

T
624.177
C.H.L



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica



**“DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE
PERFILES DOBLADOS EN FRIO SEGUN NORMAS DEL
AISI, UTILIZANDO UN PROGRAMA DE COMPUTACION
Y COMPARACION CON LAS NORMAS DEL AISC.”**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

JAVIER JOSE CHINGA CORNEJO



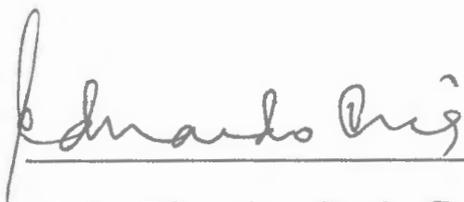
GUAYAQUIL

ECUADOR

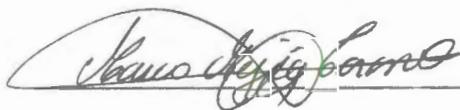
**AÑO
1994**

Dr. Alfredo Barriga R.
Decano

Ing. Alfredo Torres G.
Director de Tesis



Ing. Eduardo Orcés T.
Miembro del Tribunal



Ing. Marco T. Mejía C.
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

A mis padres, Javier e Inés,
por todo el apoyo que siempre
han sabido brindarme.

AGRADECIMIENTO

A Dios,
pues sin su ayuda nada es posible.

A Verónica y Paola,
por la colaboración brindada
en la elaboración de este trabajo y por
ser quienes siempre han estado conmigo
en los momentos más importantes
de mi vida.

A mis amigos y compañeros,
quienes de una u otra manera
han colaborado en la culminación
de este trabajo.

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"


JAVIER J. CHINGA CORNEJO

RESUMEN

El presente trabajo persigue como principal objetivo convertirse en un valioso auxiliar para el diseño, selección y construcción de elementos estructurales diversos, obtenidos a partir de perfiles estructurales formados en frío. Estos elementos estructurales deberán de soportar los cuatro principales tipos de carga: **Tensión, compresión, flexión y flexo-compresión.**

En cada uno de los capítulos en que se encuentra dividido el presente trabajo se analiza cada uno de los tipos de carga enunciados anteriormente, existiendo una similitud entre todos ellos; en primer lugar se realiza un análisis teórico en el que se observan las especificaciones de diseño utilizadas para cada caso, a continuación se presenta el desarrollo del programa de computación utilizado para el diseño, en el que aparecen el algoritmo del programa y su correspondiente diagrama de flujo, para finalmente realizar un análisis comparativo entre los perfiles estructurales diseñados de acuerdo a las especificaciones del Manual de la AISC (American Institute of Steel Construction) (*perfiles rolados*) y los perfiles

estructurales diseñados a partir de las especificaciones de la AISI (American Iron and Steel Institute) (*perfiles conformados en frío*).

Es a partir de los criterios de diseño que ofrecen las regulaciones y especificaciones del Manual del AISI que se elabora el programa de computación que se constituirá la principal herramienta del presente trabajo; este programa será de gran utilidad para la selección de los perfiles estructurales más económicos para cumplir determinada función. Para la elaboración de dicho programa se ha recurrido al lenguaje de computación conocido como Qbasic, el mismo que tiene a su haber como principales ventajas su facilidad de manejo y la posibilidad que brinda de ser instalado en computadoras personales del serie XT y siguientes debido a la poca capacidad de memoria RAM que requiere.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	4
INDICE GENERAL	6
INDICE DE FIGURAS	10
INDICE DE ABREVIATURAS	12
INDICE DE TABLAS	14
INTRODUCCION	15
I. DISEÑO ESTRUCTURAL DE ACERO DOBLADO EN FRIO .	17
1.1 Consideraciones generales	17
1.1.1 Propiedades de elementos formados en frío	17
1.1.2 Criterios de diseño en elementos estructurales obtenidos por traba- jo en frío	25
II. ELEMENTOS SOMETIDOS A TENSION	28
2.1 Análisis teórico	28
2.1.1 Aplicaciones.- Secciones general- mente usadas	29

Pág.

2.1.2 Cargas de tensión y área total ...	30
2.1.3 Area Neta	30
2.1.4 La rigidez como un criterio en el diseño	31
2.1.5 Recomendaciones que ofrece el Ma- nual del AISI	32
2.2 Programa de computación	34
2.2.1 Diagrama de flujo	34
2.2.2 Algoritmo	37
2.3 Análisis comparativo entre las especi- ficaciones del AISI y AISC	39
2.4 Ejercicios de aplicación	43
III. ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESION	48
3.1 Análisis teórico	48
3.1.1 Aplicaciones	49
3.1.2 Diferencia entre los efectos de tensión y compresión	50
3.1.3 Columnas cargadas axialmente	51
3.1.4 Tipos de columnas	51
3.1.5 Proceso general para el diseño de columnas	55
3.1.6 Elementos rigidizados y no rigidi- zados	57

3.1.7	Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI	58
3.2	Programa de computación	70
3.2.1	Diagrama de flujo	70
3.2.2	Algoritmo	78
3.3	Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI y AISC	84
3.4	Ejercicios de aplicación	95
IV.	ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXION	104
4.1	Análisis teórico	104
4.1.1	Tipos de vigas	105
4.1.2	Consideraciones de diseño	106
4.1.3	Diseño de vigas en base a la resistencia a la flexión y a la deformación	107
4.1.3.1	Vigas con ala en compresión no rigidizada	108
4.1.3.2	Vigas con ala en compresión rigidizada.....	109
4.1.4	Diseño de vigas considerando el corte	111
4.1.5	Aplastamiento del alma	114

	Pág.
4.1.6 Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI	116
4.2 Programa de computación	124
4.2.1 Diagrama de flujo	124
4.2.2 Algoritmo	132
4.3 Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI y AISC	136
4.4 Ejercicios de aplicación	146
V. ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESION	155
5.1 Análisis teórico	155
5.1.1 Esfuerzos de flexión y carga axial	156
5.1.2 Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI	159
5.2 Programa de computación	165
5.2.1 Diagrama de flujo	165
5.3.1 Algoritmo	172
5.3 Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI y AISC	179
5.4 Ejercicios de aplicación	182
CONCLUSIONES	197
RECOMENDACIONES	199
APENDICE	202
BIBLIOGRAFIA	206

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
1.- Esquema de distribución de esfuerzos en un perfil doblado en frío	19
2.- Diagrama esfuerzo vs. deformación para aceros utilizados en la construcción de perfiles estructurales.....	22
3.- Columnas.- Esfuerzo admisible vs. la relación de esbeltez. Norma AISI.....	68
4.- Columnas.- Norma AISI vs. norma AISC. Factor de seguridad como función de la relación de esbeltez	87
5.- Factor de reducción de esfuerzos como función de la relación ancho-espesor. Norma AISI vs. Norma AISC	89
6.- Ancho efectivo de elemento rigidizado como función de la relación ancho espesor. Norma AISI vs. Norma AISC	93
7.- Vigas.- Esfuerzo admisible de flexión como función de la longitud de arriestramiento. Norma AISI vs. norma AISC	120
8.- Vigas.- Esfuerzo admisible de flexión en perfiles Z. Norma AISI	142

INTRODUCCION

En la rama de la Ingeniería Mecánica, el Diseño se constituye en uno de los principales pilares para el desarrollo de la sociedad. Es una especialidad que se caracteriza por estar buscando constantemente la innovación. El diseño estructural constituye una rama de la Ingeniería que básicamente persigue la optimización de recursos en la construcción de edificaciones metálicas.

En nuestro País, la construcción de estructuras metálicas ha encontrado un gran auge debido a las grandes ventajas que ofrece la facilidad de trabajar con acero. Su alta resistencia y su ductilidad han sido los factores que han posibilitado dicho auge. Sin embargo, la casi nula producción de elementos de acero dentro de nuestra geografía ha obligado a los constructores a importar dichos elementos estructurales, lo que repercute en un alto costo de las obras de construcción.

Esta gran limitación económica ha sido compensada con la producción de perfiles metálicos doblados en frío. Dichos perfiles son obtenidos a partir de planchas de acero compradas en el mercado internacional, que son procesadas

INDICE DE TABLAS

	Pag.
I. Cuadro comparativo de expresiones usadas por el Manual AISC con las usadas por el Manual AISI .	40
II. Valores típicos para la constante de longitud efectiva (Elementos sometidos a cargas de compresión)	54
III. Cuadro comparativo de las regulaciones del Manual del AISI con las del manual del AISC para el fenómeno de compresión	85
IV. Análisis comparativo entre las regulaciones del AISI y AISC para el cálculo del factor de reducción de esfuerzos (Q_e)	91
V. Análisis comparativo entre las regulaciones del AISI y AISC para el cálculo del factor de reducción de área (Q_a)	92
VI. Cuadro comparativo de las normas AISI y AISC para el análisis de vigas sometidas a cargas de flexión. Variación de F_b en función de $L^2 S_{xc}/dI_{yc}$	139
VII. Cuadro comparativo de las normas AISI y AISC para el análisis de vigas sometidas a cargas de flexión. Variación de F_v en función de h/t	140
VIII. Valores típicos de C_m y Ψ	164

- f** Esfuerzo actual en elementos en compresión calculados en base al ancho efectivo del diseño.
- f_a** Esfuerzo axial = Carga axial dividido para el área total del miembro.
- f_b** Máximo esfuerzo de flexión = Momento flector dividido para el módulo de sección del miembro, alrededor del eje en que ocurre la flexión, ksi.
- f_v** Máximo esfuerzo cortante que soporta el area del alma de la viga, ksi.
- I_x** Momento de inercia de la sección transversal del perfil, alrededor del eje centroidal perpendicular al alma de la viga, in⁴.
- I_{xc}** Momento de inercia de la sección transversal sometida a compresión, alrededor del eje de simetría, in⁴.
- I_y** Momento de inercia de la sección transversal alrededor del eje y, in⁴.
- K** Factor de longitud efectiva.
- L** Longitud no arriostrada de la viga, in.
- M₁ y M₂** Valores del mínimo y máximo momento de extremo, respectivamente.
- P** Carga total del miembro sometido a cargas de compresión, kips.
- Q** Factor de modificación de area y/o esfuerzo permisible de compresión.
- Q_a** Factor de modificación de area de miembros compuestos por elementos rigidizados.
- Q_n** Factor de modificación de esfuerzos en miembros compuestos por elementos no rigidizados.
- r_x y r_y** Radios de giro de la sección transversal alrededor de los ejes x y y respectivamente, in.
- t** Espesor del acero base de cualquier elemento de la sección transversal del perfil estructural, in.
- w** Ancho efectivo de los elementos que conforman el perfil estructural (excluidos los filetes).

INDICE DE ABREVIATURAS

SIMBOLOS DEFINICION

A	Area total de la sección transversal del elemento estructural.
b	Ancho efectivo de diseño de elementos rigidizados.
C_b	Coficiente de flexión como función del gradiente de carga.
C_c	Relación de esbeltez crítica.
C_m	Coficiente de los momentos externos en la fórmula de interacción.
d	Profundidad de la sección
E	Módulo de elasticidad del acero = 29500 ksi.
F	Esfuerzo básico en la sección neta de los miembros de tensión y compresión en las fibras extremas de los miembros en flexión.
F_a	Promedio máximo de esfuerzo de compresión
F_{a0}	Esfuerzo máximo permisible bajo una carga concéntrica determinada por la Sección 3.6.1.1 para $L = 0$, ksi.
F_{a1}	Esfuerzo máximo permisible bajo una carga concéntrica.
F_b	Esfuerzo máximo de flexión en compresión que es permitida cuando existe un esfuerzo de flexión pura.
F_{bw}	Esfuerzo máximo de flexión permisible en el alma de la viga debido a la flexión.
F_y	Esfuerzo de fluencia
F'_e	Esfuerzo crítico o de Euler
F'_{ex}	Esfuerzo crítico o de Euler cuando el pandeo ocurre en sentido del eje x.

Pag.

9.- Variación del esfuerzo del corte en perfiles doblados en frío. Norma AISI	144
---	-----

INDICE DE ABREVIATURAS

SIMBOLOS DEFINICION

A	Area total de la sección transversal del elemento estructural.
b	Ancho efectivo de diseño de elementos rigidizados.
C_b	Coefficiente de flexión como función del gradiente de carga.
C_c	Relación de esbeltez crítica.
C_m	Coefficiente de los momentos externos en la fórmula de interacción.
d	Profundidad de la sección
E	Módulo de elasticidad del acero = 29500 ksi.
F	Esfuerzo básico en la sección neta de los miembros de tensión y compresión en las fibras extremas de los miembros en flexión.
F_a	Promedio máximo de esfuerzo de compresión
F_{a0}	Esfuerzo máximo permisible bajo una carga concéntrica determinada por la Sección 3.6.1.1 para $L = 0$, ksi.
F_{a1}	Esfuerzo máximo permisible bajo una carga concéntrica.
F_b	Esfuerzo máximo de flexión en compresión que es permitida cuando existe un esfuerzo de flexión pura.
F_{bw}	Esfuerzo máximo de flexión permisible en el alma de la viga debido a la flexión.
F_y	Esfuerzo de fluencia
F'_{e}	Esfuerzo crítico o de Euler
F'_{ex}	Esfuerzo crítico o de Euler cuando el pandeo ocurre en sentido del eje x.

- f Esfuerzo actual en elementos en compresión calculados en base al ancho efectivo del diseño.
- f_a Esfuerzo axial = Carga axial dividido para el área total del miembro.
- f_b Máximo esfuerzo de flexión = Momento flector dividido para el módulo de sección del miembro, alrededor del eje en que ocurre la flexión, ksi.
- f_v Máximo esfuerzo cortante que soporta el area del alma de la viga, ksi.
- I_x Momento de inercia de la sección transversal del perfil, alrededor del eje centroidal perpendicular al alma de la viga, in⁴.
- I_{xc} Momento de inercia de la sección transversal sometida a compresión, alrededor del eje de simetría, in⁴.
- I_y Momento de inercia de la sección transversal alrededor del eje y, in⁴.
- K Factor de longitud efectiva.
- L Longitud no arriostrada de la viga, in.
- M_1 y M_2 Valores del mínimo y máximo momento de extremo, respectivamente.
- P Carga total del miembro sometido a cargas de compresión, kips.
- Q Factor de modificación de area y/o esfuerzo permisible de compresión.
- Q_a Factor de modificación de area de miembros compuestos por elementos rigidizados.
- Q_u Factor de modificación de esfuerzos en miembros compuestos por elementos no rigidizados.
- r_x y r_y Radios de giro de la sección transversal alrededor de los ejes x y y respectivamente, in.
- t Espesor del acero base de cualquier elemento de la sección transversal del perfil estructural, in.
- w Ancho efectivo de los elementos que conforman el perfil estructural (excluidos los filetes).

INDICE DE TABLAS

	Pag.
I. Cuadro comparativo de expresiones usadas por el Manual AISC con las usadas por el Manual AISI .	40
II. Valores típicos para la constante de longitud efectiva (Elementos sometidos a cargas de compresión)	54
III. Cuadro comparativo de las regulaciones del Manual del AISI con las del manual del AISC para el fenómeno de compresión	85
IV. Análisis comparativo entre las regulaciones del AISI y AISC para el cálculo del factor de reducción de esfuerzos (Q_e)	91
V. Análisis comparativo entre las regulaciones del AISI y AISC para el cálculo del factor de reducción de área (Q_a)	92
VI. Cuadro comparativo de las normas AISI y AISC para el análisis de vigas sometidas a cargas de flexión. Variación de F_b en función de $L^2 S_{xc}/dI_{yc}$	139
VII. Cuadro comparativo de las normas AISI y AISC para el análisis de vigas sometidas a cargas de flexión. Variación de F_v en función de h/t	140
VIII. Valores típicos de C_m y Ψ	164

INTRODUCCION

En la rama de la Ingeniería Mecánica, el Diseño se constituye en uno de los principales pilares para el desarrollo de la sociedad. Es una especialidad que se caracteriza por estar buscando constantemente la innovación. El diseño estructural constituye una rama de la Ingeniería que básicamente persigue la optimización de recursos en la construcción de edificaciones metálicas.

En nuestro País, la construcción de estructuras metálicas ha encontrado un gran auge debido a las grandes ventajas que ofrece la facilidad de trabajar con acero. Su alta resistencia y su ductilidad han sido los factores que han posibilitado dicho auge. Sin embargo, la casi nula producción de elementos de acero dentro de nuestra geografía ha obligado a los constructores a importar dichos elementos estructurales, lo que repercute en un alto costo de las obras de construcción.

Esta gran limitación económica ha sido compensada con la producción de perfiles metálicos doblados en frío. Dichos perfiles son obtenidos a partir de planchas de acero compradas en el mercado internacional, que son procesadas

(dobladas) por variadas industrias que se dedican a la comercialización de dichos elementos estructurales. Desgraciadamente, el poco conocimiento que se tiene de la variación de las propiedades metálicas del acero doblado, ha conducido a utilizar las mismas normas que se emplean para el diseño de estructuras industriales a partir de perfiles rolados, en muchas ocasiones acudiendo al sobredimensionamiento, lo que sin duda alguna constituye un aumento en los costos de construcción.

En el desarrollo de la presente Tesis de Grado se persigue analizar el diseño estructural con perfiles doblados y elaborar un programa de computación que permita escoger los perfiles estructurales más económicos para trabajar bajo determinadas condiciones de carga. Además, se procede a realizar una comparación entre las recomendaciones de diseño estructural realizadas por el American Institute of Steel Construction y las sugeridas por el American Iron and Steel Institute. Básicamente se trata de analizar los cuatro casos elementales de cargas aplicadas: Tensión, compresión, flexión y flexo-compresión.

CAPITULO I

DISEÑO ESTRUCTURAL DE ACERO DOBLADO EN FRÍO

1.1 Consideraciones generales

Para un proceso de diseño en general; y, de estructuras en particular, es necesario como paso preliminar conocer las propiedades físicas que posee el material con el cual se desea trabajar, así como también los criterios de diseño que gobiernan el uso económico y correcto dimensionamiento del material que se va a emplear. Para el desarrollo del presente proyecto es necesario conocer la manera en las cuales se ven afectadas las propiedades del acero cuando este es sometido a un trabajo en frío (doblado) y la forma en la cual la variación de dichas propiedades influye en los criterios de diseño que se emplean.

1.1.1 Propiedades de elementos formados en frío.

Al deformar en frío un acero, las propiedades mecánicas de este material se verán afectadas

de una manera muy grande debido a la presencia de esfuerzos residuales, provenientes de dicha deformación. Al construir perfiles rolados, las altas temperaturas de trabajo logran que el material llegue a cierto estado de plasticidad, en el cual la aplicación de esfuerzos sobre el material es mínima. Sin embargo, en este caso la presencia de esfuerzos residuales es grande; estos se encuentran concentrados en las partes internas del perfil y son producto de un enfriamiento no uniforme. En el caso de perfiles obtenidos por doblado, la energía de deformación es tan grande que provoca una distribución de esfuerzos muy variada en todo el perfil, tal como se observa en la figura 1. Esa distribución provoca una alteración de las propiedades mecánicas del material, tornándolo muy frágil y disminuyendo su capacidad de admitir deformación.

Para un proceso de diseño estructural es necesario determinar y conocer las propiedades más importantes del acero:

- a) Esfuerzo de fluencia.
- b) Resistencia a la tensión.
- c) Características y comportamiento de la curva

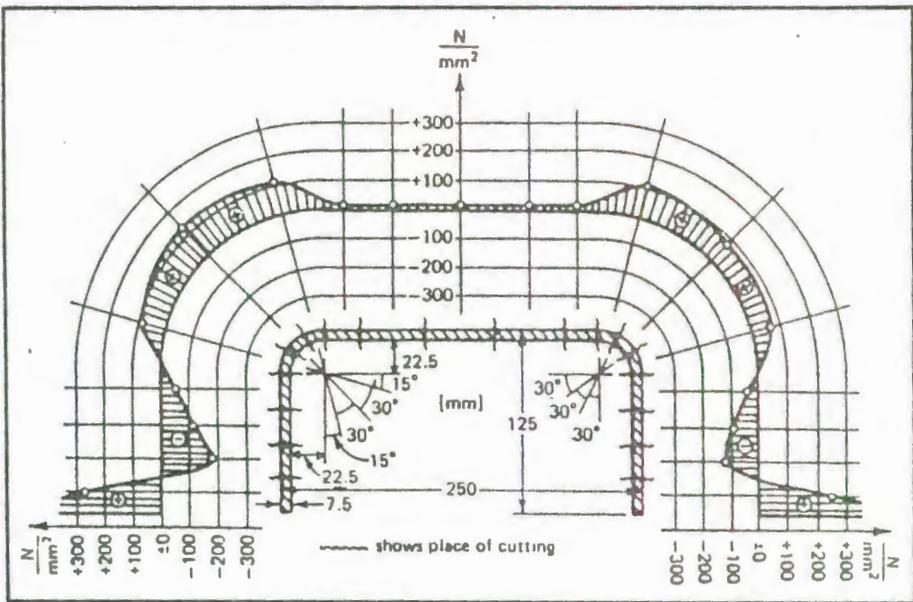


Fig. 1.- Esquema de distribución de esfuerzos en un perfil doblado en frío.

esfuerzo vs. deformación.

d) Módulo de elasticidad.

e) Ductilidad.

f) Soldabilidad.

g) Resistencia a la fatiga.

h) Tenacidad.

La resistencia de un elemento obtenido a partir de un proceso de deformación en frío, a excepción de aquellos elementos en los cuales el factor principal de diseño es el pandeo elástico que se pudiera producir, depende casi exclusivamente de su **esfuerzo de fluencia**. En la sección 1.2.1 del Manual del AISI, se estima una variación para el valor del esfuerzo de fluencia del material dentro del rango comprendido entre los 25 y 70 ksi (172 a 483 MPa)(fig. 1). Existen básicamente dos tipos de curvas esfuerzo vs. deformación para el acero; en una de ellas el esfuerzo de fluencia se encuentra plenamente identificado como un punto en el cual existe un aumento en la deformación del material, sin que se observe variación en el esfuerzo aplicado (fig. 2a); en la otra, el esfuerzo de fluencia del material no puede ser observado con facilidad ya que se presenta una

curva que tiene una leve variación; en estos casos el esfuerzo de fluencia es calculado como aquél esfuerzo capaz de producir un 0.1% de la deformación permanente del material (Fig. 2b).

En lo referente al **esfuerzo último a la tensión** que puede soportar el elemento, este no depende del material con el cual se trabaja, sino exclusivamente del diseño de dicho miembro.

En el diseño de elementos que trabajan sometidos a esfuerzos de compresión (peligro de pandeo), su resistencia no depende únicamente del esfuerzo de fluencia, en gran parte interviene el módulo de Elasticidad del material (E) y su módulo tangencial (E_t). El primero es definido como la pendiente de la parte inicial de la curva esfuerzo vs. deformación (zona elástica), con un valor que oscila entre 29.000 y 30.000 ksi (200 y 207 kN/mm^2). Aquí surge la primera diferencia entre las especificaciones del Manual AISC y el Manual AISI, ya que mientras el primero recomienda emplear un módulo de elasticidad de 29.000 ksi, en el segundo se aconseja utilizar un valor de 29.500 ksi. El módulo tangencial se encuentra definido como la pendiente

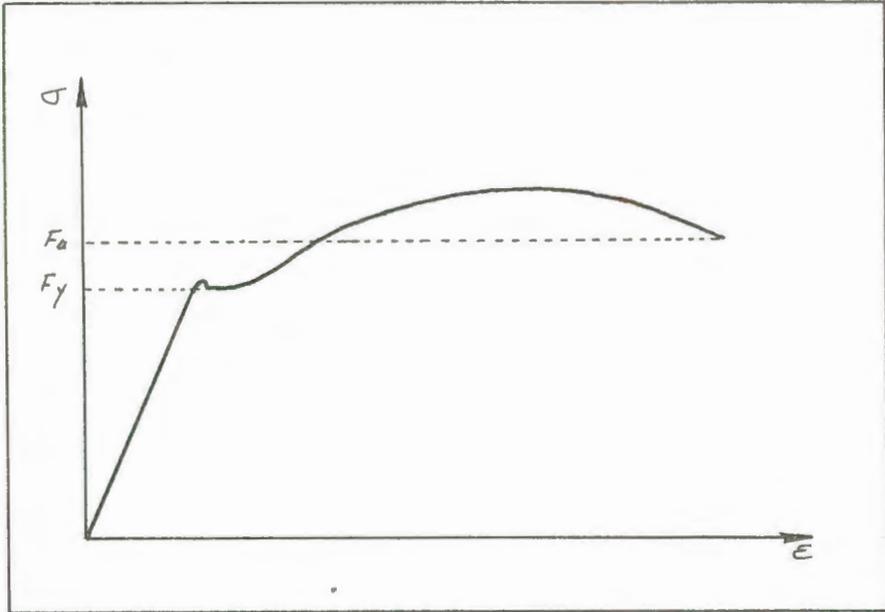


Fig. 2a.

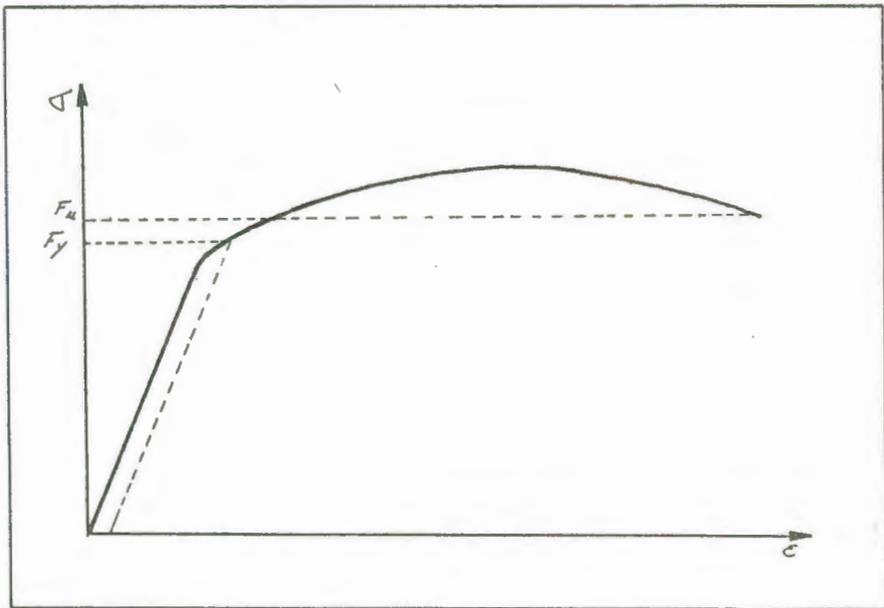


Fig. 2b.

Fig. 2.- Diagrama esfuerzo vs. deformación para aceros utilizados en la construcción de perfiles estructurales

de la curva esfuerzo vs. deformación en cualquier otro punto. Por esta razón, en los aceros que presentan un punto de fluencia plenamente identificado, los peligros de pandeo son menores ya que el valor del módulo tangencial es cercano al módulo de elasticidad, cosa que no ocurre con los aceros en los cuales el punto de fluencia no se encuentra plenamente identificado.

Otra propiedad mecánica importante es la ductilidad, la misma que se define como la capacidad que tiene el material para admitir deformación plástica, sin que se produzca su ruptura. Esta propiedad se encuentra íntimamente relacionada con el cociente que resulta al dividir el esfuerzo último que puede soportar el material, entre su esfuerzo de fluencia. Las recomendaciones del Manual del AISI establecen que aquellos materiales que pueden ser utilizados para obtener perfiles doblados en frío deben de cumplir con la siguiente relación:

$$\frac{F_u}{F_y} > 1.08 \quad (1)$$

¹ Manual del AISI, Edición de 1983, Sección 1.2.3.1

Este requerimiento asegura que el material tendrá un mínimo de ductilidad necesario para que pueda trabajar sin que se presente ningún inconveniente.

Otra propiedad muy importante que debe de poseer el acero utilizado para la construcción de perfiles estructurales doblados en frío, es referente a la **soldabilidad**, esto es capaz de ser unidos por procesos de soldadura, de manera satisfactoria, libre de impurezas y con relativa facilidad. Las regulaciones del "Structural Welding Code-Sheet Steel" (ANSI/AWS D1.3) proveen recomendaciones para los procesos de soldadura SMAW (soldadura de metal por arco), GMAW (soldadura de metal con arco y gas), SAW (soldadura por arco sumergido) y FCAW.

En lo que se refiere a las propiedades del acero, tales como resistencia a la fatiga (capacidad que posee el metal para resistir cargas cíclicas) y tenacidad (capacidad que posee el material para absorber energías sin que se produzca la fractura), el Manual del AISI no presenta recomendación alguna, por lo que se sugiere que se consideren en el diseño las espe-

cificaciones sugeridas por el Manual del AISC.

1.1.2 Criterios de diseño en elementos estructurales obtenidos por trabajo en frío.

Generalmente, la construcción de perfiles estructurales a partir de trabajos en frío (doblado), es a partir de láminas metálicas de pequeño espesor, por lo cual en dichos elementos juega un papel preponderante el pandeo (total o local) que pudiese ocurrir cuando soportan cargas mucho más bajas que aquellas que pudiesen producir la fluencia del material; por esta razón, el trabajo de diseño en este tipo de perfiles se torna complejo cuando estos deben tener capacidad para soportar cargas axiales de compresión, cargas de flexión pura o cargas de flexo-compresión. En las placas cuyos bordes presentan un estado de esfuerzos variado no ocurre lo mismo que en columnas sólidas; a diferencia de estas últimas, las placas continúan absorbiendo las cargas adicionales por medio de una redistribución de esfuerzos, la misma que ocurrirá hasta el momento en el que se produzca el pandeo local, luego de lo cual el elemento habrá fallado.

Para poseer los criterios correctos de diseño, se torna imprescindible tener los conocimientos básicos de lo que representan los determinados conceptos y dimensiones referentes a un tipo de perfil estructural:

a) Elemento no rigidizado que trabaja a compresión, es el que se caracteriza por poseer un borde libre, paralelo a la dirección de los esfuerzos.

b) Elemento rigidizado que trabaja a compresión, es el que se caracteriza por no poseer bordes libres, paralelos a la dirección de los esfuerzos.

c) Elemento rigidizado de forma múltiple, es el que posee múltiples rigidizadores entre lo que llega a formar el ala y el alma del elemento estructural.

d) Ancho del ala (w), que comprende la longitud del ala, sin tomar en consideración el segmento formado por la curva obtenida en el proceso de doblado.

e) Relación ancho del ala y espesor (w/t), que es el cociente que resulta al dividir el ancho del ala entre su espesor. La sección 2.3.3 del Manual del AISI establece las limitaciones para la relación w/t .

f) Ancho efectivo de diseño (b), es un ancho de diseño reducido para computar las propiedades seccionales de miembros sometidos a cargas de flexión y compresión en los cuales el cociente w/t excede cierto valor limitante.

g) Espesor (t), corresponde al grosor de la placa de acero base, es decir, a la dimensión que resulta al restar al espesor de la placa metálica lo correspondiente a la capa de protección (galvanizado) que esta pudiese poseer.

CAPITULO II

ELEMENTOS SOMETIDOS A TENSION

2.1 Análisis teórico

Se denomina cargas de tensión a aquellas que al ser aplicadas al elemento estructural tienden a provocar un aumento en su longitud. La magnitud de los esfuerzos de tensión está dada por el valor del cociente que resulta al dividir la magnitud de la carga aplicada entre el área que resiste dicha carga. Es decir:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

El diseño de un elemento sometido a cargas de tensión se caracteriza por poseer una sencillez extraordinaria. En este caso el principal factor que se debe controlar es la fluencia del material. Además de ello también es necesario que se cumplan los siguientes requerimientos:

- a) En lo posible, las conexiones deben de haber sido realizadas de tal manera que se impida el

¹ Resistencia de Materiales, Singer

efecto de la concentración de esfuerzos.

b) Las dimensiones de dichos elementos deben de tener una magnitud razonable con respecto a las de los otros miembros de la estructura de la cual forman parte.

2.1.1 Aplicaciones.- Secciones generalmente usadas

Los elementos sometidos a cargas de tensión forman parte de la totalidad de estructuras que se observan en el mundo moderno, sean estas pórticos o armaduras. Dentro de estos elementos, los que comúnmente se encuentran son los denominados tirantes, los mismos que forman parte de sistemas estructurales tales como puentes, torres y techos.

Como elementos estructurales diseñados para soportar cargas de tensión, miembros ideales suelen ser los cables; sin embargo, cuando se necesita resistir pequeñas cargas laterales a fin de cortar deflexiones excesivas y vibraciones es recomendable la utilización de perfiles estructurales. Refiriéndose a perfiles formados en frío, los de mayor utilización son los ángulos y los canales así como también los perfiles

tipo "I" y tipo "T", obtenidos a partir de la unión de los canales y ángulos respectivamente.

2.1.2 Cargas de tensión y área total

La carga de tensión que puede soportar un elemento es igual al esfuerzo permisible en tensión por el área total de la sección. Las normas del AISI señalan que el valor del esfuerzo admisible en tensión sea el 60% del límite en la fluencia. Así el valor de la carga aplicada es igual a:

$$T = F_t \cdot A_g^{(1)}$$

Donde:

F_t es el esfuerzo permisible en tensión

A_g es el área total del elemento

2.1.3 Area Neta

Para el diseño de elementos estructurales obtenidos por procesos de trabajo en frío, el Manual del AISI no menciona recomendaciones para el caso de perfiles en los cuales se ha traba-

¹ Manual del AISC

jado un agujero, sin embargo, para ese caso es necesario recurrir a las recomendaciones del Manual del AISC. En el se manifiesta que para el cálculo del área neta es necesario restar además del diámetro del agujero el valor de 1/16 de pulgada, que es el área que sufre daños por el proceso de mecanizado.

2.1.4 La rigidez como un criterio en el diseño

La rigidez es un fenómeno que no posee gran importancia en el diseño de elementos sometidos a cargas de tensión; sin embargo, resulta de mucha importancia cuando dichos elementos se encuentran sometidos a cargas transversales, principalmente las de viento.

El principal riesgo que se corre cuando no se controla la rigidez, es la posibilidad de que ocurran vibraciones que de alguna u otra manera pudiesen afectar la estabilidad de la estructura; y, en el caso más grave, la falla por fatiga del material.

El Manual del AISI no menciona especificaciones respecto al control de la rigidez del elemento;

sin embargo, debido a la pérdida de ductilidad del material por el proceso de formado en frío, la posibilidad de que ocurran vibraciones se torna crítica. Por esta razón es necesario controlar este aspecto, para lo cual se puede recurrir a las normas del Manual del AISC.

2.1.5 Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI

Para el cálculo del esfuerzo admisible en tensión, el Manual del AISI ofrece la expresión que se indica a continuación:

$$F_t = 0.60F_y \quad \begin{array}{l} \text{Manual} \\ \text{AISI} \end{array}$$

$$F = 0.60F_y \quad \begin{array}{l} \text{Manual} \\ \text{AISC} \end{array}$$

Para determinar el área neta del perfil, cuando en este se ha taladrado agujeros, es necesario recurrir a las normas del Manual del AISC.

$$A_n = A_t - nt \left(d + \frac{1}{16} \right) \quad (1)$$

Finalmente, para controlar la rigidez del elemento, también resulta necesario acudir a las recomendaciones del Manual del AISC. En este caso, el factor que domina el diseño es el cociente que resulta al dividir la longitud del

¹ Apuntes de Estructuras de Acero, Ing. A. Torres

elemento entre el radio de giro mínimo de la sección transversal. Para este efecto, también resulta de mucho interés determinar la disposición que van a ubicar los elementos en la estructura. De esta forma, se tiene que:

Para miembros principales:

$$\frac{L}{r_{\min}} < 240 \quad (1)$$

Para miembros secundarios:

$$\frac{L}{r_{\min}} < 300 \quad (2)$$

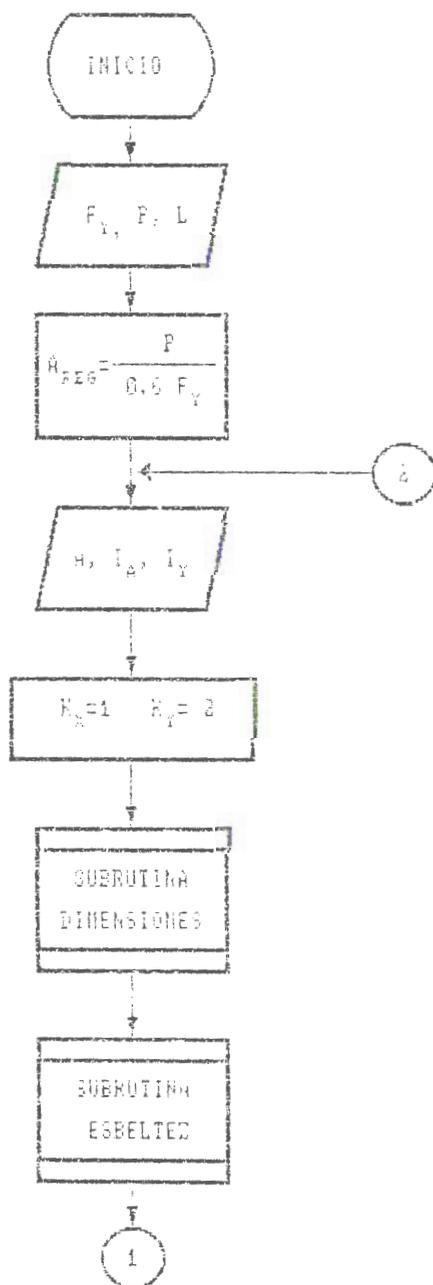
¹ Manual del AISC, Edición 1989

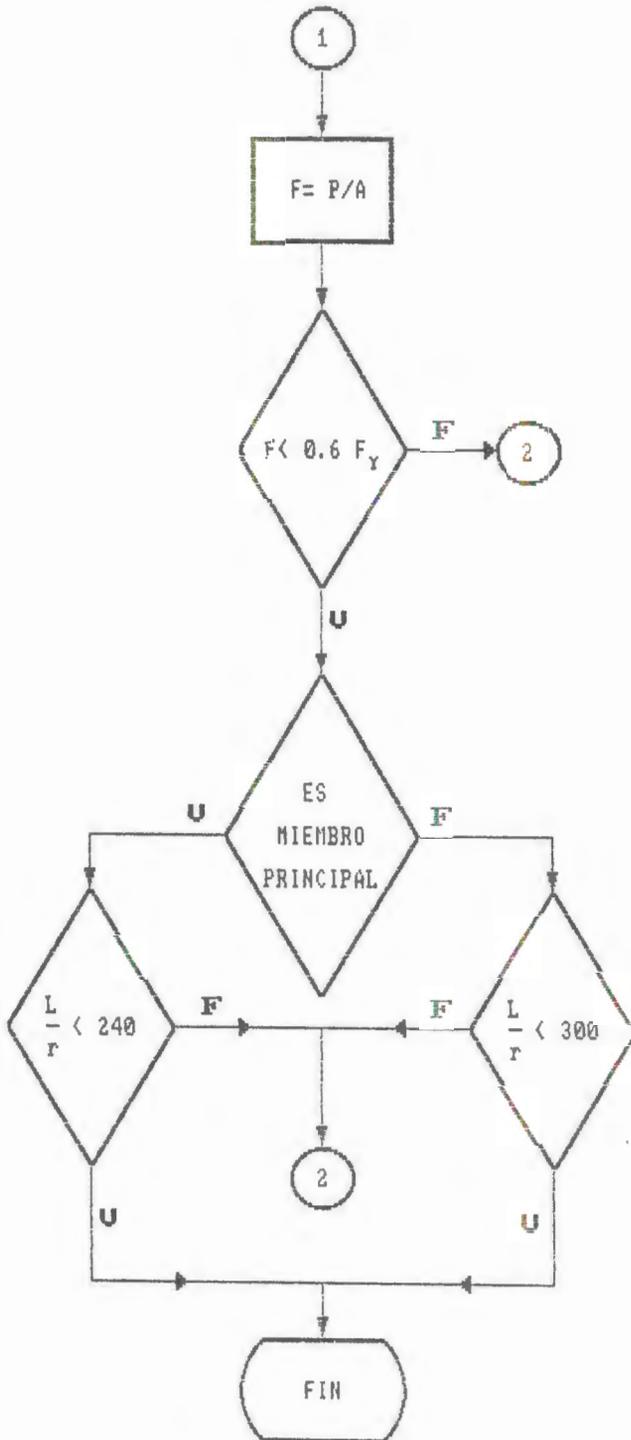
² Manual del AISC, Edición 1989

2.2 Programa de computación

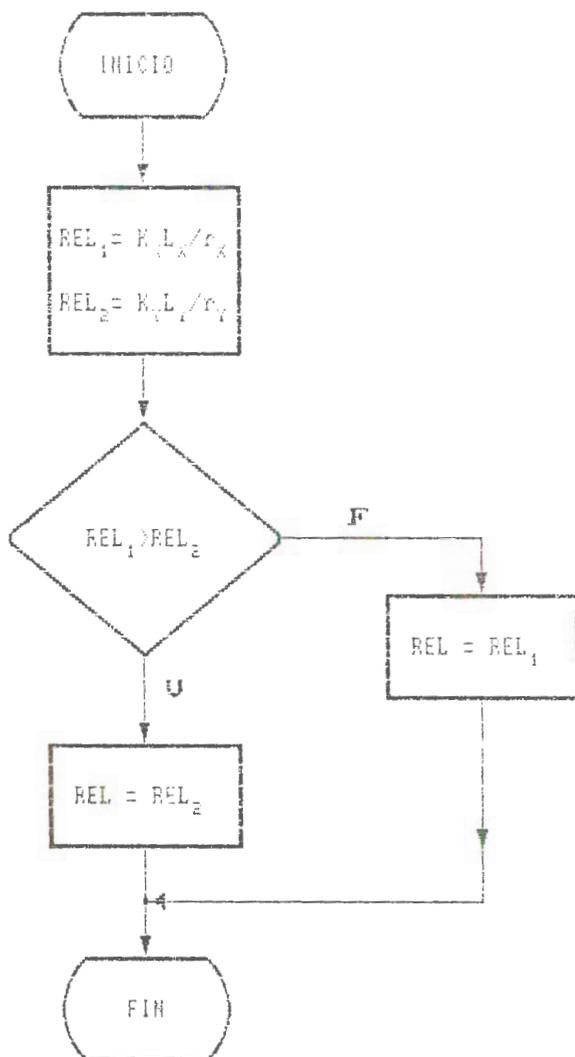
2.2.1 Diagrama de flujo

SELECCION DE ELEMENTOS EN TENSION





SUBROUTINA ESBELTEZ (REL)



2.2.2 Algoritmo

SUB TENSION

```

'#####
'##### TENSION #####
'#####
CLS
PI = 3.141592654#
LOCATE 12, 18: PRINT " INGRESAR LAS PROPIEDADES DEL ACERO A UTILIZAR "
LOCATE 14, 2: INPUT " Limite de fluencia = ", Fy
CLS
LOCATE 12, 19: PRINT " INGRESAR LA FORMA DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
LOCATE 14, 13: PRINT " Canal (C), Angulo (A), Zeta (Z), Tipo I (I), Tee (T) "
DO
  LOCATE 15, 24: INPUT " (Escoger una letra mayuscula) ", TIP$
  IF TIP$ <> "C" OR TIP$ <> "A" OR TIP$ <> "Z" OR TIP$ <> "I" OR TIP$ <> "T" THEN BEEP
LOOP UNTIL TIP$ = "C" OR TIP$ = "A" OR TIP$ = "Z" OR TIP$ = "I" OR TIP$ = "T"
CLS
DO
  LOCATE 15, 20: INPUT " Desea trabajar con un perfil rigidizado (S/N) ", RIG$
LOOP UNTIL RIG$ = "S" OR RIG$ = "N"
CLS
LOCATE 12, 19: INPUT " Carga de tension aplicada (T en kips) = ", P
LOCATE 14, 1: INPUT " Longitud no arriostrada de la columna con respecto al eje x-x (Lx en
pies) = ", Lx
DO
  LOCATE 15, 1: INPUT " El miembro cumple funciones principales o secundarias (P/S) ",
MIEMB$
LOOP UNTIL MIEMB$ = "P" OR MIEMB$ = "S"
CLS
Ft = .6 * Fy
Areq = P / Ft
LOCATE 10, 2: PRINT " Usted requiere un perfil de area mayor o igual que ", Areq
DO
  LOCATE 12, 2: PRINT " PROPIEDADES DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
  LOCATE 14, 2: INPUT " Ingrese el valor del area del perfil escogido (A en in2) ", area
  LOCATE 15, 2: INPUT " Ingrese el valor del momento de inercia respecto al eje x-x (Ix en
in4) ", Ix
  LOCATE 16, 2: INPUT " Ingrese el valor del momento de inercia respecto al eje y-y (Iy en
in4) ", Iy
  CLS
  Kx = 1
  Ky = 1
  CALL ESBELTEZ(Kx, Lx, Ix, Ky, Ly, Iy, area, REL)
  CALL DIMENSIONES(TIP$, RIG$, a, b, c, R, t, area, w1, w2, w3)
  Ftact = P / area
  IF MIEMB$ = "P" THEN
    LIM = 240
  ELSE
    LIM = 300
  END IF
  IF Ftact > Ftadm OR REL > LIM THEN

```

```

    LOCATE 10, 2: PRINT " El perfil no satisface las condiciones de diseño "
ELSE
    E = (Ftact - Ftadm) * 100 / Ftadm
    LOCATE 10, 2: PRINT " El perfil soporta la carga aplicada con un sobredimens enamiento
del "; E; "%"
END IF
CLS
LOOP UNTIL Ftact <= Ftadm AND REL <= LIM
DO
    LOCATE 10, 2: INPUT " Desea imprimir los resultados (S/N) "; IMP$
LOOP UNTIL IMP$ = "S" OR IMP$ = "N"
IF IMP$ = "S" THEN
    LPRINT " El perfil seleccionado es del tipo "; TIP$; " "; a; "x"; b; "x"; c
    LPRINT " El máximo esfuerzo de tensión que puede soportar es "; Ftadm
    LPRINT " El esfuerzo de tensión aplicado es "; Ftact
ELSE
    CLS
END IF
END SUB

```

2.3 Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI Y AISC

Una comparación entre las especificaciones que brindan tanto el Manual de Construcciones de Acero del AISC como el Manual de Diseño de Acero con perfiles Formados en Frío del AISI es de gran importancia para analizar las coincidencias, ventajas y desventajas que brindan ambas recomendaciones, las mismas que pueden ser observadas en la Tabla I.

Al comparar las diferentes recomendaciones que ofrece el Manual del AISI con las que brinda el Manual del AISC, es fácil verificar que el esfuerzo básico de diseño emplea el mismo factor de seguridad; esto se debe básicamente al hecho de que en el estudio de elementos estructurales sometidos a cargas de tensión, la presencia inicial de esfuerzos residuales de distribución no uniforme tiene poca o ninguna importancia. La razón principal de esta afirmación radica en el hecho de que en el análisis de esfuerzos de tensión el único factor que limita la capacidad de soportar carga de un elemento estructural sección transversal y por lo tanto se puede prescindir de un factor de seguridad más elevado y adoptar conservadoramente el ofrecido por el Manual del AISC.

Tabla I

Cuadro comparativo de expresiones usadas por el Manual AISC con las usadas por el Manual AISI

Aplicación	Manual AISI	Manual AISC
Esfuerzo básico de diseño	$F_a = 0.60F_y$	$F_a = 0.60F_y$
Area neta en el caso de perforación de agujeros	No provee (Usar AISC)	$A_n = A_t - nt \left(a + \frac{1}{16} \right)$
Máxima relación de esbeltez. Miembros principales	No provee (Usar AISC)	$\frac{L}{r_{\min}} < 240$
Máxima relación de esbeltez. Miembros secundarios	No provee (Usar AISC)	$\frac{L}{r_{\min}} < 300$

En lo que respecta a las otras especificaciones, tales como la referentes al área neta del perfil, cuando en este se han elaborado gráficos, el Manual del AISI no provee ninguna especificación; sin embargo, en este caso resulta necesario tomar en consideración la especificación ofrecida por el Manual del AISC; principalmente por el hecho de que el análisis de elementos sometidos a tensión no implica mayores márgenes de seguridad.

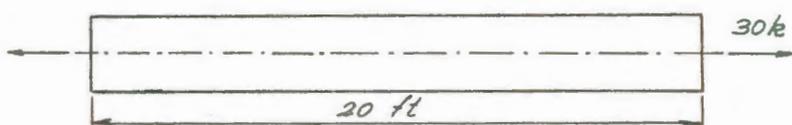
El mismo principio que se aplicó para el caso del área neta efectiva de diseño es válido para los casos de diseño de perfiles tomando en consideración la rigidez del elemento. En estos elementos resulta más crítico controlar la rigidez para evitar la vibración de dichos elementos cuando soporten cargas transversales.

Generalmente los perfiles obtenidos por doblado se caracterizan por tener un espesor relativamente bajo (no mayor a $3/16$ de pulgada). A ello se suma el hecho de que al realizar el trabajo en frío en dichos elementos, si bien es cierto que ganan gran resistencia, no es menor cierto que estos disminuyen enormemente su ductilidad, lo que los hace sumamente frágiles, creando el peligro de que falten por fatiga. Por esta

razón, al no proveer el Manual del AISI expresiones que limiten la rigidez del material, es válido aprovechar las que aparecen en el Manual del AISC, tanto para miembros principales, como para miembros secundarios.

2.4 Ejercicios de aplicación

Diseñar un elemento estructural a partir de un perfil tipo "C" rigidizado, empleado para soportar una carga de tensión de 30 kips y funcionando como elemento principal de una estructura. Considere una longitud 20 ft para cargas de tensión. Utilice un acero A36.



* Normas AISI

Primera aproximación

1.- Calculo esfuerzo admisible

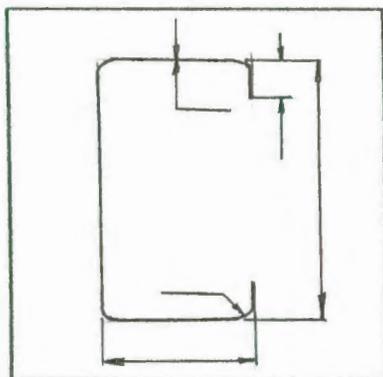
$$F_a = 0.6 F_y$$

$$F_a = 0.6 * 36 \quad F_a = 21.6 \text{ ksi}$$

2.- Calculo el area requerida $A_{req} = P/F_a$

$$A_{req} = 30/21.6 \quad A_{req} = 1.39 \text{ in}^2$$

3.- Escojo un perfil que cumpla ese requerimiento de área.



$$A = 1.41 \text{ in}^2$$

$$r_x = 2.74 \text{ in} \quad r_y = 1.01 \text{ in}$$

$$f_a = P/A \quad f_a = 30/1.39$$

$$f_a = 21.28 \text{ ksi}$$

4.- Diseño considerando la esbeltez

$$\frac{L_x}{r_x} = \frac{20 \times 12}{2.74} \Rightarrow \frac{L_x}{r_x} = 87.59$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \frac{20 \times 12}{1.41} \Rightarrow \frac{L_y}{r_y} = 170.213$$

Como se cumple que:

$$f_a < F_a$$

$$21.28 \text{ ksi} < 21.6 \text{ ksi}$$

$$L/r_{\min} < 240$$

$$170.213 < 240$$

Es fácil entonces verificar que el perfil estructural seleccionado puede ser utilizado para soportar las condiciones de carga planteadas en el problema.

* Normas AISC

Primera aproximación

Para seleccionar un perfil estructural que satisfaga las condiciones de carga a las que va a estar sometido, será necesario escoger uno que posea características de área similares a las que posee el perfil seleccionado según las normas del AISI. Así, es fácil verificar que el

que más se aproxima es:

C3x5

$$A = 1.47 \text{ in}^2 \quad r_x = 1.12 \text{ in} \quad r_y = 0.410 \text{ in}$$

$$f_a = 30/1.47$$

$$f_a = 20.41 \text{ ksi}$$

$$F_a = 0.6*36$$

$$F_a = 21.6 \text{ ksi}$$

El diseño considerando la esbeltez

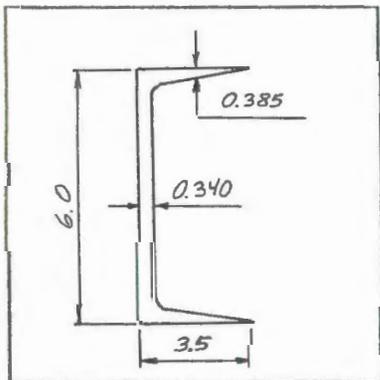
$$KL/r_{\min} = 1*20*12/0.410$$

$$KL/r_{\min} = 585.37$$

El perfil no satisface y por lo tanto es necesario escoger uno que posea un radio de giro mayor:

Segunda aproximación

MC6X15.3



$$A = 4.50 \text{ in}^2 \quad r_x = 2.38 \text{ in}$$

$$r_y = 1.05 \text{ in}$$

$$f_a = 30/4.50 \quad f_a = 6.67 \text{ ksi}$$

$$F_a = 0.6*36$$

$$F_a = 21.6 \text{ ksi}$$

Diseño controlando la esbeltez

$$KL/r_{\min} = 1*20*12/1.05$$

$$KL/r_{\min} = 228.57$$

Como $228.57 < 240$, el perfil estructural cumple las condiciones de rigidez y por lo tanto puede ser empleado como elemento principal para trabajar sometido a cargas de tensión.

ANALISIS COMPARATIVO

AISI	AISC
$A = 1.41 \text{ in}^2$	$A = 4.50 \text{ in}^2$
$r_{\min} = 1.01 \text{ in}$	$r_{\min} = 1.05$
$f_a = 21.3 \text{ ksi}$	$f_a = 6.67 \text{ ksi}$
$F_a = 21.6 \text{ ksi}$	$F_a = 21.6 \text{ ksi}$
$L/r_{\min} = 237.62$	$L/r_{\min} = 228.57$

Observando este ejercicio, resulta fácil verificar que los elementos estructurales diseñados según normas del AISC (específicamente en lo que respecta a canales), poseen un radio de giro muy pequeño, lo que involucra una gran relación de esbeltez; y por lo tanto, a pesar de que posean un área capaz de soportar el estado de carga, su estabilidad no brindará confianza en el diseño. Por otra parte, en los perfiles estructurales diseñados de acuerdo a las normas del AISI se ha conseguido una mejor distribución del área transversal (construyendo perfiles altos y anchos) lo que ha dado como resultado un radio de giro mayor y por lo tanto un perfil en el cual se consiga

una mejor relación de esbeltez. De esta manera se logran perfiles con mayor eficiencia y por lo tanto, más económicos. En esta fase sería importante hacer notar que no solo el valor del área transversal del perfil brinda un elemento de control, sino también el radio de giro mínimo que tenga dicho elemento.

CAPITULO III

ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN

3.1 Análisis Teórico

Se denomina fuerzas de compresión a aquellas que tienden a acortar o disminuir la longitud del elemento en el que son aplicadas. Dentro de la mecánica estructural existe una gran variedad de elementos que se encuentran sometidos a cargas de compresión entre los cuales los de mayor importancia son las columnas.

Se define como columna a aquel elemento estructural cuya longitud es mucho mayor que las otras dos dimensiones.

Al analizar el estados de esfuerzos de un columna se puede verificar que la falla por esfuerzo normal ocurre muy por debajo del límite elástico y el peligro de que colapse radica en el **pandeo o flexión lateral**. En este caso, los elementos fallan cuando se alcanza

el valor de la carga crítica debido a la inestabilidad; es decir, posiblemente la columna continuará fallando y flexionándose, aún cuando la magnitud de la carga no aumente por encima del valor de la carga crítica. Es por esta razón que ocurre una reducción en los esfuerzos permisibles.

Un factor de gran incidencia en el fenómeno de pandeo es la longitud de la columna. Mientras más larga sea la columna para una misma sección transversal, mayor será su tendencia a pandear y por lo tanto su capacidad de carga será menor. Otros factores de gran incidencia en el fenómeno de pandeo son:

- a) Los tipos de conexiones en los extremos
- b) Excentricidad en la aplicación de las cargas
- c) Imperfecciones del material
- d) Torceduras iniciales
- e) Esfuerzos residuales del proceso de fabricación.

3.1.1 Aplicaciones

Como se mencionó en párrafos anteriores los principales elementos que se diseñan para soportar cargas de compresión son las columnas.

Otros elementos que son diseñados para soportar cargas de compresión son las cuerdas superiores de las armaduras, los miembros de arriostramiento, los patines a compresión de las vigas laminadas y las armadas y miembros sujetos a una combinación de cargas de flexión y compresión.

3.1.2 Diferencia entre los efectos de tensión y compresión.

La principal diferencia entre los elementos sujetos a cargas de tensión y compresión radica en el tipo de falla que la carga tiende a producir. En efecto, mientras las cargas de tensión ocasionan un aumento en la longitud del elemento estructural, manteniéndolo recto y tratando de producir su ruptura, las cargas de compresión mucho antes de causar una disminución en la longitud del miembro y de hacerlo reventar por dicha aplicación de carga, producen la flexión lateral o pandeo. Por esta razón es que la capacidad de carga de una columna es mucho menor que la de una barra sujeta a cargas de tensión.

3.1.3 Columnas cargadas axialmente

En el diseño de columnas la condición idónea que se debe tratar de conseguir es que la línea de acción de la carga aplicada coincida con el centro de gravedad de la sección transversal de la columna. Cuando ello ocurre, se dice que la columna se encuentra cargada axialmente y por lo tanto se encuentra sometida a esfuerzos de compresión.

Cuando la línea de acción de la carga no coincide con el centro de gravedad de la columna, además del fenómeno de compresión, pueden presentarse simultáneamente el fenómeno de flexión y el de torsión, lo que dificulta el estudio ya que complica la distribución de esfuerzos en la columna. En el presente trabajo sólo se desarrollará el estudio de columnas cargadas axialmente.

3.1.4 Tipos de columnas

Un elemento estructural sometido a cargas axiales de compresión sufrirá un acortamiento en la dirección de la carga. Si la carga se

aumenta gradualmente hasta alcanzar un determinado valor de carga, conocido como **carga crítica**, esta se pandeará presentando entonces una flexión lateral pudiendo en ocasiones observarse una torsión en una dirección perpendicular al eje longitudinal.

La resistencia de una columna y la manera de la cual puede fallar dependen de la longitud de la columna y en especial de un parámetro adimensional denominado **relación de esbeltez** y que es el cociente que resulta al dividir el tramo no soportado de la columna (longitud efectiva) entre el mínimo radio de giro, paralelo al cual puede ocurrir la flexión.

$$C = \frac{L_e}{r} \quad (1)$$

La **longitud efectiva** de la columna es la porción del elemento que no se encuentra afectada por las conexiones con otros miembros estructurales. Su valor (L_e) se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$L_e = KL \quad (2)$$

¹ Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley

² Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley

Donde K depende de las conexiones de los extremos de la columna, así: los diferentes valores de K pueden ser observados en la Tabla II.

De la combinación de las ecuaciones anteriores la relación de esbeltez de la columna puede ser obtenido con la siguiente expresión:

$$C = \frac{KL}{r} \quad (1)$$

Se conoce como la **relación de esbeltez crítica** a aquel valor de la relación de esbeltez que separa las columnas intermedias de las columnas largas. Es un parámetro adimensional que depende básicamente de las propiedades del material (Módulo de elasticidad y límite de fluencia). Su valor obedece a la siguiente expresión.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

Manual
AISC

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

Manual
AISI

Columnas cortas.- Son aquellas en las cuales la relación de esbeltez no es mayor de 30. Estas fallan por aplastamiento; el esfuerzo de

¹ Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley

Tabla II

Valores típicos para la constante de longitud efectiva
(Elementos sometidos a cargas axiales de compresión)

Tipo de conexión	K Valor teórico	K Valor AISI
Doblemente empotrada	0.50	0.65
Un extremo empotrado y otro simplemente apoyado	0.70	0.80
Un extremo empotrado y otro con conexión de libre traslación	1.00	1.20
Dos extremos simplemente apoyados	1.00	1.00
Un extremo empotrado y otro sin conexión	2.00	2.10
Un extremo simplemente apoyado y otro con conexión de libre traslación	2.10	2.0

falla será igual al esfuerzo de fluencia y por lo tanto no ocurrirá el pandeo. Pueden también ser llamados bloques de compresión.

Columnas largas.- Son aquellas en las cuales la relación de esbeltez es mayor que la relación de esbeltez crítica. En ellas el esfuerzo axial de pandeo permanece por debajo del límite proporcional. Dichas columnas fallan elásticamente.

Columnas intermedias.- Son aquellas en las cuales la relación de esbeltez es menor que la relación de esbeltez crítica. Algunas fibras alcanzarán el esfuerzo de fluencia y otras no; estas fallarán tanto por fluencia como por pandeo y su comportamiento es inelástico.

3.1.5 Proceso general para el diseño de columnas

El diseño de columnas es un poco más complejo que el diseño de miembros en tensión, puesto que la falla por esfuerzo normal T_c ocurre muy por debajo del límite elástico de la columna debido a su tendencia al pandeo o flexión lateral. Es por esta razón que los es-

fuerzos permisibles deben ser reducidos tomando en consideración el peligro de pandeo. Aquí vale recordar que mientras más larga sea una columna para una misma sección transversal, mayor será su tendencia a pandear y menor será su capacidad de carga.

El proceso para el diseño de acuerdo a los fundamentos del Manual del AISI puede ser resumido en los siguientes pasos:

- 1) Asumir un esfuerzo permisible (F_a), igual al 50% del esfuerzo de fluencia; debido a que el límite superior del pandeo elástico queda definido por un esfuerzo $F_{amax} = 0.5 F_y$.
- 2) Cálculo del área requerida de la sección, como resultado de la división de la carga para el esfuerzo permisible.
- 3) Con el área así calculada se selecciona con el manual de un perfil estructural adecuado.
- 4) Con el conocimiento de las propiedades geométricas del perfil seleccionado se calcula la relación de esbeltez crítica para determinar

el pandeo elástico o inelástico y en base a ello se determina el esfuerzo permisible.

5) La sección escogida será válida cuando se cumpla que el esfuerzo actual f_a sea menor que el esfuerzo permisible en compresión.

3.1.6 Elementos rigidizados y no rigidizados

En un proceso general se considera la estabilidad del elemento estructural columna como un todo, pero es posible que los elementos delgados (alas y almas) se pandeen localmente al estar sometidas a cargas de compresión mucho antes de que se produzca el colapso total del elemento.

La aplicación de fuerzas de compresión en placas delgadas ocasiona la flexión de estos elementos alrededor del eje que posee el menor momento de inercia. Esto se debe a que las piezas delgadas carecen de rigidez si sus extremos están libres; sin embargo, si el extremo libre se dobla, se logra aumentar su rigidez. Es en base a esto último que se puedan distinguir dos tipos de elementos: elementos

rigidizados y elementos no rigidizados.

Elementos no rigidizados.- Son piezas proyectantes que poseen un borde libre paralelo a la dirección de la fuerza de compresión.

Elementos rigidizados.- Son aquellos que no poseen bordes o extremos libres.

La condición de elemento rigidizado o no rigidizado de un elemento estructural depende básicamente de la relación ancho (w) a espesor (t) de los elementos. Si dicha relación w/t excede ciertos valores, ocurrirá el pandeo local antes de que se alcancen los esfuerzos de fluencia. Cuando el pandeo local controla el diseño, la eficiencia o capacidad de la sección debe de ser reducida mediante la aplicación de un factor de reducción Q .

3.1.7 Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI

Al igual que los perfiles rolados, los perfiles formados en frío pueden ser diseñados para soportar cargas de compresión aplicadas a través del centro de la sección transversal y

pueden estar constituidos de tal forma que:

- a) Todos sus elementos sean rigidizados
- b) Todos sus elementos sean no rigidizados
- c) Parte de sus elementos sean rigidizados y otra parte sean no rigidizados.

Los perfiles formados en frío son construidos a partir de planchas de acero de poco espesor y por ello en muchos casos el centro de corte no coincide con el centroide de la sección. De acuerdo a las condiciones de carga los perfiles pueden ser diseñados contra los siguientes tipos de falla:

- a) Falla por fluencia
- b) Falla por pandeo total de la columna
 - i.- Pandeo por flexión alrededor del eje principal.
 - ii.- Pandeo torsional alrededor del centro de corte del perfil.
 - iii.- Pandeo flexo torsional (flexión y torsión simultáneamente)
- c) Falla por pandeo local en los elementos individuales.

En el desarrollo del presente proyecto sólo se estudiarán los casos de pandeo del tipo de

flexión pura. Las especificaciones para este tipo de diseño se encuentran enmarcadas en la sección 3.6.1.1 del Manual del AISI. En dicha sección se analiza el pandeo que puede existir en elementos compactos y no compactos de formas simétricas, secciones cerradas y secciones cilíndricas.

La carga elástica de pandeo para una columna larga puede ser determinada por la fórmula de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

Dividiendo la expresión anterior para el área transversal del perfil estructural que soporta la carga de compresión, se define de esa manera el esfuerzo de Euler o esfuerzo crítico, a través de la siguiente expresión:

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

Esta última ecuación es aplicable a columnas ideales construidas a partir de elementos estructurales fabricados con aceros dúctiles, en los cuales no se tome en consideración los

¹ Cold-Formed Steel Design, Wei-Wen Yu

² Cold -Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

esfuerzos residuales producidos por el proceso de trabajo en frío. Analizando los aceros comúnmente utilizados para los procesos de trabajo en frío se puede encontrar que estos inicialmente poseen una alta ductilidad, la misma que está caracterizada por poseer una fluencia gradual. Mas al aplicar el trabajo en frío se logra aumentar su límite de fluencia pero disminuyen su ductilidad y el valor de su límite de proporcionalidad. Por las dos razones anteriores es que la ecuación de Euler no es aplicable en columnas que posean una relación de esbeltez baja ya que en dichos elementos gobierna el pandeo inelástico.

En la actualidad el Manual del AISI acoge las recomendaciones del Consejo de Investigación de Columnas (Columns Research Council) y establece que el valor del esfuerzo que soportan las columnas cortas está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_t = F_y - \frac{F_y^2}{4\pi^2 E} * (KL/r)^2 \quad (1)$$

Las expresiones anteriores son modificadas por

¹ Cold-Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

un factor de seguridad, el mismo que define los esfuerzos permisibles en base a la relación de esbeltez del elemento, en comparación con el valor de su relación de esbeltez crítica (C_0).

1.- Si $KL/r < C_0$

$$F_{a1} = \frac{12}{23} \left[F_y - \left(\frac{F_y^2}{4\pi^2 E} \right) (KL/r)^2 \right]$$

Manual AISI

$$F_{a1} = \frac{1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_0^2}}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_0} - \frac{(KL/r)^3}{8C_0^2}} F_y$$

Manual AISC

2.- Si $KL/r > C_0$

$$F_a = \frac{12}{23} * \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Manual AISI y
Manual AISC

Otro fenómeno que tiene gran incidencia en el diseño de columnas es el de pandeo local. Este fenómeno ocurre cuando la carga aplicada sobre el elemento estructural no provoca el colapso de la columna como un todo, sino que ocasiona la falla de alguno de los elementos que la conforman (ala o alma), ocasionándose de esta manera una disminución en su resistencia.

En general, la influencia del pandeo local en

un elemento estructural depende de los siguientes factores:

- a) La forma de la sección transversal.
- b) La relación de esbeltez de la columna.
- c) El tipo de pandeo general que gobierna el diseño de la columna (flexión, torsión o flexo-torsión)
- d) El tipo de acero y sus propiedades mecánicas.
- e) Influencia del trabajo en frío.
- f) Efectos de las imperfecciones cristalinas
- g) Efectos de los esfuerzos residuales producto del trabajo en frío.
- h) Interacciones entre los componentes de la estructura.
- i) Efectos de las perforaciones.

Desde 1946 el efecto del pandeo local en la resistencia de una columna ha sido considerado por el AISI dentro de las "Especificaciones para el diseño de miembros estructurales de acero de bajo espesor" en los cuales se considera el ingreso de un factor geométrico de reducción Q , el mismo que disminuye la capacidad de carga del elemento.

Para miembros compuestos totalmente por elementos rigidizados el factor Q pasa a convertirse en un factor de área Q_a , definido como el cociente que resulta al dividir el área efectiva de trabajo entre el área total del elemento.

$$Q_a = \frac{A_{eff}}{A}$$

AISI y
AISC

Si se considera un esfuerzo actual de diseño $f=0.60F_y$, tomando como parámetro de comparación la relación ancho espesor del elemento, se puede obtener que:

1.- Si $w/t \leq 184/\sqrt{f}$

$$b=w$$

Similar en Manual
AISI y AISC

2.- Si $w/t > 184/\sqrt{f}$

$$\frac{b}{t} = \frac{253}{\sqrt{f}} * \left(1 - \frac{50.3}{(w/t)\sqrt{f}}\right) \text{ Similar en Manual AISI y AISC.}$$

Para cualquiera de los dos casos, siempre se

tendrá que:

$$A_{eff} = b \cdot t$$

Similar en Manual
AISI y AISC

Para miembros que se encuentren compuestos totalmente por elementos no rigidizados, el factor de reducción Q se transforma en un factor de esfuerzo Q_s , que se encuentra definido como el cociente que resulta al dividir el esfuerzo actual de compresión para una placa plana (F_c) entre el esfuerzo admisible del elemento.

$$Q_s = \frac{F_c}{F}$$

Similar en Manual
AISI y AISC

Donde el valor del esfuerzo admisible del elemento está dado por:

$$F = 0.60 \cdot F_y$$

(1)

Al igual que en todas las condiciones en que pudiese ocurrir pandeo local, la relación w/t se transforma en el factor dominante de diseño; así, se tienen las siguientes recomendaciones para diferentes valores de dicha relación.

¹ Cold-Formed Steel Design, Wei-Wen Yu

1.- Si $w/t \leq 63.3/\sqrt{F_y}$

$$F_c = 0.60 * F_y$$

Similar en Manual
AISI y AISC

2.- Si $63.3/\sqrt{F_y} < w/t \leq 144/\sqrt{F_y}$

$$F_c = F_y * [0.767 - 2.64 * 10^{-3} (w/t) \sqrt{F_y}] \quad \langle 1 \rangle$$

3.- Si $144/\sqrt{F_y} < w/t \leq 25$

$$F_c = \frac{8000}{(w/t)^2} \quad \langle 2 \rangle$$

4.- Si $25 < w/t \leq 60$

Para el caso de ángulos se deberá satisfacer la ecuación anterior, mientras que para todos los demás tipos de perfiles se debe cumplir que:

$$F_c = 19.8 - 0.28 * (w/t) \quad \langle 3 \rangle$$

Por otra parte, para elementos estructurales que se encuentren conformados por elementos rigidizados y no rigidizados, el factor de reducción total estará dado por:

¹ Manual del AISI, Edición 1983

² Manual AISI, Edición 1983

³ Manual del AISI, Edición 1983

$$Q = Q_a * Q_e \quad \text{Similar en Manual AISI y AISC}$$

Tomando en consideración la introducción del factor Q , las fórmulas deducidas para el diseño de elementos estructurales sometidos a cargas de compresión son modificadas de la siguiente manera:

1.- Si $KL/r < C_c/\sqrt{Q}$

$$F_a = \frac{12}{23} Q F_y - \frac{3(Q F_y)^2}{23 \pi^2 E} (KL/r)^2 \quad \text{Manual AISI}$$

2.- Si $KL/r \geq C_c/\sqrt{Q}$

$$F_a = \frac{12 \pi^2 E}{23 (KL/r)^2} \quad \text{Similar en Manual AISI y AISC}$$

La variación del esfuerzo admisible de columnas, según las normas del Manual del AISI para diversos valores del producto $Q F_y$ puede ser observada en la figura 4.

Es interesante recalcar el hecho de que el factor de reducción Q sólo aparece cuando el valor de la relación de esbeltez del elemento es menor que el valor límite definido previa-

ESFUERZOS ADMISIBLES EN COLUMNAS

Acero formado en frío. Normas AISI

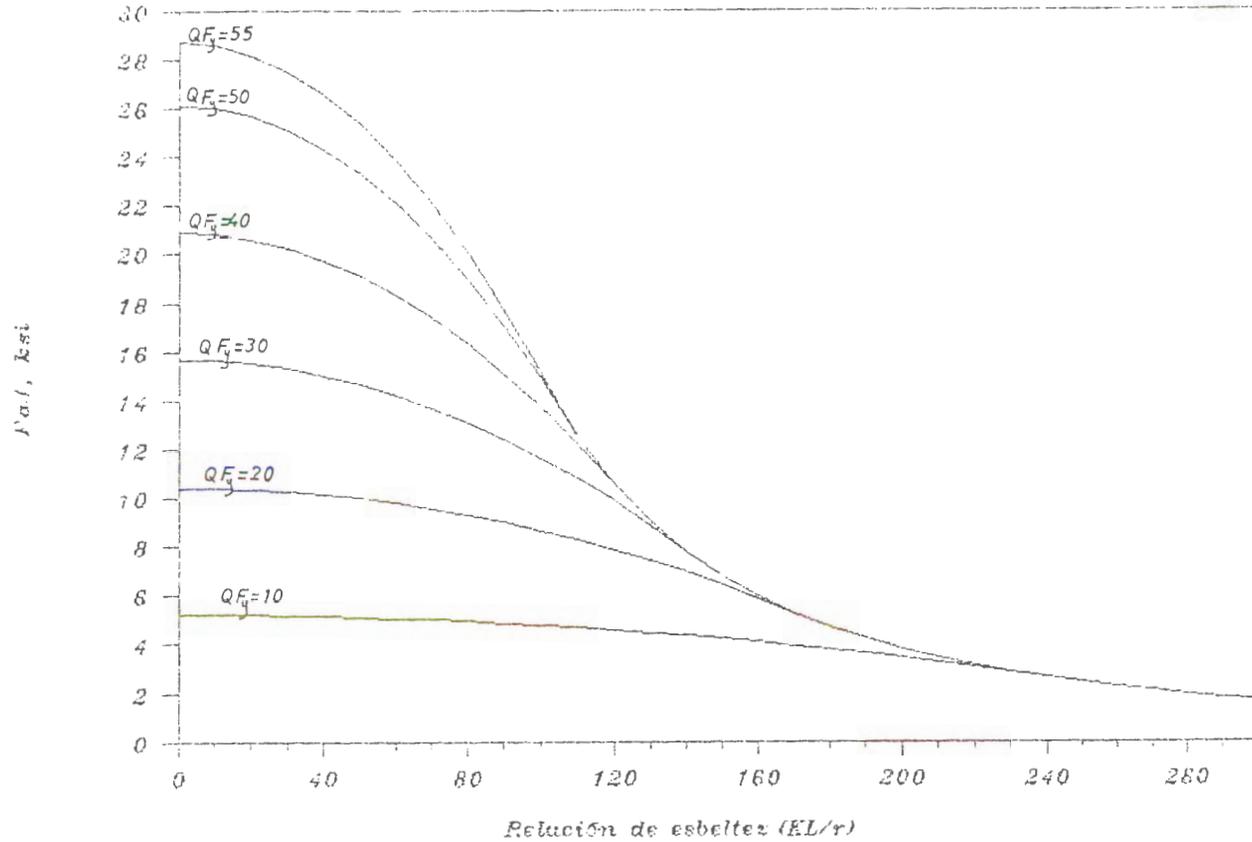


Fig. 3.- Columnas.- Esfuerzo admisible vs. la relación de esbeltez. Norma AISI

mente. Esto ocurre porque para columnas largas los esfuerzos con los cuales se produce pandeo son tan bajos que la columna falla por pandeo local.

Adicionalmente, el Manual del AISI recoge una especificación del Manual AISC para secciones compactas ($Q = 1.0$) que la aplica a perfiles formados en frío a partir de planchas de espesor superior a 0.09 in (2.3 mm). Para dichos casos, siempre que $KL/r \leq C_0$ se tiene que:

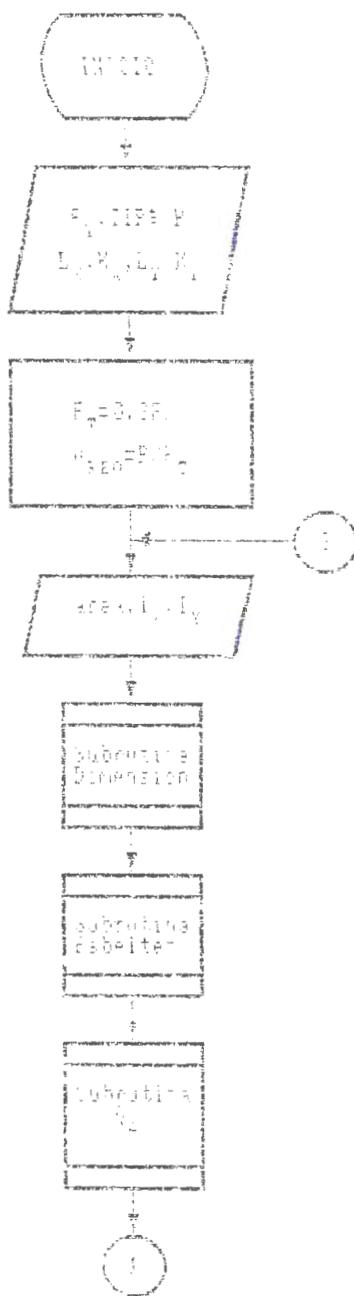
$$F_{a1} = \frac{1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} * F_y$$

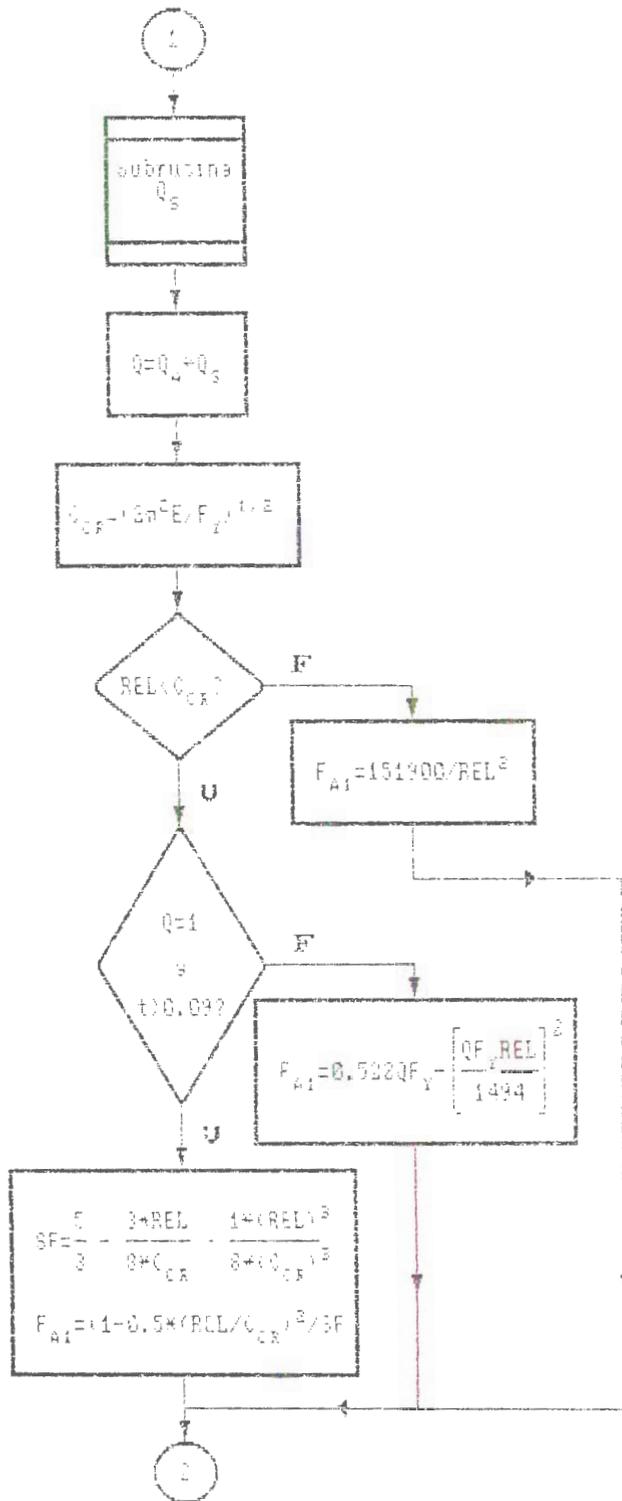
Similar en
Manual AISI y
AISC

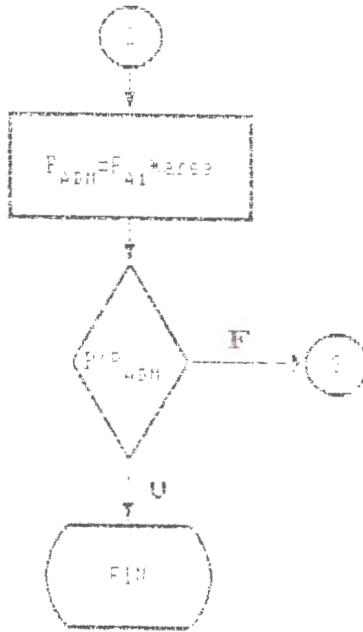
3.2 Programa de computación

3.2.1 Diagrama de flujo

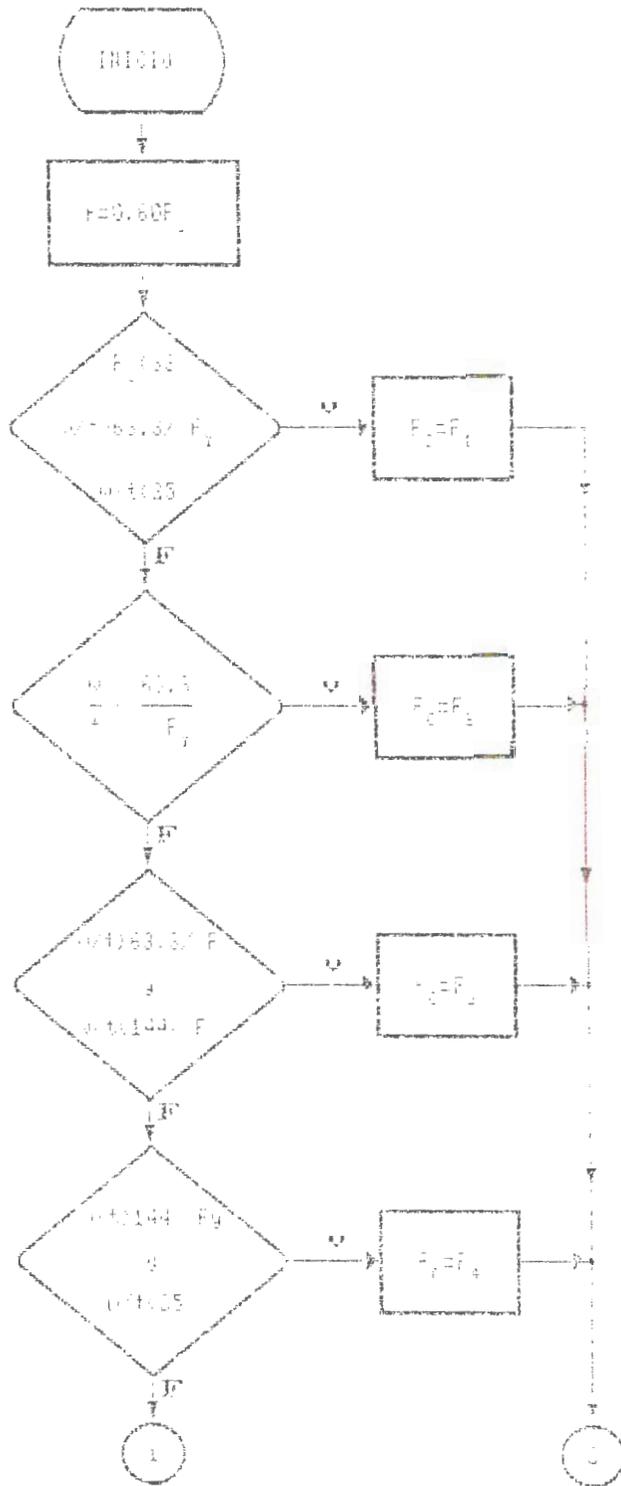
SELECCION DE MIEMBROS EN COMPRESION



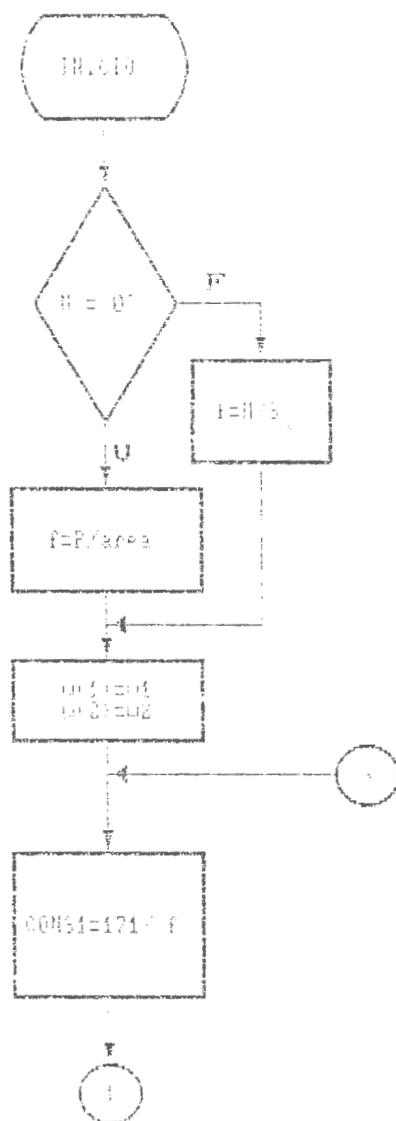


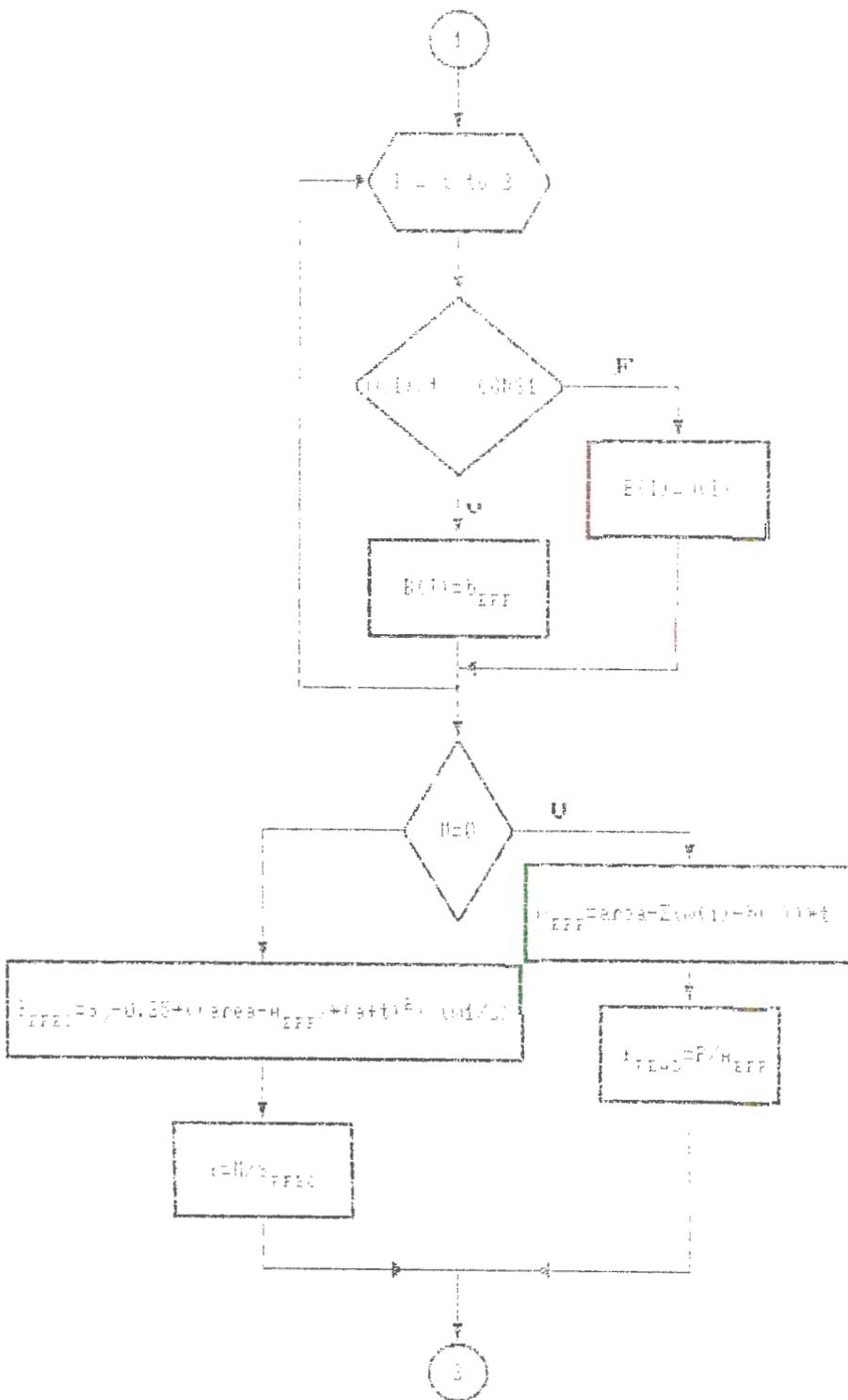


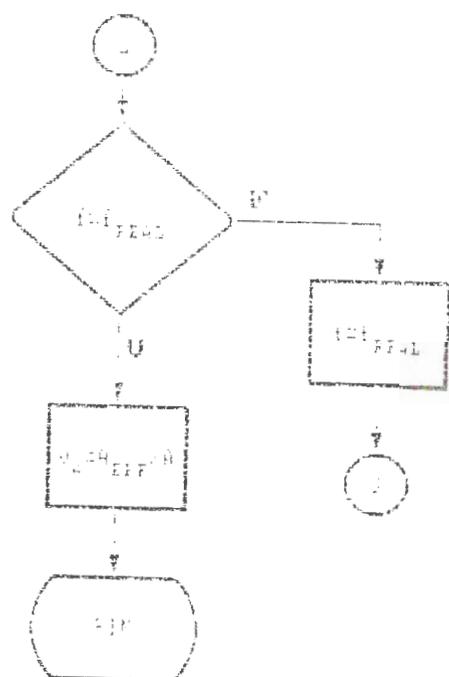
SUBROUTINA Q



SUBROUTINA Q







3.2.2 Algoritmo

```

SUB COMPRESION
'#####
'##### COMPRESION #####
'#####
CLS
PI = 3.141592654#
LOCATE 12, 18: PRINT " INGRESAR LAS PROPIEDADES DEL ACERO A UTILIZAR "
LOCATE 14, 2: INPUT " Limite de fluencia = ", Fy
CLS
LOCATE 12, 19: PRINT " INGRESAR LA FORMA DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
LOCATE 14, 13: PRINT " Canal (C), Angulo (A), Zeta (Z), Tipo I (I), Tee (T) "
DO
  LOCATE 15, 24: INPUT " (Escoger una letra mayuscula) ", TIP%
  IF TIP% <> "C" OR TIP% <> "A" OR TIP% <> "Z" OR TIP% <> "I" OR TIP% <> "T" THEN BEEP
LOOP UNTIL TIP% = "C" OR TIP% = "A" OR TIP% = "Z" OR TIP% = "I" OR TIP% = "T"
CLS
DO
  LOCATE 15, 20: INPUT " Desea trabajar con un perfil rigidizado (S/N) ", RIG%
LOOP UNTIL RIG% = "S" OR RIG% = "N"
CLS
LOCATE 12, 19: INPUT " Carga de compresion aplicada (T en kips) = ", P
LOCATE 14, 1: INPUT " Longitud no arriostrada de la columna con respecto al eje x-x (Lx en
pies) = ", Lx
LOCATE 15, 1: INPUT " Factor de longitud efectiva con respecto al eje x-x (Kx) = ", Kx
LOCATE 16, 1: INPUT " Longitud no arriostrada de la columna con respecto al eje y-y (Ly en
pies) = ", Ly
LOCATE 17, 1: INPUT " Factor de longitud efectiva con respecto al eje y-y (Ky) = ", Ky
CLS
Ft = .5 # Fy
Areq = P / Ft
LOCATE 10, 2: PRINT " Usted requiere un perfil de area mayor o igual que ", Areq
DO
  LOCATE 12, 2: PRINT " PROPIEDADES DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL PERFIL ESTRUCTURAL"
  LOCATE 14, 2: INPUT " Ingrese el valor del area del perfil escogido (A en in2) ", area
  LOCATE 15, 2: INPUT " Ingrese el valor del momento de inercia respecto al eje x-x (Ix en
in4) ", Ix
  LOCATE 16, 2: INPUT " Ingrese el valor del momento de inercia respecto al eje y-y (Iy en
in4) ", Iy
  CLS
  CALL ESBELTEZ(Kx, Lx, Ix, Ky, Ly, Iy, area, REL)
  CALL DIMENSIONES(TIP%, RIG%, a, b, c, R, t, area, w1, w2, w3)
  CALL FACBa(w3, t, Fy, Qs)
  CALL FACBa(w1, w2, t, P, M, area, Sx, TIP%, bef1, bef2, Qa, Sxc)
  Q = Qa # Qs
  CLS
  Ccr = SQR((59000 # PI ^ 2) / (Q # Fy))
  IF REL > Ccr THEN
    Fa1 = 151900 / REL ^ 2
  ELSE
    IF Q = 1 AND t > .09 THEN

```

```

    Fa1 = (1 - .5 * (REL / Ccr) ^ 2) * Fy / (.5 / 3 + (3 / 8) * (REL / Ccr) - (1 / 3)
(REL / Ccr) ^ 3)
    ELSE
    Fa1 = .522 * G * Fy - (G * Fy * REL / 1494) / 2
    END IF
END IF
Padm = Fa1 * area
CLS
IF Padm < .95 * P THEN
    LOCATE 2, 2: PRINT "EL PERFIL SELECCIONADO NO SOPORTA LA CARGA DE DISEÑO"
    LOCATE 4, 2: PRINT "LA MAXIMA CARGA QUE PUEDE SOPORTAR EL PERFIL ES "; Padm; "kips"
    LOCATE 6, 2: PRINT "ESCOGER UN PERFIL DE AREA MAYOR"
    CALL ESPACIO
    CLS
ELSE
    E1 = 100 * (Padm - P) / P
    LOCATE 2, 2: PRINT "EL PERFIL ESTA SELECCIONADO CON UN ERROR DE "; E1; " %"
    LOCATE 4, 2: PRINT "LA CARGA ADMISIBLE ES ", Padm
    CALL ESPACIO
    CLS
END IF
Faa = P / area
LOOP UNTIL Padm < 1.05 * P AND Padm > .98 * P
DO
    INPUT "DESEA IMPRIMIR LOS RESULTADOS (S/N) "; IMP$
LOOP UNTIL IMP$ = "S" OR IMP$ = "N"
IF IMP$ = "S" THEN
    LPRINT " El perfil seleccionado es del tipo "; TIP$; a; "x"; b; "x"; c
    LPRINT " La carga admisible es "; Padm
    LPRINT " El esfuerzo de compresión admisible es "; Fa1
    LPRINT " El esfuerzo actual de compresión es "; Faa
ELSE
    BEEP
END IF
END SUB

```

```

SUB DIMENSIONES (TIP$, RIG$, a, b, c, R, t, area, w1, w2, w3)
CLS
IF TIP$ = "C" THEN
  LOCATE 13, 14: PRINT " INGRESAR LAS DIMENSIONES DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
  LOCATE 15, 2: INPUT " Espesor del perfil = ", t
  LOCATE 16, 2: INPUT " Radio de curvatura = ", R
  LOCATE 17, 2: INPUT " Longitud del ala = ", b
  LOCATE 18, 2: INPUT " Longitud del alma = ", a
  IF RIG$ = "N" THEN
    CLS
  ELSE
    LOCATE 19, 2: INPUT " Longitud del borde = ", c
    CLS
  END IF
  CALL SECCIONCANAL(RIG$, a, b, c, R, t, w1, w2, w3)
ELSE
  IF TIP$ = "Z" THEN
    LOCATE 13, 14: PRINT " INGRESAR LAS DIMENSIONES DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
    LOCATE 15, 2: INPUT " Espesor del perfil = ", t
    LOCATE 16, 2: INPUT " Radio de curvatura = ", R
    LOCATE 17, 2: INPUT " Longitud del ala = ", b
    LOCATE 18, 2: INPUT " Longitud del alma = ", a
    IF RIG$ = "N" THEN
      CLS
    ELSE
      LOCATE 19, 2: INPUT " Longitud del borde = ", c
      CLS
    END IF
    CALL SECCIONCANAL(RIG$, a, b, c, R, t, w1, w2, w3)
  ELSE
    IF TIP$ = "I" THEN
      LOCATE 11, 12: PRINT " ESTE PERFIL ES CONSTRUIDO POR DOS CANALES SENCILLOS "
      LOCATE 13, 14: PRINT " INGRESAR LAS DIMENSIONES DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
      LOCATE 15, 2: INPUT " Espesor del perfil = ", t
      LOCATE 16, 2: INPUT " Radio de curvatura = ", R
      LOCATE 17, 2: INPUT " Longitud del ala = ", b
      LOCATE 18, 2: INPUT " Longitud del alma = ", a
      IF RIG$ = "N" THEN
        CLS
      ELSE
        LOCATE 19, 2: INPUT " Longitud del borde = ", c
        CLS
      END IF
      CALL SECCIONESI(RIG$, a, b, c, R, t, w1, w2, w3)
    ELSE
      LOCATE 14, 14: PRINT " INGRESAR LAS DIMENSIONES DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
      LOCATE 16, 2: INPUT " Espesor del perfil = ", t
      LOCATE 17, 2: INPUT " Radio de curvatura = ", R
      LOCATE 18, 2: INPUT " Longitud del ala = ", b
      LOCATE 19, 2: INPUT " Longitud del alma = ", a
      IF RIG$ = "N" THEN

```

```

        CLS
    ELSE
        LOCATE 16, 2: INPUT " Longitud del borde = ", c
        CLS
    END IF
    CALL SECCIONESI(RIG#, a, c, b, R, t, w1, w2, w3)
END IF
END IF
END IF
END SUB

SUB ESBELTEZ (Kx, Lx, Ix, Ky, Ly, Iy, area, REL)
    REL1 = Kx * Lx * 12 / SQR(Ix / area)
    REL2 = Ky * Ly * 12 / SQR(Iy / area)
    IF REL1 > REL2 THEN
        REL = REL1
    ELSE
        REL = REL2
    END IF
END SUB

SUB FACBa (w1, w2, t, P, M, area, Sx, TIP#, bef1, bef2, θa, Sxc)
    DIM w(2)
    DIM COC(2)
    DIM bef(2)
    IF P = 0 THEN
        Fact = 36
    ELSE
        Fact = P / area
    END IF
    w(1) = w1
    w(2) = w2
    DO
        FOR I = 1 TO 2
            COC(I) = w(I) / t
            IF COC(I) < 171 / SQR(Fact) THEN
                bef(i) = w(I)
            ELSE
                bef(i) = 253 * t * (1 - 55.3 / (COC(I) * SQR(Fact))) / SQR(Fact)
            END IF
        NEXT I
        IF TIP# = "C" OR TIP# = "Z" THEN
            k = 1
        ELSE
            k = 2
        END IF
        Aefec = area - k * (w(1) + 2 * w(2) - bef(1) - 2 * bef(2)) * t
        Freal = INT(P * 1000 / Aefec) / 1000
        Fact = INT(1000 * (Freal + Fact)) / 2000
    LOOP UNTIL ABS(Fact - Freal) < .01
    bef1 = bef(1)
    bef2 = bef(2)

```

```
Qa = Aefec / area
END SUB
```

```
SUB FACQS (w3, t, Fy, Qs)
```

```
IF Fy < 33 AND w3 / t > 63.3 / SQR(Fy) AND w3 / t < 25 THEN
```

```
  Fc = .6 * Fy - (w3 / t - 63.3 / SQR(Fy)) * (.6 * Fy - 12.8) / (25 * (1 - 2.33 / SQ(Fy)))
```

```
ELSE
```

```
  IF w3 / t < 63.3 / SQR(Fy) THEN
```

```
    Fc = .6 * Fy
```

```
  ELSE
```

```
    IF w3 / t > 63.3 / SQR(Fy) AND w3 / t <= 144 / SQR(Fy) THEN
```

```
      Fc = Fy * (.767 - (2.64 / 1000) * (w3 / t) * SQR(Fy))
```

```
    ELSE
```

```
      IF w3 / t >= 144 / SQR(Fy) AND w3 / t < 25 THEN
```

```
        Fc = 8000 / (w3 / t) ^ 2
```

```
      ELSE
```

```
        IF w3 / t > 25 AND w3 / t < 60 AND TIP# = "A" THEN
```

```
          Fc = 8000 / (w3 / t) ^ 2
```

```
        ELSE
```

```
          Fc = 19.8 - .28 * (w3 / t)
```

```
        END IF
```

```
      END IF
```

```
    END IF
```

```
  END IF
```

```
END IF
```

```
Qs = Fc / (.6 * Fy)
```

```
END SUB
```

```
SUB SECCIONANGULO (RIG#, a, c, R, t, area, w1, w3)
```

```
IF RIG# = "S" THEN
```

```
  w1 = a - 2 * (R + t)
```

```
  w3 = c - (R + t)
```

```
ELSE
```

```
  w3 = a - (R + t)
```

```
  w1 = 0
```

```
END IF
```

```
u = 1.57 * R
```

```
END SUB
```

```
SUB SECCIONCANAL (RIG#, a, b, c, R, t, w1, w2, w3)
```

```
IF RIG# = "S" THEN
```

```
  w1 = a - 2 * (R + t)
```

```
  w2 = b - 2 * (R + t)
```

```
  w3 = c - (R + t)
```

```
ELSE
```

```
  w1 = a - 2 * (R + t)
```

```
  w2 = 0
```

```
  w3 = b - (R + t)
```

```
END IF
```

```
u = 1.57 * R
```

```
END SUB
```

```
BIS SECTIONEST (RIGI, a, b, c, R, t, w1, w2, w3)
  IF RIGI = "E" THEN
    w1 = a - C * (R + t)
    w2 = b / C - C * (R + t)
    w3 = c - (R + t)
  ELSE
    w1 = a - C * (R + t)
    w2 = b / C - (R + t)
    w3 = b
  END IF
  d = 1.57 * R
  EN* ONE
```

3.3 Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI y AISC

La comparación entre las recomendaciones que brinda el Manual de Diseño en perfiles de acero doblados del AISI, con las que brinda el Manual de Construcciones en Acero del AISC, resulta verdaderamente interesante cuando se analiza el caso de la compresión. Dicha comparación puede ser visualizada de una mejor manera en a la Tabla III.

En efecto, el fenómeno de compresión resulta crítico cuando se está trabajando con perfiles formados en frío debido a dos razones esenciales: El poco espesor que poseen dichos perfiles; y, la fragilidad que estos adquieren producto del proceso de manufactura con el cual han sido obtenidos.

Una de las primeras expresiones en ser analizadas debe ser la de la relación de esbeltez crítica de las columnas. Para ambos manuales dicha expresión es la misma; sin embargo, numericamente no son iguales, ya que mientras el AISC sugiere emplear un valor para el Módulo de Young de 29000 ksi, el AISI sugiere utilizar un valor de 29500 ksi. Lo anterior tiene como consecuencia que para cualquier tipo de acero, la

Tabla III

Cuadro comparativo de las regulaciones del Manual del AISI con las del Manual del AISC para el fenómeno de compresión

Aplicación	Manual del AISI	Manual del AISC
	E=29500 ksi	E=29000 ksi
Relación de esbeltez crítica	$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} = \frac{323.38}{\sqrt{F_y}}$	$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} = \frac{320.63}{\sqrt{F_y}}$
Pandeo inelástico E: KL/r > C _c	$F_{a1} = \frac{1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}}{S.F.} QF_y$ S.F.=1.92	$F_{a1} = \frac{1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}}{S.F.} QF_y$ S.F. desde 1.67 hasta 1.7
Factor de seguridad SF Para Q=1 y Q=1 si L/0.07in	$\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^2}$	$\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^2}$
Factor de seguridad Para Q=1 AISC 0.9in	$\frac{23}{12}$	
Pandeo elástico C _c < KL/r < 200	$F_{a1} = \frac{23\pi^2 E}{12 (KL/r)^2}$	$F_{a1} = \frac{23\pi^2 E}{12 (KL/r)^2}$

relación de esbeltez crítica sugerida por el Manual del AISI será mayor que la recomendada por el Manual del AISC en un 0.85%.

En lo relacionado al rango donde predomina el pandeo inelástico, ambos manuales proveen la misma expresión para el cálculo del esfuerzo admisible. Pero el que difiere del valor del factor de seguridad. Mientras el Manual del AISI provee una expresión en la cual se recomienda un factor de seguridad constante con un valor de 1.92, el Manual del AISC recomienda utilizar un factor de seguridad que varía de acuerdo a la relación de esbeltez de la columna, tomando valores de 1.67 cuando la relación de esbeltez es cero y de 1.92 cuando la relación de esbeltez es igual a la relación de esbeltez crítica. Lo anterior indica que los valores sugeridos por el AISI son más conservadores que los empleados por el AISC ya que en el caso más extremo ($KL/r=0$), emplea un factor de seguridad 15% más alto. Dicha variación del factor de seguridad en columnas puede ser observada con mayor claridad en la figura 4. Cabe también mencionar que la aplicación de la ecuación del Manual del AISI presenta como principal limitante el espesor de la placa con la cual ha sido elaborado el perfil estructural; dicho manual también establece que para perfiles con un espesor

FACTOR DE SEGURIDAD EN COLUMNAS

(Válido para un acero A36)

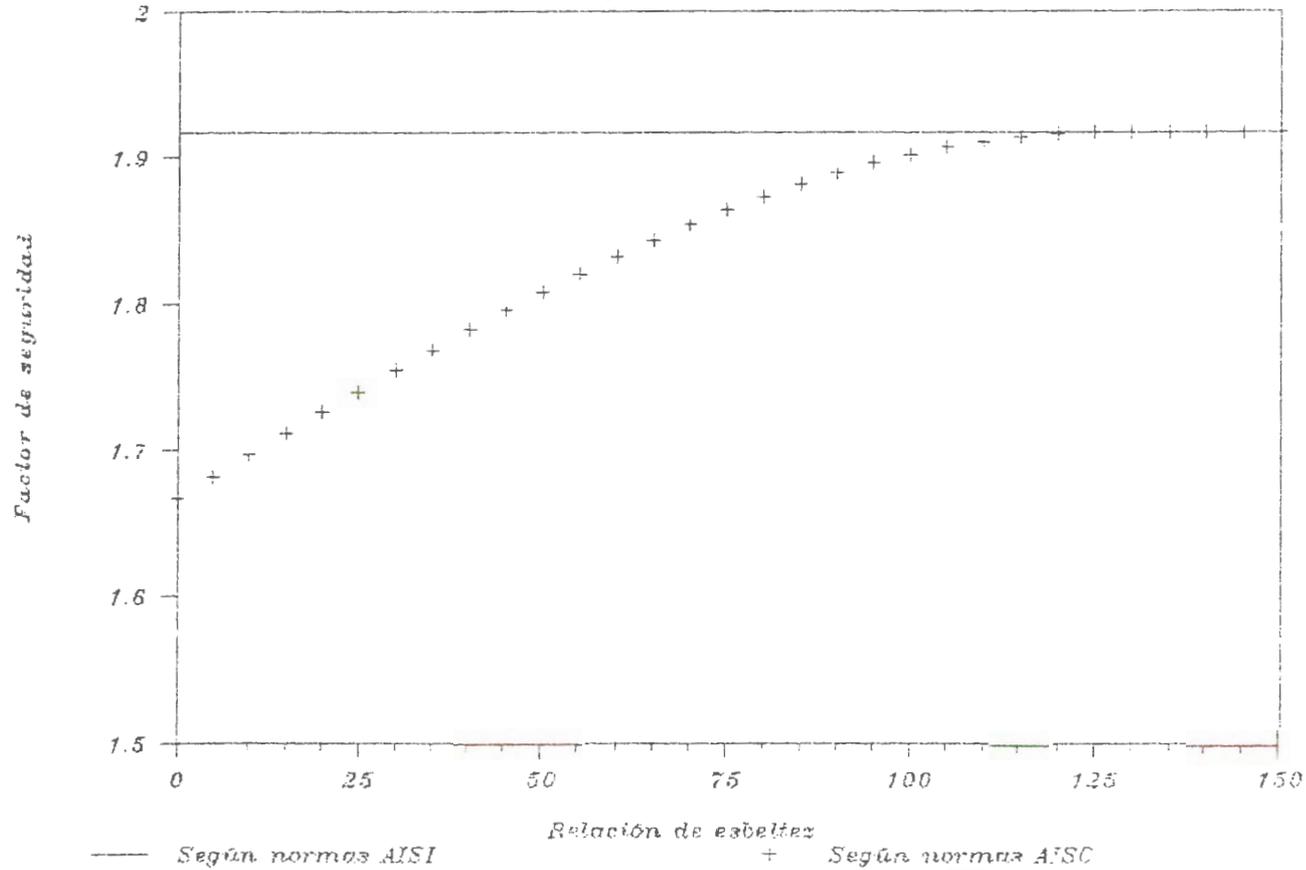


Fig. 4.- Columnas.- Norma AISI vs. AISC. Factor de seguridad como función de la relación de esbeltez

mayor a 0.09 in es válido emplear la misma expresión recomendado por el Manual del AISC, con la única diferencia de que el Módulo de Young utilizado siga teniendo un valor de 29500 ksi.

En lo que se respecta al estudio del pandeo local en los elementos rigidizados que forman el perfil estructural, es aquí donde existen la mayor parte de las diferencias. En la figura 5 es posible visualizar de una manera mucho más clara la variación de los valores de Q_s para una viga I de acero A36. En primer lugar, es fácil verificar que los rangos dentro de los cuales tienen validez las diferentes expresiones para el cálculo de Q_s , varían de un Manual a otro. Por ejemplo, el AISC considera un rango más amplio que el del AISI para que un elemento pueda ser considerado 100% eficiente. Por otra parte, dentro del rango en que predomina el pandeo inelástico, el Manual del AISI ofrece valores del factor de reducción de esfuerzos más bajos que los presentados por el AISC. Al llegar al campo del pandeo elástico, el gradiente de dichos valores es menor y por lo tanto en dicho rango los valores del factor de reducción de esfuerzos recomendados por el Manual del AISI son poco más altos que los que se recomienda en el Manual del AISC. Todo lo anterior permite aseverar que el

VARIACION DE Q_s VS. w/t

(Viga tipo "T" de acero A36)

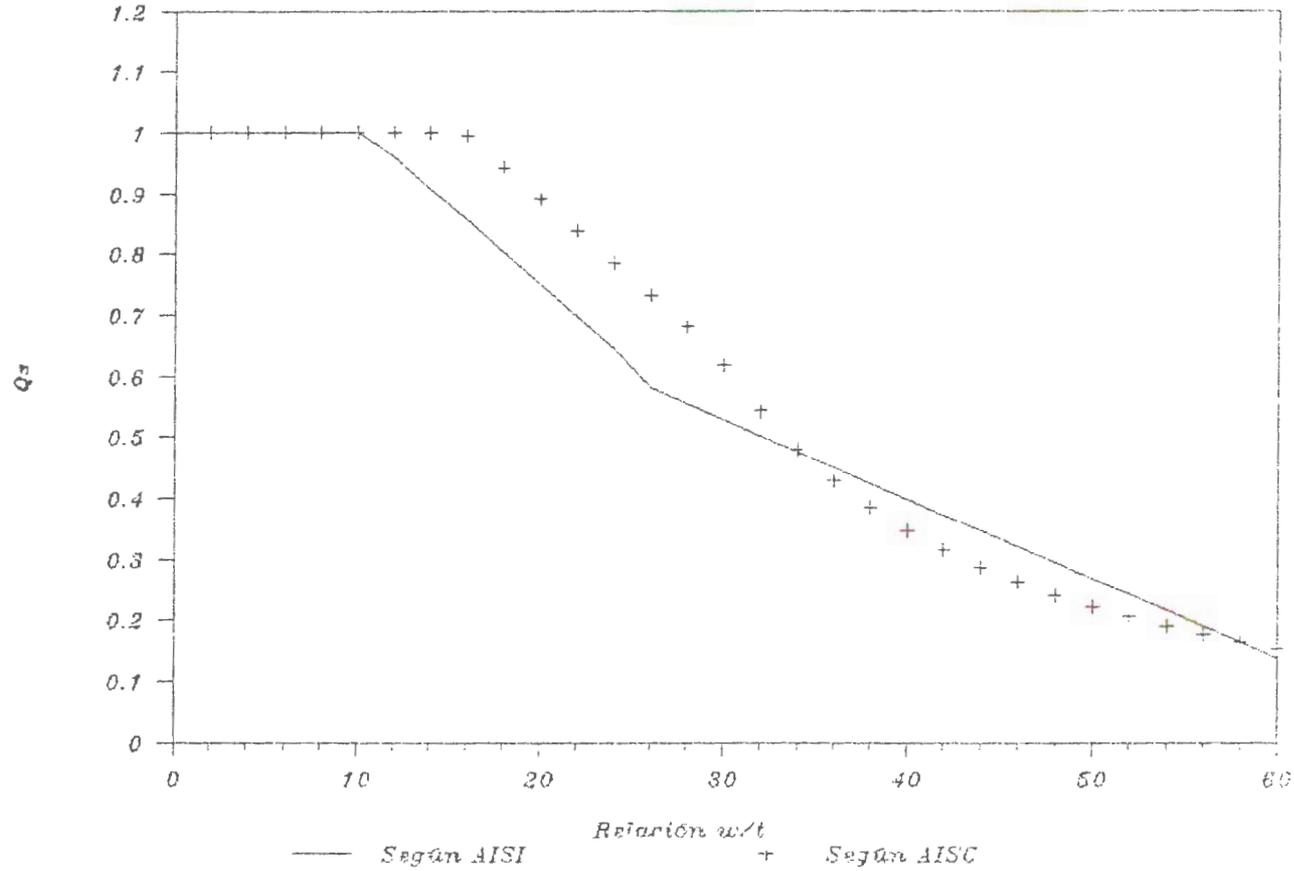


Fig. 5.- Factor de reducción de esfuerzos como función de la relación ancho-espesor.

Norma AISI vs. Norma AISC

Manual del AISI pone mayor énfasis en el rango del pandeo inelástico, que es donde existen mayores posibilidades de falla en los materiales. Finalmente, mientras el AISI provee un límite para el cociente w/t (no debe ser mayor que 60), el AISC no ofrece ninguna limitación para dicho valor. Ello se debe al estado crítico de esfuerzos que se puede llegar a conseguir con perfiles estructurales tan delgados como los obtenidos gracias a trabajo de doblado. Una mejor comprensión de la forma en que varían los valores del factor de reducción Q_s , se consigue en la Tabla IV, que es donde se compara los valores ofrecidos por ambos manuales.

Otra diferencia que merece ser tomada en cuenta al analizar los elementos sometidos a cargas axiales de compresión es referente a la variación de los valores del factor de reducción de área Q_a , referente a los elementos no rigidizados, que indican ambos manuales; la Tabla V permite comparar la forma en que varían los valores del ancho efectivo del segmento no rigidizado según las recomendaciones ofrecidas por ambos manuales. Evaluando dichas fórmulas se puede entonces construir el gráfico que se observa en la figura 6, el mismo que ofrece una mejor visualización de la diferencia numérica que existe entre ambos manuales.

Tabla IV

Análisis comparativo entre las regulaciones
del AISI y AISC para el cálculo del
Factor de reducción de esfuerzos (Q_B)

Aplicación	Manual AISI		Manual AISC	
	Expresión	Rgo.w/t	Expresión	Rgo.w/t
Pandeo elástico	$Q_B = \frac{0.767 - \frac{2.64}{10^3} \frac{w}{t} \sqrt{F_y}}{0.60}$	De 67.5/Fy 3 104/Fy	$Q_B = 1.415 - \frac{4.37 w}{1000 t} \sqrt{F_y}$	De 25/Fy a 16/Fy
Pandeo inelástico (ángulos)	$Q_B = \frac{8000}{0.60 F_y (w/t)^2}$	De 144/Fy a 60	$Q_B = \frac{15000}{F_y (w/t)^2}$	Más de 15/Fy
Pandeo inelástico (tiras perfiles)	$Q_B = \frac{8000}{0.60 F_y (w/t)^2}$	De 144/Fy a 25	$Q_B = \frac{20000}{F_y (w/t)^2}$	Más de 16/Fy
	$Q_B = \frac{19.8 - 0.28 \frac{w}{t}}{0.60 F_y}$	De 15 a 50		

Tabla V

Análisis comparativo entre las regulaciones
del AISI y AISC para el cálculo del
Factor de reducción de área (Q_u)

Aplicación	Manual AISI		Manual AISC	
	Expresión	Rango w/t	Expresión	Rango w/t
Perfiles Tubulares	$b = \frac{253t}{\sqrt{F}} \left(1 - \frac{50.3}{\frac{w}{t}\sqrt{F}} \right)$	Mayor que 181/F	$b = \frac{253t}{\sqrt{F}} \left(1 - \frac{50.3}{\frac{w}{t}\sqrt{F}} \right)$	Mayor que 58/Fy
Otros Perfiles	$b = \frac{253t}{\sqrt{F}} \left(1 - \frac{55.3}{\frac{w}{t}\sqrt{F}} \right)$	Mayor que 171/F	$b = \frac{253t}{\sqrt{F}} \left(1 - \frac{44.3}{\frac{w}{t}\sqrt{F}} \right)$	Mayor que 203/F.

CURVA b/t VS. w/t

(Válido para un acero A36)

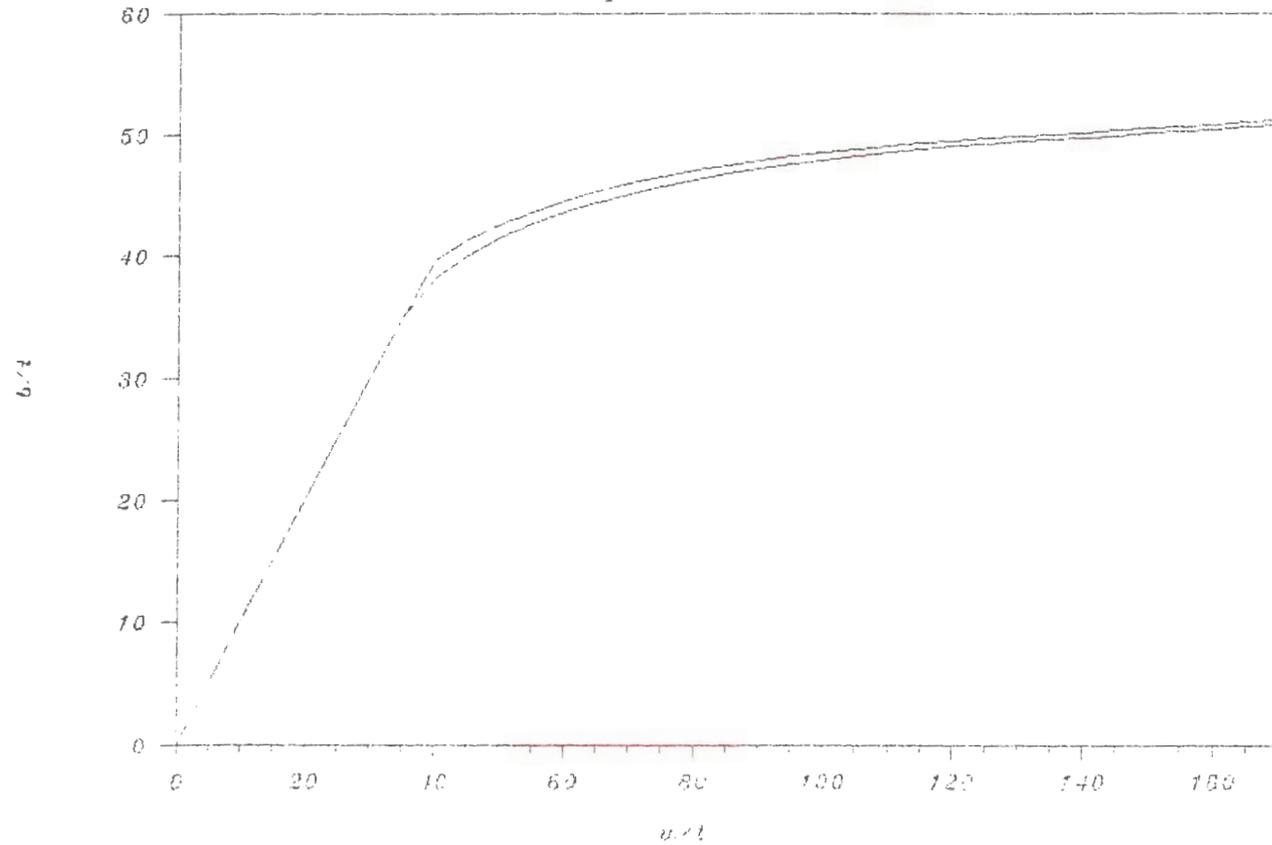
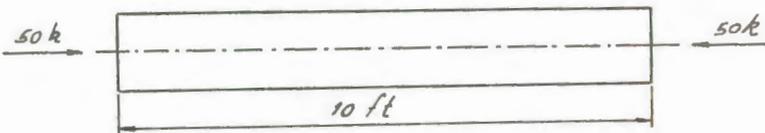


Fig. 6.- Ancho efectivo de elemento rigidizado como función de la relación ancho espesor. Norma AISI vs. Norma AISI

Gracias a dicho gráfico se puede observar que el Manual del AISI posee un criterio más conservador respecto al Manual del AISC ya que los valores del ancho efectivo de diseño para estos últimos son mayores que el ancho de diseño calculado de los primeros.

3.4 Ejercicios de aplicación

Diseñar una columna a partir de un perfil estructural de tipo "I", capaz de soportar una carga de compresión de 50 kips. Utilice un acero A36 ($F_y = 36$ ksi) y considere $L_x = L_y = 10$ ft y $K_x = K_y = 1$.



* Normas AISI

1.- Asumo $F_{a1} = 0.5F_y$

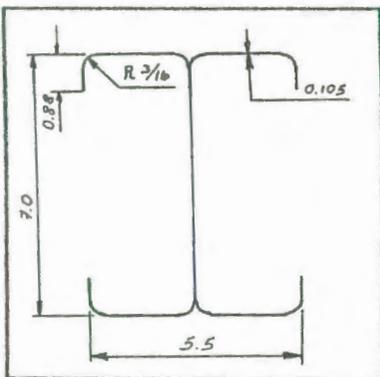
$$F_{a1} = 0.5 \times 36 \quad F_{a1} = 18 \text{ ksi}$$

2.- Calculo el area requerida $A_{req} = P/F_{a1}$

$$A_{req} = 50\text{k}/18\text{ksi} \quad A_{req} = 2.78 \text{ in}^2$$

Primera aproximación

3.- Escojo un perfil que cumpla ese requerimiento de área.



$$\text{Area} = 2.82 \text{ in}^2$$

$$r_x = 2.74 \text{ in}$$

$$r_y = 1.33 \text{ in}$$

$$f_a = 50/2.82$$

$$f_a = 17.73 \text{ ksi}$$

4.- Cálculo de los factores de reducción:

$$* \text{ Borde no rigidizado } w/t)_{lim} = 63.3/fF_y$$

$$w/t)_{lim} = 10.55$$

$$\frac{w}{t} = \frac{0.88 - \left(\frac{3}{16} + 0.105\right)}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 5.595$$

$$5.595 < 10.55 \rightarrow Q_s = 1.0$$

$$* \text{ Ala rigidizada } w/t)_{lim} = 171/fF$$

$$w/t)_{lim} = 40.61$$

$$\frac{w}{t} = \frac{0.5 * 5.5 - 2 \left(\frac{3}{16} + 0.105\right)}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 20.62$$

$$20.62 < 40.61 \rightarrow b = w$$

$$* \text{ Alma rigidizada}$$

$$\frac{w}{t} = \frac{7 - 2 \left(\frac{3}{16} + 0.105\right)}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 61.10$$

$$61.10 \not< 40.61 \rightarrow b < w$$

$$\frac{b}{t} = \frac{253}{\sqrt{17.73}} \left[1 - \frac{55.5}{61.10 \sqrt{17.73}} \right] \quad \frac{b}{t} = 47.17c$$

$$b = 47.170 * 0.105 \rightarrow b = 4.953 \text{ \AA}$$

$$A_{efec} = 2.81 - 2(6.415 - 4.953) * 0.105$$

$$A_{efec} = 2.513 \text{ in}^2$$

Realizando un proceso iterativo, se llega a obtener el siguiente resultado:

$$Q_a = 2.562 / 2.82 \quad Q_a = 0.873$$

$$Q = Q_a * Q_m \quad Q = 1.0 * 0.873 \Rightarrow Q = 0.873$$

5.- Relación de esbeltez crítica:

$$\frac{C_c}{\sqrt{D}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 29500}{0.873 * 36}} \quad \frac{C_c}{\sqrt{D}} = 136.12$$

6.- Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 * 10 * 12}{1.33} \quad \frac{KL}{r} = 90.23$$

7.- Esfuerzo admisible

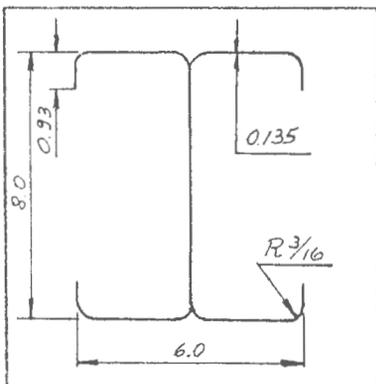
$$F_a = 0.522 (0.873) (36) - \left(\frac{0.873 * 36 * 90.23}{1494} \right)^2$$

$$F_a = 12.80 \text{ ksi}$$

Como 17.73 ksi \neq 12.80 ksi ($f_a \neq F_a$) el perfil no satisface las condiciones de carga.

Segunda aproximación

8.- Se escoge un perfil estructural más adecuado



$$\text{Area} = 4.02 \text{ in}^2$$

$$r_x = 3.11 \text{ in}$$

$$r_y = 1.41 \text{ in}$$

$$f_a = 50/4.02$$

$$f_a = 12.44 \text{ ksi}$$

9.- Cálculo de factores de reducción

- Elemento no rigidizado $w/t)_{lim} = 63.3/436$

$$w/t)_{lim} = 10.55$$

$$\frac{w}{t} = \frac{0.93 - \left(\frac{3}{16} + 0.135\right)}{0.135} \quad \frac{w}{t} = 4.5$$

$$4.5 < 10.55 \rightarrow Q_s = 1$$

- Elementos rigidizados $w/t)_{lim} = 171/4.44$

$$w/t)_{lim} = 48.49$$

Ala

$$\frac{w}{t} = \frac{0.5 * 6 - 2 \left(\frac{3}{16} + 0.135\right)}{0.135} \quad \frac{w}{t} = 17.44$$

$$17.44 < 48.49 \rightarrow b = w$$

Alma

$$\frac{w}{t} = \frac{8 - 2\left(\frac{3}{16} + 0.135\right)}{0.135} \quad \frac{w}{t} = 53.48$$

$$53.48 \not< 48.49 \rightarrow b < w$$

$$\frac{b}{t} = \frac{253}{\sqrt{12.44}} \left[1 - \frac{55.3}{54.48\sqrt{12.44}} \right] \quad \frac{b}{t} = 51.09$$

$$b = 51.09 * 0.135 \quad b = 6.897 \text{ e}$$

$$A_{efec} = 4.02 - 2(7.355 - 6.897) * 0.135 \quad A_{efec} = 3.876 \text{ in}^2$$

Por un proceso iterativo llego a:

$$A_{efec.} = 3.876 \text{ in}^2$$

$$Q_a = 3.856/4.02 \quad Q_a = 0.9644$$

$$Q = Q_a * Q_a \quad Q = 1 * 0.9644 \quad Q = 0.9644$$

10.- Relación de esbeltez crítica

$$\frac{C_c}{\sqrt{Q}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 29500}{0.964 * 36}} \quad \frac{C_c}{\sqrt{Q}} = 129.52$$

11.- Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 * 10 * 12}{1.41} \quad \frac{KL}{r} = 85.1179$$

12.- Esfuerzo admisible

$$F_a = 0.522(0.964)(36) - \left(\frac{0.964 * 36 * 85.11}{1494} \right)^2$$

$$F_a = 14.210 \text{ ksi}$$

Como $12.44 \text{ ksi} < 14.21 \text{ ksi}$ ($f_a < F_a$) el perfil satisface las condiciones de carga.

* Normas AISC

A manera de comparación de resultados, escogemos un perfil estructural del Manual del AISC que ofrezca características geométricas (area) similar a la que posee el perfil más económico obtenido según normas AISI.

Primera aproximación

S5x14.75

$$A = 4.34 \text{ in}^2 \quad b_f/2t_f = 5.04$$

$$r_y = 0.620 \text{ in} \quad d/t_w = 10.12$$

Este elemento estructural trabajando en las condiciones de carga establecidas en el problema sugerido, soporta el siguiente esfuerzo real:

$$f_a = 50/4.34 \quad f_a = 11.52 \text{ ksi}$$

* Factor de reducción de esfuerzos (alas)

$$b_f/2t_f)_{lim} = 95/\sqrt{F_y} \quad b_f/2t_f)_{lim} = 15.83$$

$$\text{Como } 5.04 < 15.83 \implies Q_a = 1.0$$

* Factor de reducción de área (alma)

$$w/t)_{lim} = 253/\sqrt{F_y} \quad w/t)_{lim} = 42.16$$

$$10.12 < 42.16 \implies Q_a = 1.0$$

* Relación de esbeltez crítica

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 29000}{36}} \quad C_c = 126.10$$

* Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 12}{0.620} \quad \frac{KL}{r} = 193.55$$

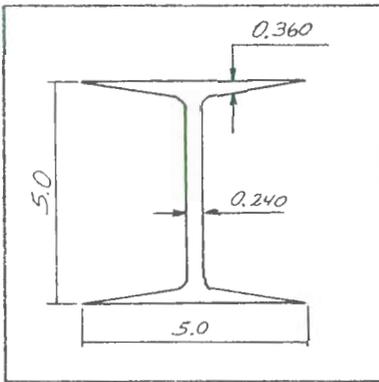
Es fácil observar que $KL/r > C_c$

* Esfuerzo admisible

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23 (KL/r)^2} \quad F_a = \frac{12\pi^2 29500}{23 (193.55)^2} \quad F_a = 3.986 \text{ ksi}$$

Como $11.52 \text{ ksi} < 3.986 \text{ ksi}$ ($f_a < F_a$) el perfil no es satisfactorio y por lo tanto es necesario escoger uno más robusto.

Segunda aproximación



W5 x 16

$$A = 4.68 \text{ in}^2 \quad b_f/2t_f = 5.0$$

$$r_y = 1.27 \text{ in} \quad d/t_w = 2.42$$

* Factor de reducción de esfuerzos (alas)

$$b_f/2t_f)_{lim} = 95/\sqrt{F_y} \quad b_f/2t_f)_{lim} = 15.83$$

$$5.0 < 15.83 \implies Q_a = 1.0$$

* Factor de reducción de área (alma)

$$w/t)_{lim} = 253/\sqrt{F_y} \quad w/t)_{lim} = 42.16$$

$$24.2 < 42.16 \implies Q_a = 1.0$$

* Relación de esbeltez crítica

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 29000}{36}} \quad C_c = 126.10$$

* Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \times 10 \times 12}{1.27} \quad \frac{KL}{r} = 94.49$$

* Esfuerzo admisible

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(94.49)^2}{2(126.10)^2}\right] \times 36}{\frac{5}{3} + \frac{3(94.49)}{8(126.10)} - \frac{(94.49)^3}{8(126.10)^3}} \quad F_a = 13.66 \text{ ksi}$$

Como $10.68 < 13.66$ ($f_a < F_a$) el perfil cumple con los requerimientos de carga.

ANALISIS COMPARATIVO

AISI	AISC
$A = 4.02 \text{ in}^2$	$A = 4.68 \text{ in}^2$
$r_{\min} = 1.41 \text{ in}$	$r_{\min} = 1.27 \text{ in}$
$f_a = 12.44 \text{ ksi}$	$f_a = 10.68 \text{ ksi}$
$F_a = 14.21 \text{ ksi}$	$F_a = 13.66 \text{ ksi}$

Analizando para ambos casos el perfil más económico, resulta fácil visualizar cierta ventaja a favor de los perfiles rolados. Los perfiles doblados en frío pueden llegar a tener mejores relaciones de esbeltez debido a las alas rigidizadas que se les proporciona,

lo que aumenta la inercia de los perfiles estructurales (incrementando obviamente su radio de giro), lo que brinda un perfil más eficiente para cumplir las funciones de columnas. Para el caso que nos ocupa, el perfil AISI puede soportar una sobrecarga en el orden del 14.21%, mientras que el perfil AISC podría llegar a soportar una sobrecarga de hasta un 27.9%. Lo anterior puede ser comprendido como una clara ventaja a favor de los perfiles estructurales construidos según normas del AISC; sin embargo, esa aparente ventaja desaparece cuando se observa que los perfiles estructurales construidos según las normas del AISI resultan más económicos, debido a que con un área menor son capaces de soportar de mejor manera los estados de carga a los que son sometidos. Lo anterior se debe a una mejor distribución del área transversal, con lo que se consigue una mayor relación de esbeltez y por lo tanto un perfil estructural más rígido.

CAPITULO IV

ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN

4.1 Análisis Teórico

Una carga de flexión, a diferencia de las cargas de tipo axial, es aquella que al ser aplicada en un elemento, tiende a producir en este una curvatura que provoca que algunas fibras del elemento estén sometidas a cargas de tensión, mientras que las otras se encuentren sometidas a cargas de compresión. A pesar de esto, siempre existirá una fibra (que generalmente coincide con el centro de gravedad de la sección transversal) que no se encuentre sometida a ningún tipo de esfuerzo. Esa fibra es conocida como eje neutro. Para este caso el esfuerzo máximo (que bien puede ser de tensión o de compresión) obedece a la siguiente ecuación:

$$F_b = \frac{MC}{I} \quad (1)$$

¹ Resistencia de Materiales, Shigley

Donde:

F_b = Esfuerzo máximo que soporta el elemento

M = Magnitud del momento que produce la flexión.

c = Distancia hacia la fibra más alejada del eje neutro.

I = Momento de inercia de la sección transversal.

Las vigas son elementos estructurales que han sido diseñados para soportar cargas transversales y las aplicaciones de momentos. Secciones obtenidas a través de procesos de doblado en frío, tales como los perfiles I, canales, secciones Z, secciones T y miembros tabulares son elementos estructurales que pueden ser utilizados de manera óptima en la construcción de vigas.

4.1.1 Tipos de vigas

Como se dejó anotado anteriormente, todo elemento estructural que sea diseñado para resistir cargas transversales son las vigas. Sin embargo, dependiendo de sus dimensiones el uso que se le va a dar y del tipo de cargas que va a resistir, estas pueden ser clasificadas en diferentes tipos. Dentro de estos diferentes tipos de vigas, se puede mencionar como los de

mayor importancia los siguientes:

- Largueros
- Vigas de arriostramiento
- Vigas de borde
- Trabes
- Vigas secundarias o viguetas
- Vigas de piso
- Vigas armadas

Las viguetas son tipos de vigas que han sido dispuestas de forma estrecha para soportar los pisos y techos de edificios; los dinteles en cambio son colocados sobre aberturas hechas en muros de mampostería tales como puertas y ventanas.

Las vigas de piso en cambio, son vigas que se colocan en los pisos de puentes, corriendo perpendiculares a la superficie de rodamiento para transmitir las cargas desde dicha superficie hacia los largueros y de estos hacia los trabes.

4.1.2 Consideraciones de diseño

En el diseño de elementos estructurales dobla-

dos en frío y que trabajan sometidos a cargas de flexión los factores que deben ser controlados serán la capacidad de resistencia a la aplicación de momentos flectores en los extremos y su rigidez basada en el tipo de elementos que trabajan en compresión que deben ser utilizados. Además de ello, el alma de las vigas debe ser chequeada para que no falte por ninguno de los fenómenos conocidos: Cortante, flexión, combinación de cortante y flexión ni pandeo local del alma.

Además de los factores arriba anotados, la capacidad de resistencia a la flexión de un miembro puede ser limitada por la posibilidad de pandeo lateral lo que ocurre particularmente cuando la sección es fabricada con material de pequeño espesor y su longitud de arriostramiento es muy grande. Para evitar ello, el Manual AISI ofrece restricciones respecto a la longitud entre apoyos laterales de las vigas.

4.1.3 Diseño de vigas en base a la resistencia a la flexión y deformación.

En el diseño de elementos sometidos a cargas de

flexión, estos deben de poseer una suficiente resistencia a los esfuerzos de flexión y además su deformación bajo la aplicación de las cargas de servicio no debe de exceder ciertos límites y especificaciones.

Para el diseño de vigas en base a la resistencia a la flexión y límites de deformación, es importantes hacer notar que antes de diseñar cualquier tipo de viga con perfiles doblados es necesario resaltar que existen dos recomendaciones de diseño diferentes, los mismos que indistintamente pueden ser aplicados, dependiendo del tipo de alas en compresión que se pueden observar. El primero de ellos es utilizado para el diseño de vigas que poseen su ala en compresión no rigidizada, es una aproximación por reducción del esfuerzo de trabajo; el otro es empleado en vigas cuya ala en compresión se encuentra rigidizada y es una "aproximación por reducción del área transversal".

4.1.3.1 Vigas con ala en compresión no rigidizada

Si la viga posee elementos en compresión

sión no rigidizados, para este caso la resistencia a la flexión de la viga es determinada por:

- 1.- Las propiedades seccionales del área total.
- 2.- El esfuerzo permisible de trabajo.

Por otro lado, el esfuerzo permisible de trabajo puede tomar cualquiera de los siguientes valores (el que sea de menor valor):

- 1.- El esfuerzo básico de diseño
- 2.- El esfuerzo de diseño gobernado por la posibilidad de pandeo local en el ala de compresión F_c .
- 3.- El esfuerzo de trabajo gobernado por pandeo lateral.

4.1.3.2 Vigas con ala en compresión rigidizada.

Si la viga posee su ala en compresión rigidizada, la resistencia a la flexión puede estar determinada por:

- 1.- Las propiedades seccionales del área efectiva.
- 2.- El menor valor entre el esfuerzo de

diseño básico o el esfuerzo admisible por pandeo lateral.

El area efectiva se encuentra definida de la misma manera que en el diseño de los elementos sometidos a cargas de compresión, por la relación ancho espesor (w/t) del ala que se encuentra sometida a esfuerzos de compresión. Por esta razón, en algunas ocasiones es necesario trabajar con el ancho efectivo de diseño en cuyo caso es necesario considerar los siguientes aspectos:

1.- Si el eje neutro se encuentra más cercano al ala en tensión, el máximo esfuerzo ocurre en el ala en compresión y por ello el ancho efectivo de diseño de dicha ala es determinado por la relación w/t .

2.- Si el eje neutro se encuentra más cercano al ala en compresión, el máximo esfuerzo ocurre en el ala en tensión. El esfuerzo actual en el ala en compresión será menor que el esfuerzo de trabajo dependiendo de la localización del eje neutro, el mismo que es determinado

por el area efectiva del ala en compresión.

4.1.4 Diseño de vigas considerando el corte

Cuando el alma de una viga posee un valor pequeño para la relación h/t que gobierna el diseño del elemento estructural es el límite de fluencia en el corte con un máximo valor de $F_y/\sqrt{3}$ en el eje neutro. Por esta razón, el esfuerzo admisible de corte para el cual el alma causa una pequeña relación h/t aplicando un factor de seguridad de 1.44, el valor admisible de esfuerzo cortante se encuentra dado por:

$$F_v = \frac{F_y}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1.44} \quad (1)$$

$$F_v = 0.40F_y$$

Similar en AISI
y AISC

Para almas con un elevado valor para la relación h/t , la capacidad de corte del ala es gobernada por la posibilidad de pandeo en corte. El valor del esfuerzo cortante crítico puede ser sin embargo computado por la siguiente ex-

¹ Cold Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

presión:

$$\tau_{cr} = \frac{k_v \pi^2 E}{12 (1 - \mu^2) (h/t)^2} \quad (1)$$

Donde:

k_v = coeficiente de colapso en el corte

E = módulo de elasticidad del acero

μ = coeficiente de Poissons

h = altura de la placa

t = espesor de la placa

En la ecuación anterior el valor de k_u varía con las condiciones de soporte y el coeficiente a/h . Para una placa larga el valor de k_u encontrada es de 5.34 para soportes simples mientras que para condiciones de empotramiento es de 8.98. Sustituyendo los respectivos valores de las propiedades del acero ($E = 29,5 \times 10^3$ ksi y $\mu = 0.3$) se tiene que:

$$\tau_{cr} = \frac{26660 k_v}{(h/t)^2} \quad (2)$$

El esfuerzo de trabajo puede ser calculado a partir de la ecuación anterior aplicando un factor de seguridad. Por uniformidad en los

¹ Cold-Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

² Cold-Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

criterios del AISI con los del AISC, el valor del esfuerzo de trabajo se calcula a partir de un módulo de Young $E = 29 \times 10^3$ ksi.

$$F_v = \frac{15600k_v}{(h/t)^2}$$

Similar en AISC
y AISI

Para alas que tengan una relación h/t moderada, el valor teórico de τ_{cr} puede exceder el límite proporcional de corte. Por esta razón, el valor del esfuerzo crítico de falla por corte debe ser reducido de acuerdo a la variación del módulo de elasticidad y considerando la influencia del endurecimiento por deformación, la teoría recomienda la siguiente relación:

$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_{pr} \tau_{cr1}} \quad (1)$$

Donde:

τ_{pr} es el límite de proporcionalidad en corte, cuyo valor se encuentra dado por:

$$\tau_{pr} = \frac{0.8 * F_y}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

τ_{cr1} = esfuerzo crítico inicial de corte, cuyo

¹ Cold-Formed Design Steel, Wei Wen Yu

² Cold-Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

valor se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$\tau_{cr1} = \frac{k_v \pi^2 E}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (1)$$

Aplicando los respectivos valores en la ecuación anterior y aplicando un factor de seguridad igual a 1.67, el esfuerzo de trabajo queda dado por:

$$F_v = \frac{65.7 \sqrt{k_v F_y}}{h/t}$$

Similar en AISC
y AISI

La ecuación anterior es usada por el AISC y ha sido adoptado por el AISI por la uniformidad de criterios.

4.1.5 Aplastamiento del alma

El aplastamiento del alma de una viga es un tipo de falla que puede ocurrir debido a la alta concentración de carga en los apoyos de reacción de la viga; esto es, a la distribución de cargas de gran valor en pequeñas longitudes de apoyo.

¹ Cold-Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

El valor de la carga que produce dicho aplastamiento está dada por:

$$P_{cr} = \frac{k\pi^2 Et^3}{12(1-\mu^2)h} \quad (1)$$

donde k es el coeficiente de pandeo, el mismo que depende de las relaciones N/h y a/h.

Una descripción correcta de los fenómenos que se producen por la aplicación de cargas en el caso del pandeo del alma (aplastamiento) no es posible debido a que este es complicado por los siguientes factores:

- 1.- Distribución de esfuerzos no uniforme debajo del punto de aplicación de la carga y las porciones adyacentes del alma.
- 2.- Estabilidad elástica e inelástica de los elementos del alma.
- 3.- Fluencia local en la región inmediata a la zona de aplicación de carga.
- 4.- Flexión producida por la carga excéntrica (o excentricidad de la reacción) cuando esta es aplicada en el ala a una distancia cerca a la curva de transición del alma.
- 5.- Imperfecciones iniciales fuera del plano de las placas del elemento.

¹ Cold-Formed Design Steel, Wei-Wen Yu

- 6.- Variadas restricciones de bordes provistas por las alas de la viga y la interacción entre el ala y el alma.
- 7.- En el caso de paneles, la existencia un alma inclinada.

4.1.6 Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI

Para el caso de diseño de la viga en base a su resistencia a la flexión el Manual del AISI ofrece tres criterios básicos de diseño para el cálculo del esfuerzo de trabajo de una viga. De los valores obtenidos por cualquiera de las tres recomendaciones, siempre se deberá escoger el menor.

- 1.- El esfuerzo básico de diseño determinado por:

$$F_b = 0.60 * F_y$$

- 2.- El esfuerzo permisible de trabajo gobernado por el pandeo local del ala sometida a las cargas de compresión. Para ello es de gran importancia la variación del cociente w/t .

Si $w/t \leq 63.3/\sqrt{F_y}$

$$F_c = 0.60F_y$$

Si $63.3/\sqrt{F_y} < w/t \leq 144/\sqrt{F_y}$

$$F_c = F_y = \left[0.767 - \left(\frac{2.64}{10^3} \right) \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{F_y} \right]$$

Si $144/\sqrt{F_y} < w/t \leq 25$

$$F_c = \frac{8000}{(w/t)^2}$$

Si $25 < w/t \leq 60$

Para ángulo estruados:

$$F_c = \frac{8000}{(w/t)^2}$$

Para todas las demás secciones:

$$F_c = 19.8 - 0.28(w/t)$$

Cuando el límite de fluencia del acero es inferior a los 33 ksi y además se cumple que la relación w/t se encuentra comprendida entre los límites de $63.3/\sqrt{F_y}$ y 25 el Manual recomienda

emplear:

$$F_c = 0.60F_y - \frac{(w/t - 63.3/\sqrt{F_y})(0.60F_y - 12.8)}{25(1 - 2.53/\sqrt{F_y})}$$

- 3.- El esfuerzo permisible de trabajo gobernado por el fenómeno de pandeo lateral. En este caso el esfuerzo de trabajo se ve afectado por el coeficiente de flexión C_b , el mismo que depende de manera exclusiva de los momentos de extremos a los que está sujeta la viga y que se encuentra dado por:

$$C_b = 1.75 + 1.05(M_1/M_2) + 0.3(M_1/M_2)^2$$

Donde M_1 es el momento flector de extremo más pequeño y M_2 es en momento flector de extremo más grande. En lo referente al signo del cociente M_1/M_2 , es necesario indicar que este será positivo cuando ambos tienen el mismo signo (curvatura reversa) y será negativo cuando tengan signos contrarios (curvatura simple). Cuando en cualquier punto de la viga existe un momento mayor que el de los extremos $C_b = 1$. En ningún caso, este valor puede exceder a 2.3.

Para el caso de canales y vigas de tipo I construidas a partir de la unión de dos canales, considerando las limitaciones que se muestran, se tienen las siguientes expresiones para determinar el valor de los esfuerzos de trabajo que son capaces de soportar dichos perfiles estructurales.

Si $0.36\pi^2EC_b/F_y \leq L^2S_{xc}/dI_{yc} < 1.8\pi^2EC_b/F_y$

$$F_b = \frac{2}{3}F_y - \frac{F_y^2}{5.4\pi^2EC_b} \left(\frac{L^2S_{xc}}{dI_{yc}} \right)$$

Si $L^2S_{xc}/dI_{yc} \geq 1.8\pi^2EC_b/F_y$

$$F_b = 0.6\pi^2EC_b \frac{dI_{yc}}{L^2S_{xc}}$$

De igual manera, para el caso de formas estructurales del tipo Z, el Manual del AISI ofrece las recomendaciones que abajo se indican. La variación del esfuerzo de trabajo en flexión para dicho perfil puede ser observada en la figura 7, donde también se compara dicho esfuerzo con el que pudiese soportar una viga tipo I o un canal que tuviesen las mismas dimensiones. En dicha curva el factor determinan-

VARIACION DE F_b CON l/r^2

Estudio comparativo

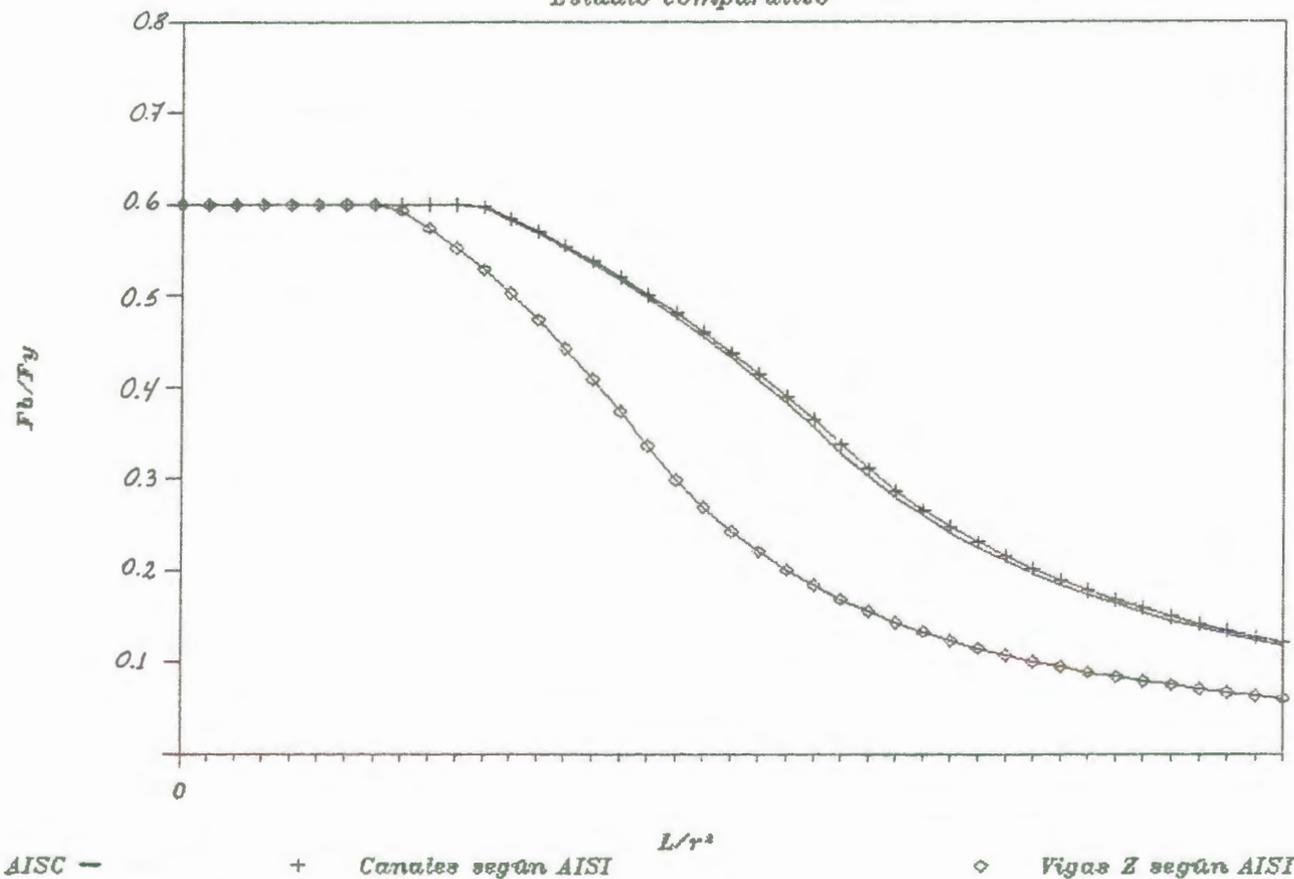


Fig. 7.- Vigas.- Esfuerzo admisible de flexión como función de la longitud de arriostamiento. Norma AISI vs. norma AISC

te de diseño llega a ser la longitud no arriostrada de la viga.

Si $0.18\pi^2EC_b/F_y \leq L^2S_{xc}/dI_{yc} < 0.9\pi^2EC_b/F_y$

$$F_b = \frac{2}{3}F_y - \frac{F_y^2}{2.7\pi^2EC_b} \left(\frac{L^2S_{xc}}{dI_{yc}} \right)$$

Si $L^2S_{xc}/dI_{yc} \geq 0.9\pi^2EC_b/F_y$

$$F_b = 0.3\pi^2EC_b \frac{dI_{yc}}{L^2S_{xc}}$$

Donde:

L = longitud no arriostrada del elemento estructural (in).

I_{yc} = Momento de inercia de la porción sujeta a esfuerzos de compresión alrededor del eje centroidal paralelo al alma de la sección completa (in⁴).

S_{yc} = Módulo de sección (momento de inercia de toda la sección dividida para la distancia más lejana al eje neutro) (in⁴).

C_b = Altura o peralte de la sección (in).

Para el diseño de una viga en base a su resis-

tencia al corte, se debe tener en cuenta las limitaciones con respecto al valor del esfuerzo de trabajo, las mismas que se encuentran dadas por el valor del cociente h/t referente a las dimensiones del alma.

$$\text{Si } h/t \leq 164(k_v/F_y)^{1/2}$$

$$F_v = 0.4F_y$$

$$\text{Si } 164(k_v/F_y)^{1/2} < h/t \leq 237(k_v/F_y)^{1/2}$$

$$F_v = \frac{65.7\sqrt{k_v F_y}}{h/t}$$

$$\text{Si } h/t > 237(k_v/F_y)^{1/2}$$

$$F_v = \frac{15600k_v}{(h/t)^2}$$

Donde:

h = es la distancia entre alas medidas en el plano del alma.

t = espesor del ala.

k_v = coeficiente del colapso por corte determinado de alguna de las siguientes maneras:

1.- Para miembros no reforzados se

considera $k_v = 5.34$.

- 2.- Para miembros reforzados a distancias de valor a .

Si $a/h < 1.0$

$$k_v = 4.00 + \frac{5.34}{(a/h)^2}$$

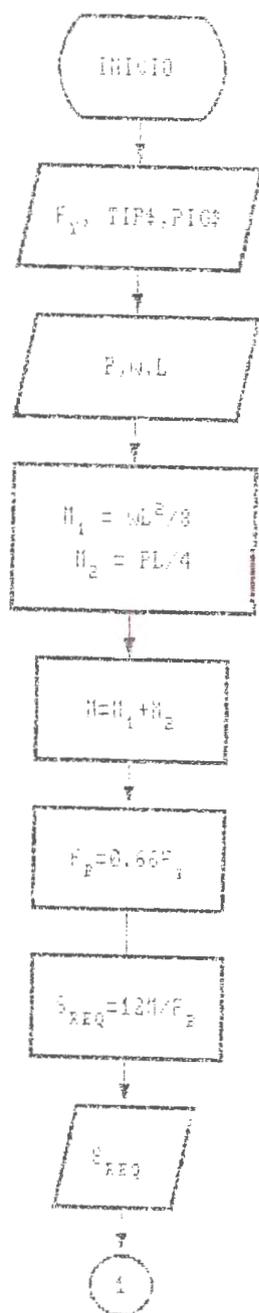
Si $a/h > 1.0$

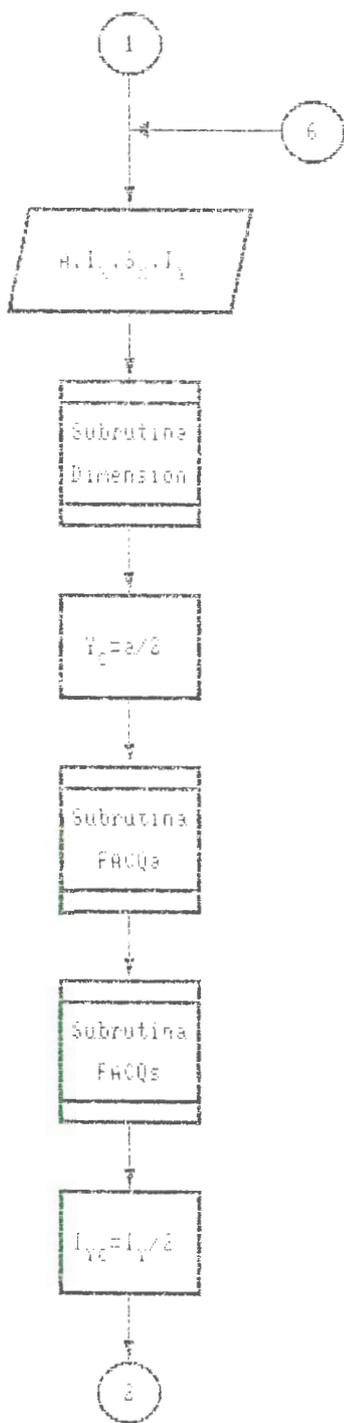
$$k_v = 5.34 + \frac{4.00}{(a/h)^2}$$

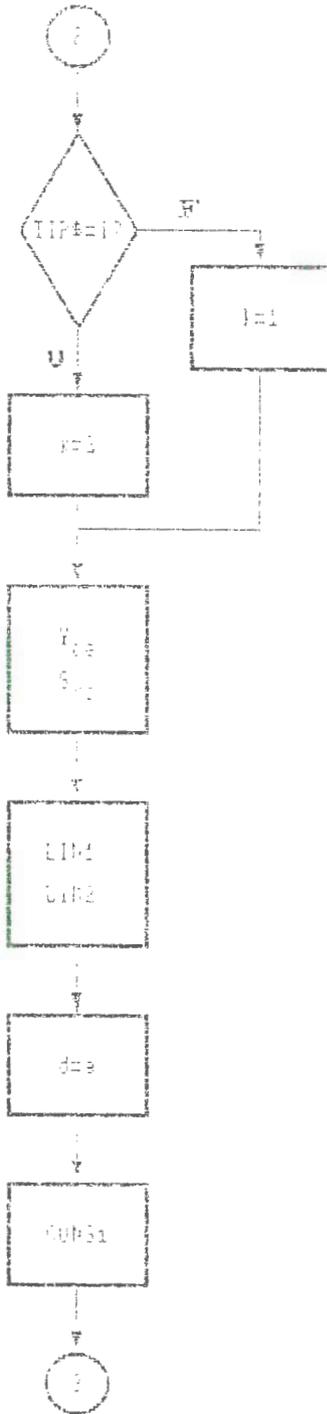
4.2 Programa de computación

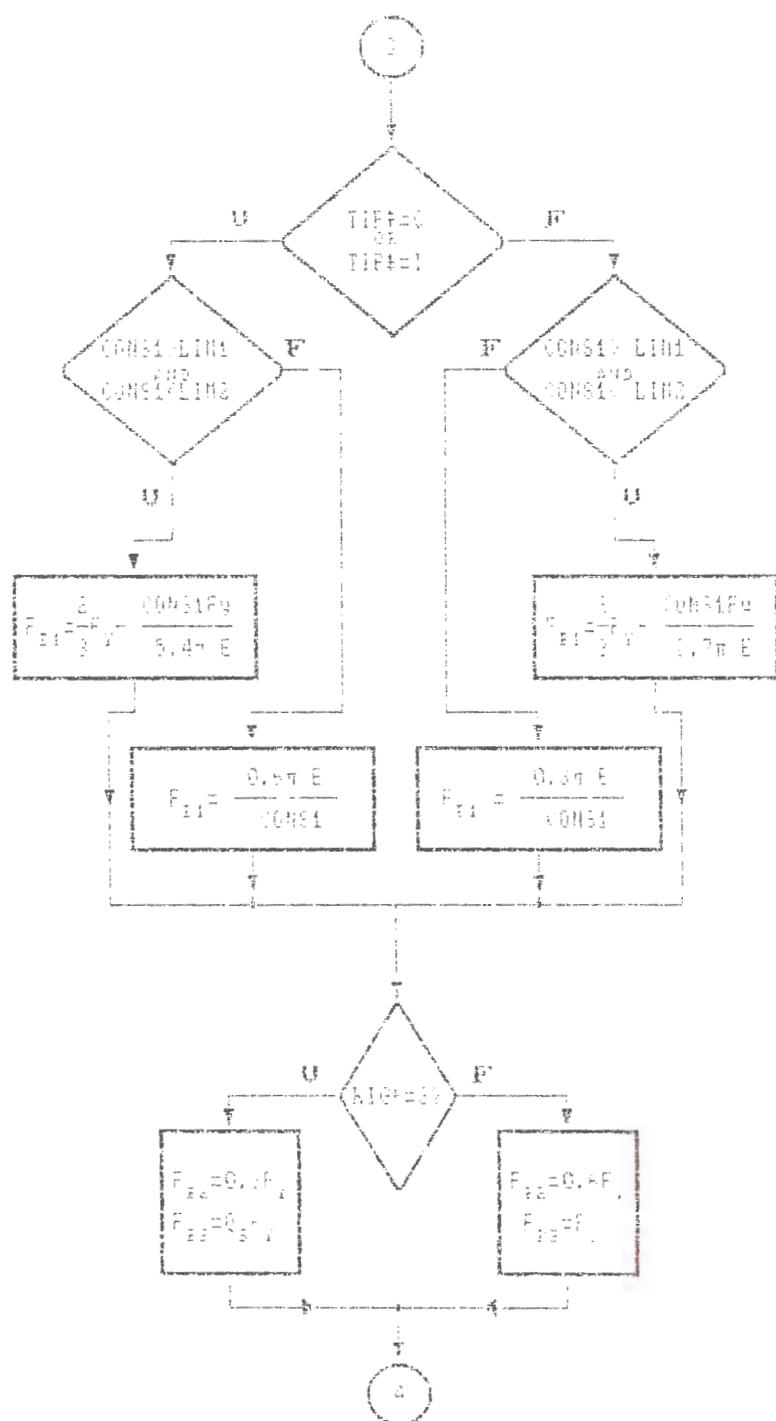
4.2.1 Diagrama de flujo

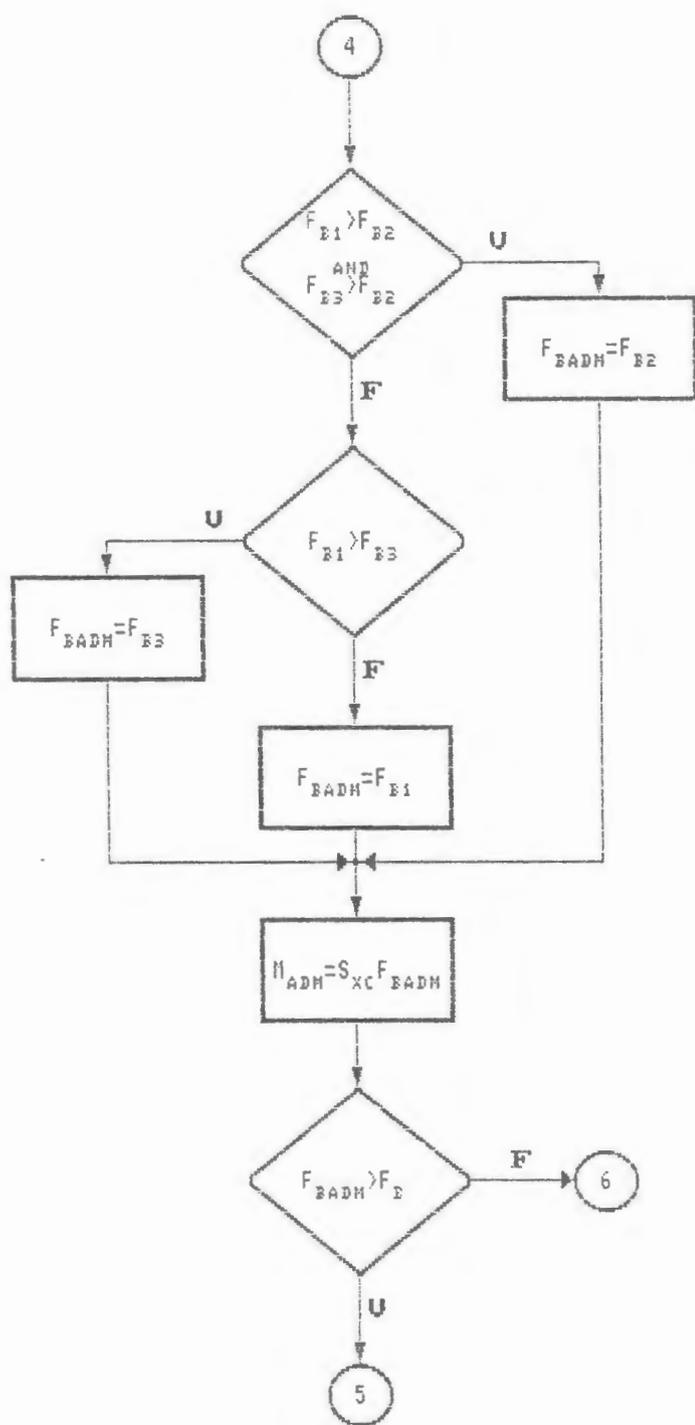
SELECCION DE MIEMBROS EN FLEXION

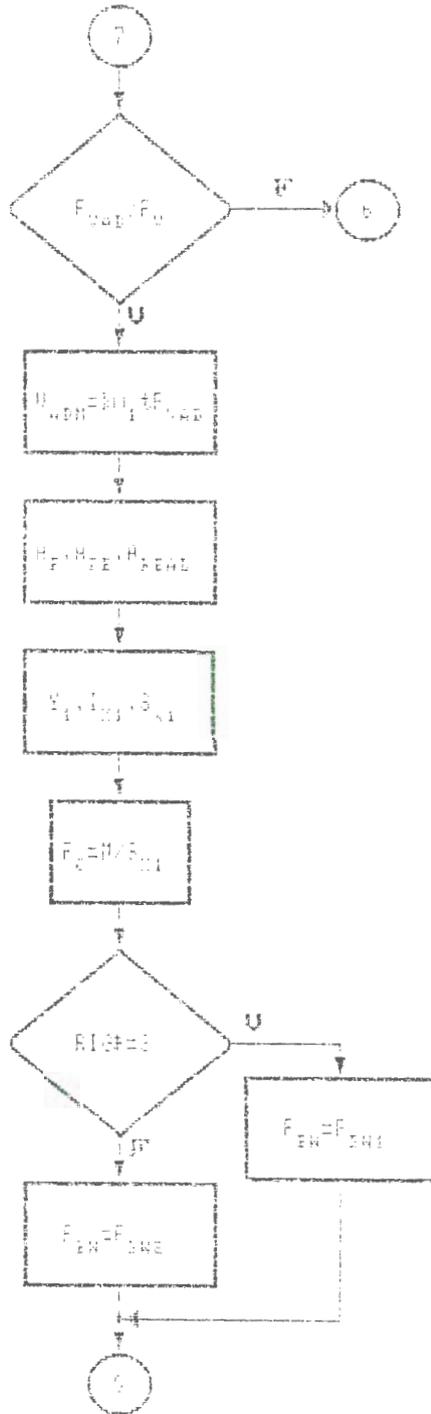


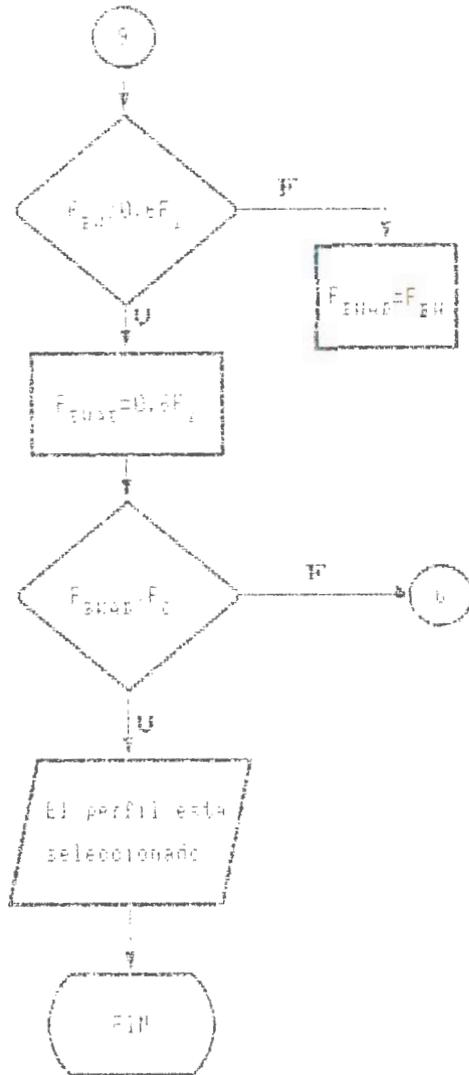













```

ELSE
  k = 1
END IF
LIM1 = 104815.1987# / Fy
LIM2 = 524075.9937# / Fy
CONS1 = ((Lx * 12#) ^ 2) * Sx / (a * Iyc)
IF TIP# = "C" OR TIP# = "I" THEN
  IF CONS1 > LIM1 AND CONS1 < LIM2 THEN
    Fb1 = .6667 * Fy - ((Fy ^ 2) * CONS1 / 1572228#)
  ELSE
    Fb1 = 174692 / CONS1
  END IF
ELSE
  IF CONS1 > LIM1 / 2 AND CONS1 < LIM2 / 2 THEN
    Fb1 = .6667 * Fy - (Fy ^ 2) * CONS1 / 786114#
  ELSE
    Fb1 = 87346# / CONS1
  END IF
END IF
IF RIG# = "S" THEN
  Fb2 = .6 * Fy
  Ccr = SQR((59000 * PI ^ 2) / (Qa * Fy))
  IF REL > Ccr THEN
    Fb3 = 151900 / REL ^ 2
  ELSE
    IF Qa = 1 AND t > .09 THEN
      Fb3 = (1 - .5 * (REL / Ccr) ^ 2) * Fy / (5 / 3 + (3 / 8) * (REL / Ccr) - (1 / 8) *
(REL / Ccr) ^ 3)
    ELSE
      Fb3 = .522 * Qa * Fy - (Qa * Fy * REL / 1494) ^ 2
    END IF
  END IF
END IF
ELSE
  Fb2 = .6 * Fy
  Fb3 = Fy
END IF
IF Fb1 > Fb2 AND Fb3 > Fb2 THEN
  Fbadm = Fb2
ELSE
  IF Fb1 > Fb3 THEN
    Fbadm = Fb3
  ELSE
    Fbadm = Fb1
  END IF
END IF
CLS
Fb = M * 12 / Sx
IF Fbadm < .97 * Fb THEN
  LOCATE 10, 2: PRINT "La viga no soporta la carga aplicada, escoger una más robusta"
  CALL ESPACIO
  GOTO 25
ELSE

```

```

LOCATE 10, 2: PRINT "La viga está diseñada para soportar el máximo momento flector "
CALL ESPACIO
Madm = Sx * Fbadm / 12
END IF
LOOP UNTIL Fbadm >= .97 * Fb
DO
IF TIP% = "I" THEN
k = 2
ELSE
k = 1
END IF
Vmax = wd * Lx / 2 + P / 2
Fv = Vmax / (w1 * k * t)
IF w1 / t <= 164 / SQR(Fy) THEN
Fvadm = .4 * Fy
ELSE
IF w1 / t > 164 / SQR(Fy) AND w1 / t <= 237 / SQR(Fy) THEN
Fvadm = 65.7 * SQR(Fy) / (w1 / t)
ELSE
Fvadm = 15600 / (w1 / t) ^ 2
END IF
END IF
CLS
IF Fvadm < Fv THEN
LOCATE 10, 2: PRINT "La viga falla por corte del alma, escoger otra viga más robusta"
CALL ESPACIO
GOTO 25
ELSE
LOCATE 10, 2: PRINT "La viga soporta el máximo cortante "
CALL ESPACIO
Vadm = k * w1 * t * Fvadm
END IF
LOOP UNTIL Fv <= Fvadm
DO
IF TIP% = "I" THEN
k = 1
ELSE
k = 2
END IF
Af = k * w2 * t
Afe = Af * Qs
Ared = area - (Af - Afe)
Ypr = (Af - Afe) * (a / 2 - t / 2) / Ared
Ixi = Ix - (Af - Afe) * (a / 2 - t / 2) ^ 2 - Ared * Ypr ^ 2
Sxi = Ixi / (a / 2 + Ypr)
Fc = M * 12 / Sxi
IF RIG% = "S" THEN
Fbw = .6 * (1.21 - .00034 * (w1 / t) * SQR(Fy)) * Fy
ELSE
Fbw = .6 * (1.26 - .00051 * (w1 / t) * SQR(Fy)) * Fy
END IF
IF Fbw > .6 * Fy THEN

```

```

    Fbwad = .6 * Fy
ELSE
    Fbwad = Fbw
END IF
CLS
IF Fbwad < Fc THEN
LOCATE 10, 2: PRINT "La viga falla por flexión del alma, escoger otra viga más robusta"
    CALL ESPACIO
    GOTO 25
ELSE
    LOCATE 10, 2: PRINT "El alma de la viga soporta la flexión "
    CALL ESPACIO
END IF
LOOP UNTIL Fc <= Fbwad
CLS
SOB = (Madm - M) * 100 / Madm
PRINT "La viga esta sobredimensionada en un "; SOB; " %"
DO
    INPUT "DESEA IMPRIMIR LOS RESULTADOS (S/N) "; IMP$
LOOP UNTIL IMP$ = "S" OR IMP$ = "N"
IF IMP$ = "S" THEN
    LPRINT " El perfil seleccionado es del tipo "; TIP$; a; "X"; b; "X"; c
    LPRINT " El máximo momento que la viga puede soportar es "; Madm
    LPRINT " El esfuerzo admisible de flexión es "; Fbadm
    LPRINT " El esfuerzo actual de flexión es "; Fb
ELSE
    BEEP
END IF
END SUB

```

4.3 Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI y AISC

Al analizar las similitudes y diferencias que existen entre las especificaciones del AISI y el AISC, en el estudio del fenómeno de flexión, resulta necesario recordar las observaciones efectuadas cuando se trató el fenómeno de compresión.

La principal similitud que surge entre ambos Manuales involucra la gran importancia que reviste el control del esfuerzo admisible en el ala de compresión y por lo tanto las recomendaciones y sugerencias realizadas en el fenómeno de compresión para los casos de flexión. Sin embargo, entre ambos casos surge una diferencia; mientras en el fenómeno de compresión se analiza el factor de reducción de área en la totalidad de elementos no rigidizados de la columna, en el fenómeno de flexión sólo interesa el factor de reducción de área en el ala a compresión de la viga. La necesidad de un factor de reducción de esfuerzos en los elementos no rigidizados es ajena al estudio de los casos de flexión.

Otro factor cuyo control reviste singular importancia en el fenómeno de flexión es la distancia que

existe entre los apoyos de la viga, la que indistintamente suele ser nombrada también como longitud no arriostrada o longitud de arriostramiento. Aquí surge la principal diferencia entre ambos manuales. Las normas del AISC establecen que la totalidad de las vigas puede ser incluida dentro de la siguiente clasificación:

a) Con apoyo lateral continuo, la que a su vez puede ser:

- Compacta
- Parcialmente compacta
- No compacta

b) Sin apoyo lateral continuo

- Longitud no arriostrada menor que longitud compacta
- Longitud no arriostrada menor que la longitud última
- Longitud no arriostrada mayor que la longitud última

Por otra parte, el Manual del AISI, realiza una clasificación de las vigas analizando el tipo de falla que pudiese ocurrir en el ala que soporta los esfuerzos de compresión. De acuerdo a dichas especificaciones, la totalidad de las vigas debe de encon-

trarse dentro de cualquiera de las siguientes categorías:

- a) Falla por fluencia
- b) Falla por pandeo inelástico
- c) Falla por pandeo elástico

Resulta importante señalar que el Manual del AISI no establece recomendaciones explícitas en lo referente a la longitud de arriostramiento de las vigas. Señala simplemente que estos deberán de ser colocados a distancias no mayores a la cuarta parte de la longitud de la viga. Esta recomendación básicamente obedece a la necesidad de impedir la presencia de esfuerzos combinados; principalmente la presencia de esfuerzos cortantes debido a torsión. Las tablas VI y VII permiten comparar las diferencias que existen entre las especificaciones de ambos Manuales, mientras que las figuras 8 y 9 ilustran de una manera más clara las diferencias y similitudes que pueden existir entre dichas especificaciones.

Otro fenómeno que es necesario controlar en el diseño de una viga, es la posibilidad de que el alma del elemento estructural falle por cortante directo. Este tipo de falla ocurre generalmente en los apoyos

Tabla VI

Cuadro comparativo de las normas AISI y AISC

para el análisis de vigas sometidas a cargas de flexión

Variación de F_b en función de $L^2 S_{xc}/dI_{yc}$

Aplicación	Manual AISI		Manual AISC	
	Expresión	Rango	Expresión	Rango
Fluencia	$0.60F_y$	Hasta .36π ² EC _b /F _y (canales, I) .18π ² EC _b /F _y (zeta)	$0.60F_y$	$\sqrt{\frac{102000C_b}{F_y}}$
Pandeo Inelástico	$\frac{2F_y}{3} - \frac{F_y^2}{5.4\pi^2 E C_b} \frac{L^2 S_{xc}}{dI_{yc}}$ (perfiles "C" e "I")	Desde .36π ² EC _b /F _y hasta 1.8π ² EC _b /F _y	El mayor valor entre $(\frac{2}{3} - \frac{F_y(L/r_t)^2}{1530 \times 10^3 C_b}) F_y$ y $\frac{12 \times 10^3 C_b}{ld/A_f}$ pero siempre menor que $F_b = 0.6F_y$	Desde $\sqrt{\frac{102000C_b}{F_y}}$ hasta $\sqrt{\frac{510000C_b}{F_y}}$
	$\frac{2F_y}{3} - \frac{F_y^2}{2.7\pi^2 E C_b} \frac{L^2 S_{xc}}{dI_{yc}}$ (perfiles "Z")	Desde .18π ² EC _b /F _y hasta 0.9π ² EC _b /F _y		
Pandeo elástico	$0.6\pi^2 E C_b \frac{dI_{yc}}{L^2 S_{xc}}$ (perfiles "C" e "I")	Más de 1.8π ² EC _b /F _y	El mayor valor entre $\frac{170 \times 10^3 C_b}{(L/r_t)^2}$ y $\frac{12 \times 10^3 C_b}{ld/A_f}$ pero siempre menor que $F_b = 0.6F_y$	Más de $\sqrt{\frac{510000C_b}{F_y}}$
	$0.3\pi^2 E C_b \frac{dI_{yc}}{L^2 S_{xc}}$ (perfiles "Z")	Más de .9π ² EC _b /F _y		

Tabla VII

Cuadro comparativo de las normas AISI y AISC
para el análisis de vigas sometidas a cargas de flexión
Variación de F_v en función de h/t

Aplicación	Manual AISI		Manual AISC	
	Expresión	Validez	Expresión	Validez
Fluencia	$0.40F_y$	Menos de 1647(kv/Fy)	$0.40F_y$	No existe limitación
Rango Inelástico	$\frac{65.7\sqrt{k_v F_y}}{h/t}$	Desde 1647(kv/Fy) hasta 2374(kv/Fy)		
Rango Elástico	$\frac{15600}{(h/t)^2}$	Más de 2374(kv/Fy)		

de la viga, donde el esfuerzo cortante aplicado suele tener su valor máximo. De ser el esfuerzo cortante que soporta la viga el nuevo parámetro básico de diseño, se puede afirmar que el tipo de falla que se presente se encontrará incluida en la siguiente clasificación:

- a) Falla por fluencia en corte,
- b) Falla dentro del rango inelástico; y,
- c) Falla dentro del rango elástico.

Dentro de este tipo de falla surge otra diferencia con respecto a las recomendaciones del Manual del AISC. Según dichas especificaciones, la clasificación presentada anteriormente no es necesaria, debido a que los perfiles rolados han sido diseñados de tal forma que la única posibilidad de que ocurra falla en el corte será dentro del rango de falla por fluencia, cosa que no ocurrirá en los perfiles doblados en frío construidos según normas del AISI. Si bien es cierto, las dimensiones de estos se encuentran en un gran porcentaje dentro de los límites donde se produce la falla por fluencia en el corte, existe un determinado porcentaje para los cuales la falla pudiese ocurrir dentro del rango inelástico. En lo que respecta a las fallas dentro del rango elástico, estas ocurren de

ESFUERZO ADMISIBLE DE FLEXION

(Perfiles "Z" con $F_y = 36\text{ksi}$ y $C_b = 1$)

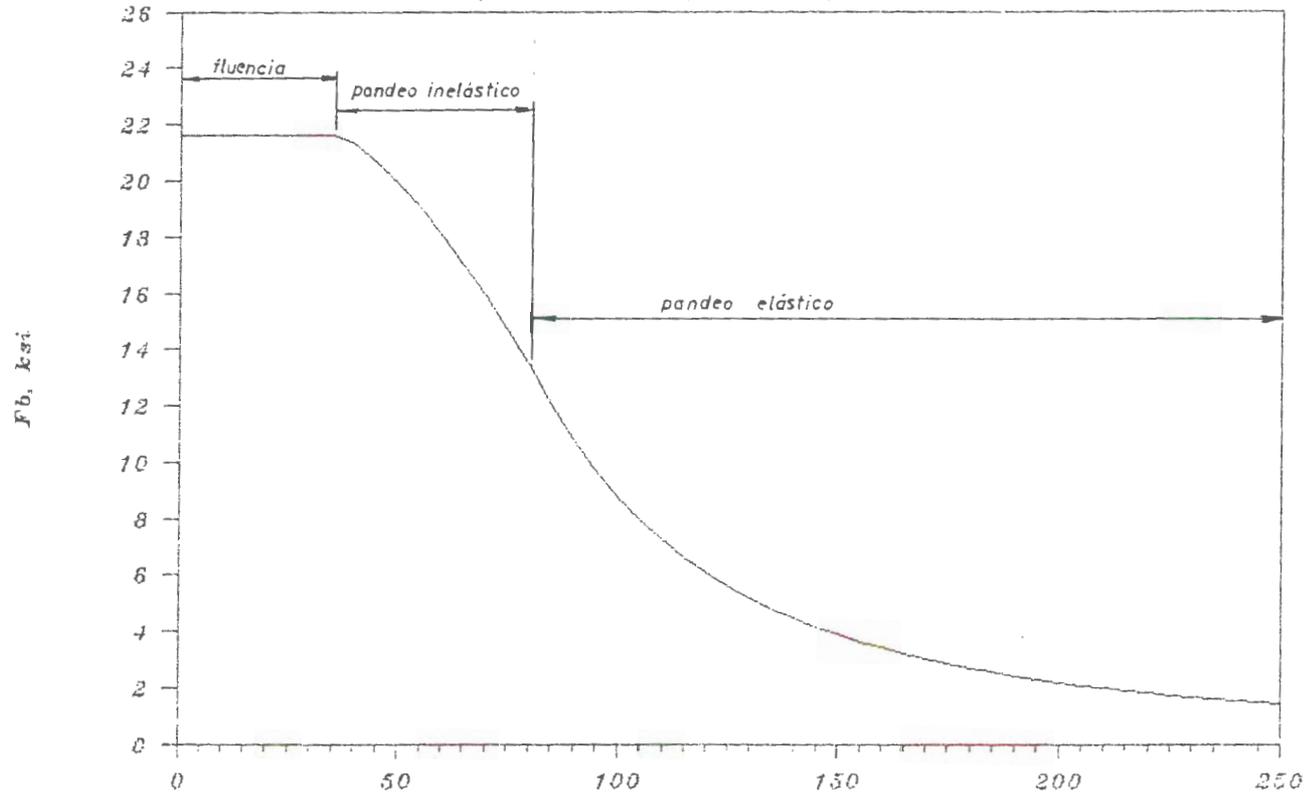


Fig. 8.- Vigas.- Esfuerzo admisible de flexión en perfiles Z. Normas AISI

manera preferencial en paredes o láminas de acero doblado y por lo tanto se encuentran fuera del alcance del presente trabajo.

Al observar la figura 8, se puede verificar la gran similitud que existe en las curvas que describen el comportamiento del esfuerzo admisible de flexión entre ambos Manuales. Cosa similar ocurre en la variación del esfuerzo permisible de corte, con lo que se puede afirmar que en el proceso de diseño el factor crítico en el que pone mayor énfasis el Manual del AISI es en la posibilidad de pandeo local en los elementos rigidizados de los perfiles estructurales.

Otro punto crítico que merece ser analizado al comparar las regulaciones de ambos manuales se refiere a la posibilidad de que ocurra pandeo en el alma del perfil estructural. Es fácil observar que el Manual del AISI prevee dos expresiones bien definidas, tanto para perfiles con ala en compresión rigidizada, como para perfiles con ala en compresión no rigidizada. El Manual del AISC no prevee expresiones para diseñar perfiles estructurales contra este tipo de falla debido a que los perfiles estándares que se encuentran en el mercado han sido diseñados en sus dimensiones para evitar que ocurra este tipo de fa-

ESFUERZO DE CORTE

Variación con la relación h/t

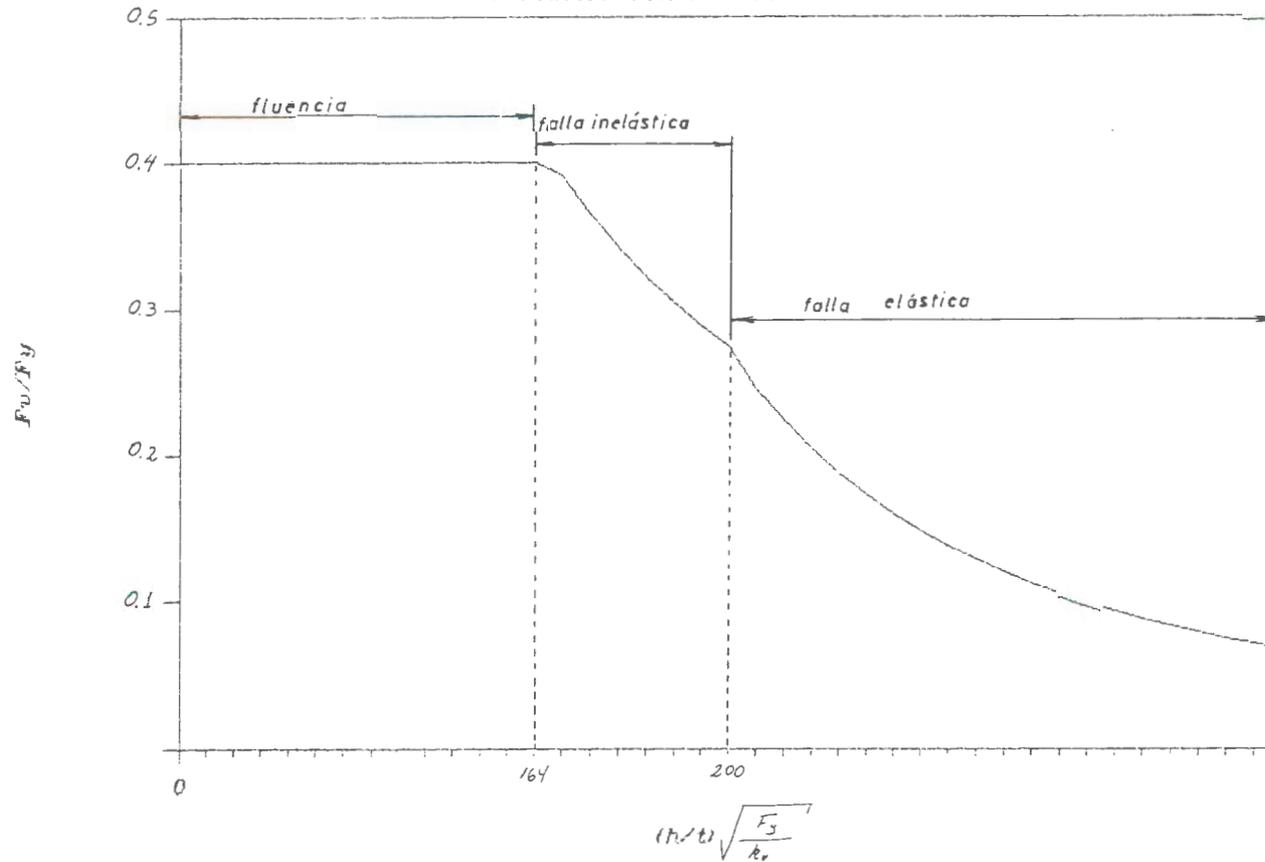
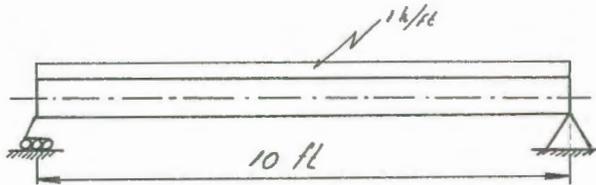


Fig. 9.- Variación del esfuerzo de corte en perfiles doblados en frío. Norma AISI

lla. Diseñar contra este tipo de falla es necesario debido a la gran altura y poco espesor que poseen dichos perfiles estructurales.

4.4 Ejercicios de aplicación

Diseñar una viga a partir de un perfil estructural tipo "I", cuya longitud es de 10 ft y sobre la cual se ha aplicado una carga uniformemente distribuida de magnitud 1 k/ft. Utilice un acero tipo A36 y considere $K_x=K_y=1.0$



* Normas AISI

- 1.- Calculo la carga de momento máximo

$$M = 1/8 w l^2 \quad M = 1/8 * 1 * 10^2 \quad M = 12.5 \text{ k*ft}$$

- 2.- Asumo $F_{b1} = 0.6 F_y$

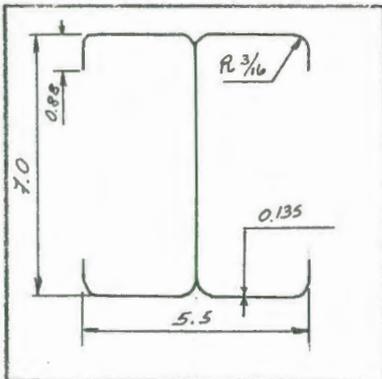
$$F_{b1} = 0.6 * 36 \quad F_{b1} = 21.6 \text{ ksi}$$

- 3.- Calculo el area requerida A_{req}

$$S_x \text{ req} = 12.5 * 12 / 21.6 \quad S_x \text{ req} = 6.944$$

- 4.- Escojo el perfil estructural

Primera aproximación



$$A = 3.59 \text{ in}^2$$

$$r_x = 2.72 \text{ in} \quad r_y = 1.32 \text{ in}$$

$$I_x = 26.5 \text{ in}^4 \quad I_y = 6.20 \text{ in}^4$$

$$S_x = 7.58 \text{ in}^3 \quad S_y = 2.13 \text{ in}^3$$

$$f_b = 12.5 * 12 / 7.58$$

$$f_b = 17.789 \text{ ksi}$$

5.- Cálculo la relación de esbeltez

$$KL/r = 1*10*12/2.72 \quad KL/r = 69.767$$

$$C_c = 127.182$$

6.- Factor de reducción del área del ala en compresión

$$w/t)_{lim} = 171/f_{19.789}$$

$$w/t)_{lim} = 38.440$$

$$\frac{w}{t} = \frac{0.5*5.5 - 2\left(\frac{3}{16} + 0.135\right)}{0.135} \quad \frac{w}{t} = 15.593$$

$$15.593 < 38.440 \rightarrow b = w \rightarrow \rho_a = 1.0$$

7.- Cálculo del esfuerzo admisible de flexión

Controlando la resistencia del ala en compresión.

$$F_b = \frac{\left[1 - \frac{(69.767)^2}{2*(127.182)^2}\right] * 36}{\frac{5}{3} + \frac{3*69.767}{8*127.182} - \frac{(69.767)^3}{8*(127.182)^3}}$$

$$F_{b1} = 16.516 \text{ ksi}$$

Por otra parte, controlando la longitud no arriostrada de la viga, se tiene que:

$$\frac{0.36\pi^2 EC_b}{F_y} = 2911.53 \quad y \quad \frac{1.8\pi^2 EC_b}{F_y} = 145557.67$$

$$\frac{L^2 S_{xc}}{dI_{yc}} = \frac{(10*12)^2 * 7.58}{7*0.5*6.20} \rightarrow \frac{L^2 S_{xc}}{dI_{yc}} = 5030.05$$

Como $2911.53 < 5030.05 < 14557.67$, se debe aplicar que:

$$F_b = \frac{2}{3}(36) - \frac{36^2 * 5030.046}{1572258}$$

$$F_{b2} = 19.584 \text{ ksi}$$

Finalmente, se tiene también que:

$$F_b = 0.6 * F_y$$

$$F_b = 0.6(36)$$

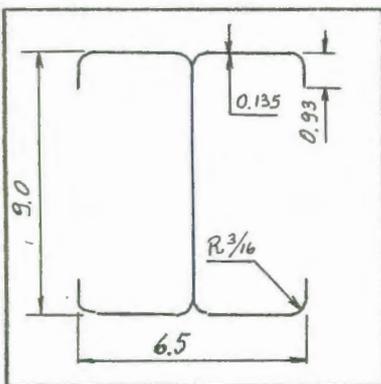
$$F_{b3} = 21.6 \text{ ksi}$$

De los tres valores obtenidos para el esfuerzo admisible de flexión, el que domina es el menor; es decir, utilizo $F_b = 16.516 \text{ ksi}$.

Como $19.789 \text{ ksi} < 16.516 \text{ ksi}$ ($f_b < F_b$) el perfil escogido no sirve y por lo tanto es necesario seleccionar uno más robusto.

Segunda aproximación

8.- Escojo otro perfil



$$A = 4.46 \text{ in}^2$$

$$r_x = 3.49 \text{ in} \quad r_y = 1.52 \text{ in}$$

$$I_x = 54.3 \text{ in}^4 \quad I_y = 10.30 \text{ in}^4$$

$$S_x = 12.10 \text{ in}^3 \quad S_y = 3.17 \text{ in}^3$$

$$f_b = 12.5 * 12 / 12.10$$

$$f_b = 12.40 \text{ ksi}$$

9.- Calculo la relación de esbeltez

$$KL/r = 1 * 10 * 12 / 3.49$$

$$KL/r = 34.384$$

$$C_c = 127.182$$

10.- Factor de reducción del área del ala en compresión

$$w/t)_{lim} = 171/\sqrt{12.397}$$

$$w/t)_{lim} = 48.567$$

$$\frac{w}{t} = \frac{0.5*6.5 - 2*(3/16 + 0.135)}{0.135} \quad \frac{w}{t} = 19.30$$

$$19.30 < 48.567 \rightarrow b = w \rightarrow Q_s = 1$$

11.- Cálculo del esfuerzo admisible de flexión
Controlando la resistencia del ala en compresión.

$$F_b = \frac{[1 - \frac{(34.384)^2}{2*(127.182)^2}] * 36}{\frac{5}{3} + \frac{3*34.384}{8*127.182} - \frac{(34.384)^3}{8*(127.182)^3}}$$

$$F_b = 19.645 \text{ ksi}$$

Por otra parte, controlando la longitud no arriostrada de la viga, se tiene que:

$$\frac{0.36\pi^2 E C_b}{F_y} = 2911.53 \quad y \quad \frac{1.8\pi^2 E C_b}{F_y} = 14557.67$$

$$\frac{L^2 S_{xc}}{d I_{yc}} = \frac{(10*12)^2 * 12.067}{9 * 0.5 * 10.30} \rightarrow \frac{L^2 S_{xc}}{d I_{yc}} = 3748.97$$

Como $2911.53 < 3748.97 < 14557.67$, se debe aplicar:

$$F_b = \frac{2}{3} (36) - \frac{36^2 * 3748.97}{1572258}$$

$$F_b2 = 20.420 \text{ ksi}$$

Finalmente, se tiene también que:

$$F_b = 0.6 * F_y$$

$$F_b = 0.6(36)$$

$$F_b3 = 21.6 \text{ ksi}$$

De los tres valores obtenidos para el esfuerzo admisible de flexión, el que domina es el menor; es decir, utilizo $F_b = 19.320 \text{ ksi}$.

Como $15.480 \text{ ksi} < 19.320 \text{ ksi}$ ($f_b < F_b$) el perfil escogido sirve y por lo tanto ahora será necesario verificar su resistencia al corte y al pandeo del alma.

$$V_{\max} = 1 \times 10 / 2$$

$$V_{\max} = 5k$$

$$\frac{w_1}{t} = \frac{8 - 2 \left(\frac{3}{16} + 0.135 \right)}{0.135} = \frac{7.355}{0.135} \quad \frac{w_1}{t} = 54.481$$

$$164 / \sqrt{F_y} = 27.333$$

$$237 / \sqrt{F_y} = 39.50$$

Como $54.481 > 39.50$, la resistencia al corte se verifica con:

$$F_v = 15.600 / (54.481)^2 \quad F_v = 5.256 \text{ ksi}$$

$$f_v = 5 / (7.355 * 2 * 0.135) \quad f_v = 2.518 \text{ ksi}$$

Como $2.518 \text{ ksi} < 5.256 \text{ ksi}$ ($f_v < F_v$) el perfil es satisfactorio.

Verificando el pandeo del alma:

$$A_f = 2 * w * t$$

$$A_f = 2 * 3.355 * 0.135 \quad \frac{w}{t} = \frac{0.93 - \left(\frac{3}{16} + 0.135\right)}{0.135} \quad \frac{w}{t} = 4.5$$

$$A_f = 0.90585 \text{ in}^2$$

$$w/t)_{lim} = 63.3 / \sqrt{F_y} \quad w/t)_{lim} = 10.55$$

$$4.5 < 10.55 \implies Q_e = 1$$

$$A_{fe} = A_f * Q_e$$

$$A_{fe} = 0.90585 * 1$$

$$A_{fe} = 0.90585 \text{ in}^2$$

$$A_{red} = 4.02 - (0.90585 - 0.90585)$$

$$A_{red} = 4.02$$

$$Y_{pr} = (A_f - A_{fe}) * (a/2 * t/2) / A_{red} \quad Y_{pr} = 0$$

$$I_{x1} = I_x - (A_f - A_{fe}) * (a/2 * t/2)^2 - A_{red} * Y_{pr}^2$$

$$I_{x1} = I$$

$$S_{x1} = I_{x1} / (a/2 + Y_{pr})$$

$$S_{x1} = 38.7 / 0.5 * 8.0 \quad S_{x1} = 9.675$$

$$f_c = M * 12 / S_{x1} \quad f_c = 12.5 * 12 / 9.675$$

$$f_c = 15.504 \text{ ksi}$$

$$\frac{w_1}{t} = \frac{8 - 2 \left(\frac{3}{16} + 0.135\right)}{0.135} \quad \frac{w_1}{t} = 54.48$$

$$F_c = 0.6 * (1.21 - 0.00034 * 54.48 * \sqrt{36}) * 36$$

$$F_c = 23.74 > 21.6 \text{ ksi}$$

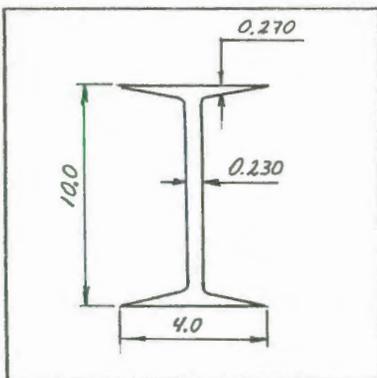
$$F_c = 21.6 \text{ ksi}$$

Como $15.50 \text{ ksi} < 21.6 \text{ ksi}$ ($f_c < F_c$) el perfil es capaz de soportar las condiciones de carga.

* Normas AISC

A manera de comparación de resultados, escogemos un perfil estructural del Manual del AISC que ofrezca características geométricas (de área) similares a las que posee el perfil más económico obtenido según normas AISI.

Primera aproximación



W10x15

$$A = 4.41 \text{ in}^2 \quad S_x = 13.8 \text{ in}^3$$

$$r_T = 0.99 \text{ in} \quad d/A_T = 9.25$$

$$L_c = 4.2 \text{ ft} \quad L_u = 5.0 \text{ ft}$$

Este elemento estructural trabajando en las condiciones de carga establecidas en el problema sugerido, soporta el siguiente esfuerzo real:

$$f_b = 12.5 * 12 / 13.8 \quad f_b = 10.87 \text{ ksi}$$

El diseño de la viga es realizado en base a la longi-

tud de arriostramiento de la viga. Como dicha longitud se encuentra entre los límites establecidos, se calcula el esfuerzo admisible de flexión:

$$F_b = \frac{170 \cdot 10^3 C_b}{(l/r_T)^2} \quad F_b = \frac{170 \cdot 10^3 \cdot 1}{(10 \cdot 12 / 1.29)^2}$$

$$F_b = 11.57 \text{ ksi}$$

$$F_b = \frac{12 \cdot 10^3 C_b}{ld/A_r} \quad F_b = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 1}{10 \cdot 12 \cdot 9.25}$$

$$F_b = 10.81 \text{ ksi}$$

Entre ambos valores se debe escoger el mayor, siempre que este no exceda a $0.6 \cdot F_y$ (21.6 ksi). Es decir:

$$F_b = 11.57 \text{ ksi}$$

Como $10.87 \text{ ksi} < 11.57 \text{ ksi}$ ($f_b < F_b$) el perfil es satisfactorio.

Verificando la resistencia al corte

$$V_{\max} = 5k$$

$$f_v = \frac{V}{t_v \cdot d} \quad f_v = \frac{5}{0.230 \cdot 9.99} \quad f_v = 2.18 \text{ ksi}$$

Además:

$$F_v = 0.4 \cdot F_y \quad F_v = 0.4 \cdot 36 \quad F_v = 14.4 \text{ ksi}$$

Como $2.18 \text{ ksi} < 14.4 \text{ ksi}$ ($f_v < F_v$) el perfil también es resistente al corte.

ANALISIS COMPARATIVO

AISI	AISC
$A = 4.46 \text{ in}^2$	$A = 4.41 \text{ in}^2$
$S_x = 12.10 \text{ in}^3$	$S_x = 13.8 \text{ in}^3$
$f_b = 15.48 \text{ ksi}$	$f_b = 10.87 \text{ ksi}$
$F_b = 19.32 \text{ ksi}$	$F_b = 11.57 \text{ ksi}$
$f_v = 2.52 \text{ ksi}$	$f_v = 2.18 \text{ ksi}$
$F_v = 5.26 \text{ ksi}$	$F_v = 14.4 \text{ ksi}$
$f_c = 15.50 \text{ ksi}$	El perfil es diseñado
$F_c = 21.6 \text{ ksi}$	para prevenir esta falla.

Se observa que el perfil escogido según las normas del AISI ($A = 4.46 \text{ in}^2$ y $F_b = 19.32 \text{ ksi}$) es más eficiente en flexión que el seleccionado por las normas del AISC ($A = 4.41 \text{ in}^2$ y $F_b = 11.57 \text{ ksi}$). Según los resultados, mientras el perfil estructural diseñado de acuerdo al AISI puede soportar una sobrecarga del 24.81%, el diseñado según las recomendaciones del AISC sólo podrá soportar una sobrecarga igual al 6.44% de la carga aplicada. Esta capacidad de soportar una mayor sobrecarga es la que brinda una ventaja con respecto al perfil AISC, a pesar de que este último posee mejores condiciones para soportar esfuerzos de corte. Controlando de la manera debida el cortante se podrá mejorar las condiciones de trabajo del perfil AISI, con lo que se optimizaría su uso.

CAPITULO V

ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXO-COMPRESION

5.1 Análisis teórico.

Los elementos sometidos a cargas de flexo-compresión son miembros estructurales sometidos simultáneamente a cargas de flexión y compresión. Los esfuerzos de flexión pueden ser el resultado de cargas excéntricas, cargas transversales o momentos de extremo aplicados. En las estructuras de acero, las vigas son usualmente soportadas por columnas a través de conexiones rigidizadas en los extremos. Las reacciones de las vigas deben ser consideradas como cargas excéntricas, las mismas que producen momentos flectores.

El comportamiento estructural de las vigas sometidas a cargas de flexo-compresión depende de variados factores, tales como las formas y dimensiones de la sección transversal, la ubicación de las cargas excéntricas aplicadas, la longitud de la columna y las

condiciones de arriostramiento. Es en base a esta razón que el AISI subdivide los procesos de diseño en los casos que a continuación se enumeran de acuerdo a la configuración de la sección transversal y el tipo de falla que pudiese ocurrir:

1.- Formas doblemente simétricas y formas no sujetas a cargas torsionales ni a cargas flexo-torsionales.

2.- Formas simplemente simétricas o rigidizadas alternativamente construidas de tal forma que $Q=1.0$, las mismas que pueden hallarse sometidas a cargas flexo-torsionales.

3.- Formas simplemente simétricas o rigidizadas alternadamente, construidas de tal forma que $Q<1.0$, las mismas que pueden hallarse sometidas a cargas flexo-torsionales.

4.- Formas simplemente simétricas, las mismas que no se encuentren cargadas asimétricamente.

En el desarrollo del presente trabajo sólo se analizan los elementos estructurales que por su condición se encuentren comprendidos dentro del primer grupo.

5.1.1 Esfuerzos de flexión y carga axial

Cuando una sección doblemente simétrica se en-

cuentra sometida a una carga axial de compresión y a un momento flector alrededor de su eje menor, el miembro puede fallar flexionándose en la localización del máximo momento, sea por fluencia o por pandeo local. Por otra parte, cuando la sección se encuentra sometida a una carga excéntrica que produzca un momento flector alrededor del eje mayor, el miembro puede tener fallas bien sea por flexión o por flexo-torsión debido a que dicha carga no pasa a través del centro de corte de la sección. Para formas torsionalmente estables (tal es el caso de formas tubulares rectangulares), cuando el momento flector es aplicado alrededor del eje menor, el elemento puede fallar por flexión en la región de momento máximo.

Si una sección doblemente simétrica (tipo "I") se encuentra sometida simultáneamente a una carga axial de valor P y a un momento de extremo de valor M , el estado de esfuerzos en el ala de compresión a lo largo de dicho elemento se encuentra descrito por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} = \frac{P}{A} + \frac{M}{S}$$

La ecuación anterior, en términos de esfuerzos puede también ser escrita de la siguiente manera:

$$f = f_a + f_b$$

Donde:

f es el esfuerzo combinado en el ala de compresión.

f_a es el esfuerzo axial de compresión.

f_b es el esfuerzo de flexión en el ala de compresión.

En cualquier caso, para que el diseño sea satisfactorio, el esfuerzo de trabajo del elemento debe de ser menor que el valor de los esfuerzos combinados.

$$f_a + f_b \leq F$$

O, dividiendo ambos miembros para el valor del esfuerzo admisible, dicha expresión puede también ser escrita de la siguiente manera:

$$\frac{f_a}{F} + \frac{f_b}{F} \leq 1.0$$

Debido a las diferencias que existen entre el

esfuerzo de carga axial y el esfuerzo de flexión, considerando los esfuerzos de trabajo para cada uno de dichos casos, la expresión antes anotada quedará finalmente escrita de la siguiente manera:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0$$

La relación anterior es la expresión básica que gobierna el diseño de elementos sometidos a carga de flexo-compresión, donde:

F_a es el esfuerzo admisible de compresión.

F_b es el esfuerzo admisible de flexión en el ala de compresión.

5.1.2 Recomendaciones que ofrece el Manual del AISI

Basado en los conceptos escritos anteriormente, las especificaciones del Manual del AISI recomiendan que para secciones doblemente simétricas (perfiles tipo "I"), sometidos simultáneamente a cargas de flexión y compresión el Manual del AISI ofrece las siguientes ecuaciones:

Si $f_a/F_{a1} > 0.15$ se deberá cumplir simultáneamente con lo que establecen las siguientes re-

laciones:

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_m f_{bx}}{(1 - f_a/F'_{ex}) F_{bx}} + \frac{C_m f_{by}}{(1 - f_a/F'_{ey}) F_{by}} \leq 1.0$$

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{b1x}} + \frac{f_{by}}{F_{b1y}} \leq 1.0$$

Por otra parte, si $f_a/F_{a1} \leq 0.15$

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

Donde:

f_a es el esfuerzo axial que soporta la columna.

f_b es el valor del máximo esfuerzo de compresión debido a la flexión que soporta la columna.

F_{a1} es el esfuerzo admisible de compresión bajo la aplicación de una carga axial y que obedece a las mismas especificaciones que se observaron en el capítulo III.

F_{a0} es el esfuerzo admisible de compresión en las mismas condiciones establecidas en el Capítulo III, evaluado en ($L=0$).

$$F_{a0} = \frac{12QF_y}{23}$$

Por otra parte, para elementos compuestos completamente por elementos rigidizados ($Q=1.0$) y

con altos espesores ($t > 0.09$ in), se debe cumplir que:

$$F_{a0} = 0.6F_y$$

F_b es el esfuerzo admisible de compresión debido a la presencia de cargas flectoras, cuando el fenómeno de flexión ocurre de manera aislada; por tanto se utilizan las mismas ecuaciones que se estudiaron en el capítulo IV.

F_{b1} es el esfuerzo admisible de compresión debido a la presencia de cargas flectoras, cuando el fenómeno de flexión ocurre de manera aislada y además está excluida la posibilidad de que ocurra pandeo local. De igual forma, se utilizan las mismas ecuaciones que se estudiaron en el capítulo IV.

F_e' es el esfuerzo de Euler modificado por un factor de seguridad y su valor está dado por:

$$F_e' = \frac{12\pi^2 E}{23 (Kl_b / r_b)^2}$$

L_b es la longitud no arriestrada del elemento con respecto al plano de flexión.

r_b es el radio de giro alrededor del eje de flexión.

C_m es un coeficiente de reducción cuyo valor puede ser:

1.- Para miembros sometidos a compresión con extremos sin restricción:

$$C_m = 0.85$$

2.- Para miembros sujetos a cargas de compresión y momentos de extremo con extremos restringidos.

$$C_m = 0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2}$$

Donde C_m no puede ser menor que 0.4 y M_1/M_2 es el cociente que resulta al dividir la magnitud del momento de extremo menor para la magnitud del momento de extremo mayor. El signo de dicha expresión se determina por la curvatura que se observe en la flexión de la viga; así, cuando ambos momentos tienen el mismo sentido, la curvatura es doble y el cociente positivo; si los momentos son de sentido contrario, la curvatura es simple y el cociente es negativo.

3.- Miembros sometidos a cargas de compresión y que soportan cargas entre los extremos, para el valor de C_m puede darse cualquiera de las siguientes situaciones:

a) Con extremos restringidos $C_m = 0.85$

b) Con extremos no restringidos $C_m = 1.0$

Para cualquier otro caso con presencia de

cargas transversales, el valor de C_m estará dado por la siguiente expresión:

$$C_m = 1.0 + \psi \frac{f_a}{F'_e}$$

Donde:

$$\psi = \frac{\pi^2 \delta_c EI}{M_0 L^2} - 1$$

δ_c es el valor de la máxima deflexión debida a la carga transversal.

M_0 es el valor del máximo momento entre los extremos, debido a la carga transversal aplicada.

Para casos extremadamente familiares, los valores de C_m se encuentran detallados en la tabla VIII.

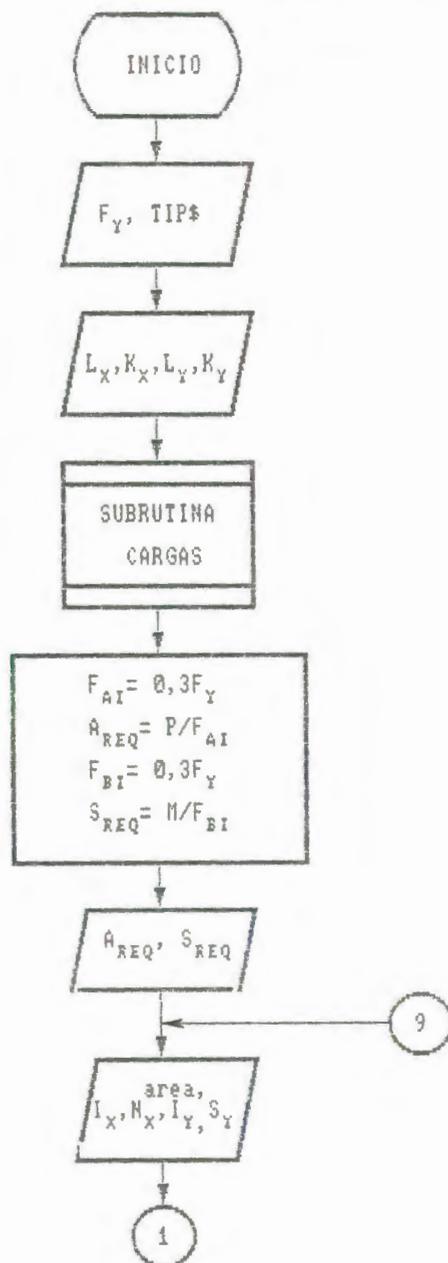
Tabla VIII

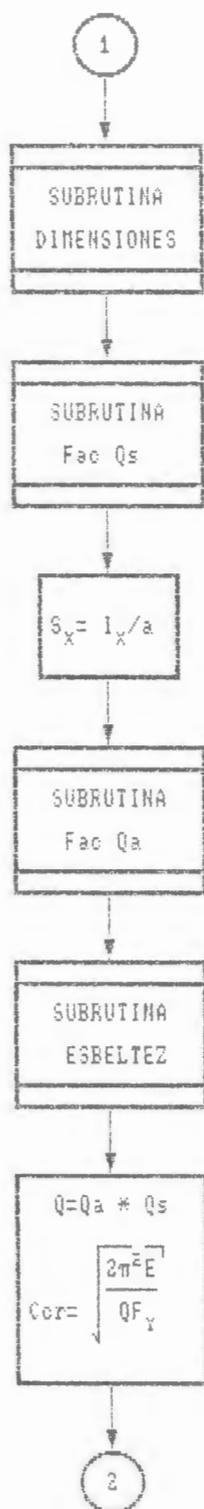
Valores típicos de C_m y ψ

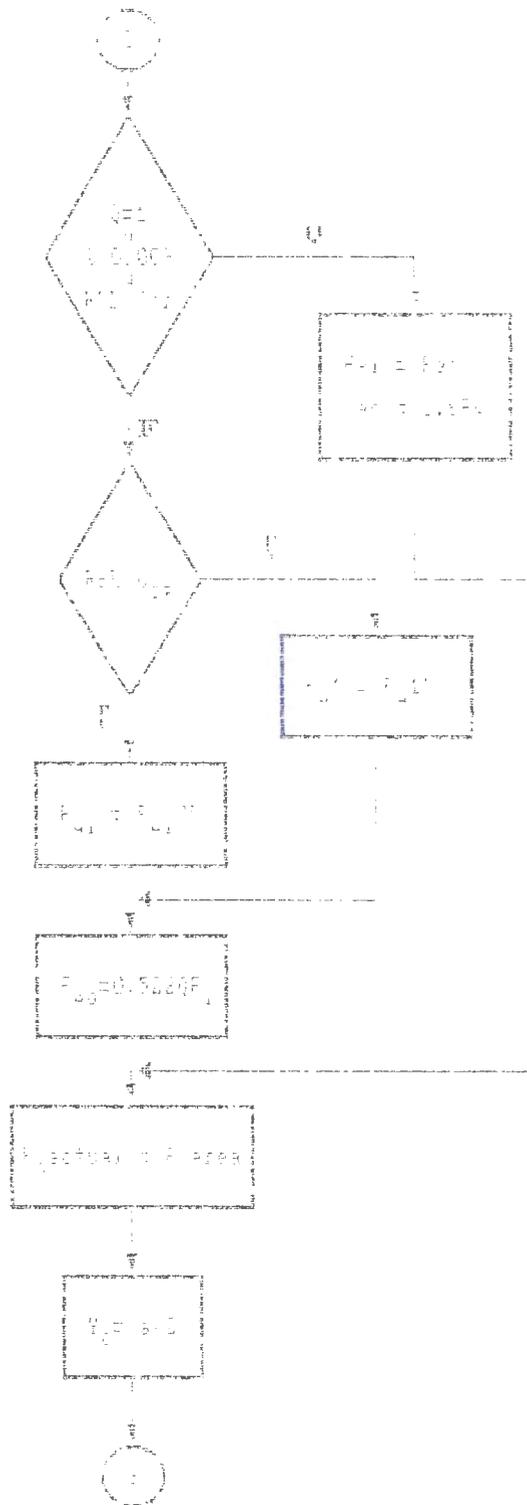
Caso	ψ	C_m
	0	1.0
	-0.4	$1 - 0.4 \frac{f_a}{F'_a}$
	-0.4	$1 - 0.4 \frac{f_a}{F'_a}$
	-0.2	$1 - 0.2 \frac{f_a}{F'_a}$
	-0.3	$1 - 0.3 \frac{f_a}{F'_a}$
	-0.2	$1 - 0.2 \frac{f_a}{F'_a}$

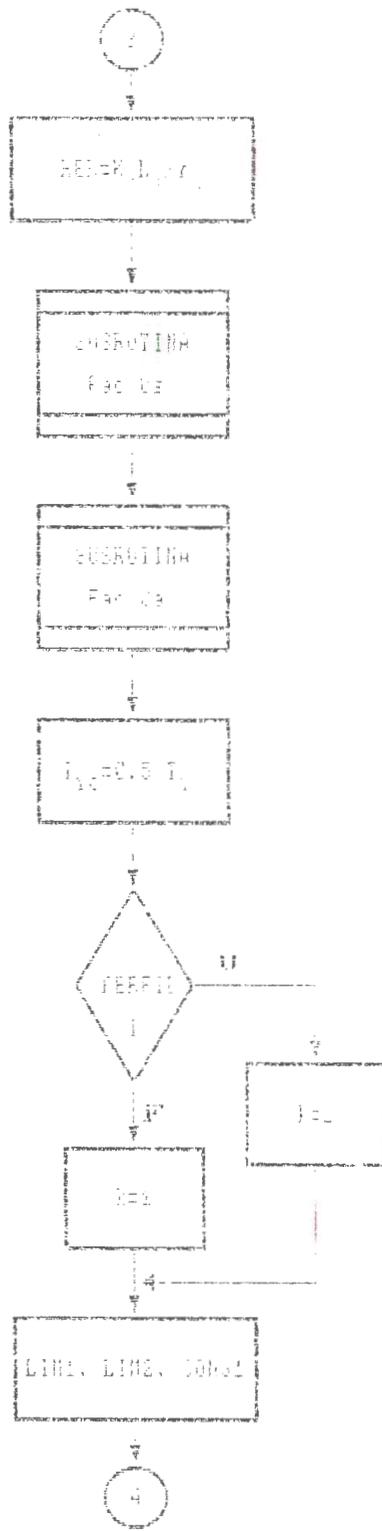
5.2 Programa de computación

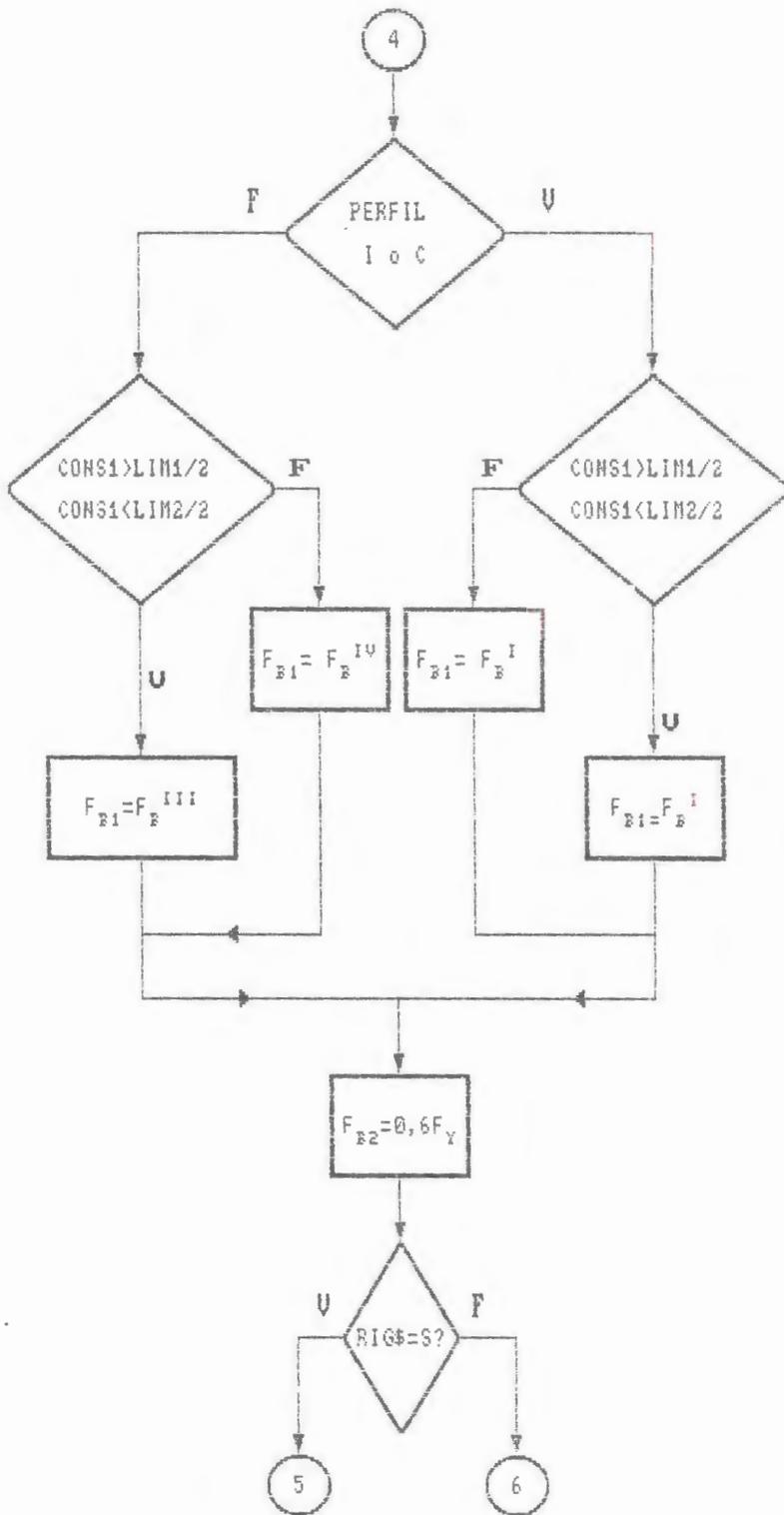
5.2.1 Diagrama de flujo

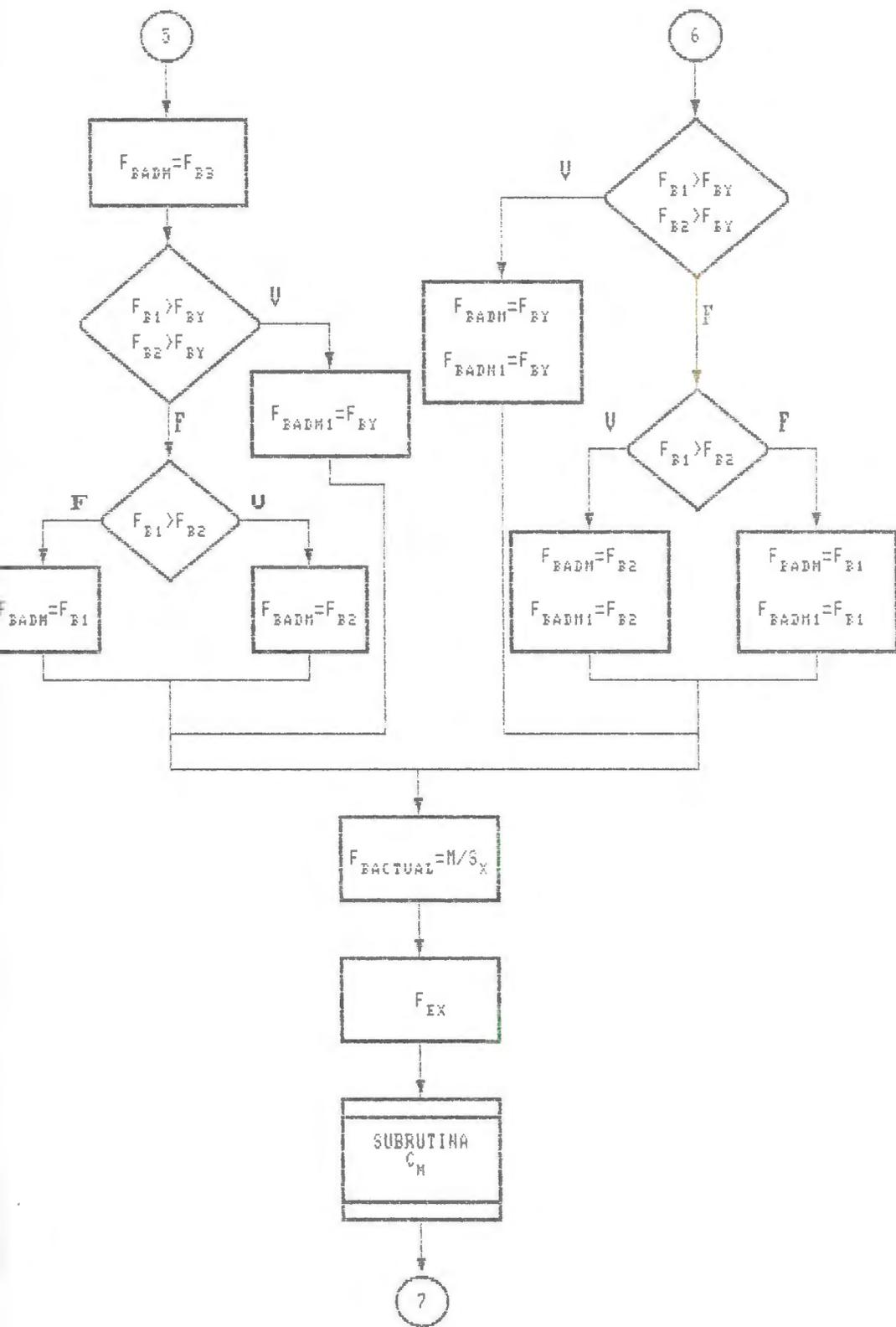
SELECCION DE ELEMENTOS SOMETIDOS
A CARGAS DE FLEXO-COMPRESION

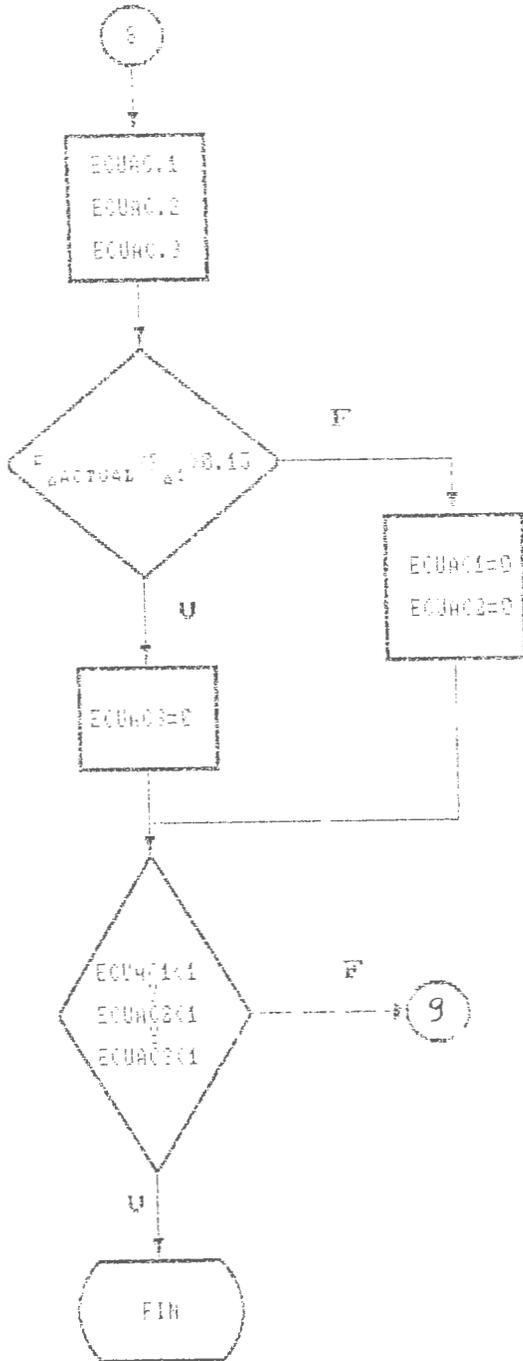












5.2.2 Algoritmo

```

SUB FLEXCOMP
'#####
'##### FLEXO-COMPRESION #####
'#####
CLS
SCREEN 2
PI = 3.141592654#
LOCATE 12, 18: PRINT " INGRESAR LAS PROPIEDADES DEL ACERO A UTILIZAR "
LOCATE 14, 2: INPUT " Limite de fluencia = ", Fy
CLS
LOCATE 12, 19: PRINT " INGRESAR LA FORMA DEL PERFIL ESTRUCTURAL "
LOCATE 14, 13: PRINT " Canal (C), Angulo (A), Zeta (Z), Tipo I (I), Tee (T) "
DO
  LOCATE 15, 24: INPUT " (Escoger una letra mayuscula) ", TIP$
  IF TIP$ <> "C" OR TIP$ <> "A" OR TIP$ <> "Z" OR TIP$ <> "I" OR TIP$ <> "T" THEN BEEP
LOOP UNTIL TIP$ = "C" OR TIP$ = "A" OR TIP$ = "Z" OR TIP$ = "I" OR TIP$ = "T"
CLS
DO
  LOCATE 15, 28: INPUT " Desea trabajar con un perfil rigidizado (S/N) ", RIG$
LOOP UNTIL RIG$ = "S" OR RIG$ = "N"
CLS
CALL CARGAS(CARGA$, P, Lx, M, M1, M2, Vmax, Cm, psi)
LOCATE 15, 1: INPUT " Factor de longitud efectiva con respecto al eje x-x (Kx) = ", Kx
LOCATE 16, 1: INPUT " Longitud no arriostrada de la columna con respecto al eje y-y (Ly en
pies) = ", Ly
LOCATE 17, 1: INPUT " Factor de longitud efectiva con respecto al eje y-y (Ky) = ", Ky
LOCATE 18, 1: INPUT " Coeficiente de reducci3n de esfuerzo (Cm) ", Cm
Fai = .3 * Fy
Areq = P / Fai
Fbi = .3 * Fy
Sreq = M * 12 / Fbi
CLS
LOCATE 2, 2: PRINT " Usted requiere un perfil de area mayor que "; Areq
LOCATE 3, 2: PRINT " O su m3dulo de secci3n debe ser mayor que "; Sreq
DO
  LOCATE 6, 2: INPUT " Area total del perfil "; area
  LOCATE 7, 2: INPUT " Momento de Inercia respecto al eje x-x "; Ix
  LOCATE 8, 2: INPUT " M3dulo de secci3n respecto al eje x-x "; Sx
  LOCATE 9, 2: INPUT " Momento de Inercia respecto al eje y-y "; Iy
  LOCATE 10, 2: INPUT " M3dulo de secci3n respecto al eje y-y "; Sy
  CALL DIMENSIONES(TIP$, RIG$, a, b, c, R, t, area, w1, w2, w3)
  CALL FAC0s(w3, t, Fy, 0s)
  Sx = Ix / a
  CALL FAC0a(w1, w2, t, P, M, area, Sx, TIP$, bef1, bef2, 0a, Sxc)
  CALL ESBELTEZ(Kx, Lx, Ix, Ky, Ly, Iy, area, REL)
  CLS
  0 = 0a * 0s
  Ccr = SQR(2 * PI ^ 2 * 29500 / (0 * Fy))
  IF 0 = 1 AND t >= .09 AND REL <= Ccr THEN
    Fai = (1 - .5 * (REL / Ccr) ^ 2) * Fy / (5 / 3 + (3 / 8) * (REL / Ccr) - (1 / 8) *

```

```

(REL / Ccr) ^ 3)
  Fa0 = .6 * Fy
ELSE
  IF REL <= Ccr THEN
    Fa1 = .522 * Q * Fy - (Q * Fy * REL / 1494) ^ 2
  ELSE
    Fa1 = 151900 / REL ^ 2
  END IF
  Fa0 = .522 * Q * Fy
END IF
faactual = P / area
Yc = a / 2
CLS
REL = Kx * Lx * 12 / SQR(Ix / area)
CALL FAC0s(w3, t, Fy, Qs)
Sy = Ix / a
CALL FAC0a(w1, w2, t, P, M, area, Sx, TIP$, bef1, bef2, Qa, Sxc)
CLS
Iyc = .5 * Iy
IF TIP$ = "I" THEN
  k = 2
ELSE
  k = 1
END IF
LIM1 = 104815.1967# / Fy
LIM2 = 524075.9937# / Fy
CONSI = ((Lx * 12#) ^ 2) * Sx / (a * Iyc)
IF TIP$ = "C" OR TIP$ = "I" THEN
  IF CONSI > LIM1 AND CONSI < LIM2 THEN
    Fb1 = .6667 * Fy - ((Fy ^ 2) * CONSI / 1572220#)
  ELSE
    Fb1 = 174692 / CONSI
  END IF
ELSE
  IF CONSI > LIM1 / 2 AND CONSI < LIM2 / 2 THEN
    Fb1 = .6667 * Fy - (Fy ^ 2) * CONSI / 786114#
  ELSE
    Fb1 = 87346# / CONSI
  END IF
END IF
Fbactual = M * 12 / Sx
IF RIG$ = "S" THEN
  Fb2 = .6 * Fy
  Fb3 = .6 * (1.21 - .00034 * (w1 / t) * SQR(Fy)) * Fy
  Ccr = SQR((59000 * PI ^ 2) / (Qa * Fy))
  IF REL > Ccr THEN
    Fb4 = 151900 / REL ^ 2
  ELSE
    IF Qa = 1 AND t > .09 THEN
      Fb4 = (1 - .5 * (REL / Ccr) ^ 2) * Fy / (5 / 3 + (3 / 8) * (REL / Ccr) - (1 / 8) *
(REL / Ccr) ^ 3)
    ELSE

```

```

      Fb4 = .522 * Qa * Fy - (Qa * Fy * REL / 1494) ^ 2
    END IF
  END IF
ELSE
  Fb2 = .6 * Fy
  Fb3 = .6 * (1.26 - .00051 * (w1 / t) * SQR(Fy)) * Fy
  Fb4 = Fy
END IF
IF Fb1 > Fb3 AND Fb2 > Fb3 AND Fb4 > Fb3 THEN
  Fbadm = Fb3
  IF Fb1 > Fb4 AND Fb2 > Fb4 THEN
    Fbadm1 = Fb4
  ELSE
    IF Fb1 > Fb2 THEN
      Fbadm1 = Fb2
    ELSE
      Fbadm1 = Fb1
    END IF
  END IF
ELSE
  IF Fb1 > Fb4 AND Fb2 > Fb4 THEN
    Fbadm = Fb4
    Fbadm1 = Fb4
  ELSE
    IF Fb1 > Fb2 THEN
      Fbadm = Fb2
      Fbadm1 = Fb2
    ELSE
      Fbadm = Fb1
      Fbadm1 = Fb1
    END IF
  END IF
END IF
END IF
IF Cm = 0 THEN
  Cm = 1 - psi * faactual / Fex
ELSE
  Cm = Cm
END IF
END IF
ECUAC1 = faactual / Fa1 + (Cm * Fbactual) / ((1 - faactual / Fex) * Fbadm)
ECUAC2 = faactual / Fa0 + Fbactual / Fbadm1
ECUAC3 = faactual / Fa1 + Fbactual / Fbadm
IF faactual / Fa1 > .15 THEN
  ECUAC3 = 0
  SOB1 = (1 - ECUAC1) * 100
  SOB2 = (1 - ECUAC2) * 100
  IF SOB1 > SOB2 THEN
    SOB = SOB1
  ELSE
    SOB = SOB2
  END IF
ELSE
  SOB = SOB2
END IF
ELSE

```

```

    ECUAC1 = 0
    ECUAC2 = 0
    SOB = (1 - ECUAC3) * 100
END IF
IF ECUAC1 > 1.07 OR ECUAC2 > 1.07 OR ECUAC3 > 1.07 THEN
    LOCATE 10, 2: PRINT " El perfil escogido no soporta las cargas aplicadas, escoger uno
más robusto "
    CALL ESPACIO
ELSE
    LOCATE 10, 2: PRINT " El perfil escogido soporta las cargas aplicadas"
    LOCATE 12, 2: PRINT " Está sobredimensionado en un "; SOB; " % "
    CALL ESPACIO
END IF
LOOP UNTIL ECUAC1 <= 1.07 AND ECUAC2 <= 1.07 AND ECUAC3 <= 1.07
CLS
LOCATE 10, 2: PRINT " El esfuerzo actual de compresión es "; faactual
LOCATE 12, 2: PRINT " Los esfuerzos admisibles de compresión son Fal= "; Fal; " y Fb1= ";
Fa0
LOCATE 14, 2: PRINT " El esfuerzo actual de flexión es "; Fbactual
LOCATE 16, 2: PRINT " Los esfuerzos admisibles de flexión son Fb= "; Fbadm; " y Fb1= ";
Fbadm1
DO
    LOCATE 20, 2: INPUT " Desea imprimir los resultados ? (S/N) "; IMP$
LOOP UNTIL IMP$ = "S" OR IMP$ = "N"
IF IMP$ = "S" THEN
    LPRINT " El perfil seleccionado es del tipo "; TIP%; a; "x"; b; "x"; c
    LPRINT " El esfuerzo actual de compresión es "; faactual
    LPRINT " Los esfuerzos admisibles de compresión son Fal= "; Fal; " y Fb1= "; Fa0
    LPRINT " El esfuerzo admisible de flexión es "; Fbactual
    LPRINT " Los esfuerzos admisibles de flexión son Fb= "; Fbadm; " y Fb1= "; Fbadm1
    CLS
ELSE
    CLS
END IF
END SUB

```

SUB CARGAS (CARGA\$, P, Lx, M, M1, M2, Vmax, Cm, psi)

DO

LOCATE 2, 3: PRINT " Escoja una de las siguientes opciones de cargas "
 LOCATE 2, 7: PRINT " a.- En cantilibre y carga puntual en el extremo "
 LOCATE 2, 8: PRINT " b.- Simplemente apoyada y carga puntual en el centro "
 LOCATE 2, 9: PRINT " c.- Simplemente apoyada y carga puntual no en el centro "
 LOCATE 2, 10: PRINT " d.- Apoyada en un extremo, empotrada en el otro y carga aplicada en l "
 LOCATE 2, 11: PRINT " e.- Doblemente empotrada con carga en el centro "
 LOCATE 2, 12: PRINT " f.- Simplemente apoyada con extremos en cantilibre cargada en el centro "

LOCATE 2, 13: PRINT " g.- Cantilibre con carga uniforme "
 LOCATE 2, 14: PRINT " h.- Simplemente apoyada y carga distribuida "
 LOCATE 2, 15: PRINT " i.- Empotrada en un extremo, apoyada en otro y carga uniforme "
 LOCATE 2, 16: PRINT " j.- Doblemente empotrada con carga distribuida "
 LOCATE 2, 17: PRINT " k.- Simplemente apoyada, con momentos de extremo, sin carga transversal "

LOCATE 2, 21: INPUT " Escoja la opción de carga con la letra correspondiente ", CARGA\$
 LOOP UNTIL CARGA\$ = "A" OR CARGA\$ = "B" OR CARGA\$ = "C" OR CARGA\$ = "D" OR CARGA\$ = "E" OR
 CARGA\$ = "F" OR CARGA\$ = "G" OR CARGA\$ = "H" OR CARGA\$ = "I" OR CARGA\$ = "J" OR CARGA\$ = "K"

CLS

IF CARGA\$ = "A" THEN

LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga puntual aplicada ", P
 LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
 $V_{max} = P$
 $M1 = 0$
 $M2 = P * Lx$
 $M = P * Lx$
 $C_m = .6 - .4 * M1 / M2$

ELSE

IF CARGA\$ = "B" THEN

LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga puntual aplicada ", P
 LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
 $V_{max} = P / 2$
 $M1 = 0$
 $M2 = 0$
 $M = P * Lx / 4$
 $psi = .2$

ELSE

IF CARGA\$ = "C" THEN

LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga puntual aplicada ", P
 LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
 LOCATE 14, 2: INPUT " Ingrese la distancia desde el apoyo a la que está aplicada la carga ", la
 $V1 = P * la / Lx$
 $V2 = P * (Lx - la) / Lx$
 IF $V1 > V2$ THEN $V_{max} = V1$ ELSE $V_{max} = V2$
 $M1 = 0$
 $M2 = 0$
 $M_{max} = P * la * (Lx - la) / Lx$
 $C_m = 1$

ELSE

IF CARGA\$ = "D" THEN

LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga puntual aplicada ", P

```

LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
Vmax = 11 * P / 16
M1 = 0
M2 = 3 * P * Lx / 16
Mmax = M2
psi = .3
ELSE
IF CARGA% = "E" THEN
LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga puntual aplicada ", P
LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
Vmax = P / 2
M1 = P * Lx / 8
M2 = M1
Mmax = M1
psi = .2
ELSE
IF CARGA% = "F" THEN
LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga puntual aplicada ", P
LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
LOCATE 14, 2: INPUT " Ingrese el valor del segmento en cantilibre ", lc
Vmax = P
M1 = P * lc
M2 = M1
Mmax = M1
Cb = 1
ELSE
IF CARGA% = "G" THEN
LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga distribuida ", wd
LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
Vmax = wd * Lx
M1 = 0
M2 = wd * Lx ^ 2 / 2
Mmax = M2
psi = .4
ELSE
IF CARGA% = "H" THEN
LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga distribuida ", wd
LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
Vmax = wd * Lx / 2
M1 = 0
M2 = 0
M = wd * Lx ^ 2 / 8
Cb = 1
ELSE
IF CARGA% = "I" THEN
LOCATE 10, 2: INPUT " Ingrese el valor de la carga distribuida ", wd
LOCATE 12, 2: INPUT " Ingrese el valor de la longitud no arriostrada ", Lx
Vmax = 5 * wd * Lx / 8
M1 = wd * Lx ^ 2 / 8
M2 = 0
M = 9 * wd * Lx ^ 2 / 128
psi = .4

```


5.3 Análisis comparativo entre las especificaciones del AISI y el AISC.

Para realizar una comparación de las normas recomendadas por ambos Manuales, bastaría recopilar aquellas efectuadas cuando se analizaron de manera individual los casos de flexión y compresión. Ello permite obtener una clara idea de cómo varían dichas recomendaciones de uno a otro Manual.

Sin embargo de lo anterior, el caso de flexocompresión merece ser analizado en sólo las tres relaciones que se deben satisfacer para este estado de esfuerzos.

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_m f_{bx}}{(1 - f_a/F'_{ax}) F_{bx}} + \frac{C_m f_{by}}{(1 - f_a/F'_{ay}) F_{by}} \leq 1.0$$

La ecuación anterior es válida para ambos Manuales, con la única diferencia de que para los cálculos se debe emplear $E=29000\text{ksi}$ según el AISC y $E=29500\text{ksi}$ en el caso del AISI. Esto otorga una ligera ventaja a favor de las recomendaciones del AISI que permiten obtener vigas con una mayor relación de esbeltez crítica.

Es en la segunda fórmula en la que existe una verdadera diferencia entre los valores sugeridos por el AISI y el AISC.

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad \text{Según normas AISI}$$

$$\frac{f_a}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad \text{Según Norma AISC}$$

Aquí existe una variación entre los esfuerzos admisibles de compresión. Mientras el Manual del AISC establece que el denominador debe ser $0.60F_y$, el Manual del AISI recomienda que dicho valor no es único ya que puede tomar determinado valor según los siguientes casos:

a) Para perfiles en los cuales Q sea diferente de 1 y el espesor sea menor que 0.09 in;

$$0.522QF_y$$

es decir, que para las normas del Manual AISI los esfuerzos permisibles no solo dependen de las propiedades mecánicas del material, sino que también son función de las propiedades geométricas del perfil estructural seleccionado.

b) Cuando $Q=1$ y además $t > 0.09$ in.

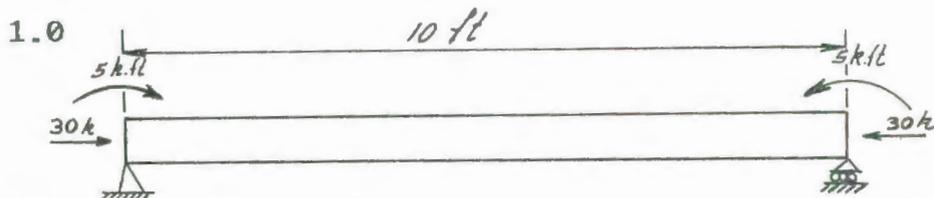
$$0.60F_y$$

Finalmente, en esta última ecuación no existe mayor diferencia para los valores, salvo de los propios que ocurren cuando se estudian aisladamente los casos. Es importante anotar también que ambos Manuales conservan unánimemente el mismo rango de validez para dichas expresiones.

$$\frac{f_a}{F_{ax}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

5.4 Ejercicios de aplicación

Diseñar un elemento estructural para soportar una carga axial de 30 kips y momentos de extremos de 5 k.ft. Utilice un acero con $F_y = 40$. Utilice una longitud no arriostrada de 10 ft. y considere $K_x = K_y = 1.0$



Normas AISI

1.- Consideremos $f_a = 0.5F_a$ y $F_a = 0.6F_y$

$$f_a = 0.5 * 0.6(40) ==> f_a = 12 \text{ ksi}$$

$$f_b = 0.5 F_b \quad F_b = 0.6 F_y$$

$$f_b = 0.5 * 0.6(40) ==> f_b = 12 \text{ ksi}$$

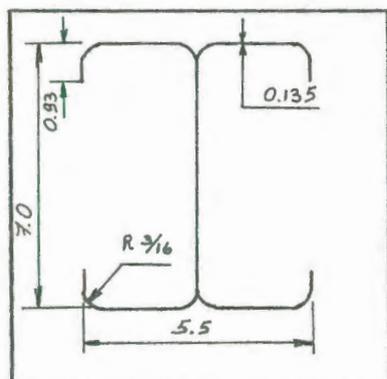
2.- Calculamos el área y módulo de sección requerida

$$A = P/F_a \quad A = 30/12 \quad A = 2.5 \text{ in}^2$$

$$S = M/F_b \quad S = 5 * 12/12 \quad S = 5 \text{ in}^3$$

Primera aproximación

3.- Escojo el perfil adecuado



$$A = 2.82 \text{ in}^2$$

$$r_x = 2.84 \text{ in} \quad r_y = 1.33 \text{ in}$$

$$I_x = 21.1 \text{ in}^4 \quad I_y = 4.96 \text{ in}^4$$

$$S_x = 6.03 \text{ in}^3 \quad S_y = 2.13 \text{ in}^3$$

$$f_a = 30/2.82 \quad f_a = 10.638 \text{ ksi}$$

$$f_b = 5 * 12/6.03 \quad f_b = 9.950 \text{ ksi}$$

4.- Efecto columna

- Necesidad de reducir esfuerzos

* Borde no rigidizado

$$\frac{w}{t} = \frac{0.88 - (0.105 + \frac{3}{16})}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 5.595$$

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{63.3}{\sqrt{40}} \quad \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = 10.01$$

$$5.595 < 10.01 \rightarrow Q_s = 1$$

* Elementos rigidizados

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{171}{\sqrt{f}} \quad f = \frac{30}{2.82} \quad f = 10.64 \text{ ksi} \rightarrow \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = 52.43$$

* Alas

$$\frac{w}{t} = \frac{0.5 * 5.5 - 2(0.105 + \frac{3}{16})}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 20.62$$

$$20.62 < 52.43 \rightarrow b = w$$

* Alma

$$\frac{w}{t} = \frac{7.0 - 2(0.105 + \frac{3}{16})}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 61.10$$

$$61.10 \not< 52.43 \rightarrow b < w$$

$$\frac{b}{t} = \frac{253}{\sqrt{10.64}} \left[1 - \frac{55.3}{61.10\sqrt{10.64}} \right] \quad \frac{b}{t} = 56.04 \quad b = 5.88\epsilon$$

$$b = 56.04 * 0.105 \quad b = 5.88$$

$$A_{efec} = 2.82 - 2 * (6.42 - 5.88) * 0.105$$

$$A_{efec} = 2.71 \quad f = 11.08 \text{ ksi}$$

Por un proceso iterativo llego a:

$$Q_a = 2.69 / 2.82 \quad Q_a = 0.954$$

$$Q = 1 * 0.954 ==> Q_a = 0.954$$

* Relación de esbeltez crítica:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Q F_y}} \quad C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 29500}{0.954 * 40}}$$

$$C_c = 123.54$$

* Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r_y} = \frac{1 * 10 * 12}{1.33} \quad \frac{KL}{r_y} = 90.23$$

* Esfuerzo admisible en compresión

$$F_{a1} = 0.522 (0.954) (40) - \frac{(0.954 * 40 * 90.23)^2}{(1494)^2}$$

$$F_{a1} = 14.61 \text{ ksi}$$

$$f_a / F_{a1} = 10.64 / 14.61 \quad f_a / F_{a1} = 0.73$$

Como $f_a / F_{a1} > 0.15$ se debe cumplir de manera si-

multánea que:

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_{mc} f_{bx}}{(1 - \frac{f_a}{F'_{ax}}) F_{bx}} \leq 1.0$$

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} \leq 1.0$$

* Efecto de viga

$$\frac{L^2 S_{xc}}{dI_{yc}} = \frac{(10 \cdot 12)^2 \cdot 6.03}{5.5 \cdot 0.5 \cdot 4.96} = 6366.0$$

$$F_{b1} = 20.19 \text{ ksi}$$

$$F_{b2} = 24 \text{ ksi}$$

$$F_{b3} = 0.6(1.21 - 0.00034 * (61.10)^4 / 40) * 40 < 24$$

$$= 25.89 \text{ ksi} \implies F_{b3} = 24 \text{ ksi}$$

* Factor de reducción de área (alas)

$$f_b = M \cdot 12 / S_x \quad f_b = 5 \cdot 12 / 6.03 \quad f_b = 9.95 \text{ ksi}$$

$$\frac{w}{t} = \frac{0.5 \cdot 5.5 - 2(0.105 + \frac{3}{16})}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 20.62$$

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{171}{\sqrt{9.95}} \quad \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = 54.21$$

Se cumple que $20.62 < 54.21$, lo que indica un área 100% efectiva y por lo tanto $Q_a = 1$

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 12}{2.74} \quad \frac{KL}{r} = 43.80 \quad 43.80 < 123.54$$

$$F_{bd} = \frac{[1 - \frac{(43.80)^2}{2 \cdot (123.84)^2}] 40}{\frac{5}{3} + \frac{3 \cdot 43.80}{8 \cdot 123.84} - \frac{(43.80)^3}{8 \cdot (123.84)^3}} \quad F_{bd} = 20.89 \text{ ksi}$$

$$F_{bx} = 20.19 \text{ ksi}$$

$$F_{bx} = 20.18 \text{ ksi}$$

$$C_m = 0.6 - 0.4 (M_1/M_2) \quad C_m = 1.0$$

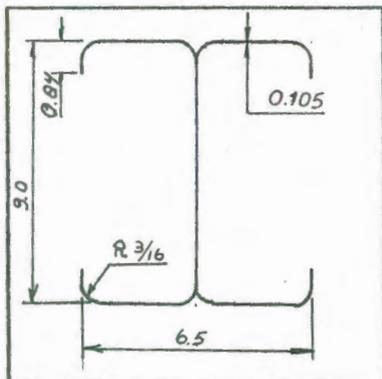
$$F'_{ex} = \frac{12\pi^2 E}{23 (KL_x/r_x)^2} \quad F'_{ex} = 79.20$$

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{(1 - \frac{f_a}{F'_{ex}}) F_{bx}} < 1.0$$

$$\frac{10.64}{14.61} + \frac{1 \cdot 9.95}{(1 - \frac{10.64}{79.20}) 20.19} = 0.73 + 0.57 = 1.30 < 1.0$$

Segunda aproximación

Escojo un perfil más robusto



$$A = 3.43 \text{ in}^2$$

$$r_x = 3.50 \text{ in} \quad r_y = 1.48 \text{ in}$$

$$I_x = 42.2 \text{ in}^4 \quad I_y = 7.51 \text{ in}^4$$

$$S_x = 9.37 \text{ in}^3 \quad S_y = 2.31 \text{ in}^3$$

$$f_a = 8.75 \text{ ksi} \quad f_b = 6.40 \text{ ksi}$$

Efecto columna

Necesidad de reducir esfuerzo

* Borde no rigidizado

$$\frac{w}{t} = \frac{0.84 - (0.105 + 3/16)}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 5.21 \quad \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{63.3}{\sqrt{40}} \quad \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = 10.01$$

Como $5.21 < 10.01 \Rightarrow Q_s = 1.0$

* Elementos rigidizados

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{171}{\sqrt{f}} \quad f = \frac{30}{3.43} \quad f = 8.75 \Rightarrow \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = 57.81$$

* Alas

$$\frac{w}{t} = \frac{\frac{6.5}{2} - 2(0.105 + 3/16)}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 25.38 \rightarrow b = w$$

* Alma

$$\frac{w}{t} = \frac{9 - 2(0.105 + 3/16)}{0.105} \quad \frac{w}{t} = 80.14 \rightarrow b < w$$

$$\frac{b}{t} = \frac{253}{\sqrt{8.75}} \left[1 - \frac{55.5}{80.14\sqrt{8.75}} \right] \quad \frac{b}{t} = 65.51 \quad b = 6.887$$

$$A_{efec} = 3.43 - 2 * (8.415 - 6.887) * 0.105$$

$$A_{efec} = 3.110 \text{ in}^2$$

Después de un proceso iterativo se llega a obtener:

$$A_{efec} = 3.051 \text{ in}^2$$

Y por consiguiente:

$$Q_a = 3.051 / 3.43 \quad Q_a = 0.8895$$

$$Q = Q_a * Q_s \quad Q = 1 * 0.8895 \quad Q = 0.8895$$

Relación de esbeltez crítica

$$\frac{C_c}{\sqrt{D}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Q F_y}} \quad \frac{C_c}{\sqrt{D}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 29500}{0.8895 \cdot 40}} \quad \frac{C_c}{\sqrt{D}} = 127.93$$

Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 12}{1.48} \quad \frac{KL}{r} = 81.098$$

Esfuerzo admisible de compresión

$$F_{a1} = \frac{1 - \frac{(81.098)^2}{2 \cdot (127.93)^2}}{\frac{5}{3} + \frac{3 \cdot 78.96}{8 \cdot 127.93} - \frac{(78.96)^3}{8 \cdot (120.7)^2}} \cdot 40$$

$$F_{a1} = 14.843 \text{ ksi}$$

$$\frac{f_a}{F_{a1}} = \frac{8.746}{14.843} \quad \frac{f_a}{F_{a1}} = 0.589$$

Como $f_a/F_{a1} > 0.15$ se debe cumplir de manera simultánea que:

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{(1 - \frac{f_a}{F_{ax}}) F_{bx}} \leq 1.0$$

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{b1x}} \leq 1.0$$

* Efecto viga

$$\frac{L^2 S_{xc}}{d I_{yo}} = \frac{(10 \cdot 12)^2 \cdot 9.38}{6.5 \cdot 0.5 \cdot 7.51} \quad \frac{L^2 S_{xc}}{d I_{yo}} = 3995.86$$

$$F_{b1} = 22.60 \text{ ksi}$$

$$F_{b2} = 0.6 (40) \quad F_{b2} = 24 \text{ ksi}$$

$$F_{b3} = 0.6 (1.21 - 0.00034(47.07)) (40) = 24.90 \text{ ksi}$$

$$F_{b3} = 24 \text{ ksi}$$

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 12}{3.50} = 34.212$$

$$F_{b4} = \frac{1 - \frac{(34.212)^2}{2 \cdot (127.93)^2}}{\frac{5}{3} + \frac{3 \cdot 34.212}{8 \cdot 127.93} - \frac{(34.212)^3}{8 \cdot (1207.93)^2}} \cdot 40$$

$$F_{b4} = 21.69 \text{ ksi}$$

De todos los valores anteriores escojo el menor:

$$F_b = 21.689 \text{ ksi}$$

$$f_b = 5 \times 12 / 9.37 \quad f_b = 6.403$$

$$F'_{ex} = \frac{12\pi^2 E}{23 (KL/r_x)^2}$$

$$F'_{ex} = \frac{12\pi^2 29500}{23 (10 \cdot 12 / 3.50)^2} \quad F'_{ex} = 129.226 \text{ ksi}$$

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{(1 - \frac{f_a}{F'_{ex}}) F_{bx}} < 1.0$$

$$\frac{8.746}{14.843} + \frac{1 \times 6.403}{(1 - \frac{8.746}{129.223}) 21.689} = 0.589 + 0.317 = 0.906 < 1.$$

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} < 1$$

$$F_{a0} = 0.6 (40) \quad F_{a0} = 24$$

$$\frac{8.746}{18.574} + \frac{6.403}{21.689} = 0.280 + 0.289 = 0.766 < 1.0$$

Como se satisfacen las dos ecuaciones del diseño estructural el perfil seleccionado es válido.

* Normas AISC

A manera de comparación de resultados, escogemos un perfil estructural del Manual del AISC que ofrezca características geométricas (módulo de sección alrededor del eje x, S_x) similar a la que posee el perfil más económico obtenido según normas AISI.

Primera aproximación

S6x12.5.

$$A = 3.67 \text{ in}^2 \quad S_x = 7.37 \text{ in}^3$$

$$r_x = 2.45 \text{ in} \quad r_y = 0.705 \text{ in}$$

$$b_f/2t_f = 4.6 \quad d/t_w = 25.9$$

Efecto columna

- Factores de reducción

* Ala

$$\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_{\text{lim}} = \frac{95}{\sqrt{F_y}} \quad \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_{\text{lim}} = \frac{95}{\sqrt{40}} \quad \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_{\text{lim}} = 15.021$$

Como $4.6 < 15.021$ las alas son completamente efectivas y por lo tanto no es necesario la re-

ducción de esfuerzos ($Q_a = 1.0$)

* Alma

$$\left(\frac{d}{t_w}\right)_{lim} = \frac{253}{\sqrt{F_y}} \quad \left(\frac{d}{t_w}\right)_{lim} = \frac{253}{\sqrt{40}} \quad \left(\frac{d}{t_w}\right)_{lim} = 40.00$$

Como $25.9 < 40.00$ el alma es completamente efectiva y por lo tanto no es necesaria la reducción de área ($Q_a = 1.0$)

* Relación de esbeltez crítica

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 29000}{40}} \quad C_c = 119.63$$

* Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r_y} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 12}{0.705} \quad \frac{KL}{r_y} = 170.213$$

* Esfuerzo admisible de compresión

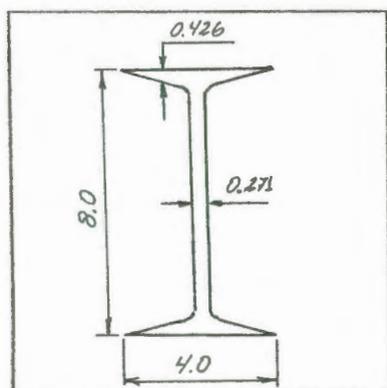
$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23 (KL/r)^2} \quad F_a = \frac{12\pi^2 \cdot 29000}{23 \cdot (170.213)^2} \quad F_a = 5.154 \text{ ksi}$$

* Esfuerzo actual de compresión

$$f_a = \frac{P}{A} \quad f_a = \frac{30}{3.67} \quad f_a = 8.174 \text{ ksi}$$

Como $f_a > F_a$ el perfil no satisface las condiciones de carga establecidas y por ello debo escoger un perfil estructural más robusto

Segunda aproximación



S8x18.4.

$$A = 5.41 \text{ in}^2 \quad S_x = 14.4 \text{ in}^3$$

$$r_x = 3.26 \text{ in} \quad r_y = 0.831 \text{ in}$$

$$b_f/2t_f = 4.7 \quad d/t_w = 29.5$$

Efecto columna

- Factores de reducción

* Ala

$$\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_{\text{lim}} = \frac{95}{\sqrt{F_y}} \quad \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_{\text{lim}} = \frac{95}{\sqrt{40}} \quad \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_{\text{lim}} = 15.021$$

Como $4.7 < 15.021$ las alas son completamente efectivas y por lo tanto no es necesario la reducción de esfuerzos ($Q_e = 1.0$)

* Alma

$$\left(\frac{d}{t_w}\right)_{\text{lim}} = \frac{253}{\sqrt{F_y}} \quad \left(\frac{d}{t_w}\right)_{\text{lim}} = \frac{253}{\sqrt{40}} \quad \left(\frac{d}{t_w}\right)_{\text{lim}} = 40.00$$

Como $29.5 < 40.00$ el alma es completamente efectiva y por lo tanto no es necesaria la reducción de área ($Q_a = 1.0$)

* Relación de esbeltez crítica

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 29000}{40}} \quad C_c = 119.63$$

* Relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r_y} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 12}{0.831} \quad \frac{KL}{r_y} = 144.40$$

* Esfuerzo admisible de compresión

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23 (KL/r)^2} \quad F_a = \frac{12 \cdot \pi^2 \cdot 29000}{23 \cdot (144.40)^2} \quad F_a = 7.161 \text{ ksi}$$

* Esfuerzo actual de compresión

$$f_a = \frac{P}{A} \quad f_a = \frac{30}{5.41} \quad f_a = 5.545 \text{ ksi}$$

$$\frac{f_a}{F_a} = \frac{5.545}{7.161} \quad \frac{f_a}{F_a} = 0.774$$

Como $0.774 > 0.15$, se debe cumplir de manera simultánea que:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ax}}\right) F_{bx}} < 1.0$$

$$\frac{f_a}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} < 1.0$$

* Efecto viga

El diseño se realiza en base a la longitud de arriostamiento. Para este perfil se tiene:

$r_T = 0.94 \text{ in}$ y $d/A_T = 4.70 \text{ in}^{-1}$.

$$\frac{l}{r_T} = \frac{10 \cdot 12}{0.94} \quad \frac{l}{r_T} = 127.66$$

Calculo los valores límites para l/r_T

$$\sqrt{\frac{102 \times 10^3 C_b}{F_y}} = \sqrt{\frac{102 \times 10^3 \cdot 1}{40}} = 50.498$$

$$\sqrt{\frac{510 \times 10^3 C_b}{F_y}} = \sqrt{\frac{510 \times 10^3 \cdot 1}{40}} = 112.92$$

Como $l/r_T > 112.92$, se debe escoger el mayor valor para F_b entre los dos que se calculan a continuación.

$$F_b = \frac{170 \times 10^3 C_b}{(l/r_T)^2} \quad F_b = \frac{170 \times 10^3 \cdot 1}{(10 \cdot 12 / 0.94)^2} \quad F_b = 10.431 \text{ ksi}$$

$$F_b = \frac{12 \times 10^3 C_b}{ld/\lambda_f} \quad F_b = \frac{12 \times 10^3 \cdot 1}{10 \cdot 12 \cdot 4.70} \quad F_b = 21.277 \text{ ksi}$$

Entre ambos valores escojo $F_b = 21.277 \text{ ksi}$.

$$F'_{ex} = \frac{12\pi^2 E}{23 (K_x L_x / r_x)^2} \quad F'_{ex} = \frac{12\pi^2 \cdot 29000}{23 (1 \cdot 10 \cdot 12 / 3.26)^2} \quad F'_{ex} = 110.211 \text{ ksi}$$

Verifico nitidez de expresiones

$$\frac{5.545}{7.161} + \frac{1 \cdot 4.167}{(1 - \frac{5.545}{110.211}) 21.177} < 1.0$$

$$0.774 + 0.206 < 1.0$$

$$0.980 < 1.0 \implies \text{perfil válido}$$

$$\frac{5.545}{0.4(40)} + \frac{4.167}{21.277} < 1.0$$

$$0.347 + 0.196 < 1.0$$

$$0.543 < 1.0 \implies \text{perfil válido}$$

ANALISIS COMPARATIVO

AISI	AISC
$A = 3.43 \text{ in}^2$	$A = 5.41 \text{ in}^2$
$r_{\min} = 1.48 \text{ in}$	$r_{\min} = 0.831 \text{ in}$
$I_x = 42.2 \text{ in}^4$	$I_x = 57.6 \text{ in}^4$
$S_x = 9.37 \text{ in}^3$	$S_x = 14.4 \text{ in}^3$
$f_a = 8.75 \text{ ksi}$	$f_a = 5.545 \text{ ksi}$
$F_a = 14.84 \text{ ksi}$	$F_a = 7.161 \text{ ksi}$
$f_b = 6.40 \text{ ksi}$	$f_b = 4.17 \text{ ksi}$
$F_b = 21.69 \text{ ksi}$	$F_b = 21.28 \text{ ksi}$
$F'_{ex} = 129.23 \text{ ksi}$	$F'_{ex} = 110.21 \text{ ksi}$

$$\frac{f_a}{F_{a1}} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_{ax}}\right) F_{bx}} = 0.906$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_{ax}}\right) F_{bx}} = 0.980$$

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{b1x}} = 0.766$$

$$\frac{f_a}{0.6 F_y} + \frac{f_{bx}}{F'_{bx}} = 0.543$$

En este caso se observa una vez más que el factor crítico de diseño es el que se refiere a las cargas de compresión a las que está sometido el perfil estructural. La ventaja surge nuevamente para el perfil seleccionado según normas del AISI debido a que este, a pesar de que posee un área menor, es capaz de resistir una sobrecarga del 9.4%, mientras que el per-

fil obtenido según normas del AISC, con un área mayor, apenas podrá resistir una sobrecarga en el orden del 2%. La facilidad de obtener elementos estructurales tipo "I" con alas rigidizadas provee elementos con mayor inercia y por lo tanto mas resistentes a las cargas de compresión. A diferencia de ello, un perfil AISC puede tener un área mayor que la de un perfil AISI, pero por la poca inercia que tiene, lo convierte en poco eficiente.

CONCLUSIONES

Al realizar un estudio de las diferentes condiciones de carga a las que puede estar sometido un elemento estructural construido a partir de un perfil de acero doblado en frío, es fácil observar, que dichos elementos poseen una mayor resistencia que aquellos que han sido obtenidos por procesos de doblado. Sin embargo, poseen como principales limitaciones las siguientes:

a) La poca ductilidad que los caracteriza los hace poco resistentes a cargas fluctuantes (fatiga).

b) El poco espesor que poseen las láminas metálicas a partir de las cuales son obtenidos, impide fabricar perfiles más robustos (mayores dimensiones), lo que limita las cargas que pueden soportar, que son pequeñas en comparación con las que puede llegar a soportar un perfil rolado.

c) El poco espesor que poseen aumenta la posibilidad de que existan cargas excéntricas, lo que conlleva la presencia simultánea de cargas de torsión.

d) La presencia de esfuerzos residuales puede acelerar el proceso de corrosión del material, aumentando la necesidad de protección contra las inclemencias del tiempo.

La utilización de perfiles doblados en la construcción de estructuras metálicas presenta ciertas ventajas:

a) La infraestructura necesaria para la construcción de un perfil doblado es menor que la necesaria para la obtención de un perfil rolado. En el primero básicamente se deben utilizar máquinas dobladoras, que permitan dar la forma deseada a la lámina de acero. En el segundo, la adecuación de un espacio físico (horno) donde se produzca el calentamiento de la barra de acero base a partir de la cual se obtiene el perfil rolado; la necesidad de rodillos y la adecuación del espacio físico necesario para el enfriamiento implican una mayor inversión inicial.

b) La utilización de perfiles estructurales más livianos implica un ahorro inminente. Menor cantidad de trabajo tanto para su traslado, como para su proceso de montaje.

RECOMENDACIONES

Una vez concluidas las investigaciones referentes al presente trabajo de graduación, resulta necesario realizar las siguientes recomendaciones:

- a) La utilización de uno u otro tipo de especificaciones para el diseño estructural es una función única y exclusiva del proceso de manufactura del perfil con el cual se va a trabajar. Si bien es cierto que para la obtención de las expresiones que permiten calcular los valores de esfuerzos admisibles parten de un mismo principio físico, las diferencias geométricas y la distribución inicial de esfuerzos provocan muchas diferencias en las expresiones obtenidas al final del análisis.

- b) En muchas ocasiones se ha convertido en práctica común el diseñar estructuras con perfiles formados en frío, siguiendo las recomendaciones que ofrece el Manual de Construcciones en Acero del AISC (válidas solamente para perfiles rola-

dos), brindándoles cierto sobredimensionamiento. Como se ha podido observar en los problemas de aplicación desarrollados, en algunas ocasiones el perfil estructural diseñado a partir de las Normas del AISI ofrecía ventajas con respecto a los diseñados a partir de las Normas del AISC, lo que demuestra que en muchas ocasiones el sobredimensionamiento otorgado resulta innecesario. Dicho sobredimensionamiento provoca una gran desventaja ya que afecta los proyectos debido al aumento de costos de materiales.

- c) Al trabajar con perfiles estructurales doblados en frío, se deberá observar que en definitiva ellos poseen una resistencia muy baja; sin embargo, su capacidad de soportar esfuerzos mejora notablemente debido a dos factores: la mejor distribución de su área transversal y la facilidad de construir elementos rigidizados que posibilitan una mayor efectividad en el área del perfil estructural.
- d) Debido a la alta frecuencia con que se comercian los perfiles estructurales doblados en frío en nuestro país, resultaría muy importante

difundir las normas de diseño del AISI. De esta manera se trabaja de una forma normalizada y se estima con una mayor precisión la cantidad de material que se va a emplear en determinado requerimiento.

APENDICE

Manual del Usuario

El programa de computación que ha sido desarrollado para facilitar los procesos de diseño estructural ha sido elaborado en lenguaje QBASIC. Dicho lenguaje tiene a su favor las siguientes ventajas:

- a) Por su extremada sencillez es de fácil comprensión para cualquier persona que tenga elementales conocimientos de informática.
- b) Trabaja con versiones de sistema operativo DOS superiores a la versión 5.0
- c) Para su ejecución sólo es necesario poseer un computador con capacidad de 64 KB de memoria RAM y para su archivo basta un espacio libre en disco de 194309 bytes; es decir, basta con un disco flexible de doble lado, doble densidad.

En lo que se refiere al programa de computación en sí, la estructura funcional del mismo ha sido realizada a base de un conjunto de subrutinas las mismas que de acuerdo a la finalidad que cumplen en el proceso de diseño, pueden

ser clasificadas de la siguiente manera:

- a) Cuatro subrutinas principales (tensión, compresión, flexión y flexo-compresión)
- b) Siete subrutinas auxiliares: ESBELTEZ (Relación de Esbeltez), DIMENSIONES (Ingreso de dimensiones del perfil estructural), FACQa (Factor de reducción de área), FACQs (Factor de reducción de esfuerzos), SECCIONESI (Dimensiones efectivas de los perfiles estructurales I), SECCIONANGULO (Dimensiones efectivas de los perfiles estructurales de tipo ángulo) y SECCIONCANAL (Dimensiones efectivas de los perfiles estructurales tipo canal).
- c) Dos subrutinas de presentación ESPACIO (permite mantener una información en la pantalla hasta que se se presione la barra espaciadora) y VENTANA (configuración inicial para la presentación del programa).

Para la ejecución del programa es necesario poseer dos archivos: El QBASIC.EXE que es el que se encarga de iniciar el computador para que este pueda ejecutar los programas de QBASIC y el denominado AISI.BAS, que es el archivo donde se encuentra almacenado el programa de diseño.

Si se desea ejecutar el programa AISI.BAS, basta con ubi-

car la unidad de disco donde se encuentre alojado el programa QBASIC.EXE y una vez que esta sea ubicada, digitar el comando QBASIC. Una vez que se ha efectuado esta operación, será necesario presionar de manera simultánea, dependiendo del idioma que se esté empleando; español (inglés) ALT A -Archivo- (ALT F -File-) y a continuación ALT A -Abrir- (ALT O -Open-). Una vez hecha esta operación, se selecciona la unidad de disco o directorio donde se encuentra alojado el programa AISI y se lo selecciona con el tabulador. Presionando la tecla ENTER o INTRODUCIR, el programa es cargado en la memoria del computador y por lo tanto puede ser ejecutado. Posterior a estas operaciones se presiona la tecla F5, que es con la cual se inicia la ejecución del programa de diseño.

Al iniciarse la ejecución del programa de diseño aparece una primera pantalla en la cual aparece información referente a la autoría del programa y pide que se presione la barra espaciadora. Posterior a dicha pantalla aparece una segunda pantalla que permite escoger el estado de cargas con el cual se va a diseñar el perfil estructural. Una vez que se escoge la opción deseada (tensión, flexión, compresión o flexo-compresión), una serie de sucesivas pantallas permite mantener un diálogo entre el computador y el usuario, referente a la geometría del problema, las condiciones de carga y las magnitudes de las mismas. EL

programa se encarga de verificar si el perfil estructural seleccionado cumple o no con las normas de diseño. En caso de que no cumpla, indica las máximas cargas que el perfil puede soportar y pide que se ingresen nuevos datos. En caso de que el perfil haya satisfecho las condiciones de diseño, el programa reporta el estado actual de cargas, las máximas cargas que puede soportar y las recomendaciones de diseño que cumple, así como también permitirá opcionalmente visualizar los valores auxiliares de cálculo (factores de reducción, relaciones de esbeltez, etc), para finalmente ofrecer una opción de impresión, con la cual todos los resultados pueden quedar escritos y debidamente archivados.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- American Institute of Steel Construction, **MANUAL DE CONSTRUCCIONES EN ACERO**, AISC, New York, 1980.
- 2.- American Iron and Steel Institute, **COLD-FORMED STEEL DESIGN MANUAL**, AISI, New York, 1980.
- 3.- Cooper and Chen; **"DESIGNING STEEL STRUCTURES.- Methods and cases"**. Editorial Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1985.
- 4.- Marks, Lionel S., **MANUAL DEL INGENIERO MECANICO**, McGraw-Hill, México, México 1992.
- 5.- Shigley, Joseph E., **DISEÑO EN INGENIERIA MECANICA**, McGraw-Hill, México, México 1992.
- 6.- Yu, Wei-Wen, **COLD-FORMED STEEL STRUCTURES**, McGraw-Hill, New York, NY 1980.