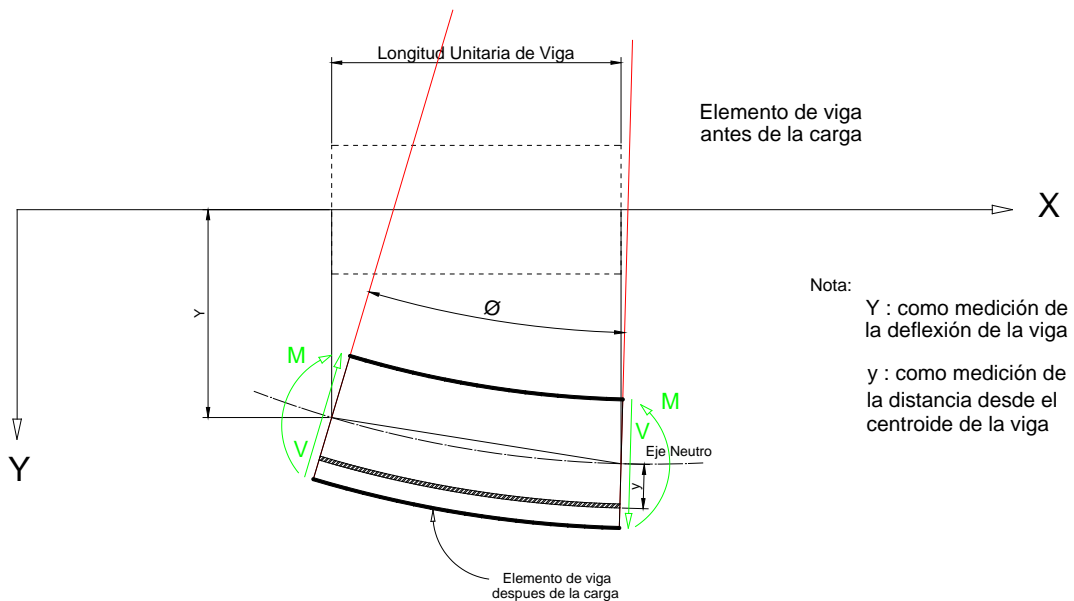


Fig. 18 Deformación en un segmento de viga

Note que Y y y , positivos como se muestran, se usan para definir dos distancias diferentes: la deflexión del eje de la viga y la distancia dentro de la sección transversal de la viga desde el centroide, respectivamente. La curvatura de la viga, o cambio en la pendiente por unidad de longitud de viga, se denota por \emptyset y la deformación unitaria longitudinal o cambio en longitud por longitud unitaria, de una fibra horizontal de viga es por tanto igual a:

$$\mathcal{E} = \emptyset y$$

Como el esfuerzo normal f_b es igual al módulo de elasticidad E multiplicado por la deformación unitaria \mathcal{E} , el esfuerzo debido a flexión es igual, según la ecuación anterior a:

$$f_b = E\phi y$$

Esta ecuación es conveniente en el problema que enfrenta el fabricante de alambre o varilla, pero para el diseño de vigas de acero el esfuerzo debido a flexión se calcula usualmente como función del momento flexionante, que es proporcional a la curvatura. La constante de proporcionalidad entre el momento y la curvatura es EI , donde I es el momento de inercia de la sección transversal, tal como es tabulada para todas las secciones laminadas en el AISC. El momento flexionante es entonces.

$$M = EI\phi$$

Combinando las ecuaciones de f_b y M , se obtiene la fórmula para el esfuerzo en términos del momento flexionante:

$$f_b = \frac{My}{I}$$

Llamada ecuación de viga y su uso se restringe a la teoría simple de la flexión. El esfuerzo máximo debido a la flexión en $y = c$, donde c es la distancia y máxima desde el eje centroidal de la viga a la fibra extrema superior o inferior de la sección transversal. Si la sección de la viga es simétrica respecto a su eje $x-x$, c será la misma para los extremos en compresión y tracción.

$$(f_b)_{max} = \frac{M(max)c}{I}$$

Para facilitar la selección de diseño de una viga por momento flexionante máximo, I y c se combinan en un solo parámetro, el módulo de sección elástico, denotado por S e igual a I/c .

Entonces la ecuación resulta:

$$(f_b)_{max} = \frac{M(max)}{S}$$

Ahora a menos que la viga sea extremadamente corta, se deberá escoger por momento y revisar por cortante. El esfuerzo cortante calculado por medio de la teoría simple de la flexión en cualquier posición en el alma de la viga está dado por:

$$(fv)_{max} = \frac{V(max)Q}{I t}$$

Dónde:

V : fuerza cortante total resultante en la sección transversal

Q : momento estático, respecto al eje neutro, de aquella porción de área de la viga más allá del punto en que se calcula el esfuerzo cortante.

t : espesor del alma donde se calcula el esfuerzo.

1.14.2 Comportamiento inelástico de las vigas de acero

El momento máximo que puede ser soportado sin fluencia es $M_y = S F_y$. Si la viga esta soportada lateralmente y sus patines y alma son compactos, la sección transversal de una viga de acero puede llegar a estar totalmente plastificada y soportar así más momento. Esta capacidad se analiza a continuación y es parte del AISC.

Si tenemos el diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el acero estructural siguiente:

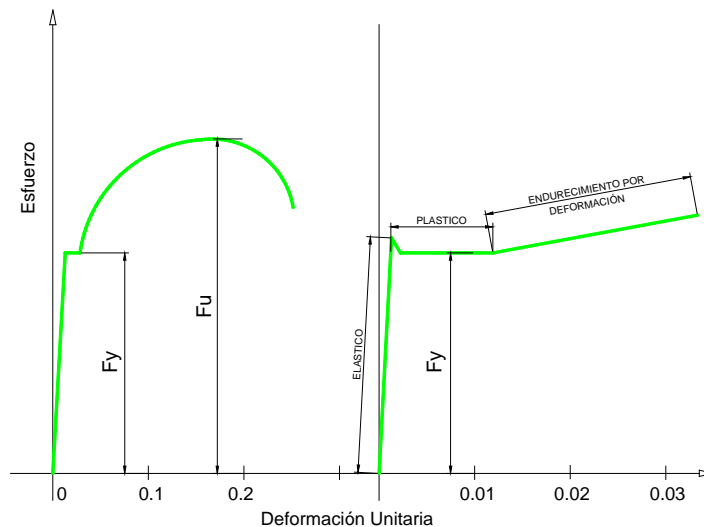


Fig. 19 Curva esfuerzo – deformación en el rango plástico

Consiste simplemente en las dos porciones de línea recta anteriores a la iniciación del endurecimiento por deformación y llamadas “rango elástico” y “rango plástico”, respectivamente. En este caso, el esfuerzo máximo debido a flexión en una viga de acero no se elevara arriba del esfuerzo de fluencia F_y .

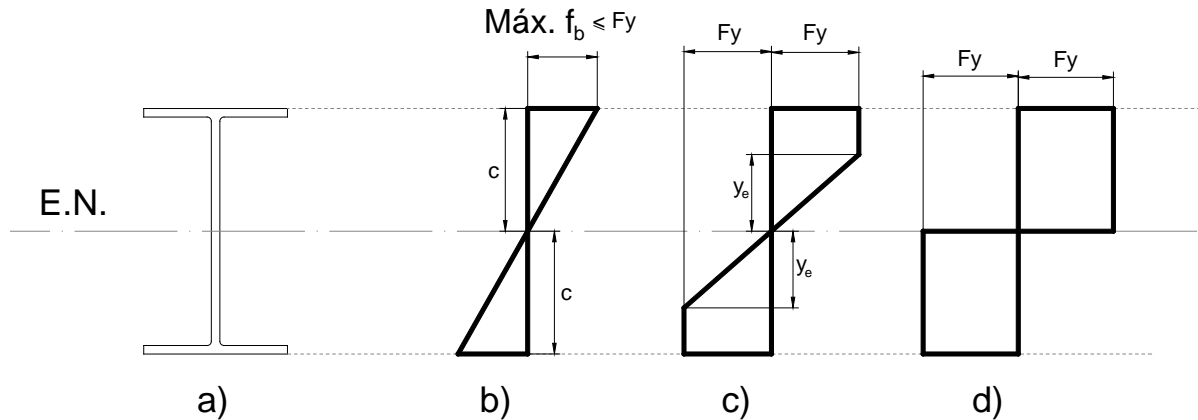


Fig. 20 Distribución de esfuerzos en una sección

La figura 13(b) muestra la distribución del esfuerzo para este caso. Si el momento flexionante se incrementa hasta alcanzar F_y , el diagrama de esfuerzo continuara teniendo la distribución elástica lineal mostrada en la figura 13(b) y el momento flexionante habrá alcanzado el valor del momento de fluencia M_y , arriba del momento de fluencia, la distribución del esfuerzo será como se muestra en la figura 13(c), acercándose finalmente en el limite a la forma rectangular mostrada en la figura 13(d), que corresponde al momento plástico M_p , que es el momento máximo alcanzable si no ocurre el endurecimiento por deformación.

El momento plástico M_p se calcula con la ecuación:

$$M_p = Z F_y$$

Donde:

Z: es el módulo de sección plástico

$M_p/M_y =$ Factor de forma

El factor de forma es también la razón Z/S y caracteriza el incremento de la capacidad de momento debido a la plastificación. Valores típicos de los factores de forma son:

Sección transversal circular sólida, $Z/S = 1.7$

Sección rectangular, $Z/S = 1.5$

Nota: para el presente trabajo en el que se analiza secciones delgadas conformadas en frío no se dispone del factor de forma, ya que el análisis es en el límite elástico, pero se recomienda a los fabricantes nacionales de perfilera dar un dato aproximado de este valor para distintos perfiles.

1.14.3 Estabilidad

Si puede esperarse que una viga permanezca estable hasta la condición plástica total, la resistencia nominal por momento puede tomarse como la capacidad por momento plástico; es decir:

$$M_n = M_p$$

De otra manera, M_n será menor que M_p .

Igual que en un miembro en compresión, la inestabilidad puede ser en sentido total (o de conjunto) o bien local.

Cuando una viga se flexiona, la región en compresión (sobre el eje neutro) es análoga a una columna y de manera similar a esta, se pandeara si el miembro es suficientemente esbelto. A diferencia de una columna la porción en compresión de la sección transversal está restringida por la porción en tracción y la deflexión hacia afuera (pandeo flexionante) es acompañada por torsión. Esta forma de inestabilidad se llama pandeo lateral torsionante (PLT). El pandeo lateral torsionante puede ser impedido por arriostramiento lateral de la zona en compresión, preferiblemente del patín en compresión a intervalos suficientemente cortos. La resistencia por momento depende en parte de la longitud no soportada, que es la distancia entre puntos de soporte lateral.

Que la viga pueda soportar un momento suficientemente grande para alcanzar la condición plástica total depende también de que la integridad de la sección transversal se mantenga. Esta integridad se perderá si uno de los elementos en compresión de la sección transversal se pandea. Este tipo de pandeo puede ser un pandeo del patín de compresión, llamado pandeo local del patín (PLP) o un pandeo de la parte comprimida del alma, llamado pandeo local del alma (PLA). Ahora cuál de estos pandeos ocurrirá, depende de las razones ancho-espesor de los elementos en compresión de la sección transversal.

1.14.4 Resistencia por flexión de perfiles compactos

Este capítulo forma parte del presente estudio a pesar de pertenecer al AISC para perfiles conformados al caliente, con el afán de analizar y comparar los diseños y parámetros de secciones conformadas en frío.

EL AISC clasifica las secciones transversales de los perfiles en: compactas, no compactas y esbeltas, dependiendo de los valores de las razones ancho-espesor. Esta puede resumirse como sigue. Sea

λ = razón ancho – espesor

λ_p = límite superior para la categoría de compactas

λ_r = límite superior para la categoría de no compactas

Entonces,

Si $\lambda \leq \lambda_p$ y el patín está conectado en forma continua al alma, la sección es compacta.

Si $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ la sección es no compacta; y

Si $\lambda > \lambda_r$ la sección es esbelta

La categoría se basa en la peor razón ancho-espesor de la sección transversal. Por ejemplo, si el alma es compacta y el patín es no compacto, la sección se clasifica como no compacta.

Una viga puede fallar al alcanzarse en ella el momento M_p y volverse totalmente plástica, o puede fallar por

1. Pandeo lateral-torsional (PLT), elástica o inelásticamente
2. Pandeo local del patín (PLP), elástica o inelásticamente
3. Pandeo local del Alma (PLA), elástica o inelásticamente

Si el esfuerzo de flexión es menor que el límite proporcional cuando ocurre el pandeo, la falla se llama elástica, si no es así, se llama inelástica.

Por conveniencia clasificamos primero las vigas y luego determinamos la resistencia por momento con base en el grado de soporte lateral.

Comenzamos con los perfiles compactos, definidos como aquellos cuyas almas están conectadas en forma continua a los patines y que satisfacen los siguientes requisitos de ancho – espesor para el patín y el alma:

$$\frac{bf}{2tf} \leq \frac{65}{\sqrt{F_y}} \quad \text{y} \quad \frac{h}{tw} \leq \frac{640}{\sqrt{F_y}}$$

La primera categoría, las vigas compactas soportadas lateralmente, es bastante común y es el caso más simple.

$$M_n = M_p$$

Donde

$$M_p = F_y Z \leq 1.5 M_y$$

El límite de $1.5 M_y$ para M_p es para prevenir deformaciones excesivas por carga de trabajo y se satisface cuando:

$$F_y Z \leq 1.5 F_y S \quad \text{o} \quad Z/S \leq 1.5$$

La resistencia por momento de perfiles compactos es una función de la longitud no soportada L_b , definida como la distancia entre puntos de soporte lateral, o arriostramiento. Si la longitud no soportada no es mayor que L_p , se considera que la viga tiene soporte lateral total y entonces $M_n = M_p$. Si L_b es mayor que L_p pero menor que o igual al parámetro L_r , la resistencia se basa en el PLT inelástico. Si L_b es mayor que L_r , la resistencia se basa en el PLT elástico.

$$L_p = \frac{300 r_y}{\sqrt{F_y}}$$

La ecuación para la resistencia por pandeo lateral torsionante elástico teórico puede encontrarse así:

$$M_n = \frac{\pi}{L_b} * \left(\sqrt{EI_y GJ} + \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \right)$$

Dónde:

L_b = longitud no soportada (in)

G = modulo cortante = 11,200 Ksi para el acero estructural

J = constante de torsión in⁴

C_w = constante de alabeo in⁶

El momento correspondiente a la primera fluencia es

$$M_r = F I S_x$$

$$M_r = (F_y - F_r) S_x$$

Donde F_r es el esfuerzo residual

Igual que con las columnas, el comportamiento inelástico de las vigas es más complicado que el comportamiento elástico y se usan a menudo formulas empíricas. Con una pequeña modificación, la siguiente ecuación es usada por el AISC:

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)$$

Dónde:

$$L_p = \frac{300 r_y}{\sqrt{F_y}}$$

Si se tiene un gradiente de momento, las ecuaciones de momento anteriores pueden modificarse por un factor C_b . Que viene dado como:

$$C_b = \frac{12.5 M}{2.5 M + 3 M + 4 M + 3 M} = 1 \quad \text{Cuando el momento flexionante dentro de la longitud no soportada es uniforme.}$$

En resumen la resistencia nominal a flexión para perfiles compactos será:

Para $L_b \leq L_p$
 $M_n = M_p \leq 1.5 M_y$

Para $L_p < L_b \leq L_r$
 $M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$

Para $L_b > L_r$
 $M_n = M_{cr} \leq M_p$

1.14.5 Resistencia por flexión de perfiles no compactos

En general, una viga puede fallar por pandeo lateral torsionante, por pandeo local del patín o por pandeo local del alma. Cualquiera de esos tipos de falla puede ocurrir en el rango elástico o en el rango inelástico. Las almas de todos los perfiles rolados dados en el Manual AISC son compactas, por lo que los perfiles no compactos están expuestos solo a los estados límite de pandeo lateral torsionante y de pandeo local del patín. Las resistencias correspondientes a ambos estados límite deben calcularse y gobernara el valor más pequeño.

El procedimiento será el siguiente:

1. Se revisa el pandeo local del patín:

Si $\lambda \leq \lambda_p$, no hay PLP

Si $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ el patin es no compacto, y

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \leq M_p$$

2. Se revisa pandeo local del alma:

Si $\lambda \leq \lambda_p$, no hay PLA

Si $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ el alma es no compacto, y

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \leq M_p$$

3. Se revisa el pandeo lateral torsionante:

Si $L_b \leq L_p$, no hay PLT

Si $L_p < L_b \leq L_r$, se tiene PLT inelástico, y

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

Si $L_b > L_r$, se tiene PLT elástico y,

$$M_n = C_b \frac{\pi}{L_b} * \left[\sqrt{EI_y GJ} + \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L_b} \right)^2 I_y C_w} \right] \leq M_p$$

1.14.6 Diseño por flexión de vigas (AISI 1996)

C3.1 Resistencia para flexión exclusivamente

La resistencia nominal a la flexión, M_n , debe ser el menor de los valores calculados de acuerdo con las secciones C3.1.1 y C3.1.2, C3.1.3 ó C3.1.4 cuando corresponda.

C3.1.1 Resistencia nominal de la sección

La resistencia nominal a la flexión, M_n , se debe calcular ya sea en base a la iniciación de la fluencia en la sección efectiva (Procedimiento I) o en base a la capacidad de reserva inelástica (Procedimiento II) según corresponda.

Para secciones con alas comprimidas rigidizadas o parcialmente rigidizadas:

$$\Omega_b = 1,67 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_b = 0,95 \text{ (LRFD)}$$

Para secciones con alas comprimidas no rigidizadas:

$$\Omega_b = 1,67 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_b = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

(a) Procedimiento I - En base a la iniciación de la fluencia.

El momento de fluencia efectivo en base a la resistencia de la sección, M_n , se debe determinar de la siguiente manera:

$$M_n = S_e F_y \quad \text{(Ec. C3.1.1-1)}$$

donde

F_y = Tracción de fluencia de cálculo de acuerdo con lo determinado en la Sección A7.1

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

(b) Procedimiento II - En base a la capacidad de reserva inelástica.

La capacidad de reserva flexional inelástica se puede utilizar cuando se satisfacen las siguientes condiciones:

- (1) El miembro no está sujeto a torsión ni a pandeo lateral, torsional o torsional-flexional.
- (2) El efecto de la conformación en frío no se incluye al determinar el límite de fluencia F_y .
- (3) La relación entre la profundidad de la porción comprimida del alma y su espesor no es mayor que λ_1 .
- (4) El esfuerzo de corte no es mayor que $0,35F_y$ por la superficie del alma, h_t .
- (5) El ángulo entre cualquier alma y la vertical no es mayor que 30 grados.

La resistencia nominal a la flexión, M_n , no debe ser mayor que $1,25S_eF_y$ determinada de acuerdo con el procedimiento I ni que aquella que provoca una máxima deformación por compresión de $C_y e_y$ (no se limita la máxima deformación por tracción).

donde

e_y = Deformación de fluencia = F_y/E

E = Módulo de elasticidad longitudinal

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

(a) Elementos comprimidos rigidizados sin rigidizadores intermedios

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

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

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

donde

$$\lambda_1 = \frac{1,11}{\sqrt{F_y/E}} \tag{Ec. C3.1.1-2}$$

$$\lambda_2 = \frac{1,28}{\sqrt{F_y/E}} \tag{Ec. C3.1.1-3}$$

- (b) Elementos comprimidos no rigidizados $C_y = 1$
- (c) Elementos comprimidos con rigidización múltiple y elementos comprimidos con rigidizadores de borde $C_y = 1$

Cuando sea aplicable, para calcular las propiedades de la sección se deben utilizar los anchos efectivos de cálculo. M_n se debe calcular considerando el equilibrio de tensiones, suponiendo una curva tracción-deformación idealmente elastoplástica igual para compresión y tracción, suponiendo pequeñas deformaciones y suponiendo que las secciones planas permanecen planas durante la flexión. La combinación de flexión y abolladura del alma se debe verificar de acuerdo con los requisitos de la Sección C3.5.

C3.1.2 Resistencia al pandeo lateral

La resistencia nominal de los segmentos sin arriostramiento lateral de las secciones con simetría simple, simetría doble y simetría puntual* sujetas a pandeo lateral, M_n , se debe calcular de la siguiente manera:

$$M_n = S_c \frac{M_c}{S_f} \quad (Ec. C3.1.2-1)$$

$$\Omega_b = 1,67 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_b = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

donde,

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

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

M_c = Momento crítico calculado de la siguiente manera:

Para $M_e \leq 2,78M_y$

$$M_c = M_y \quad (Ec. C3.1.2-2)$$

Para $2,78M_y > M_e > 0,56M_y$

$$M_c = \frac{10}{9} M_y \left[1 - \frac{10 M_y}{36 M_e} \right]$$

Para $M_e \leq 0,56M_y$

$$M_c = M_e$$

Donde,

M_y = Momento que provoca la fluencia inicial en la fibra comprimida extrema de la totalidad de la sección

* Los requisitos de esta Sección se aplican para miembros de sección doble T, Z, C y otros miembros flexados con simetría simple (excluyendo tableros con múltiples almas, miembros de sección U, miembros tipo cajón se sección cerrada y arcos o miembros curvos). Los requisitos de esta Sección no se aplican a las alas comprimidas sin arriostamiento lateral de secciones que por lo demás son lateralmente estables. Para las correas de sección C y Z en las cuales el ala traccionada está unida al revestimiento, ver C3.1.3 AISI 1996.

$$M_y = S_f F_y \quad (Ec. C3.1.2-5)$$

M_e = Momento elástico crítico calculado de acuerdo con (a) o (b):

(a) Para secciones con simetría simple, doble y puntual:

$$M_e = C_b r_o A \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \text{ para flexión alrededor del eje de simetría.} \quad (Ec. C3.1.2-6)$$

Para secciones con simetría simple, el eje x es el eje de simetría orientado de manera tal que el centro de corte tiene una coordenada x negativa.

Para secciones con simetría puntual utilizar $0,5M_e$.

Alternativamente, M_e se puede calcular utilizando la ecuación para secciones doble T con simetría doble o secciones con simetría puntual dadas en (b)

$$M_e = C_s A \sigma_{ex} \left[j + C_s \sqrt{j^2 + r_o^2 (\sigma_t / \sigma_{ex})} \right] / C_{TF} \text{ para flexión alrededor del} \quad (Ec. C3.1.2-7)$$

eje baricéntrico perpendicular al eje de simetría sólo para secciones con simetría simple

$C_s = +1$ para momento que provoca compresión del lado del baricentro donde se encuentra el centro de corte

$C_s = -1$ para momento que provoca tracción del lado del baricentro donde se encuentra el centro de corte

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \quad (Ec. C3.1.2-8)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} \quad (Ec. C3.1.2-9)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (Ec. C 3.1.2-10)$$

A = Superficie total de la sección transversal

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (Ec. C3.1.2-11)$$

donde:

M_{max} = valor absoluto del momento máximo en el segmento no arriestrado

M_A = valor absoluto de momento correspondiente al punto ubicado a un cuarto del segmento no arriestrado

M_B = valor absoluto del momento en el eje del segmento no arriestrado

M_C = valor absoluto del momento correspondiente al punto ubicado a tres cuartos del segmento no arriostrado

En todos los casos está permitido tomar C_b igual a la unidad (valor conservador).

Para los voladizos en los cuales el extremo libre no está arriostrado, C_b se debe tomar igual a la unidad. Para los miembros sometidos a carga axial combinada con momento flector (Sección C5), C_b se debe tomar igual a la unidad

E = Módulo de elasticidad longitudinal

$$C_{TF} = 0,6 - 0,4 (M_1 / M_2) \quad (Ec. C3.1.2-12)$$

donde:

M_1 es el menor y M_2 es el mayor momento flector en los extremos de la longitud no arriostrada en el plano de flexión, y M_1/M_2 , relación entre los momentos de los extremos, es positiva cuando M_1 y M_2 tienen el mismo signo (flexión con curvatura inversa) y negativa cuando son de signos contrarios (flexión con curvatura simple). Cuando el momento flector en cualquier punto de una longitud no arriostrada es mayor que en los dos extremos de dicha longitud y para miembros sometidos a carga axial y momento flector (Sección C5), C_{TF} se debe tomar igual a la unidad.

r_o = Radio de giro polar de la totalidad de la sección transversal respecto al centro de corte

$$= \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} \quad (Ec. C3.1.2-13)$$

r_x, r_y = Radios de giro de la totalidad de la sección transversal respecto a los ejes principales baricéntricos

G = Módulo de elasticidad transversal

K_x, K_y, K_t = Factores de longitud efectiva para flexión alrededor de los ejes x y y , y para torsión

L_x, L_y, L_t = Longitud no arriostrada del miembro comprimido para flexión alrededor de los ejes x e y , y para torsión

x_0 = Distancia entre el centro de corte y el baricentro a lo largo del eje principal x , considerada negativa

J = Constante de torsión de St. Venant de la sección transversal

C_w = Constante de alabeo torsional de la sección transversal

$$j = \frac{1}{2I_y} \left[\int_A x^3 dA + \int_A xy^2 dA \right] - x_o \quad (\text{Ec. C3.1.2-14})$$

(b) Para secciones doble T o Z flexionadas alrededor del eje baricéntrico perpendicular al alma (eje x):

En vez de (a), para evaluar M_e se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$M_e = \frac{\pi^2 E C_b d I_{yc}}{L^2} \text{ para secciones doble T con simetría doble} \quad (\text{Ec. C3.1.2-15})$$

$$= \frac{\pi^2 E C_b d I_{yc}}{2L^2} \text{ para secciones Z con simetría puntual} \quad (\text{Ec. C3.1.2-16})$$

d = Profundidad de la sección

L = Longitud no arriostrada del miembro

I_{yc} = Momento de inercia de la porción comprimida de una sección respecto al eje baricéntrico de la totalidad de la sección paralelo al alma, utilizando la sección total, no reducida.

Los demás términos fueron definidos en (a).

1.14.7 Requisitos de soporte lateral

La mayor parte de las vigas se diseñan con la teoría simple de la flexión suponiendo un soporte lateral total y sin reducción de la capacidad total por flexión M_p . Cualquier viga con su patín de compresión firmemente unido a un sistema de piso o techo, proporcionará un soporte continuo o casi continuo que satisface esos requisitos.

Algunas condiciones para las cuales el soporte lateral puede ser menos que adecuado, son las siguientes:

- 1) Ninguna conexión positiva entre la viga y el sistema de carga que soporta, particularmente si las cargas son vibratorias o implican impacto.
- 2) EL sistema de soporte lateral es de tipo removible
- 3) El sistema de soporte lateral se conecta con un sistema paralelo de dos o más vigas similarmente cargadas sin anclaje positivo.

Existen muchos factores que afectan el valor del esfuerzo crítico del pandeo del patín de compresión de una viga. Algunos de estos factores son las propiedades del material, el espaciamiento y tipo de apoyos laterales suministrados, los tipos de apoyos en los extremos, las condiciones de carga, etc.

La tracción en el otro patín de la viga, tiende a mantenerlo recto y restringe el pandeo del patín a compresión; pero a medida que el momento flexionante aumenta, la tendencia al pandeo se hace lo suficientemente grande como para vencer la restricción de la tracción; cuando el patín a compresión empieza a pandearse, se presenta un fenómeno colateral de torsión, y entre menor sea la resistencia torsional de la viga, progresa más rápidamente la falla.

1.14.8 Limitaciones a las deflexiones de vigas

Las deflexiones de vigas bajo cargas vivas son a menudo limitadas para no perjudicar el servicio del piso o techo por agrietamiento del yeso, agrietamiento de la losa, distorsión de los muros divisorios u otras anomalías. Se imponen también límites a las deflexiones cuando la apariencia de la deflexión podría hacer pensar a los ocupantes que la estructura es insegura en alguna medida.

Las AISC establecen en la sección L3.1 que las deformaciones en miembros y sistemas estructurales debido a cargas de servicio no pondrán en peligro el servicio de la estructura. Sin embargo, no se dan límites específicos porque tales límites dependen de la función de la estructura. Depende por tanto, de la discreción y experiencia del ingeniero para seleccionar un límite adecuado. A falta de experiencia, es satisfactorio seleccionar el límite de la deflexión por carga viva a claro/360 y en volados luz del volado/500. Se deberá utilizar la teoría de vibraciones en pisos para garantizar el nivel de servicio. También es necesario evitar el encharcamiento. Se debe construir con contra flecha (camber) para garantizar cualquier deflexión visualmente perceptible.

Las vibraciones de entrepiso han sido categorizadas con respecto a la respuesta humana como sigue:

1. Las vibraciones, aunque presentes, no son percibidas por los ocupantes.
2. La vibración es percibida pero no causa molestia.
3. La vibración molesta y causa perturbación.
4. La vibración es tan severa que enferma a las personas.

La mayoría de los sistemas de entrepiso caen en las dos primeras categorías.

La perceptibilidad humana a vibraciones transitorias de entrepiso depende de tres factores: frecuencia, amplitud inicial y amortiguamiento. Aunque se han desarrollado un número de escalas para medir la sensibilidad humana en

estado estable (cero amortiguamiento), solo se dispone de dos escalas que incluyan los efectos del amortiguamiento: La escala Reiher-Meister modificada (1) y la escala Wiss-Parmelee.

La escala Reiher-Meister modificada relaciona los efectos de la amplitud y frecuencia a cuatro niveles de percepción humana.

1.14.9 Flexión biaxial de vigas

La flexión biaxial ocurre cuando una viga está sometida a una condición de carga que produce flexión alrededor del eje mayor (fuerte) y del eje menor (débil). Caso que se expone en la siguiente figura:

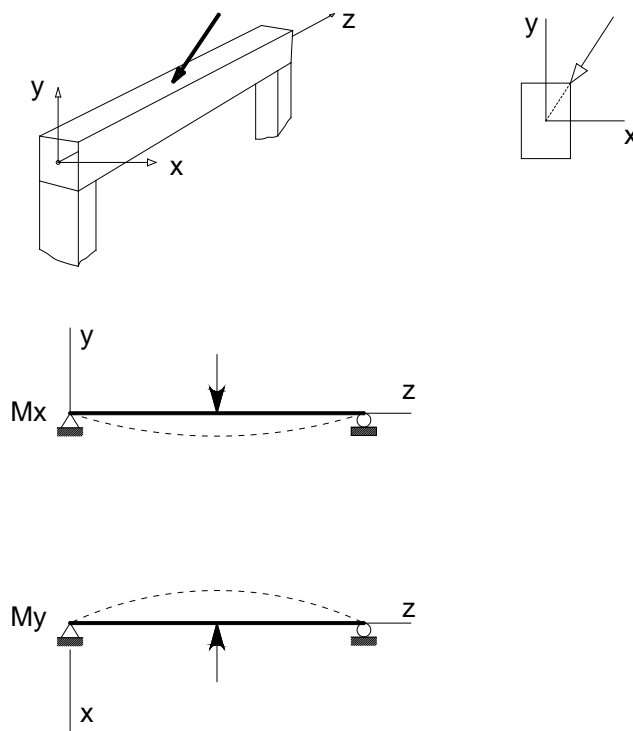


Fig. 21 Flexión Biaxial en vigas

Donde una sola carga concentrada actúa normalmente al eje longitudinal de la viga pero esta inclinada con respecto a cada uno de los ejes principales de la sección transversal. La carga pasa por el centro de cortante de la sección transversal. Siendo el centro de cortante el punto a través del cual las cargas deben actuar para que no haya torsión en la viga. La localización del centro de cortante puede determinarse con la mecánica elemental de materiales

igualando el momento torsor interno resistente, obtenido del flujo de cortante sobre la sección transversal, con el par externo. La posición del centro de cortante para los distintos tipos de secciones de perfiles deberá ser calculado, sabiendo que siempre está localizado sobre un eje de simetría; el centro de cortante está en el centroide de una sección transversal con dos ejes de simetría. Las especificaciones, tratan la carga combinada principalmente por medio del uso de las fórmulas de interacción, que toman en cuenta la importancia relativa de cada efecto de carga en relación a la resistencia correspondiente a ese efecto. Por ejemplo, si se tiene flexión solo respecto al eje x,

$$M_{ux} \leq \phi_b M_{nx} \quad \text{o} \quad \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \leq 1.0$$

Donde,

M_{ux} = momento flexionante por carga factorizada respecto al eje x

M_{nx} = resistencia nominal por momento respecto al eje x

Similarmente, si se tiene flexión solo alrededor del eje y, el requisito es

$$\frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$

Donde,

M_{uy} = momento flexionante por carga factorizada respecto al eje y

M_{ny} = resistencia nominal por momento respecto al eje y

Cuando ambos tipos de flexión están presentes, el enfoque de la fórmula de interacción requiere que la suma de las dos razones sea menor que 1; es decir,

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$

Cualquier perfil flexionado respecto a su eje débil no puede pandearse en la otra dirección, por lo que el pandeo lateral torsionante no es un estado limite. Si el perfil es compacto, entonces:

$$M_{ny} = M_{py} = F_y Z_y \leq 1.5 M_{yy}$$

Donde, $M_{yy} = F_y S_y$ = momento de fluencia para el eje y . Si el perfil es no compacto, la resistencia estará dada por la expresión de M_n para pandeo local del patín o por pandeo local del alma.

Es importante que se tenga presente que existen dos casos de aplicación de la carga lateral diagonal:

- 1) Carga a través del centro de cortante (flexión simple en dos direcciones)
- 2) Cargas no aplicadas por el centro de cortante (flexión con torsión)

En las especificaciones AISI se encuentra la combinación de compresión axial y flexión en la sección C5.2

1.14.10 Resistencia por cortante (AISI 1996)

La resistencia nominal al corte, V_n , en cualquier sección se debe calcular de la siguiente manera:

(a) Para $h/t \leq 0,96\sqrt{E k_v / F_y}$

$$V_n = 0,60 F_y h t \quad (\text{Ec. C3.2-1})$$

$$\Omega_v = 1,50 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_v = 1,0 \text{ (LRFD)}$$

(b) Para $0,96\sqrt{E k_v / F_y} < h/t \leq 1,415\sqrt{E k_v / F_y}$

$$V_n = 0,64 t^2 \sqrt{k_v F_y E} \quad (\text{Ec. C3.2-2})$$

$$\Omega_v = 1,67 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_v = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

(c) Para $h/t > 1,415\sqrt{E k_v / F_y}$

$$V_n = \frac{\pi^2 E k_v t^3}{12(1-\mu^2)h} = 0,905 E k_v t^3 / h \quad (\text{Ec. C3.2-3})$$

$$\Omega_v = 1,67 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_v = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

donde

V_n = Resistencia nominal al corte de la viga

t = Espesor del alma

h = Profundidad 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 B6

Cuando $a/h \leq 1,0$

$$k_v = 4,00 + \frac{5,34}{(a/h)^2} \quad (\text{Ec. C3.2-4})$$

Cuando $a/h > 1,0$

$$k_v = 5,34 + \frac{4,00}{(a/h)^2} \quad (\text{Ec. C3.2-5})$$

Donde,

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.

CAPITULO II

DISEÑO MANUAL A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN, APLICADO EL MÉTODO LRFD Y LAS NORMAS AISI PARA DISTINTOS TIPOS DE PERFILES QUE SE ENCUENTRAN EN CATÁLOGOS DE PRODUCCIÓN NACIONAL

2.1 CATÁLOGOS DE PERFILES DE PRODUCCIÓN NACIONAL

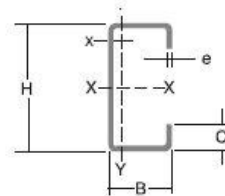
Luego de haber realizado la respectiva investigación se dispone de las siguientes tablas de perfilería conformada en frío de producción ecuatoriana y que están disponibles en la página web de cada empresa.

Correas "G"

ESPECIFICACIONES GENERALES

Largo normal: 6 metros.

Otras dimensiones o formas: A pedido, previa consulta.



Características Técnicas

| DIMENSIONES | | | | | PROPIEDADES | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|------|-------------------------|-----------------|---------|---------|-------|------|---------|------|------|------|--|
| H | B | C | e | Area cm ² | Peso Aproximado | | EJE X-X | | | EJE Y-Y | | | | |
| mm | mm | mm | mm | | Kg / m | Kg / 6m | I | S | rx | I | S | ry | x | |
| 60 | 30 | 10 | 1.50 | 1.95 | 1.49 | 8.96 | 11.02 | 3.67 | 2.38 | 2.43 | 1.25 | 1.12 | 1.06 | |
| | | | 1.80 | 2.31 | 1.79 | 10.75 | 12.84 | 4.28 | 2.36 | 2.79 | 1.44 | 1.10 | 1.06 | |
| | | | 2.00 | 2.54 | 1.99 | 11.94 | 13.98 | 4.66 | 2.35 | 3.01 | 2.85 | 1.09 | 1.06 | |
| | | | 3.00 | 3.61 | 2.83 | 16.98 | 18.90 | 6.30 | 2.29 | 3.87 | 3.69 | 1.04 | 1.05 | |
| 80 | 40 | 15 | 1.50 | 2.70 | 2.09 | 12.51 | 27.43 | 6.86 | 3.19 | 6.39 | 2.52 | 1.54 | 1.47 | |
| | | | 1.80 | 3.21 | 2.50 | 15.01 | 32.21 | 8.05 | 3.17 | 7.43 | 2.93 | 1.52 | 1.46 | |
| | | | 2.00 | 3.54 | 2.78 | 16.68 | 35.20 | 8.81 | 3.16 | 8.10 | 3.18 | 1.51 | 1.46 | |
| | | | 3.00 | 5.11 | 4.01 | 24.06 | 49.00 | 12.30 | 3.10 | 10.80 | 4.27 | 1.46 | 1.46 | |
| | | | 4.00 | 6.55 | 5.14 | 30.84 | 60.40 | 15.10 | 3.04 | 12.90 | 5.05 | 1.40 | 1.45 | |
| 100 | 50 | 15 | 1.80 | 3.93 | 3.08 | 18.50 | 63.07 | 12.61 | 4.01 | 13.74 | 4.20 | 1.87 | 1.73 | |
| | | | 2.00 | 4.27 | 3.40 | 20.40 | 67.50 | 13.50 | 3.98 | 14.50 | 4.41 | 1.84 | 1.73 | |
| | | | 3.00 | 6.31 | 4.95 | 29.70 | 97.80 | 19.60 | 3.94 | 20.50 | 6.25 | 1.80 | 1.72 | |
| | | | 4.00 | 8.15 | 6.40 | 38.40 | 122.00 | 24.50 | 3.88 | 24.90 | 7.55 | 1.75 | 1.71 | |
| 125 | 50 | 15 | 2.00 | 4.84 | 3.80 | 22.80 | 116.00 | 18.60 | 4.91 | 16.20 | 4.70 | 1.83 | 1.58 | |
| | | | 3.00 | 7.06 | 5.54 | 33.24 | 165.00 | 26.50 | 4.84 | 22.20 | 6.43 | 1.77 | 1.55 | |
| | | | 4.00 | 9.15 | 7.18 | 43.08 | 209.00 | 33.40 | 4.78 | 26.90 | 7.78 | 1.71 | 1.54 | |
| | | | 2.00 | 5.34 | 4.19 | 25.14 | 179.00 | 23.80 | 5.79 | 17.10 | 4.78 | 1.79 | 1.42 | |
| 150 | 50 | 15 | 3.00 | 7.81 | 6.13 | 36.78 | 255.00 | 34.00 | 5.72 | 23.50 | 6.56 | 1.73 | 1.42 | |
| | | | 4.00 | 10.10 | 7.79 | 47.82 | 323.00 | 43.10 | 5.65 | 28.50 | 7.95 | 1.68 | 1.41 | |
| | | | 2.00 | 6.34 | 4.99 | 29.94 | 355.00 | 35.50 | 7.48 | 18.60 | 4.91 | 1.71 | 1.21 | |
| 200 | 50 | 15 | 3.00 | 9.31 | 7.31 | 43.86 | 510.00 | 51.00 | 7.40 | 25.50 | 6.74 | 1.66 | 1.21 | |
| | | | 4.00 | 12.10 | 9.54 | 57.24 | 651.00 | 65.10 | 7.32 | 31.00 | 8.18 | 1.60 | 1.21 | |

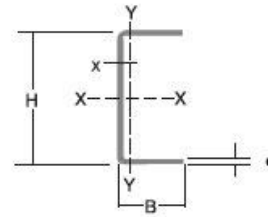
Fig. 22 Perfiles comerciales nacionales " tipo G" – Propiedades Geométricas

Canales "C"

ESPECIFICACIONES GENERALES

Largo normal: 6 metros.

Otras dimensiones o formas: A pedido, previa consulta.



Características Técnicas

| DIMENSIONES | | | PROPIEDADES | | | | | | | | | |
|-------------|---------|---------|-------------------------|--------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| H mm | B mm | e mm | Area cm ² | Peso Aproximado Kg / m Kg / 6m | | EJE X-X | | | EJE Y-Y | | | |
| | | | | | | I cm ⁴ | S cm ³ | r _x cm | I cm ⁴ | S cm ³ | r _y cm | x cm |
| 50 | 25 | 1.50 | 1.42 | 1.11 | 6.66 | 5.48 | 2.19 | 1.97 | 0.87 | 0.48 | 0.78 | 0.70 |
| | | 1.80 | 1.69 | 1.33 | 7.98 | 6.44 | 2.58 | 1.95 | 1.03 | 0.58 | 0.78 | 0.71 |
| | | 2.00 | 1.87 | 1.47 | 8.82 | 7.06 | 2.83 | 1.94 | 1.13 | 0.63 | 0.78 | 0.72 |
| | | 3.00 | 2.70 | 2.12 | 12.72 | 9.70 | 3.88 | 1.89 | 1.57 | 0.91 | 0.76 | 0.77 |
| 80 | 40 | 1.80 | 2.77 | 2.17 | 13.01 | 28.05 | 7.01 | 3.18 | 4.44 | 1.52 | 1.27 | 1.08 |
| | | 2.00 | 3.07 | 2.41 | 14.46 | 30.80 | 7.71 | 3.17 | 4.89 | 1.68 | 1.26 | 1.09 |
| | | 3.00 | 4.50 | 3.54 | 21.24 | 43.90 | 11.00 | 3.12 | 7.01 | 2.45 | 1.25 | 1.14 |
| | | 4.00 | 5.87 | 4.61 | 27.66 | 55.40 | 13.90 | 3.07 | 8.92 | 3.17 | 1.23 | 1.19 |
| 100 | 50 | 1.80 | 3.49 | 2.74 | 16.45 | 55.81 | 11.16 | 4.00 | 8.82 | 2.40 | 1.59 | 1.33 |
| | | 2.00 | 3.87 | 3.04 | 18.24 | 61.50 | 12.30 | 3.99 | 9.72 | 2.66 | 1.59 | 1.34 |
| | | 3.00 | 5.70 | 4.48 | 26.88 | 88.50 | 17.70 | 3.91 | 14.10 | 3.90 | 1.57 | 1.39 |
| | | 4.00 | 7.47 | 5.87 | 35.22 | 113.00 | 22.60 | 3.89 | 18.10 | 5.07 | 1.56 | 1.44 |
| 125 | 50 | 2.00 | 4.37 | 3.43 | 20.58 | 103.00 | 16.50 | 4.86 | 10.40 | 2.74 | 1.54 | 1.20 |
| | | 3.00 | 6.45 | 5.07 | 30.42 | 149.00 | 23.90 | 4.81 | 15.10 | 4.02 | 1.53 | 1.24 |
| | | 4.00 | 8.47 | 6.65 | 39.90 | 192.00 | 30.70 | 4.76 | 19.40 | 5.24 | 1.51 | 1.29 |
| 150 | 50 | 2.00 | 4.87 | 3.82 | 22.92 | 138.00 | 21.10 | 5.71 | 10.90 | 2.80 | 1.50 | 1.09 |
| | | 3.00 | 7.20 | 5.66 | 33.96 | 230.00 | 30.70 | 5.65 | 15.90 | 4.11 | 1.49 | 1.13 |
| | | 4.00 | 9.47 | 7.44 | 44.64 | 297.00 | 39.60 | 5.60 | 20.50 | 5.36 | 1.47 | 1.17 |
| 200 | 50 | 2.00 | 5.87 | 4.61 | 27.66 | 316.00 | 31.60 | 7.34 | 11.80 | 2.88 | 1.42 | 0.92 |
| | | 3.00 | 8.70 | 6.83 | 40.98 | 462.00 | 46.20 | 7.29 | 17.10 | 4.23 | 1.40 | 0.96 |

Fig. 23 Perfiles comerciales nacionales " tipo C" – Propiedades Geométricas

2.2 CALCULO POR EL MÉTODO LINEAL DE VARIOS PERFILES

Si los espesores de las secciones formadas en frío son uniformes, el cálculo de las propiedades mecánicas de tales secciones puede ser simplificado por el uso del “Método Lineal”. En este método el material de la sección se considera que está concentrado a lo largo del centro medio del espesor de la chapa y los elementos de área son reemplazados por elementos lineales rectos o curvos.

El espesor (t) es introducido después que los cálculos lineales han sido determinados. Entonces el área total será ($A = L \cdot t$) y el momento de inercia de la sección será ($I = I' \cdot t$)

Donde:

L Longitud total de todos los elementos lineales de la sección.

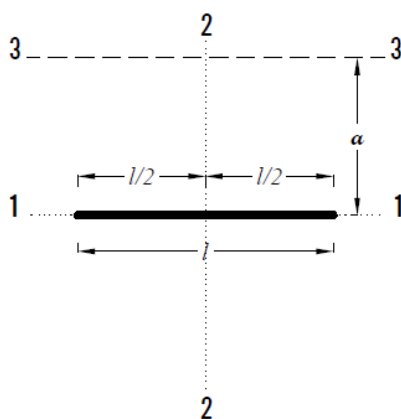
I' Momento de inercia de la línea media de la sección

t Espesor de la plancha de la sección.

Los elementos lineales típicos así como sus propiedades mecánicas son mostrados a continuación:

Elementos rectos

Primer Caso:

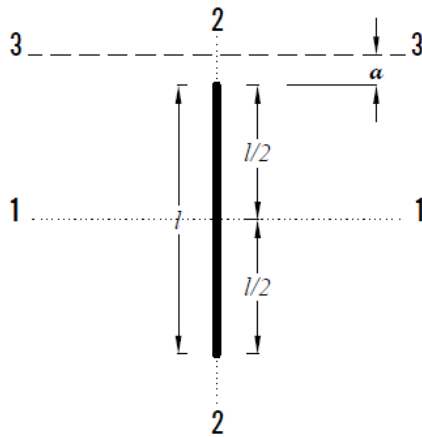


$$I_1 = 0$$

$$I_2 = \frac{l^3}{12}$$

$$I_3 = l \cdot a^2$$

Segundo Caso:



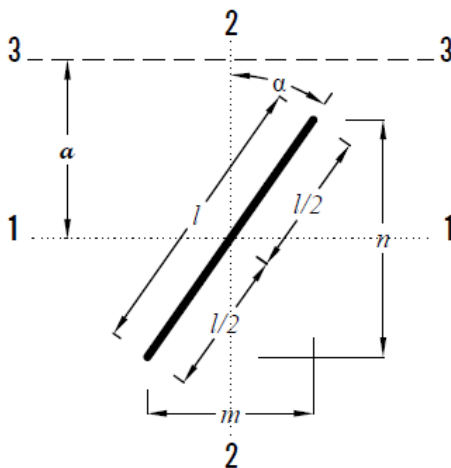
$$I_1 = \frac{l^3}{12}$$

$$I_2 = 0$$

$$I_3 = l \cdot a^2 + \frac{l^3}{12} = l \cdot \left(a^2 + \frac{l^2}{12} \right)$$

Tercer Caso:

Tenemos que: α (expresado en radianes) = $0.01745 \cdot \alpha$ (Expresado en grados)



$$I_1 = \frac{\cos^2 \alpha}{12} \cdot l^3 = \frac{l \cdot n^2}{12}$$

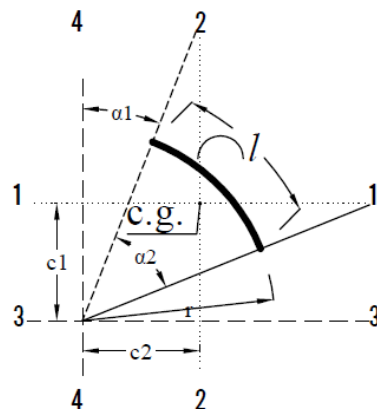
$$I_2 = \frac{\sin^2 \alpha}{12} \cdot l^3 = \frac{l \cdot m^2}{12}$$

$$I_{12} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \alpha}{12} \cdot l^3 = \frac{l \cdot m \cdot n}{12}$$

$$I_3 = l \cdot a^2 + \frac{l \cdot n^2}{12} = l \cdot \left(a^2 + \frac{n^2}{12} \right)$$

Elementos curvos

Cuarto Caso:



$$l = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot r$$

$$c_1 = \frac{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot r$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot r$$

$$I_1 = \left[\frac{\alpha_2 - \alpha_1 + \text{sen } \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 - \text{sen } \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} - \frac{(\text{sen } \alpha_2 - \text{sen } \alpha_1)^2}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] \cdot r^3$$

$$I_2 = \left[\frac{\alpha_2 - \alpha_1 - \text{sen } \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \text{sen } \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} - \frac{(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)^2}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] \cdot r^3$$

$$I_{12} = \left[\frac{(\text{sen}^2 \alpha_2 - \text{sen}^2 \alpha_1)}{2} + \frac{(\text{sen } \alpha_2 - \text{sen } \alpha_1) \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] \cdot r^3$$

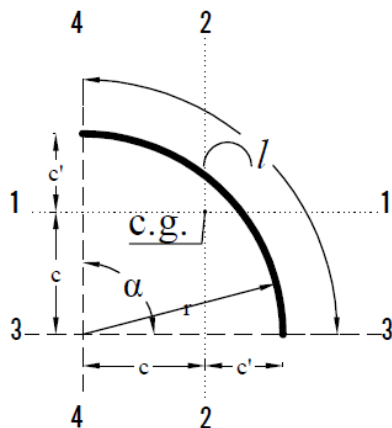
$$I_3 = \left[\frac{\alpha_2 - \alpha_1 + \text{sen } \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 - \text{sen } \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} \right] \cdot r^3$$

$$I_4 = \left[\frac{\alpha_2 - \alpha_1 - \text{sen } \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \text{sen } \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} \right] \cdot r^3$$

$$I_{34} = \left(\frac{\text{sen}^2 \alpha_2 - \text{sen}^2 \alpha_1}{2} \right) \cdot r^3$$

Quinto Caso

Cuando $\alpha_1 = 0$ y $\alpha_2 = 90^\circ$ tenemos que:



$$l = 1,57 \cdot r$$

$$c = 0,637 \cdot r$$

$$c' = 0,363 \cdot r$$

$$I_1 = I_2 = 0,149 \cdot r^3$$

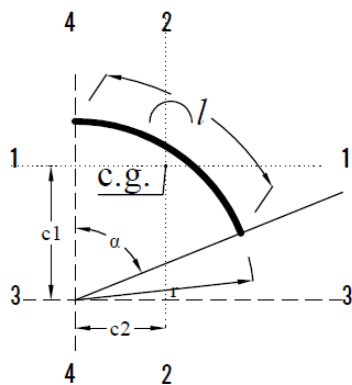
$$I_{12} = -0,137 \cdot r^3$$

$$I_3 = I_4 = 0,785 \cdot r^3$$

$$I_{34} = 0,50 \cdot r^3$$

Sexto Caso

Cuando $\alpha_1 = 0$ y $\alpha_2 = \alpha$ tenemos que:



$$l = \alpha \cdot r$$

$$c_1 = \frac{r \cdot \text{sen } \alpha}{\alpha}$$

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

$$I_1 = \left(\frac{\alpha + \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha}{2} - \frac{\text{sen}^2 \alpha}{\alpha} \right) \cdot r^3$$

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

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

$$I_3 = \left(\frac{\alpha + \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha}{2} \right) \cdot r^3$$

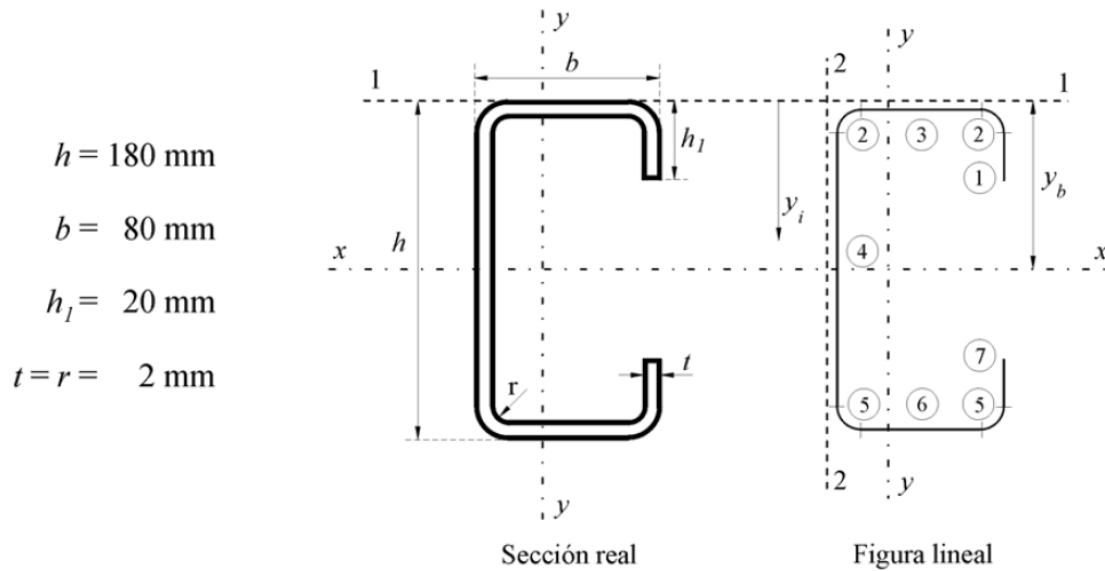
$$I_4 = \left(\frac{\alpha - \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha}{2} \right) \cdot r^3$$

$$I_{34} = \frac{\text{sen}^2 \alpha}{2} \cdot r^3$$

Luego de haber visto la metodología del método procedemos a realizar el cálculo de algunas secciones de perfiles.

Ejemplo 1:

Se da un ejemplo de cómo calcular el área, el momento de inercia, el módulo resistente, etc. de una sección utilizando el método lineal.



| Elemento N^o | l_i cm | n_i | $l_i \cdot n_i$ cm | y_i cm | $l_i \cdot n_i \cdot y_i$ cm ² | $l_i \cdot n_i \cdot y_i^2$ cm ³ | I_{exi} cm ³ |
|-------------------|-------------|-------|-----------------------|-------------|--|--|------------------------------|
| ① | 1,60 | 1 | 1,60 | 1,20 | 1,92 | 2,30 | 0,34 |
| ② | 0,47 | 2 | 0,94 | 0,21 | 0,20 | 0,04 | 0,00 |
| ③ | 7,20 | 1 | 7,20 | 0,10 | 0,72 | 0,07 | 0,00 |
| ④ | 17,20 | 1 | 17,20 | 9,00 | 154,80 | 1.393,20 | 424,04 |
| ⑤ | 0,47 | 2 | 0,94 | 17,79 | 16,76 | 298,16 | 0,00 |
| ⑥ | 7,20 | 1 | 7,20 | 17,90 | 128,88 | 2.306,95 | 0,00 |
| ⑦ | 1,60 | 1 | 1,60 | 16,80 | 26,88 | 451,58 | 0,34 |
| Σ | - | - | 36,68 | - | 330,16 | 4.452,30 | 424,72 |

Para obtener las características geométricas de la sección se utiliza, por ejemplo, una planilla similar a la anterior, que se adapta a las necesidades del cálculo, a partir de ella, entre otras, se puede obtener:

El área

$$A = \left(\sum l_i \cdot n_i \right) \cdot t = 36,68 \cdot 0,20 = 7,34 \text{ cm}^2$$

l_i son las longitudes de los distintos elementos descontados los redondeos del plegado. Cuando se reduce el ancho de cálculo b de un elemento comprimido rigidizado por motivo de cálculo, el ancho efectivo de cálculo b_e , se utiliza directamente para calcular la longitud efectiva total de los elementos lineales.

n_i las cantidades de elementos que tiene la sección.

$\sum l_i \cdot n_i$ es la longitud total de todos los elementos lineales.

El momento de inercia

$$I_x = \left(\sum l_i \cdot n_i \cdot y_i^2 + \sum I_{ex} - y_b^2 \cdot \sum l_i \cdot n_i \right) \cdot t =$$

$$(4452,30 + 424,72 - 9,00^2 \cdot 36,68) \cdot 0,20 = 381,19 \text{ cm}^2$$

I_x es el momento de inercia baricéntrico de la sección respecto al eje x-x.

y_i son las distancias del eje de referencia 1-1 al eje baricéntrico de cada elemento.

I_{exi} son los momentos de inercia baricéntrico de cada elemento lineal.

y_b es la distancia del eje neutro a la fibra extrema del perfil (no a la línea central del elemento extremo). Se lo calcula directamente del método lineal, ya que no depende del espesor y su valor es:

$$y_b = \frac{\sum l_i \cdot n_i \cdot y_i}{\sum l_i \cdot n_i} = \frac{330,16}{36,68} = 9,00 \text{ cm}$$

El módulo resistente

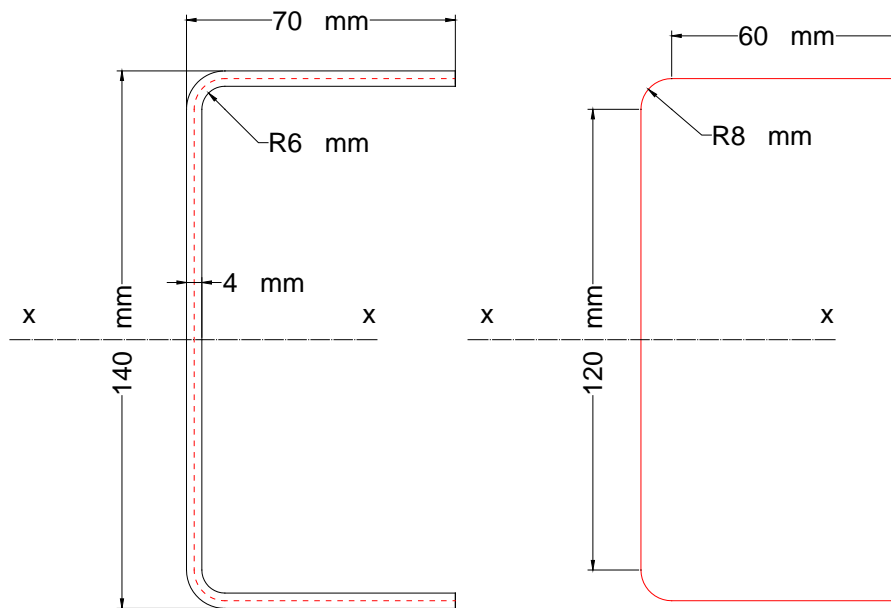
$$W_x = \frac{I_x}{y_b} = \frac{381,19}{9,00} = 42,35 \text{ cm}^3$$

El radio de giro

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{381,19}{7,34}} = 7,21 \text{ cm}$$

Ejemplo 2:

Determine el área, momento de inercia y módulo de sección de la Figura.



La línea central de la sección transversal aparece en la Figura B y se determina como sigue:

1. Longitud de las alas (Elemento 1)

$$L_{\text{ala}} = 70 - (r + t) = 70 - (6 + 4) = 60 \text{ mm} = 6 \text{ cm}$$

2. Distancia del eje x-x a la línea central del ala.

$$Y_{\text{ala}} = 70 - t / 2 = 70 - 4 / 2 = 68 \text{ mm} = 6,8 \text{ cm}$$

3. Cálculo de las propiedades de las esquinas a 90° (Elemento 2)

$$R = r + t / 2 = 6 + 4 / 2 = 8 \text{ mm} = 0,8 \text{ cm}$$

$$L_c = 1,57 R = 1,57 (0,8) = 1,256 \text{ cm}$$

$$c = 0,637 R = 0,637 (0,8) = 0,5096 \text{ cm}$$

4. Longitud del alma (Elemento 3)

$$L_{\text{alma}} = 140 - 2 (r + t) = 140 - 2 (6 + 4) = 120 \text{ mm} = 12 \text{ cm}$$

5. Distancia del eje x-x al centro de gravedad de las esquinas.

$$Y = L_{\text{alma}} / 2 + c = 12 / 2 + 0,5096 = 6,5096 \text{ cm}$$

6. Cálculo de la longitud total de la sección.

$$L_t = 2 L_{\text{ala}} + 2 L_c + L_{\text{alma}} = 2 \cdot 6 + 2 \cdot 1,256 + 12 = 26,512 \text{ cm}$$

7. Cálculo del área de la sección.

$$A = L_t \cdot t = 26,512 \cdot 0,4 = 10,6048 \text{ cm}^2$$

$$A = 10,6 \text{ cm}^2$$

8. Cálculo del momento de inercia lineal I'_x .

$$I'_x = 2 I'_{\text{alas}} + I'_{\text{alma}} + 2 I'_{\text{esq}}$$

$$I'_{\text{alas}} = L_{\text{ala}} \cdot (Y_{\text{ala}})^2 = 6 \cdot (6,8)^2 = 277,44 \text{ cm}^3$$

$$I'_{\text{alma}} = (1 / 12) (L_{\text{alma}})^3$$

$$= (1 / 12) (12)^3 = 144 \text{ cm}^3.$$

$$I'_{\text{esq}} = L_c \cdot Y_2 = 1,256 (6,5096)^2 = 53,22 \text{ cm}^3$$

$$I'_x = 2 \cdot 277,44 + 144 + 2 \cdot 53,22$$

$$I'_x = 805,32 \text{ cm}^3$$

9. Momento de inercia I_x .

$$I_x = I'_x \cdot t = 805,32 \cdot 0,4$$

$$I_x = 322,128 \text{ cm}^4$$

10. Módulo de sección S_x .

$$S_x = I_x / (h / 2) = 322,128 / 7$$

$$S_x = 46,02 \text{ cm}^3$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{322,128}{10,60}} = 5,51 \text{ cm}$$

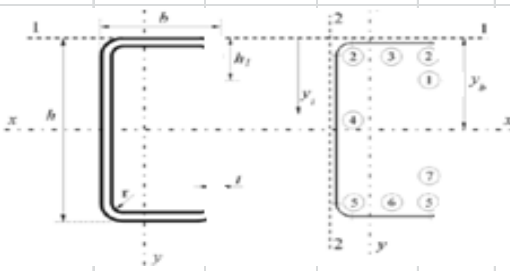
Los valores del área, momento de inercia y módulo de sección que proporciona el fabricante son:

$$A = 10,6 \text{ cm}^2 \quad I_x = 322 \text{ cm}^4 \quad S_x = 46 \text{ cm}^3$$

A continuación se aplica la formulación en una hoja de cálculo electrónica para poder realizar los siguientes ejercicios.

Se resuelve el ejercicio anterior y se pueden comprobar que los resultados son iguales.

| Cálculo propiedades de la Sección | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | mm | cm | | | | | | | | | | |
| H | 140.00 | 14.00 | | | | | | | | | | |
| B inf | 70.00 | 7.00 | | | | | | | | | | |
| b sup | 70.00 | 7.00 | | | | | | | | | | |
| e | 4.00 | 0.40 | | | | | | | | | | |
| r | 6.00 | 0.60 | | | | | | | | | | |

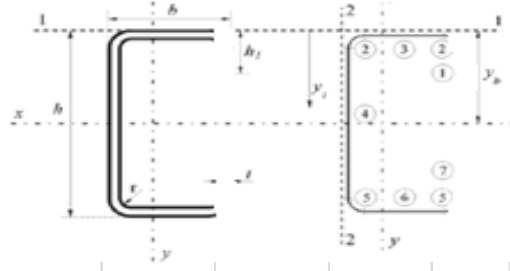


| Elemento | li cm | ni | lini cm | yi cm | liniyi cm2 | liniyi2 cm3 | lexi cm3 | xi cm | linixi cm2 | linixi2 cm3 | leyi cm3 |
|-----------------------|-------|------|--------------|-------|---------------|----------------|---------------|-------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 6.00 | 1.00 | 6.00 | 0.20 | 1.20 | 0.24 | 0.00 | 3.00 | 18.00 | 54.00 | 18.00 |
| 2 | 1.26 | 1.00 | 1.26 | 0.49 | 0.62 | 0.30 | 0.08 | 6.51 | 8.18 | 53.22 | 0.08 |
| 3 | 12.00 | 1.00 | 12.00 | 7.00 | 84.00 | 588.00 | 144.00 | 6.80 | 81.60 | 554.88 | 0.00 |
| 4 | 1.26 | 1.00 | 1.26 | 13.51 | 16.97 | 229.23 | 0.08 | 6.51 | 8.18 | 53.22 | 0.08 |
| 5 | 6.00 | 1.00 | 6.00 | 13.80 | 82.80 | 1142.64 | 0.00 | 3.00 | 18.00 | 54.00 | 18.00 |
| totales sin redondear | | | 26.51 | | 185.58 | 1960.41 | 144.15 | | 133.95 | 769.33 | 36.15 |

| | | | | | | | |
|-------------|--------------|----------------|---------------|--------------------|--------------|-----------------|------|
| Area | 10.60 | Inercia | | Mod seccion | | Rad Giro | |
| yb | 7.00 | ix | 322.19 | x | 46.03 | ix | 5.51 |
| xb | 5.05 | ly | 51.47 | y | 10.19 | iy | 2.20 |
| xg | 1.95 | | | | | | |

Ejemplo 3:

| Cálculo propiedades de la Sección | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | mm | cm | | | | | | | | | | |
| H | 150.00 | 15.00 | | | | | | | | | | |
| B inf | 50.00 | 5.00 | | | | | | | | | | |
| b sup | 50.00 | 5.00 | | | | | | | | | | |
| e | 2.00 | 0.20 | | | | | | | | | | |
| r | 2.00 | 0.20 | | | | | | | | | | |



| Elemento | li cm | ni | lini cm | yi cm | liniyi cm2 | liniyi2 cm3 | lexi cm3 | xi cm | linixi cm2 | linixi2 cm3 | leyi cm3 |
|-----------------------|-------|------|--------------|-------|---------------|----------------|---------------|-------|--------------|---------------|--------------|
| 1 | 4.60 | 1.00 | 4.60 | 0.10 | 0.46 | 0.05 | 0.00 | 2.30 | 10.58 | 24.33 | 8.11 |
| 2 | 0.47 | 1.00 | 0.47 | 0.21 | 0.10 | 0.02 | 0.00 | 4.79 | 2.26 | 10.81 | 0.00 |
| 3 | 14.20 | 1.00 | 14.20 | 7.50 | 106.50 | 798.75 | 238.61 | 4.90 | 69.58 | 340.94 | 0.00 |
| 4 | 0.47 | 1.00 | 0.47 | 14.79 | 6.97 | 103.04 | 0.00 | 4.79 | 2.26 | 10.81 | 0.00 |
| 5 | 4.60 | 1.00 | 4.60 | 14.90 | 68.54 | 1021.25 | 0.00 | 2.30 | 10.58 | 24.33 | 8.11 |
| totales sin redondear | | | 24.34 | | 182.57 | 1923.11 | 238.62 | | 95.25 | 411.23 | 16.23 |

| | | | | | | | |
|-------------|-------------|----------------|--------|--------------------|-------|-----------------|------|
| Area | 4.87 | Inercia | | Mod seccion | | Rad Giro | |
| yb | 7.50 | ix | 158.50 | x | 21.13 | ix | 5.71 |
| xb | 3.91 | ly | 10.95 | y | 2.80 | iy | 1.50 |
| xg | 1.09 | | | | | | |

Se realiza una hoja de cálculo para la sección tipo G.

Ejemplo 4:

| Cálculo propiedades de la Sección | | | |
|-----------------------------------|--------|-----|--------|
| | mm | cm | ρ |
| H | 180.00 | 18 | 1.00 |
| B inf. | 80.00 | 8 | 1.00 |
| b1 sup. | 80.00 | 8 | 1.00 |
| D | 20.00 | 2 | 1.00 |
| t | 2.00 | 0.2 | 1.00 |
| r | 2.00 | 0.2 | 1.00 |

| Elemento | li cm | ni | lini cm | yi cm | liniyi cm2 | liniyi2 cm3 | lexi cm3 | xi cm | linixi cm2 | linixi2 cm3 | leyi cm3 |
|------------------------------|---------|--------|---------------|-------|----------------|-----------------|----------------|--------|---------------|----------------|---------------|
| 1 | 1.6000 | 1.0000 | 1.6000 | 1.20 | 1.9200 | 2.3040 | 0.3413 | 7.9000 | 12.6400 | 99.8560 | 0.0000 |
| 2 | 0.4710 | 2.0000 | 0.9420 | 0.21 | 0.1968 | 0.0411 | 0.0040 | 0.2089 | 0.1968 | 0.0411 | 0.0040 |
| 3 | 7.2000 | 1.0000 | 7.2000 | 0.10 | 0.7200 | 0.0720 | 0.0000 | 4.0000 | 28.8000 | 115.2000 | 31.1040 |
| 4 | 17.2000 | 1.0000 | 17.2000 | 9.00 | 154.8000 | 1393.2000 | 424.0373 | 0.1000 | 1.7200 | 0.1720 | 0.0000 |
| 5 | 0.4710 | 2.0000 | 0.9420 | 17.79 | 16.7592 | 298.1649 | 0.0040 | 7.7911 | 7.3392 | 57.1806 | 0.0040 |
| 6 | 7.2000 | 1.0000 | 7.2000 | 17.90 | 128.8800 | 2306.9520 | 0.0000 | 4.0000 | 28.8000 | 115.2000 | 31.1040 |
| 7 | 1.6000 | 1.0000 | 1.6000 | 16.80 | 26.8800 | 451.5840 | 0.3413 | 7.9000 | 12.6400 | 99.8560 | 0.0000 |
| totales sin redondear | | | 36.684 | | 330.156 | 4452.318 | 424.728 | | 92.136 | 487.506 | 62.216 |

| | | | | | | | |
|-----|-------|----------|--------|-------------|-------|----------|------|
| A = | 7.337 | Inercias | | Mod seccion | | Rad Giro | |
| xb | 2.51 | lx | 381.13 | Sx | 42.35 | rx | 7.21 |
| yb | 9.00 | ly | 63.66 | Sy | 11.60 | ry | 2.95 |

Como se puede ver es el ejemplo 1, resuelto en la hoja de cálculo y coinciden todos los valores.

Ejemplo 5:

| Cálculo propiedades de la Sección | | | |
|-----------------------------------|--------|-----|--------|
| | mm | cm | ρ |
| H | 150.00 | 15 | 1.00 |
| B inf. | 50.00 | 5 | 1.00 |
| b1 sup. | 50.00 | 5 | 1.00 |
| D | 15.00 | 1.5 | 1.00 |
| t | 2.00 | 0.2 | 1.00 |
| r | 2.00 | 0.2 | 1.00 |

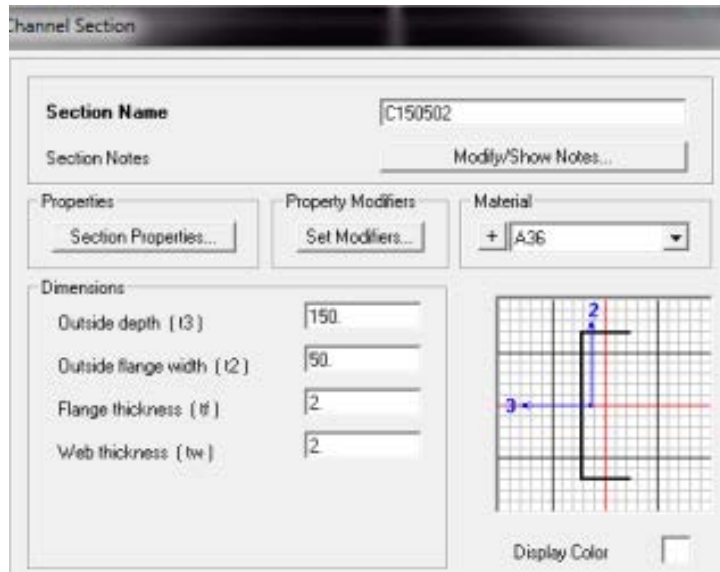
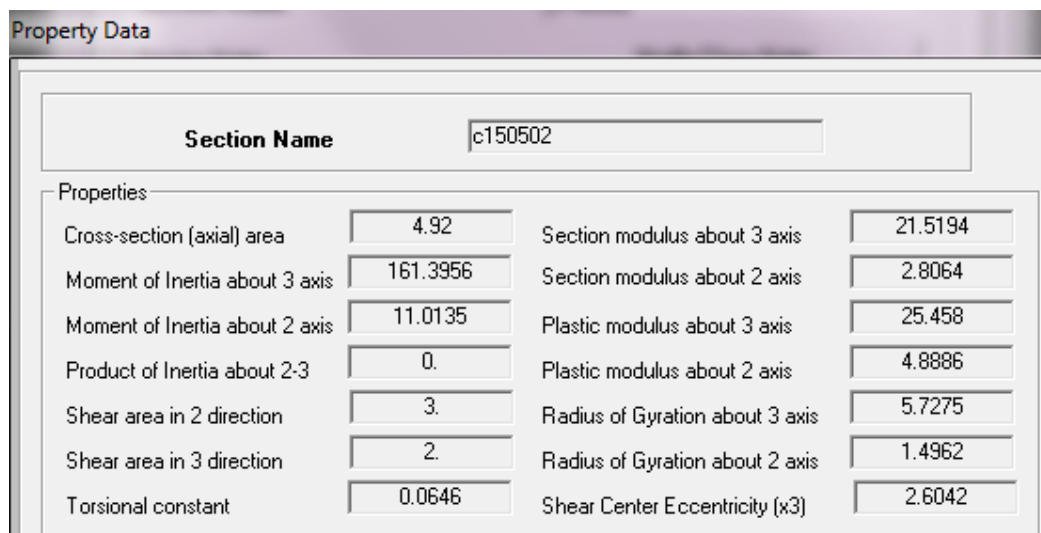
| Elemento | li cm | ni | lini cm | yi cm | liniyi cm2 | liniyi2 cm3 | lexi cm3 | xi cm | linixi cm2 | linixi2 cm3 | leyi cm3 |
|------------------------------|---------|--------|---------------|-------|----------------|-----------------|----------------|--------|---------------|----------------|---------------|
| 1 | 1.1000 | 1.0000 | 1.1000 | 0.95 | 1.0450 | 0.9928 | 0.1109 | 4.9000 | 5.3900 | 26.4110 | 0.0000 |
| 2 | 0.4710 | 2.0000 | 0.9420 | 0.21 | 0.1968 | 0.0411 | 0.0040 | 0.2089 | 0.1968 | 0.0411 | 0.0040 |
| 3 | 4.2000 | 1.0000 | 4.2000 | 0.10 | 0.4200 | 0.0420 | 0.0000 | 2.5000 | 10.5000 | 26.2500 | 6.1740 |
| 4 | 14.2000 | 1.0000 | 14.2000 | 7.50 | 106.5000 | 798.7500 | 238.6073 | 0.1000 | 1.4200 | 0.1420 | 0.0000 |
| 5 | 0.4710 | 2.0000 | 0.9420 | 14.79 | 13.9332 | 206.0876 | 0.0040 | 4.7911 | 4.5132 | 21.6233 | 0.0040 |
| 6 | 4.2000 | 1.0000 | 4.2000 | 14.90 | 62.5800 | 932.4420 | 0.0000 | 2.5000 | 10.5000 | 26.2500 | 6.1740 |
| 7 | 1.1000 | 1.0000 | 1.1000 | 14.05 | 15.4550 | 217.1428 | 0.1109 | 4.9000 | 5.3900 | 26.4110 | 0.0000 |
| totales sin redondear | | | 26.684 | | 200.130 | 2155.498 | 238.837 | | 37.910 | 127.128 | 12.356 |

| | | | | | | | |
|-----|-------|----------|--------|-------------|-------|----------|------|
| A = | 5.337 | Inercias | | Mod seccion | | Rad Giro | |
| xb | 1.42 | lx | 178.67 | Sx | 23.82 | rx | 5.79 |
| yb | 7.50 | ly | 17.13 | Sy | 4.78 | ry | 1.79 |

Nota: las unidades de los resultados están en cm(radio de giro), cm²(área), cm³(módulo de sección), cm⁴(momentos de inercia)

2.3 CALCULO CON EL SAP 2000 DE VARIOS PERFILES

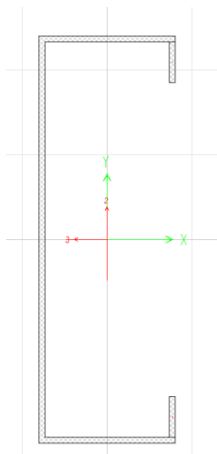
Ejemplo 6:

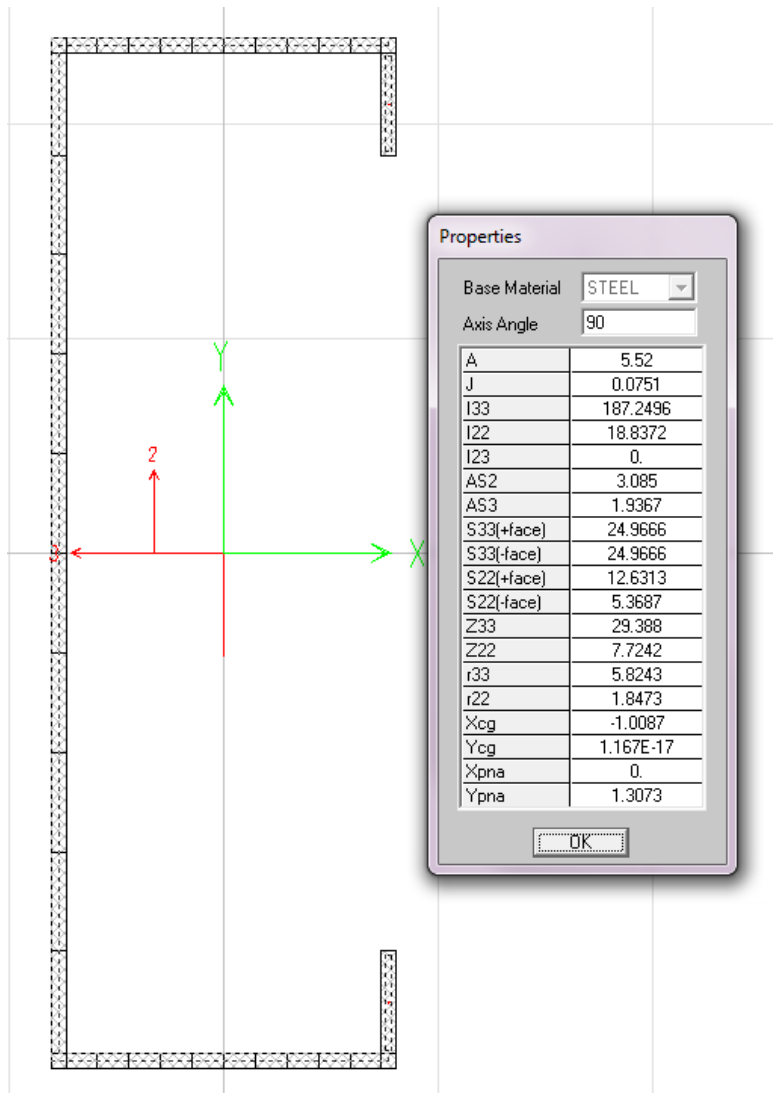
| Section Name: c150502 | | | |
|--------------------------------|----------|---------------------------------|---------|
| Cross-section (axial) area | 4.92 | Section modulus about 3 axis | 21.5194 |
| Moment of Inertia about 3 axis | 161.3956 | Section modulus about 2 axis | 2.8064 |
| Moment of Inertia about 2 axis | 11.0135 | Plastic modulus about 3 axis | 25.458 |
| Product of Inertia about 2-3 | 0. | Plastic modulus about 2 axis | 4.8886 |
| Shear area in 2 direction | 3. | Radius of Gyration about 3 axis | 5.7275 |
| Shear area in 3 direction | 2. | Radius of Gyration about 2 axis | 1.4962 |
| Torsional constant | 0.0646 | Shear Center Eccentricity (x3) | 2.6042 |

En el SAP 2000, no se aplica el radio de curvatura de los ángulos del perfil, es por esta razón la variación con los resultados del método lineal.

Ejemplo 7: G:150*50*15*2

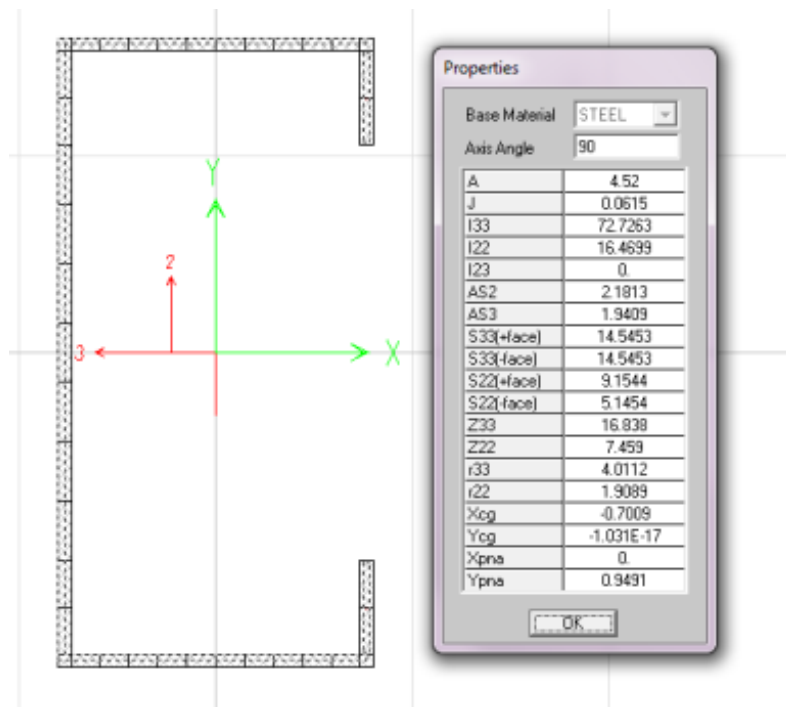


Dibujamos un perfil tipo G en el módulo de dibujo de secciones del software ETABS 9.7.4, y como resultado de la sección tenemos:



De igual forma no se considera los ángulos redondeados del perfil por lo que difiere en cierto valor los valores del cálculo de propiedades de la sección.

Ejemplo 8: G:100*50*15*2



La exactitud del método lineal para calcular las propiedades mecánicas de una sección depende de los espesores de las planchas de acero que se usen en la configuración de ella. Para los espesores de las planchas de acero generalmente usadas en la construcción de perfiles formados en frío el error en el momento de inercia determinado por el método lineal es usualmente despreciable, particularmente para secciones relativamente altas hechas de material fino. Por lo tanto se concluye que los resultados por el cálculo manual, en la hoja de cálculo y en un “software” comercial como el SAP 2000, son semejantes y es aceptable la metodología para ser aplicada en el diseño a compresión y a flexión que se plantea en el “software” del presente estudio.

2.4 COMPROBACIÓN CON EL CÁLCULO Y LOS CATÁLOGOS

Ahora nos centramos en dos secciones para comprobar lo indicado en los catálogos y el cálculo mediante la hoja de cálculo.

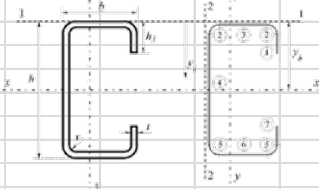
Seleccionamos un perfil G y un perfil U de un productor nacional, como se ve a continuación.

Luego ingresamos las propiedades en el programa automatizado del Excel propuesto como una parte de este trabajo investigativo.



| Designaciones | | | | Área | Peso | Propiedades Estáticas | | | | | | |
|---------------|----|----|------|-----------------|-------|-----------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|
| | | | | | | Eje x-x | | | Eje y-y | | | |
| | | | | | | Momento de inercia | Módulo de resistencia | Radio de giro | Momento de inercia | Módulo de resistencia | Radio de giro | Distancia de eje menor y superior |
| H | B | c | e | A | P | I | W | i | I | W | i | X |
| mm | mm | mm | mm | cm ² | kg/m | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm |
| 150 | 50 | 15 | 1,50 | 4,05 | 19,09 | 140,47 | 18,43 | 5,85 | 14,49 | 3,98 | 1,88 | 1,41 |
| | | | 2,00 | 5,34 | 25,14 | 178,71 | 23,83 | 5,79 | 17,13 | 4,78 | 1,79 | 1,42 |
| | | | 3,00 | 7,81 | 36,78 | 255,23 | 34,03 | 5,72 | 23,49 | 6,56 | 1,73 | 1,42 |
| | | | 25 | 4,00 | 10,95 | 51,56 | 323,00 | 43,10 | 5,65 | 28,50 | 7,95 | 1,41 |

| | mm | cm | ρ | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-----|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| H | 150.00 | 15 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| B inf. | 50.00 | 5 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| b1 sup. | 50.00 | 5 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| D | 15.00 | 1.5 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| t | 2.00 | 0.2 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| r | 2.00 | 0.2 | 1.00 | | | | | | | | | | |



| Elemento | li cm | ni | lini cm | yi cm | liniyi cm ² | liniyi ² cm ³ | lexi cm ³ | xi cm | linixi cm ² | linixi ² cm ³ | leyi cm ³ |
|------------------------------|---------|--------|---------------|-------|------------------------|-------------------------------------|----------------------|--------|------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 1.1000 | 1.0000 | 1.1000 | 0.95 | 1.0450 | 0.9928 | 0.1109 | 4.9000 | 5.3900 | 26.4110 | 0.0000 |
| 2 | 0.4710 | 2.0000 | 0.9420 | 0.21 | 0.1968 | 0.0411 | 0.0040 | 0.2089 | 0.1968 | 0.0411 | 0.0040 |
| 3 | 4.2000 | 1.0000 | 4.2000 | 0.10 | 0.4200 | 0.0420 | 0.0000 | 2.5000 | 10.5000 | 26.2500 | 6.1740 |
| 4 | 14.2000 | 1.0000 | 14.2000 | 7.50 | 106.5000 | 798.7500 | 238.6073 | 0.1000 | 1.4200 | 0.1420 | 0.0000 |
| 5 | 0.4710 | 2.0000 | 0.9420 | 14.79 | 13.9332 | 206.0876 | 0.0040 | 4.7911 | 4.5132 | 21.6233 | 0.0040 |
| 6 | 4.2000 | 1.0000 | 4.2000 | 14.90 | 62.5800 | 932.4420 | 0.0000 | 2.5000 | 10.5000 | 26.2500 | 6.1740 |
| 7 | 1.1000 | 1.0000 | 1.1000 | 14.05 | 15.4550 | 217.1428 | 0.1109 | 4.9000 | 5.3900 | 26.4110 | 0.0000 |
| totales sin redondear | | | 26.684 | | 200.130 | 2155.498 | 238.837 | | 37.910 | 127.128 | 12.356 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|--|----------|--------|--|-------------|-------|--|----------|------|--|
| A = | 5.337 | | | | | | | | | | |
| | | | Inercias | | | Mod seccion | | | Rad Giro | | |
| xb | 1.42 | | lx | 178.67 | | Sx | 23.82 | | rx | 5.79 | |
| yb | 7.50 | | ly | 17.13 | | Sy | 4.78 | | ry | 1.79 | |

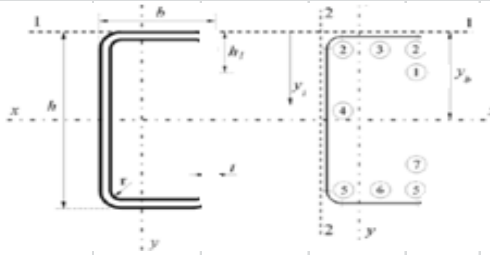
Cumple todos los parámetros.

| Designaciones | | | Área | Peso | Propiedades Estáticas | | | | | | |
|---------------|----|------|-----------------|-------|-----------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|
| | | | | | Eje x-x | | | Eje y-y | | | |
| | | | | | Momento de inercia | Módulo de resistencia | Radio de giro | Momento de inercia | Módulo de resistencia | Radio de giro | Distancia de eje menor y superior |
| B | H | e | A | P | I | W | i | I | W | i | X |
| mm | mm | mm | cm ² | kg/m | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm |
| 150 | 50 | 1,50 | 3,68 | 17,31 | 118,91 | 15,86 | 4,28 | 8,21 | 2,10 | 1,13 | 1,04 |
| | | 2,00 | 4,87 | 22,93 | 158,54 | 21,14 | 5,71 | 10,94 | 2,80 | 1,50 | 1,09 |
| | | 3,00 | 7,20 | 33,93 | 230,28 | 30,70 | 5,65 | 15,89 | 4,11 | 1,49 | 1,13 |



Cálculo propiedades de la Sección

| | mm | cm |
|-------|--------|-------|
| H | 150.00 | 15.00 |
| B inf | 50.00 | 5.00 |
| b sup | 50.00 | 5.00 |
| e | 2.00 | 0.20 |
| r | 2.00 | 0.20 |



| Elemento | li cm | ni | lini cm | yi cm | liniyi cm2 | liniyi2 cm3 | lexi cm3 | xi cm | linixi cm2 | linixi2 cm3 | leyi cm3 |
|------------------------------|-------|------|--------------|-------|---------------|----------------|---------------|-------|--------------|---------------|--------------|
| 1 | 4.60 | 1.00 | 4.60 | 0.10 | 0.46 | 0.05 | 0.00 | 2.30 | 10.58 | 24.33 | 8.11 |
| 2 | 0.47 | 1.00 | 0.47 | 0.21 | 0.10 | 0.02 | 0.00 | 4.79 | 2.26 | 10.81 | 0.00 |
| 3 | 14.20 | 1.00 | 14.20 | 7.50 | 106.50 | 798.75 | 238.61 | 4.90 | 69.58 | 340.94 | 0.00 |
| 4 | 0.47 | 1.00 | 0.47 | 14.79 | 6.97 | 103.04 | 0.00 | 4.79 | 2.26 | 10.81 | 0.00 |
| 5 | 4.60 | 1.00 | 4.60 | 14.90 | 68.54 | 1021.25 | 0.00 | 2.30 | 10.58 | 24.33 | 8.11 |
| totales sin redondear | | | 24.34 | | 182.57 | 1923.11 | 238.62 | | 95.25 | 411.23 | 16.23 |

| Area | 4.87 | Inercia | | Mod seccion | | Rad Giro | |
|------|------|---------|--------|-------------|-------|----------|------|
| yb | 7.50 | ix | 158.50 | x | 21.13 | ix | 5.71 |
| xb | 3.91 | ly | 10.95 | y | 2.80 | iy | 1.50 |
| xg | 1.09 | | | | | | |

Cumple todos los parámetros.

2.5 DISEÑO A COMPRESIÓN DE VARIOS PERFILES

De igual forma seguimos el procedimiento recomendado en el AISI y formulamos una hoja de cálculo para el diseño a compresión indicado en el capítulo C4 del AISI 1996. y actualizado en el mismo capítulo C4 del AISI 2007.

DISEÑO A COMPRESIÓN PERFIL C

Datos:

B: 50.00 mm
H: 150.00 mm

t: 2.00 mm
R: 2.00 mm
w1: 142.00 mm
w2: 46.00 mm

Fy: 2530.00 kg/cm²
Ix: 158.50 cm⁴
Iy: 1.50 cm⁴
Sx: 21.13 cm³
Sy: 2.80 cm³
rx: 5.71 cm
ry: 1.50 cm
xb: 3.91 cm
yb: 7.50 cm
A: 4.87 cm²
L: 3.00 m
k: 1.00
E: 2.1E+06 kg/cm²
K: 4.00

Constante de arriostamiento

Coefficiente de pandeo de placas

m= 1.63
G= 795000
x0= 2.62
r0= 6.45
J= 0.06
Cw= 430.47

Respecto al eje x-x

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{\left(\frac{1.00 \times 300}{5.71}\right)^2} = 7508.42 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_{cx} = \sqrt{\frac{2530.00}{7508.42}} = 0.58 < 1.5$$

$$\lambda_{cx}^2 = 0.340$$

$$F_{nx} = (0.658^{0.34}) \times 2530 = 2194.41 \text{ kg/cm}^2$$

Respecto al eje y-y

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{\left(\frac{1.00 \times 300}{1.50}\right)^2} = 517.75 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_{cy} = \sqrt{\frac{2530.00}{517.75}} = 2.21 > 1.5$$

$$\lambda_{cy}^2 = 4.890$$

$$F_{ny} = (0.877/4.89) \times 2530 = 453.74 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando F_{nx} y F_{ny} : $F_n = 453.74 \text{ kg/cm}^2$

Pandeo Torsional y Flexotorsional

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{\left(\frac{1.00 \times 300}{5.71}\right)^2} = 7508.42 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{4.87 \times (6.45)^2} \left(795000 \times 0.0649 + \frac{\pi^2 \times 2.1E+06 \times 430.47}{\left(\frac{1.00 \times 300}{5.71}\right)^2} \right) = 744.20 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_e = \frac{744.20 \times 7508.42}{744.20 + 7508.42} = 677.09 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_{ct} = \sqrt{\frac{2530.00}{677.09}} = 1.93 > 1.5$$

$$\lambda_{ct}^2 = 3.740$$

$$F_{nt} = (0.877/3.74) \times 2530 = 593.26 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando F_n y F_{nt} : $F_n = 453.74 \text{ kg/cm}^2$

Factor de esbeltez λ sección transversal

Cálculo Ala

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{0.43}} \left(\frac{46.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{453.74}{2.1E+06}} = 0.54 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.54}}{0.54} = 0.00$$

$$b = 46.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

Cálculo Alma

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{4.00}} \left(\frac{142.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{453.74}{2.1E+06}} = 0.55 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.55}}{0.55} = 0.00$$

$$b = 142.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

Cálculo de la carga de compresión resistente

$$P_{nx} = (4.8684 - ((0+0)/10) \times (2/10)) \times 453.74 = 2208.99 \text{ kg} \checkmark$$

DISEÑO A COMPRESIÓN PERFIL G

Datos:

B: 50.00 mm
H: 150.00 mm
hl: 15.00 mm
t: 2.00 mm
R: 2.00 mm
wl: 142.00 mm
w2: 42.00 mm
w3: 11.00 mm

Fy: 2530.00 kg/cm²
Ix: 178.67 cm⁴
Iy: 17.13 cm⁴
Sx: 23.82 cm³
Sy: 4.78 cm³
rx: 5.79 cm
ry: 1.79 cm
xb: 1.42 cm
yb: 7.50 cm
A: 5.34 cm²
L: 4.00 m
k: 1.00
E: 2.1E+06 kg/cm²
K: 4.00

Constante de arriostamiento

Coefficiente de pandeo de placas

m= 2.16
J= 0.0728
Cw= 798.05
x0= 3.48
Xc_ = 1.32
Bw= -78.18
Bf= 127.83
Bl= 101.15
j= 7.88
ro= 6.98
B= 0.75
G= 795000

Respecto al eje x-x

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{\left(\frac{1.00 \times 400}{5.79} \right)^2} = 4336.85 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_{cx} = \sqrt{\frac{2530.00}{4336.85}} = 0.76 < 1.5$$

$$\lambda_{cx}^2 = 0.580$$

$$F_{nx} = (0.658 \times 0.58) \times 2530 = 1984.68 \text{ kg/cm}^2$$

Respecto al eje y-y

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{\left(\frac{1.00 \times 400}{1.79} \right)^2} = 415.67 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_{cy} = \sqrt{\frac{2530.00}{415.67}} = 2.47 > 1.5$$

$$\lambda_{cy}^2 = 6.090$$

$$F_{ny} = (0.877/6.09) \times 2530 = 364.34 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando F_{nx} y F_{ny} : $F_n = 364.34 \text{ kg/cm}^2$

Pandeo Torsional y Flexotorsional

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{\left(\frac{1.00 \times 400}{5.79}\right)^2} = 4336.85 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{5.34 \times (6.98451)} \left[795000 \times 0.0728 + \frac{\pi^2 \times 2.1E+06 \times 798.05}{(1.00 \times 400)^2} \right] = 619.38 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_e = \frac{619.38 \times 4336.85}{619.38 + 4336.85} = 541.98 \text{ kg/cm}^2$$

$$\lambda_{ct} = \sqrt{\frac{2530.00}{541.98}} = 2.16 > 1.5$$

$$\lambda_{ct}^2 = 4.670$$

$$F_{nt} = (0.877/4.67) \times 2530 = 475.12 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando F_n y F_{nt} : $F_n = 364.34 \text{ kg/cm}^2$

Factor de esbeltez λ sección transversal

Cálculo Ala

Como es un perfil tipo G es necesario calcular el rigidizador de borde:

$$S = 1.28 \sqrt{(2100000/364.34)} = 97.18$$

$$S/3 = 32.39$$

$$w/t = 21$$

No existe abolladura del alma pues $w/t < S/3$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

Cálculo Alma

$$\lambda = \frac{1.052 \left(\frac{142.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{364.34}{2.1E+06}}}{\sqrt{4.00}} = 0.49 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.49}}{0.49} = 0.00$$

$$b = 142.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

Cálculo Rigidizador

$$\lambda = \frac{1.052 \left(\frac{11.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{364.34}{2.1E+06}}}{\sqrt{0.43}} = 0.12 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.12}}{0.12} = 0.00$$

$$b = 42.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

Cálculo de la carga de compresión resistente

$$P_{nx} = (5.3368 - ((0+0+0)/10) \times (2/10)) \times 364.34 = 1944.41 \text{ kg} \checkmark$$

2.6 DISEÑO A FLEXIÓN Y COMPROBACIÓN A CORTE DE VARIOS PERFILES

De igual manera se realiza una hoja de cálculo en la cual se sigue el procedimiento de diseño a flexión. Se resuelven dos ejercicios para un perfil tipo C y un perfil tipo G. Según el artículo C3 de las especificaciones AISI.

DISEÑO A FLEXION PERFIL C

Datos:

B: 50.00 mm
H: 150.00 mm

t: 2.00 mm
R: 2.00 mm
wf: 142.00 mm
w2: 46.00 mm

Fy: 2530.00 kg/cm²
Ix: 158.50 cm⁴
Iy: 1.50 cm⁴
Sx: 21.13 cm³
Sy: 2.80 cm³
rx: 5.71 cm
ry: 1.50 cm
xb: 3.91 cm
yb: 7.50 cm
A: 4.87 cm²
L: 3.00 m
k: 1.00
E: 2.1E+06 kg/cm²
K: 4.00

m= 1.63
G= 795000
x0= 2.62
r0= 6.45
J= 0.06
Cw= 430.47

Constante de arriostamiento

Coficiente de pandeo de placas

Cálculo Ala

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{0.43}} \left(\frac{46.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{2530.00}{2.1E+06}} = 1.28 > 0.673$$

Existe abolladura y se reduce el área

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{1.28}}{1.28} = 0.65$$

$$b = 46.00 \times 0.65 = 29.75$$

$$b' = 46.00 - 29.75 = 16.25$$

Nuevas Características debillo al abollamiento

Ix: 139.43 cm⁴

- ly: 10.87 cm⁴
- Sx: 17.36 cm³
- Sy: 2.77 cm³
- rx: 5.54 cm
- ry: 1.55 cm
- xb: 3.92 cm
- yb: 8.03 cm
- A: 4.54 cm²
- L: 4.00 m

Almas y elementos rigidizados con gradiente de tensiones

Como no se produce abolladura del ala ni el rigidizador:

$$f1 = \frac{(8.03 - (0.20 + 0.20)) \times 2530.00}{8.03} = 2403.96$$

$$f2 = \frac{15.00 - 8.03 - (0.20 + 0.20) \times 2403.96}{8.03 - (0.20 + 0.20)} = 2070.38$$

$$\Psi = f2/f1 = 0.86$$

$$K = 4 + 2 \times (1 + (0.86))^3 + 2 \times (1 + (0.86)) = 20.59$$

$$F = f1 = 2403.96$$

$$\lambda = \frac{1.052 \left(\frac{142.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{2403.96}{2.1E+06}}}{\sqrt{20.59}} = 0.56 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.56}}{0.56} = 0.00$$

$$b = 142.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

$$h/B = 3.00$$

$$b1 = \frac{142.00}{3 + 0.86} = 36.79$$

$$b2 = 142 / 2 = 71.00$$

$$b1 + b2 = 107.79 = 10.779 \text{ cm}$$

$$y_b - (t + r) = 8.03 - (0.20 + 0.20) = 7.63 < b1 + b2$$

No existe abolladura

Pandeo Lateral

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06 \times 15.00 \times (10.87 / 2)}{21.13 \times (1.00 \times 3.00)^2} = 888.26 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{(1.00 \times 3.00 / 1.50)^2} = 517.75 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_e = 888.26$$

$$2.78 * F_y = 7033.4$$

$$0.56 * F_y = 1416.8$$

Por lo tanto

$$F_c = 888.26$$

$$M_n = 21.13 \times 888.26 = 18771.51$$

DISEÑO A FLEXION PERFIL G

Datos:

B: 50.00 mm
H: 150.00 mm
hl: 15.00 mm
t: 2.00 mm
R: 2.00 mm
w 1: 142.00 mm
w 2: 42.00 mm
w 3: 11.00 mm

Fy: 2530.00 kg/cm²
Ix: 178.67 cm⁴
Iy: 17.13 cm⁴
Sx: 23.82 cm³
Sy: 4.78 cm³
rx: 5.79 cm
ry: 1.79 cm
xb: 1.42 cm
yb: 7.50 cm
A: 5.34 cm²
L: 4.00 m
k: 1.00
E: 2.1E+06 kg/cm²
K: 4.00

Constante de arriostamiento

Coefficiente de pandeo de placas

m= 2.16
J= 0.0728
Cw = 798.05
x0= 3.48
Xc_ = 1.32
Bw = -78.18
Bf= 127.83
Bl= 101.15
j= 7.88
ro= 6.98
B= 0.75
G= 795000

Cálculo Ala

Como es un perfil tipo G es necesario calcular el rigidizador de borde:

$$S = 1.28 \sqrt{(2100000 / 2530)} = 36.88$$

$$S/3 = 12.29$$

$$w/t = 21$$

FORMULA 2

$$I_s = \frac{1}{12} \times (2.00 \times 11.00^3) = 221.83$$

$$I_a = 399 \times 2.00^4 \left(\frac{42.00}{2.00} - 0.328 \right)^3 = 89.868$$

$$t^4 * (115 - (w / t) / S + 5) = 1910.89 > I_a \quad R = 2.47$$

$$n = 0.582 - \frac{42.00}{4 \times 36.88} = 0.440$$

$$n = 0.440$$

$$D/w = 15.00 / 42.00 = 0.357$$

$$(4.82 - 5 * D / w) * R^{1/n} + 0.43 = 4.9467 > 4$$

$$K = 4.000$$

$$\lambda = \frac{1.052 \left(\frac{42.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{2530.00}{2.1E+06}}}{\sqrt{4.00}} = 0.38 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.38}}{0.38} = 0.00$$

$$b = 42.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

Almas y elementos rigidizados con gradiente de tensiones

Como no se produce abolladura del ala ni el rigidizador:

$$I_1 = \frac{(7.50 - (0.20 + 0.20)) \times 2530.00}{7.50} = 2395.07$$

$$I_2 = \frac{15.00 - 7.50 - (0.20 + 0.20) \times 2395.07}{7.50 - (0.20 + 0.20)} = 2395.07$$

$$\Psi = I_2 / I_1 = 1.00$$

$$K = 4 + 2 \times (1 + (1.00))^3 + 2 \times (1 + 1.00) = 24.00$$

$$F = I_1 = 2395.07$$

$$\lambda = \frac{1.052 \left(\frac{142.00}{2.00} \right) \sqrt{\frac{2395.07}{2.1E+06}}}{\sqrt{24.00}} = 0.51 < 0.673$$

Toda el área es efectiva

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{0.51}}{0.51} = 0.00$$

$$b = 142.00 \times 0.00 = 0.00$$

$$b' = 0.00 - 0.00 = 0.00$$

$$h/B = 3.00$$

$$b1 = \frac{142.00}{3 + 1.00} = 35.5$$

$$b2 = 142 / 2 = 71.00$$

$$b1 + b2 = 106.50 = 10.65 \text{ cm}$$

$$y_b - (t + r) = 7.50 - (0.20 + 0.20) = 7.10 < b1 + b2$$

No existe abolladura

Pandeo Lateral

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06 \times 15.00 \times (17.13 / 2)}{23.82 \times (1.00 \times 4.00)^2} = 698.39 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 \times 2.1E+06}{(1.00 \times 4.00 / 1.79)^2} = 415.67 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_e = 698.39$$

$$2.78 * F_y = 7033.4$$

$$0.56 * F_y = 1416.8$$

Por lo tanto

$$F_c = 698.39$$

$$M_n = 23.82 \times 698.39 = 16637.7$$

CAPITULO III

ELABORACIÓN DEL SOFTWARE PARA EL DISEÑO A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN Y COMPROBACIÓN CON EL DISEÑO MANUAL

3.1 DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS DE FLUJO

A continuación se presenta los diagramas de flujo usados para el desarrollo del software.

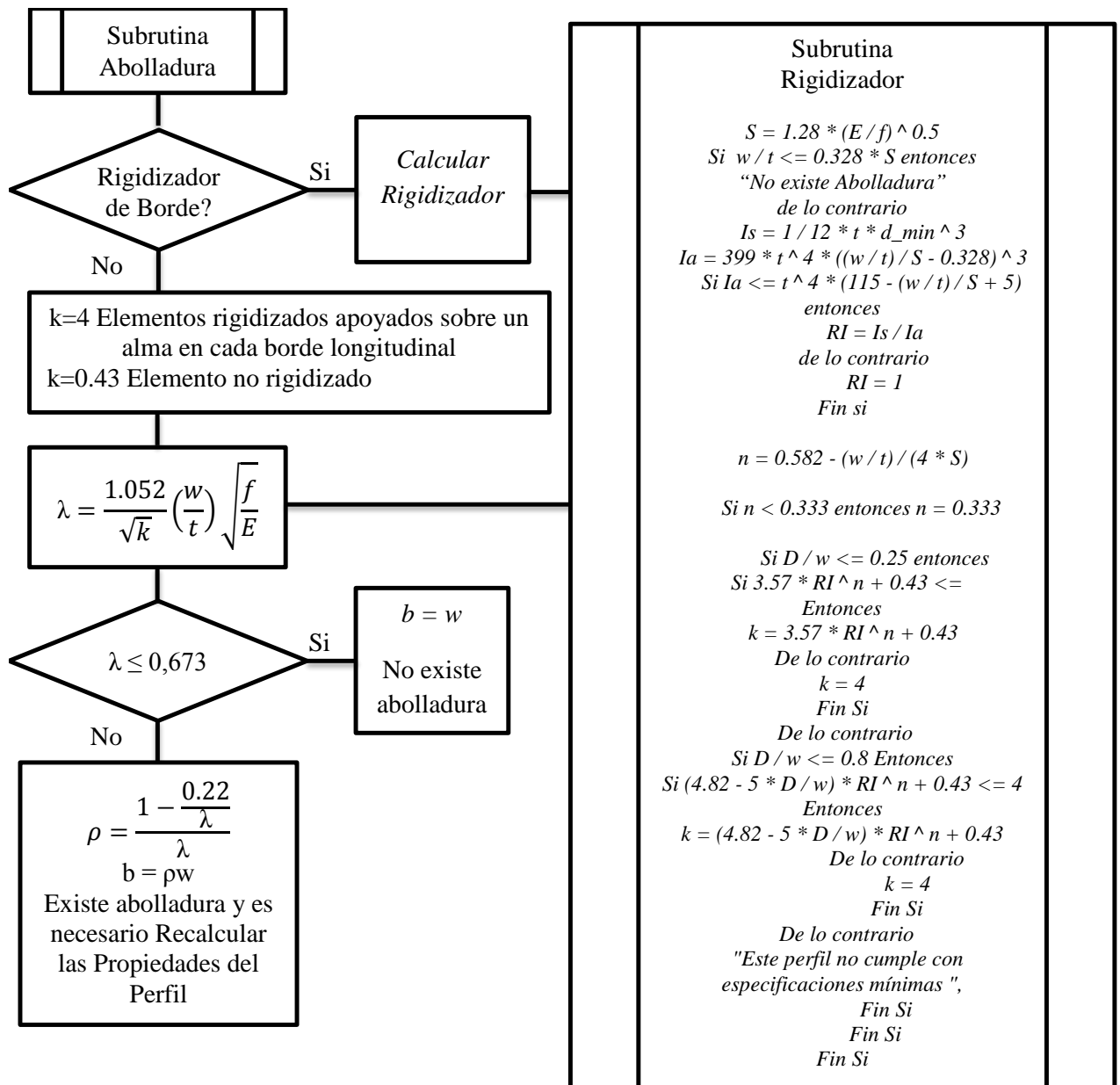


DIAGRAMA DE FLUJO - COMPRESIÓN

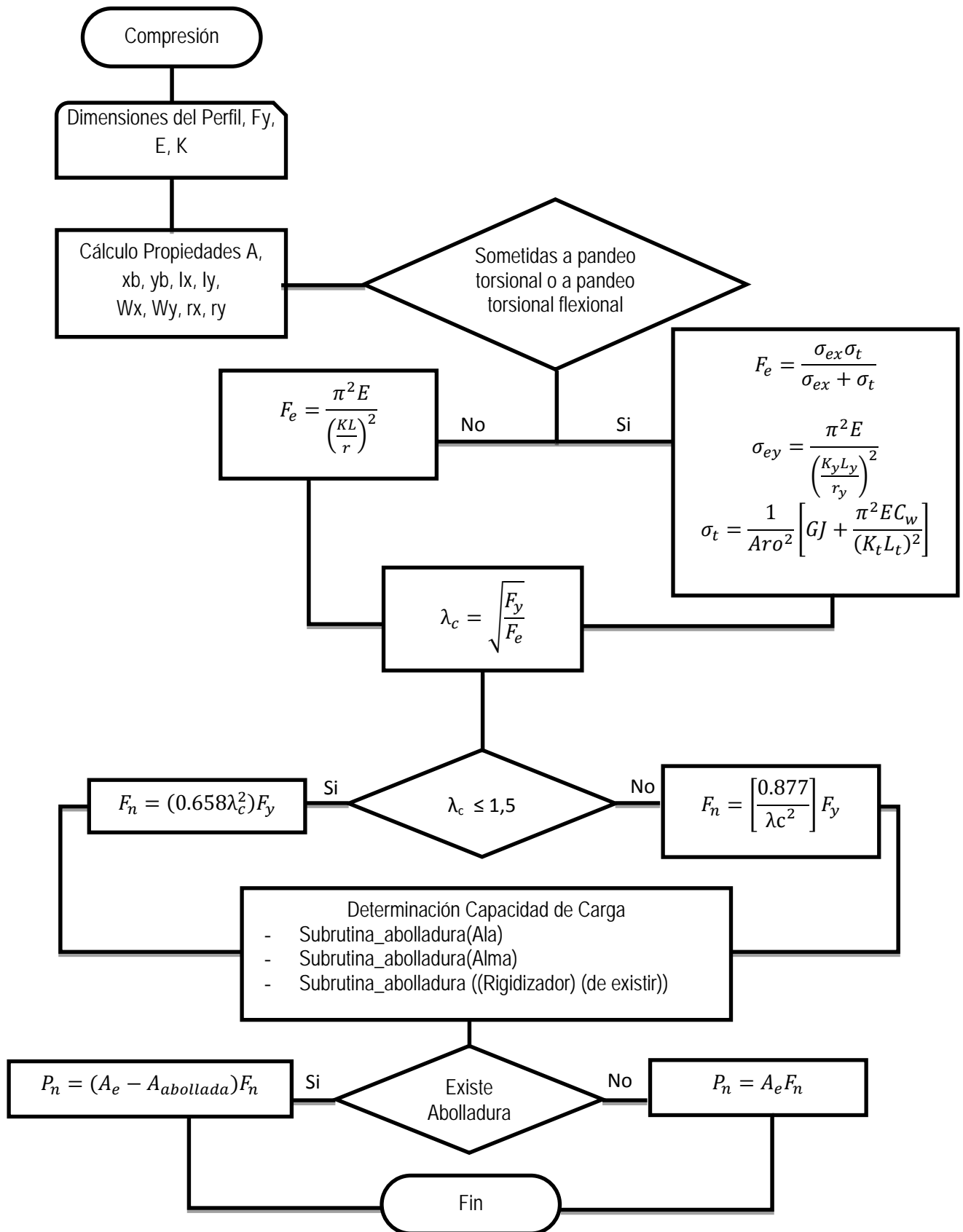
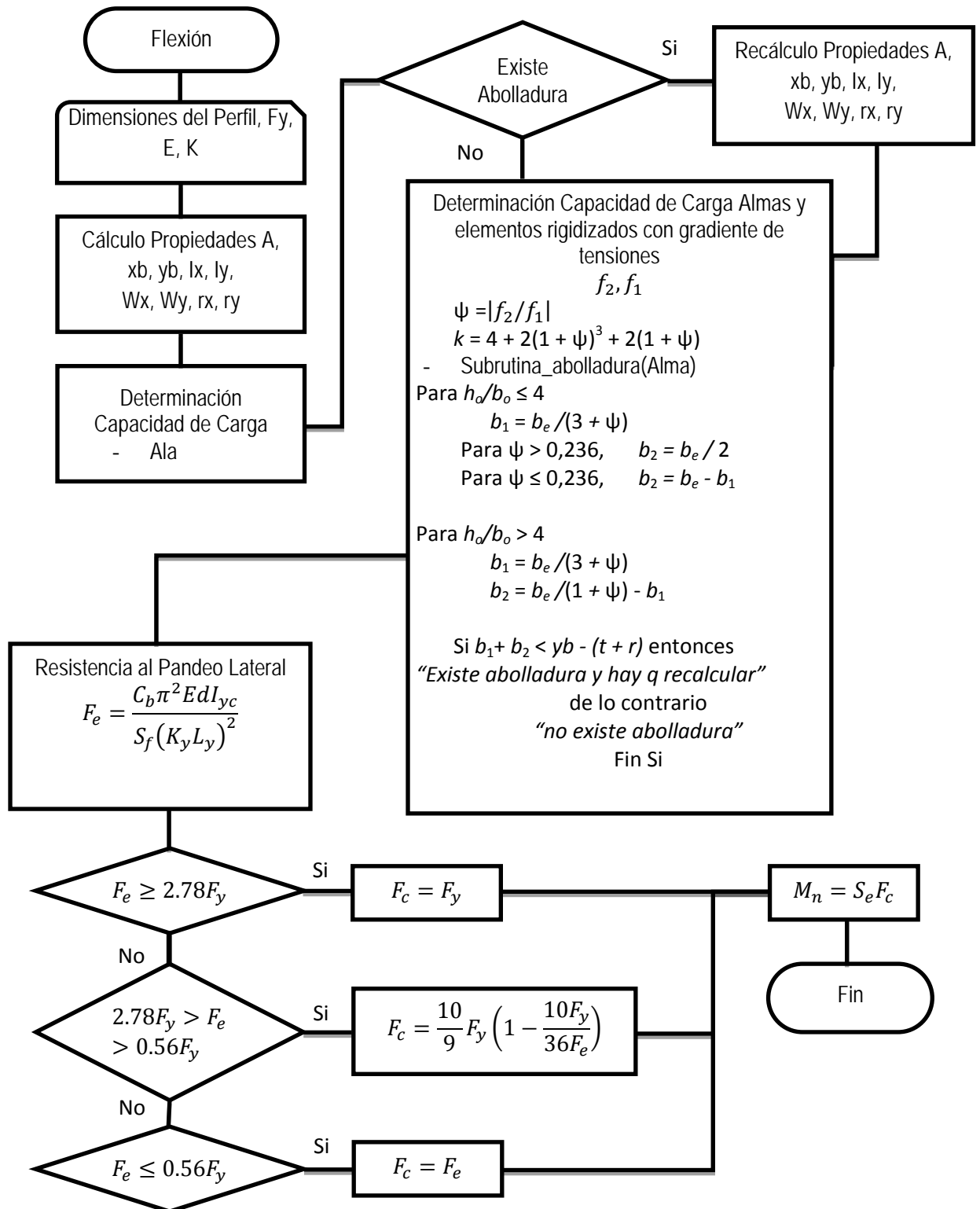
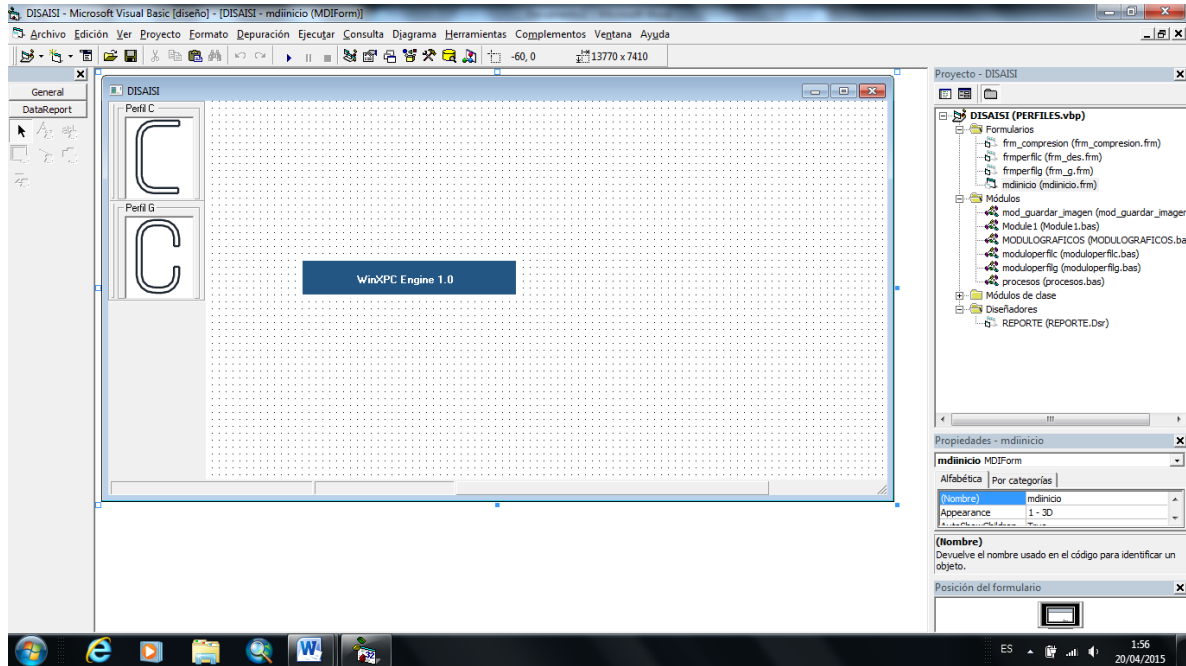


DIAGRAMA DE FLUJO - FLEXIÓN

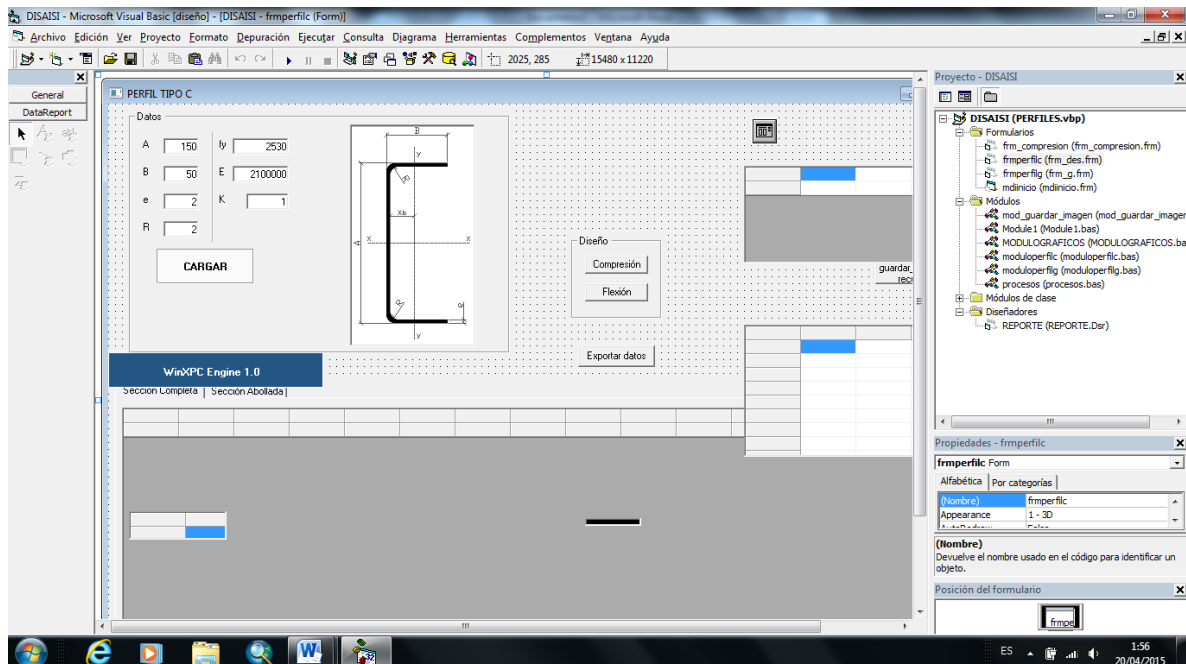


3.2 DESARROLLO DEL SOFTWARE EN LENGUAJE VISUAL BASIC 6.0

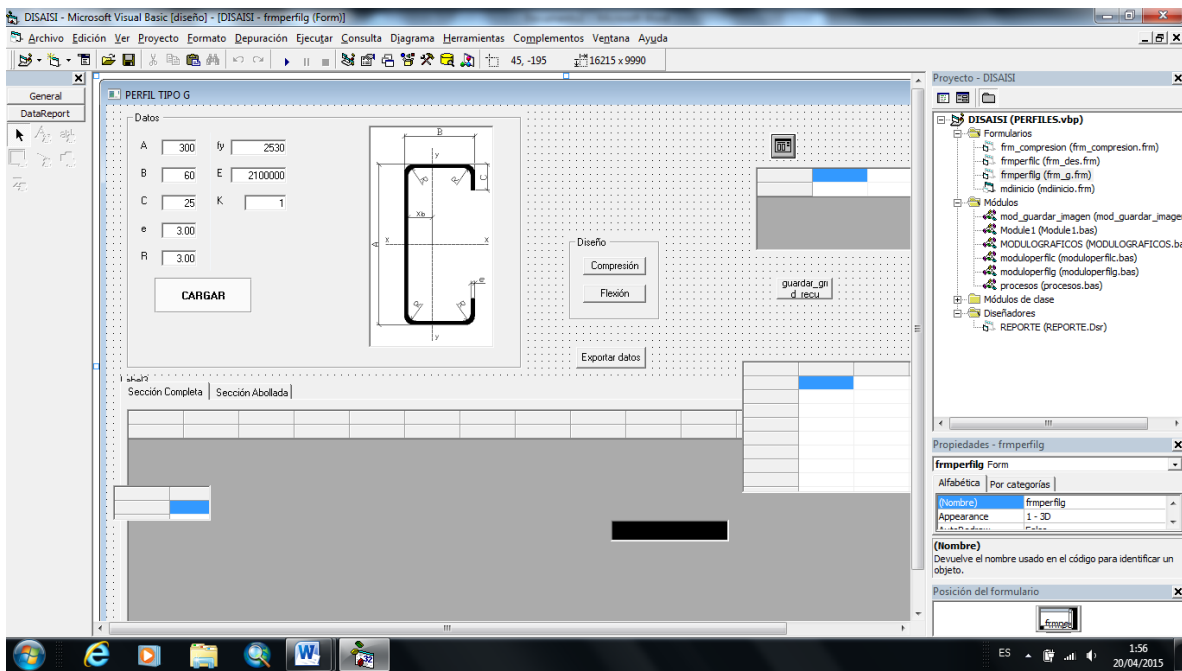
Programa Principal (módulos y formularios)



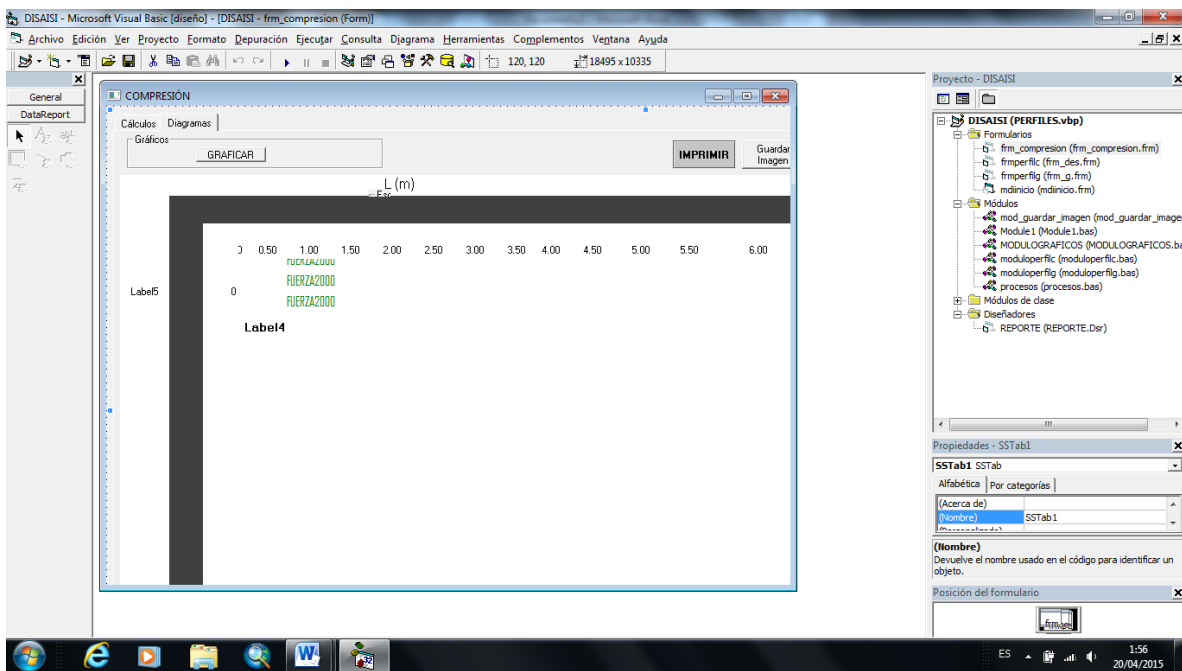
Formulario "C"



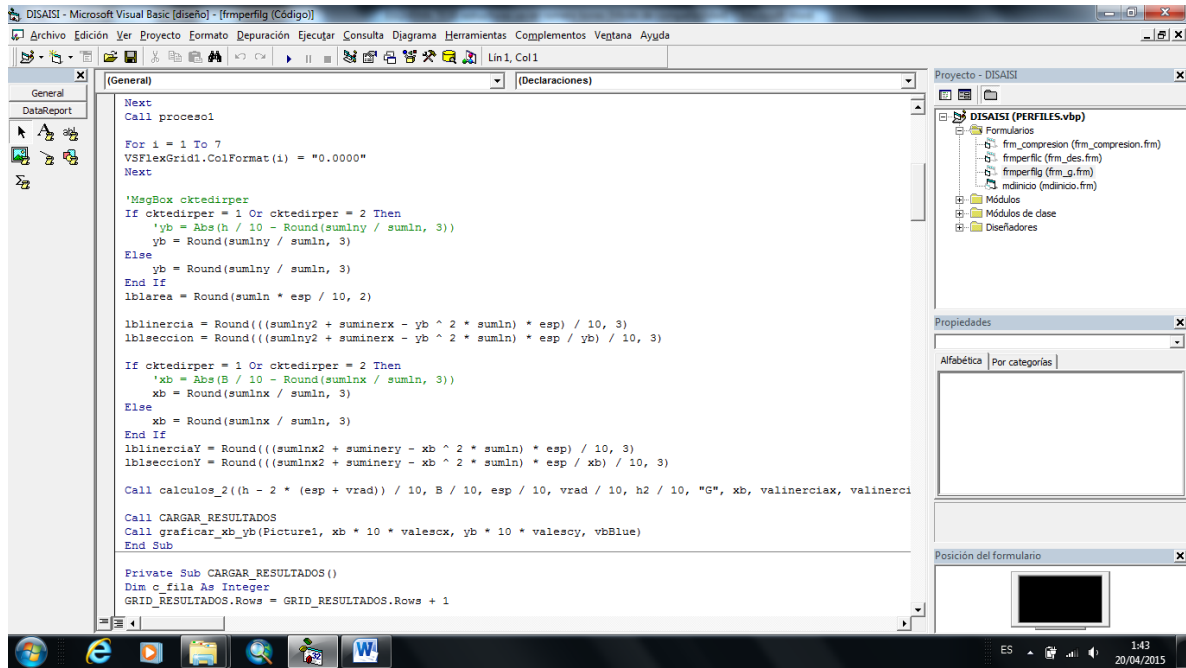
Formulario "G"



Formulario "Gráficos"



Código Características de los Perfiles



```

Next
Call procesol

For i = 1 To 7
    VSFlexGrid1.ColFormat(i) = "0.0000"
Next

'MsgBox oktedirper
If oktedirper = 1 Or oktedirper = 2 Then
    'yb = Abs(B / 10 - Round(sumlny / sumln, 3))
    yb = Round(sumlny / sumln, 3)
Else
    yb = Round(sumlny / sumln, 3)
End If
lblearea = Round(sumln * esp / 10, 2)

lblineracia = Round(((sumlny2 + sumlnexx - yb ^ 2 * sumln) * esp) / 10, 3)
lbleccion = Round(((sumlny2 + sumlnexx - yb ^ 2 * sumln) * esp / yb) / 10, 3)

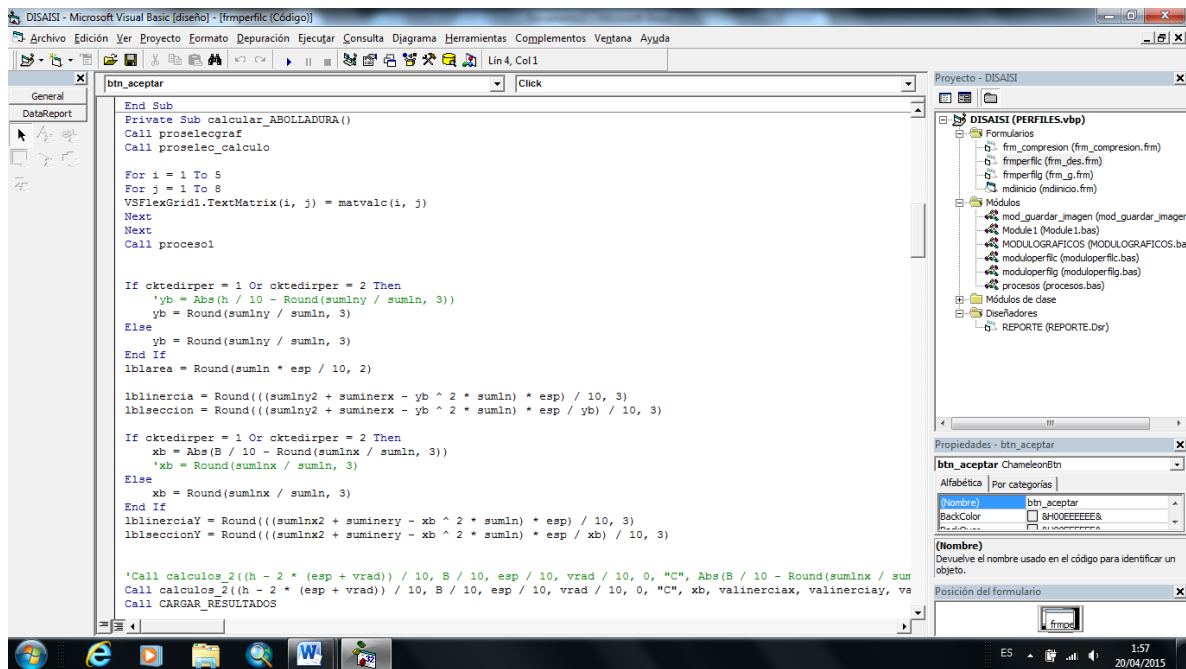
If oktedirper = 1 Or oktedirper = 2 Then
    'xb = Abs(B / 10 - Round(sumlnx / sumln, 3))
    xb = Round(sumlnx / sumln, 3)
Else
    xb = Round(sumlnx / sumln, 3)
End If
lblineraciaY = Round(((sumlnx2 + sumlnery - xb ^ 2 * sumln) * esp) / 10, 3)
lbleccionY = Round(((sumlnx2 + sumlnery - xb ^ 2 * sumln) * esp / xb) / 10, 3)

Call calculos_2((h - 2 * (esp + vrad)) / 10, B / 10, esp / 10, vrad / 10, h2 / 10, "G", xb, valineraciax, valineraciay)

Call CARGAR RESULTADOS
Call graficar_xb_yb(Picture1, xb * 10 * valescx, yb * 10 * valescy, vbBlue)
End Sub

Private Sub CARGAR_RESULTADOS()
Dim c_fila As Integer
GRID_RESULTADOS.Rows = GRID_RESULTADOS.Rows + 1
    
```

Código Abolladura



```

End Sub
Private Sub calcular_ABOLLADURA()
Call proseelegraf
Call proseelecalc
For i = 1 To 5
For j = 1 To 8
    VSFlexGrid1.TextMatrix(i, j) = matvalc(i, j)
Next
Next
Call procesol

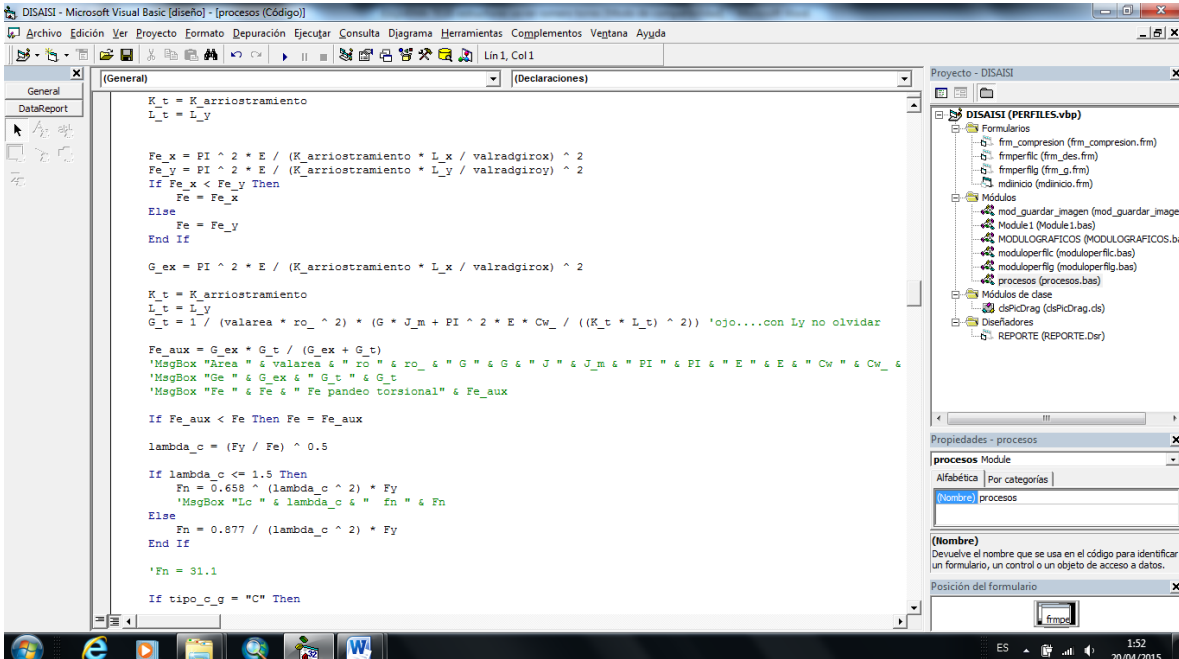
If oktedirper = 1 Or oktedirper = 2 Then
    'yb = Abs(B / 10 - Round(sumlny / sumln, 3))
    yb = Round(sumlny / sumln, 3)
Else
    yb = Round(sumlny / sumln, 3)
End If
lblearea = Round(sumln * esp / 10, 2)

lblineracia = Round(((sumlny2 + sumlnexx - yb ^ 2 * sumln) * esp) / 10, 3)
lbleccion = Round(((sumlny2 + sumlnexx - yb ^ 2 * sumln) * esp / yb) / 10, 3)

If oktedirper = 1 Or oktedirper = 2 Then
    'xb = Abs(B / 10 - Round(sumlnx / sumln, 3))
    xb = Round(sumlnx / sumln, 3)
Else
    xb = Round(sumlnx / sumln, 3)
End If
lblineraciaY = Round(((sumlnx2 + sumlnery - xb ^ 2 * sumln) * esp) / 10, 3)
lbleccionY = Round(((sumlnx2 + sumlnery - xb ^ 2 * sumln) * esp / xb) / 10, 3)

'Call calculos_2((h - 2 * (esp + vrad)) / 10, B / 10, esp / 10, vrad / 10, 0, "C", Abs(B / 10 - Round(sumlnx / sumln, 3)), valineraciax, valineraciay, vb
Call calculos_2((h - 2 * (esp + vrad)) / 10, B / 10, esp / 10, vrad / 10, 0, "C", xb, valineraciax, valineraciay, vb
Call CARGAR RESULTADOS
    
```

Código Diseño a Compresión



```

DISAISI - Microsoft Visual Basic [diseño] - [procesos (Código)]
Archivo Edición Ver Proyecto Formato Depuración Ejecutar Consulta Diagrama Herramientas Complementos Ventana Ayuda
[General] | [Declaraciones]
Proyecto - DISAISI
DISAISI (PERFILES.vbp)
  Formularios
    frm_compresion (frm_compresion.frm)
    frm_perfilc (frm_des.frm)
    frm_perflig (frm_g.frm)
    frm_inicio (frm_inicio.frm)
  Módulos
    mod_guardar_imagen (mod_guardar_imagen)
    Module1 (Module1.bas)
    MODULOGRAFICOS (MODULOGRAFICOS.bas)
    moduloperflig (moduloperflig.bas)
    moduloperflig (moduloperflig.bas)
    procesos (procesos.bas)
  Módulos de clase
    CSPrkDrag (CSPrkDrag.cls)
  Diseñadores
    REPORTE (REPORTE.Dsr)
Propiedades - procesos
procesos Module
Alfabética | Por categorías
Nombre: procesos
(Nombre)
Devuelve el nombre que se usa en el código para identificar un formulario, un control o un objeto de acceso a datos.
Posición del formulario
frm00
ES 1:52 20/04/2015
  
```

```

K_t = K_arriostramiento
L_t = L_y

Fe_x = PI ^ 2 * E / (K_arriostramiento * L_x / valradgirox) ^ 2
Fe_y = PI ^ 2 * E / (K_arriostramiento * L_y / valradgiroy) ^ 2
If Fe_x < Fe_y Then
  Fe = Fe_x
Else
  Fe = Fe_y
End If

G_ex = PI ^ 2 * E / (K_arriostramiento * L_x / valradgirox) ^ 2

K_t = K_arriostramiento
L_t = L_y
G_t = 1 / (valarea * ro_ ^ 2) * (G * J_m + PI ^ 2 * E * C_w / ((K_t * L_t) ^ 2)) 'ojo....con Ly no olvidar

Fe_aux = G_ex * G_t / (G_ex + G_t)
'MsgBox "Area " & valarea & " ro " & ro_ & " G " & G & " J " & J_m & " PI " & PI & " E " & E & " C_w " & C_w_ &
'MsgBox "G_e " & G_ex & " G_t " & G_t
'MsgBox "Fe " & Fe & " Fe pandeo torsional" & Fe_aux

If Fe_aux < Fe Then Fe = Fe_aux

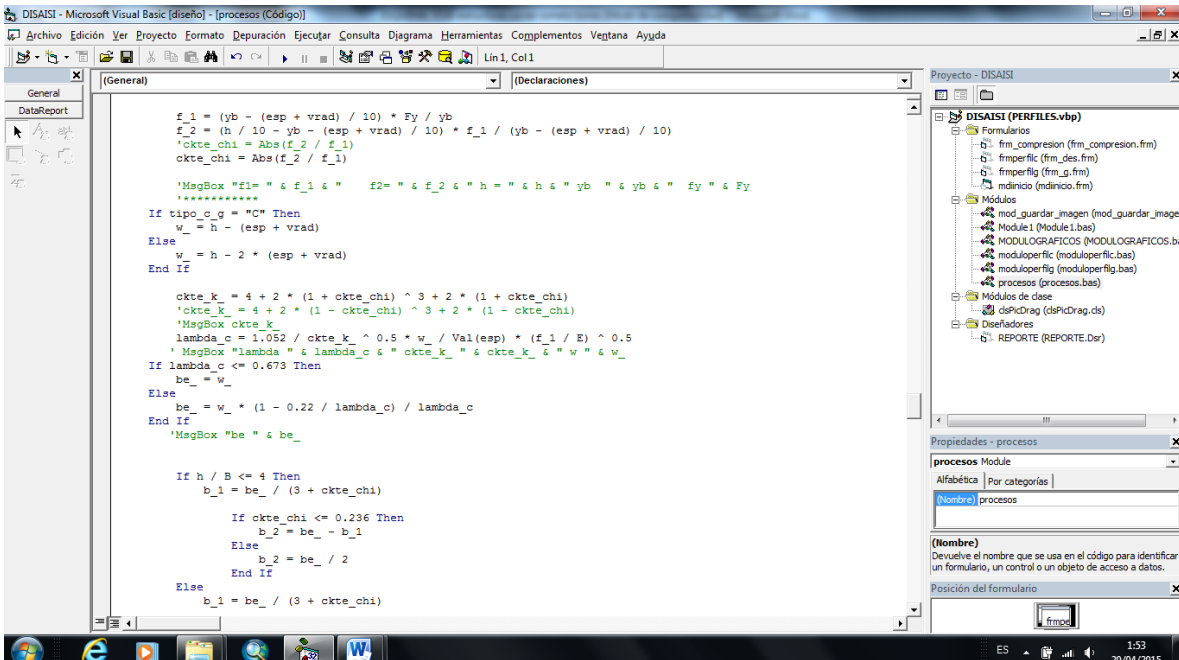
lambda_c = (Fy / Fe) ^ 0.5

If lambda_c <= 1.5 Then
  Fn = 0.658 ^ (lambda_c ^ 2) * Fy
  'MsgBox "Lc " & lambda_c & " Fn " & Fn
Else
  Fn = 0.877 / (lambda_c ^ 2) * Fy
End If

'Fn = 31.1

If tipo_c_g = "C" Then
  
```

Código Diseño a Flexión



```

DISAISI - Microsoft Visual Basic [diseño] - [procesos (Código)]
Archivo Edición Ver Proyecto Formato Depuración Ejecutar Consulta Diagrama Herramientas Complementos Ventana Ayuda
[General] | [Declaraciones]
Proyecto - DISAISI
DISAISI (PERFILES.vbp)
  Formularios
    frm_compresion (frm_compresion.frm)
    frm_perfilc (frm_des.frm)
    frm_perflig (frm_g.frm)
    frm_inicio (frm_inicio.frm)
  Módulos
    mod_guardar_imagen (mod_guardar_imagen)
    Module1 (Module1.bas)
    MODULOGRAFICOS (MODULOGRAFICOS.bas)
    moduloperflig (moduloperflig.bas)
    moduloperflig (moduloperflig.bas)
    procesos (procesos.bas)
  Módulos de clase
    CSPrkDrag (CSPrkDrag.cls)
  Diseñadores
    REPORTE (REPORTE.Dsr)
Propiedades - procesos
procesos Module
Alfabética | Por categorías
Nombre: procesos
(Nombre)
Devuelve el nombre que se usa en el código para identificar un formulario, un control o un objeto de datos.
Posición del formulario
frm00
ES 1:53 20/04/2015
  
```

```

f_1 = (yb - (esp + vrad) / 10) * Fy / yb
f_2 = (h / 10 - yb - (esp + vrad) / 10) * f_1 / (yb - (esp + vrad) / 10)
'ckte_chi = Abs(f_2 / f_1)
okte_chi = Abs(f_2 / f_1)
'*****
'MsgBox "f1 " & f_1 & " f2 " & f_2 & " h " & h & " yb " & yb & " fy " & Fy

If tipo_c_g = "C" Then
  w_ = h - (esp + vrad)
Else
  w_ = h - 2 * (esp + vrad)
End If

okte_k_ = 4 + 2 * (1 + okte_chi) ^ 3 + 2 * (1 + okte_chi)
'ckte_k_ = 4 + 2 * (1 - okte_chi) ^ 3 + 2 * (1 - okte_chi)
'MsgBox okte_k_

lambda_c = 1.052 / okte_k_ ^ 0.5 * w_ / Val(esp) * (f_1 / E) ^ 0.5
'MsgBox "lambda " & lambda_c & " okte_k_ " & okte_k_ & " w " & w_

If lambda_c <= 0.673 Then
  be_ = w_
Else
  be_ = w_ * (1 - 0.22 / lambda_c) / lambda_c
End If
'MsgBox "be " & be_

If h / B <= 4 Then
  b_1 = be_ / (3 + okte_chi)
  If okte_chi <= 0.236 Then
    b_2 = be_ - b_1
  Else
    b_2 = be_ / 2
  End If
Else
  b_1 = be_ / (3 + okte_chi)
  
```

3.3 EJERCICIOS DE APLICACIÓN

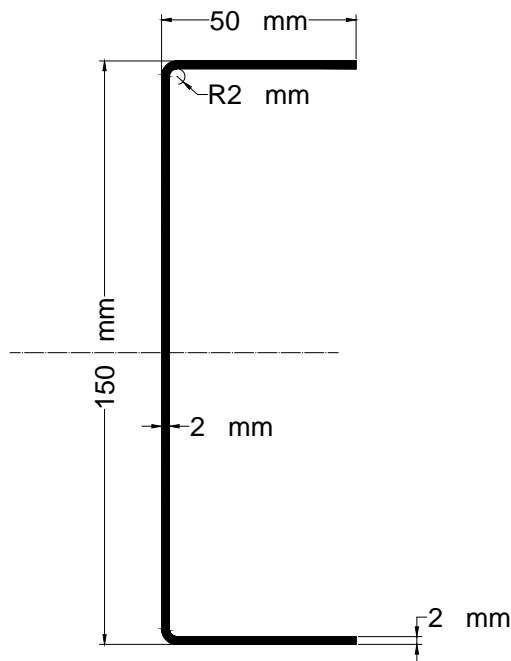
A continuación se aplica el “software” desarrollado para el diseño de un perfil C a compresión y a flexión. Y de igual manera se realiza con un perfil G.

Es importante indicar que el “software” desarrollado presenta las curvas de longitud no soportada versus el esfuerzo, de igual forma se puede obtener un reporte en tablas de los valores que sirvieron para graficar las curvas de capacidad nominal de los miembros a compresión y a flexión.

Ejercicio No. 1

Calcular la capacidad nominal a flexión y a compresión de acuerdo al capítulo C3 y C4 del AISI 2007, un perfil tipo canal “C” según los siguientes datos, utilizando el “software” DISAISI, desarrollado en este trabajo investigativo, y comparar los resultados.

Datos:



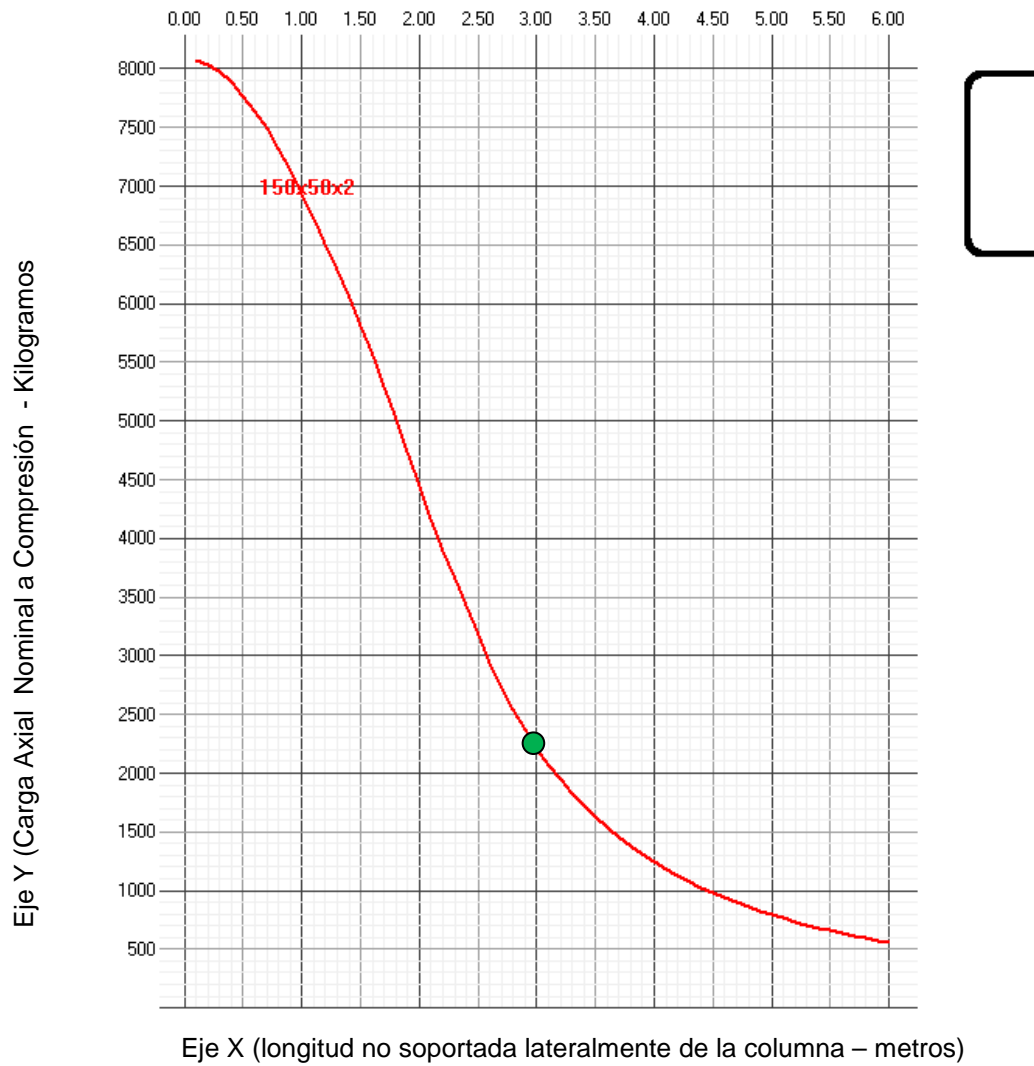
Longitud no soportada $L = 3\text{m}$

Acero ASTM A36

$E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$

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

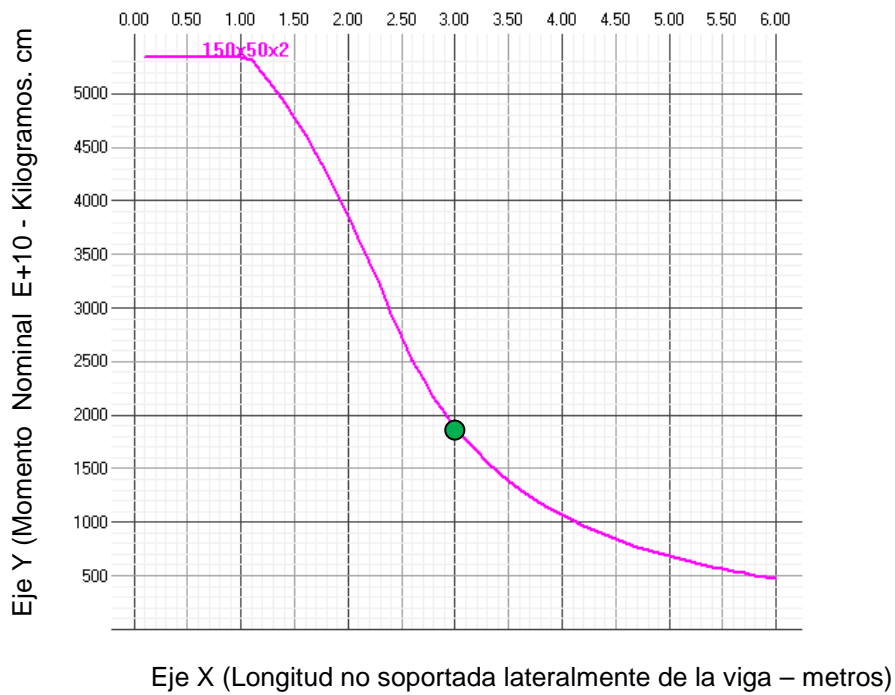
- Curva de Capacidad Nominal a Compresión: resultado del software DISAISI



$P_n = 2210.58 \text{ Kg}$ ✓

En conclusión el esfuerzo calculado por el “software” es igual al calculado de forma manual con ayuda de una hoja de cálculo.

- Curva de Capacidad Nominal a Flexión: resultado del software DISAISI



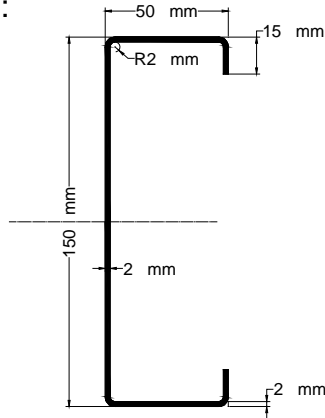
$M_n = 1890.46 \text{ Kg.cm}$ $E_{10} = 18904.60 \text{ Kg.cm}$ ✓

En conclusión el esfuerzo calculado por el “software” es igual al calculado de forma manual con la ayuda de una hoja de cálculo.

Ejercicio No. 2

Diseñar a flexión y a compresión independientemente de acuerdo al capítulo C3 y C4 del AISI 2007, un perfil tipo correa “G” de acuerdo a los siguientes datos, utilizando el software DISAISI, desarrollado en este trabajo investigativo, y comparar los resultados.

Datos:



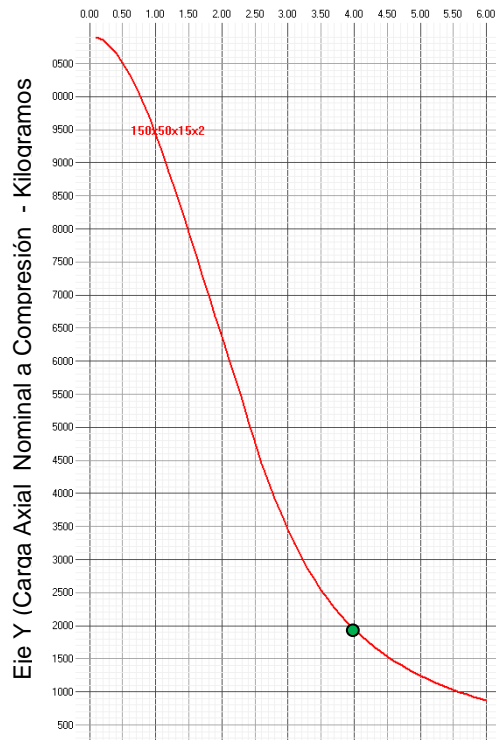
Longitud no soportada $L = 4\text{m}$

Acero ASTM A36

$E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$

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

- Curva de Capacidad Nominal a Compresión: resultado del software DISAISI

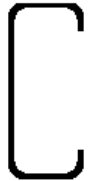
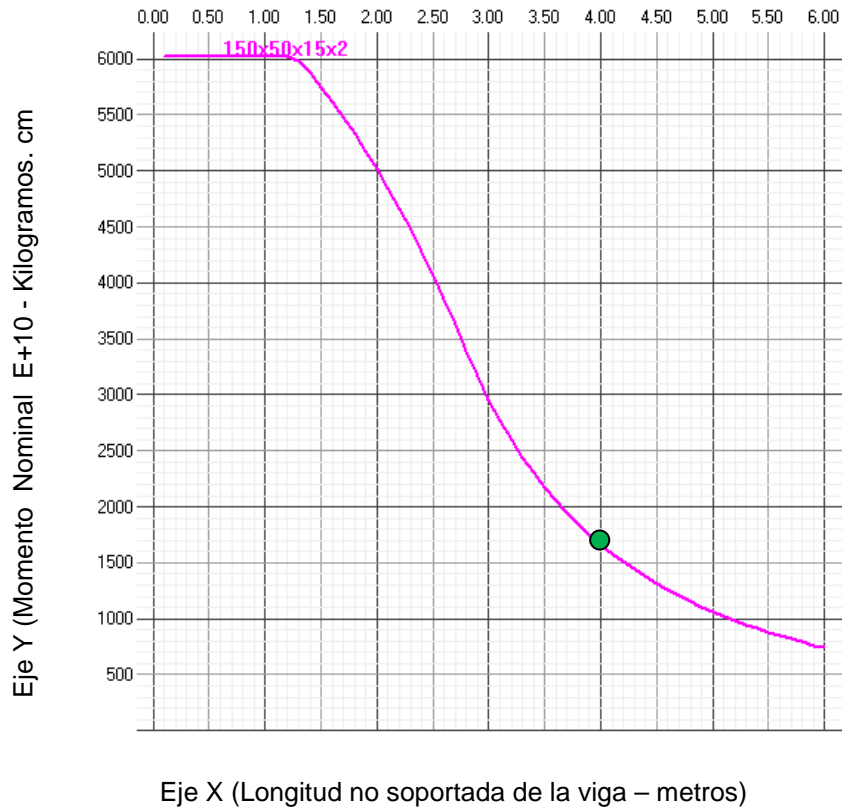


Eje X (longitud no soportada lateralmente de la columna – metros)

$P_n = 1945.64 \text{ Kg}$ ✓

En conclusión el esfuerzo calculado por el “software” es igual al diseñado de forma manual, en una hoja de cálculo.

- Curva de Capacidad Nominal a Flexión: resultado del software DISAISI



$M_n = 1663.89 \text{ Kg.cm}$ E10 = 16638.90 Kg.cm ✓

En conclusión el esfuerzo calculado por el software es igual al diseñado de forma manual, en una hoja de cálculo.

3.4 Comprobación con el cálculo manual y el software DISAISI V.10.0

| | | CALCULO MANUAL | CALCULO SOFTWARE |
|--|--|---------------------|---------------------|
| | <p>PERFIL TIPO C 150 * 50 * 2 mm</p> | Pn = 2208.99 Kg | Pn = 2210.58 Kg |
| | | Mn = 18771.51 Kg.cm | Mn = 18904.60 Kg.cm |
| | <p>PERFIL TIPO G 150 * 50 * 15 * 2 mm L = 4m</p> | Pn = 1944.41 Kg | Pn = 1945.64 Kg |
| | | Mn = 16637.70 Kg.cm | Mn = 16638.90 Kg.cm |

CONCLUSIONES

1. Se comprende el procedimiento de cálculo de la capacidad nominal para perfiles conformados en frío propuesto en la especificación AISI, referente a sus distintas publicaciones a partir de la especificación del año 1996, de manera que se dispone de conocimientos útiles para la especialidad de ingeniería estructural.
2. Se aplica el método de estados límite (LRFD) para determinar la capacidad nominal de los perfiles de producción nacional, específicamente a los miembros de sección abierta conformados en frío de tipo C y G, obteniendo resultados confiables.
3. Se determina la necesidad por parte de los profesionales de programas computacionales de diseño para elementos estructurales con secciones de lámina delgada conformados en frío. Ya que al disponer de esta herramienta se agiliza los cálculos.
4. Se comprobó la veracidad de las características geométricas de los perfiles de producción nacional mediante un software de cálculo, que aplica el método lineal.
5. Con respecto a la hipótesis planteada se probó con diferentes perfiles conformados en frío, mediante el software y se determinó que no se genera pérdida de estabilidad local de sus elementos lo cual confirma lo supuesto.

RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar las especificaciones para el diseño de miembros estructurales de acero conformado en frío (AISI) y utilizar el software del presente estudio de manera confiable, prevaleciendo siempre el buen criterio y los consejos de un profesional competente y matriculado en su respectiva jurisdicción.

Por último el profesional que utilice el software podrá realizar el cálculo de capacidad a compresión y a flexión, para luego de forma manual aplicar el procedimiento de interacción flexión y carga axial indicados en la sección C5 de la AISI, lo cual demuestra la bondad de la herramienta desarrollada.

BIBLIOGRAFIA.

- GALAMBOS V. Theodore, LIM. F.J, Johnston Bruce G, “Diseño de Estructuras de Acero con LRFD”, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- SEGUI William T., “Diseño de Estructuras de Acero con LRFD”, Internacional Thomson Editores.
- Mc.CORMAC Jack C., “Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD”, Alfaomega grupo editor S.A.
- Mc.CORMAC Jack C., “Diseño de Estructuras de Acero Método ASD”, Alfaomega grupo editor S.A.
- GAMON TORRES Roberto Dr., “Módulos de la Especialidad en Estructuras-Universidad de Cuenca-Ecuador”.
- MICROSOFT CORPORATION, “Manual del Programador Visual Basic 6.0”, Mc. Graw Hill.
- ESPECIFICACIÓN PARA EL DISEÑO DE MIEMBROS ESTRUCTURALES ACERO CONFORMADO EN FRÍO AISI 1996, 2001, 2007. (American Iron and Steel Institute)