

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**OPTIMIZACION DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES
DE ACERO POR PROGRAMACION NO LINEAL**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

EDWIN SANCHEZ LLATAS

PROMOCION: 1987-I

LIMA - PERU

1995

INDICE

INTRODUCCION	Pág. 1
CAPITULO 1	
OPTIMIZACION	Pág. 3
1.1. EL PROBLEMA DE OPTIMIZAR.	
1.2. LA OPTIMIZACION ESTRUCTURAL.	
1.3. EL CONCEPTO DEL PESO MINIMO.	
CAPITULO 2	
PROGRAMACION NO LINEAL	Pág. 9
2.1. MINIMIZACION NO RESTRINGIDA.	
2.2. EL METODO DE LAS DIRECCIONES CONJUGADAS.	
2.3. MINIMIZACION RESTRINGIDA.	
2.4. EL METODO DE LA FUNCION DE PENALIDAD.	
EJEMPLO DE APLICACION DEL METODO DE LA FUNCION DE PENALIDAD.	
CAPITULO 3	
RESTRICCIONES O ESPECIFICACIONES	Pág. 22
3.1. ELEMENTOS SUJETOS A COMPRESION.	
3.2. ELEMENTOS SUJETOS A FLEXION.	
3.3. ELEMENTOS SUJETOS A FLEJO-COMPRESION.	
CAPITULO 4	
DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTO	Pág. 36
4.1. CONSIDERACIONES PARA EL METODO DE LAS DIRECCIONES CONJUGADAS. DIAGRAMA DE FLUJO.	
4.2. CONSIDERACIONES PARA EL METODO DE LA FUNCION DE PENALIDAD. DIAGRAMA DE FLUJO.	

4.3. CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACION DE LAS
RESTRICCIONES. DIAGRAMA DE FLUJO.

CAPITULO 5

EJEMPLOS DE APLICACION

Pág. 56

5.0. EJEMPLOS.

5.1. SOLICITACIONES DE COMPRESION.

5.2. SOLICITACIONES DE FLEXION.

5.3. SOLICITACIONES DE FLEJO-COMPRESION.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Pág. 62

APENDICE

Pág. 64

LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO Y DEFINICION DE
VARIABLES USADAS POR EL PROGRAMA.

BIBLIOGRAFIA

Pág. 91

INTRODUCCION

El uso de perfiles tipo I de acero data de hace más de cien años y su versatilidad se aprecia en distintos problemas estructurales. Inicialmente concebidos para resolver problemas de flexión, han demostrado un buen comportamiento en problemas de compresión y flexo-compresión.

Los perfiles laminados tienen un rango de proporciones limitado entre sus alas y almas, por consideraciones propias de su manufactura. Los perfiles formados por planchas soldadas, en cambio, exhiben una diversidad de proporciones en sus dimensiones, por lo que se prestan mejor al estudio de la variación de las mismas, según la metodología empleada.

Para realizar la búsqueda de la sección óptima, se define un espacio de cuatro dimensiones; éstas son: el ancho del ala, el espesor del ala, el peralte del alma y el espesor del alma, con lo cual el problema queda expresado *en términos no lineales de las variables, para ser resuelto* por el método de la función de penalidad que se detallará más adelante, involucrando subrutinas que hacen uso del método de las direcciones conjugadas, que también será explicado posteriormente.

Este procedimiento numérico se traduce en un programa de cómputo, que permite la optimización de un elemento estructural tipo columna, tipo viga o tipo viga-columna, a

partir de las solicitaciones de carga. Las fuerzas internas en el elemento pueden estimarse con un análisis de la estructura basado en proporciones aproximadas entre los elementos que la conformen.

Queda así establecida una herramienta capaz de resolver rápidamente un problema, dadas las cargas, cualquiera que sea su configuración. La extensión lógica del trabajo es la optimización sucesiva de todos los elementos de una estructura para un posterior re-análisis. El óptimo global se conseguiría así mediante iteraciones y ajustes.

CAPITULO 1

OPTIMIZACION

En casi cualquier campo de acción, se busca la minimización de los costos o la maximización de las ganancias. Ello queda englobado dentro del concepto de optimización, según el cual, para un problema dado, siempre existe una solución que es la mejor de todas, empleando determinados criterios para hacer la evaluación.

1.1.- EL PROBLEMA DE OPTIMIZAR.

Dentro de un concepto seleccionado hay muchas posibles soluciones que satisfacen las condiciones del problema y la optimización consiste en encontrar los valores óptimos de las variables que cumplen con las limitaciones impuestas sobre ellas, llamadas restricciones.

Desde un punto de vista matemático estas limitaciones se pueden expresar por el conjunto de desigualdades

$$g_j(\{X\}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (I)$$

donde m es el número de restricciones y $\{X\}$ es el vector de variables. Es frecuente que el problema considere restricciones tipo igualdad de la forma general

$$h_j(\{X\}) = 0 \quad j = 1, \dots, k \quad (II)$$

donde k es el número de igualdades. En muchos casos, las restricciones tipo igualdad se pueden usar para eliminar variables del proceso de optimización, reduciendo su número.

Con el propósito de encontrar la mejor solución, es necesario formar una función de las variables a usarse para comparar las distintas opciones. Esta es la denominada función objetivo (llamada también la función de mérito, de criterio o de costo) y su valor mínimo (o máximo, dependiendo del caso) es el que se persigue con el procedimiento de optimizar. Es una función de las variables, $\{X\}$, y puede representar el peso de una estructura, el costo de la misma, la ganancia en una operación, etc o cualquier criterio por el cual unas soluciones sean preferidas sobre otras.

Se puede suponer que la función objetivo, $Z = F(\{X\})$ siempre debe ser minimizada para concentrar la atención en procedimientos de minimización, lo que no pierde generalidad pues si hubiera que maximizar la función, se puede tener en cuenta que

$$\text{máx } F(\{X\}) = - \text{mín } (-F(\{X\}))$$

Considerando que las ecuaciones (II) pueden ser eliminadas, el problema de optimizar puede ser formulado matemáticamente como aquel de encontrar un vector de variables $\{X\}$ tal que,

$$g_j(\{X\}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m$$

$$Z = F(\{X\}) \rightarrow \text{mín}$$

Esta forma de plantear el problema se denomina **programación matemática**.

1.2.- LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

La optimización estructural es una etapa dentro del proceso de diseño, que requiere previamente la formulación de los requerimientos de funcionalidad y la etapa de diseño conceptual (planeamiento del sistema que servirá los propósitos de función establecidos) y posteriormente el detalle, que involucra verificaciones y modificaciones, de ser necesario.

En un proceso de diseño óptimo, un sistema estructural queda descrito por dos tipos de cantidades, unas fijas durante el diseño automatizado, llamadas parámetros pre-asignados y otras no fijas, llamadas Variables de Diseño.

En este trabajo, se optimiza un elemento de una estructura, cuyos parámetros pre-asignados son las propiedades mecánicas o físicas del acero, que es el material escogido, la topología (forma: patrón de conexión y/o el número de elementos) y la configuración geométrica (coordenadas de nudos). Asimismo, se deben estimar las fuerzas en el elemento en base a un análisis aproximado de la estructura, como el que se obtiene al tantear ciertas proporciones entre las secciones de vigas y columnas.

Las variables de diseño, componentes del vector $\{X\}$, son las dimensiones de la sección transversal: Ancho de ala (b_f), espesor de ala (t_f), peralte de alma (h_w) y espesor de alma (t_w), que son independientes; escogidos sus valores se puede evaluar el comportamiento (esfuerzos,

desplazamientos, etc). El comportamiento de la estructura (o del elemento) puede ser representado por un conjunto de **variables de comportamiento** y éstas generalmente son variables dependientes.

El vector de variables $\{X\}$ se llama en este caso **vector de variables de diseño** y si se considera cada variable de diseño como una dimensión en un espacio tendremos lo que se denomina **espacio de diseño** y un juego particular de variables representa un diseño de la estructura (o del elemento) y puede ser visto como un punto de ese espacio.

Algunos diseños son útiles para el proceso de optimización, pero otros pueden ser inadecuados por su función, su comportamiento u otras consideraciones. Si un diseño cumple todos los requerimientos colocados sobre él, será llamado un **diseño posible** y las restricciones que se deben satisfacer son de dos tipos: unas impuestas directamente en las variables que restringen su rango, que son llamadas **restricciones de diseño** o restricciones laterales y otras que se derivan de los requerimientos de comportamiento, como limitaciones en los máximos esfuerzos, desplazamientos, resistencia al pandeo, etc, que son llamadas **restricciones de comportamiento**.

Ambos tipos de limitaciones pueden expresarse por el conjunto de desigualdades (I) del acápite anterior. Las igualdades (II) del acápite referido representan

generalmente las ecuaciones de equilibrio del sistema o la relación entre las fuerzas internas y los desplazamientos y pueden ser usadas para conocer el comportamiento de la estructura (las variables de comportamiento) para valores dados de las variables de diseño y así poder analizar las limitaciones tipo desigualdad. Esto significa que las variables de comportamiento quedan eliminadas del proceso de optimización al ser posible evaluar sus valores.

1.3.- EL CONCEPTO DEL PESO MÍNIMO.

La selección de una función objetivo adecuada es una de las decisiones más importantes de todo el proceso de optimización. Generalmente representa la propiedad individual más importante de un diseño o la suma ponderada de una serie de propiedades. El peso es una función objetivo comunmente escogida ya que es fácil de evaluar, aunque si bien es de importancia crítica no siempre el mínimo peso es la solución más económica. El costo es una función de importancia más amplia que el peso, pero no es tan fácil de evaluar, pues habría que incluir costo de materiales, costo de fabricación, de transporte, de mantenimiento, de reparación, etc.

Cuando se trata de considerar la función más general (más amplia) posible, como el costo en los términos antes descritos, el resultado puede ser una función "plana", es decir que no sea sensitiva a cambios en las variables y que puedan haber dos o más diseños totalmente distintos que

tengan similares costos y grandes cambios en las variables no mejorarían sustancialmente el diseño. Por lo tanto, es deseable considerar una función objetivo que no sea tan general, pero que sea sensitiva a cambios en las variables y que represente algunos o los más importantes componentes del costo, pero no todos.

En estructuras de acero, el peso es un factor de gran importancia y en algunos países más que en otros es el más influyente en el costo (dependiendo de los costos de la mano de obra, por ejemplo), hecho que en nuestro país se da, por lo que para optimizar una estructura (o un elemento) es razonable minimizar el peso. Este es el concepto del peso mínimo como la mejor solución para una estructura o un elemento, que es el que vamos a aplicar en esta investigación.

Minimizar el peso es equivalente a minimizar el volumen y considerando que la configuración geométrica es fija y las longitudes de los elementos ya están definidas, ello resulta proporcional a minimizar el área de la sección transversal, lo que será usado aquí.

CAPITULO 2

PROGRAMACION NO LINEAL

Un problema general de programación no lineal es encontrar un vector $\{X\}$ de variables de diseño, $\{X\}^t = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, tal que:

$$Z=F(\{X\}) \rightarrow \text{Mín.} \dots \text{(I)}$$

$$g_j(\{X\}) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \quad \dots \text{(II)}$$

Z es la función objetivo, expresada en términos no lineales de las variables; las ecuaciones (II) son restricciones, funciones no lineales de $\{X\}$, que definen el espacio posible.

2.1.- MINIMIZACIÓN NO RESTRINGIDA.

En este caso, $Z = F(\{X\})$ debe minimizarse sin limitaciones en la elección de $\{X\}$ (el caso resuelto en este trabajo puede ser tratado así durante ciertas etapas). Existen los sgtes. métodos:

1. Métodos para minimizar una función a lo largo de una línea, aplicable a problemas en una variable o a problemas de varias variables a lo largo de direcciones vectoriales especificadas.

2. Métodos de búsqueda directa, que resuelven una secuencia de minimizaciones a lo largo de direcciones vectoriales, sin el uso de derivadas (componentes del vector gradiente $\{\nabla F\}$).

3. Métodos de Gradiente, que están basados en el cálculo del vector gradiente $\{\nabla F\}$, no siempre fácil de evaluar.

4. Métodos de Newton, basados en la matriz de segundas derivadas de F , $[J]$, o en su aproximación.

MINIMIZANDO UNA FUNCION A LO LARGO DE UNA LINEA

Se debe hallar un punto $\{X\}_{q+1}$ a partir del punto $\{X\}_q$ y la dirección $\{S\}_q$, que son datos, según:

$\{X\}_{q+1} = \{X\}_q + \alpha \{S\}_q$. El escalar α se escoge para minimizar $F(\{X\}_q + \alpha \{S\}_q)$ con respecto a α . Con frecuencia, se busca sólo un mínimo estimado, como el obtenido ajustando una función cuadrática o cúbica a la información conocida.

Se tiene: $F(\{X\}_{q+1}) = F(\{X\}_q + \alpha \{S\}_q) = F(\alpha)$ y el objeto es hallar el valor de α , α^* , que minimiza $F(\alpha)$.

Se aproxima $F(\alpha)$ en cierta zona por la función cuadrática: $Q(\alpha) = a + b \alpha + c \alpha^2$.

Se hallan 3 valores de $F(\alpha)$: F_1, F_2, F_3 , para 3 valores de α : $\alpha_1=0, \alpha_2= \Delta\alpha$ y $\alpha_3=2 \Delta\alpha$, se encuentran los valores de a, b y c y entonces, $Q(\alpha)$ queda minimizada por el valor α^* :

$$\alpha^* = \frac{4F_2 - 3F_1 - F_3}{4F_2 - 2F_1 - 2F_3} \Delta\alpha$$

$Q(\alpha^*)$ es un mínimo si: $(F_3 + F_1)/2 > F_2$

Es conveniente evaluar α^* solamente en caso que $F_2 < F_1$ y $F_2 < F_3$ pues resulta un valor cercano, intermedio entre 0 y $2(\Delta\alpha)$.

2.2.- EL MÉTODO DE LAS DIRECCIONES CONJUGADAS.

Es uno de los procedimientos dentro de los METODOS DE BUSQUEDA DIRECTA.

Consideremos la función cuadrática:

$Q = \{X\}^t [A] \{X\} + \{X\}^t \{B\} + C$, donde $[A]$ es una matriz simétrica positiva definida, $\{B\}$ es un vector dado y C es un escalar dado.

Los métodos de búsqueda directa se basan en la comparación de valores de la función objetivo sin la necesidad de usar derivadas. El uso de "direcciones conjugadas" o "vectores direccionales conjugados" es especialmente útil.

Un juego de vectores direccionales $\{S_1\}, \{S_2\}, \dots, \{S_n\}$ son conjugados entre sí con respecto a una matriz simétrica positiva definida $[A]_{(n \times n)}$ si: $\{S_i\}^t [A] \{S_j\} = 0$, para todo $i \neq j$.

Tal juego de direcciones posee la propiedad de localizar el mínimo global de una función cuadrática Q en o antes del n -ésimo paso, cuando se efectúa una minimización secuencial, una vez en cada una de estas n direcciones linealmente independientes.

La expansión en series de Taylor de una función general F alrededor de su mínimo $\{X^*\}$ es:

$$F(\{X\}) = F^* + \{\nabla F^*\}^t (\{X\} - \{X^*\}) + \frac{1}{2} (\{X\} - \{X^*\})^t [J^*] (\{X\} - \{X^*\}) + \dots$$

En el mínimo $\{\nabla F^*\} = \{0\}$ y conforme $(\{X\} - \{X^*\})$ se aproxima a cero, los términos de orden más alto de la serie pueden ser despreciados y $F(\{X\})$ se aproxima a una forma cuadrática.

El Método de Powell, usado aquí, consta de los sgtes. pasos:

1. Escoger un punto inicial $\{X\}$ y n direcciones independientes (por ejemplo, las direcciones paralelas a los ejes coordenados: direcciones coordenadas) $\{S\}_q$, $q=1, 2, \dots, n$.
2. Asignar a un vector $\{Y\}$ el punto inicial: $\{Y\} \leftarrow \{X\}$
3. Hallar α^* para minimizar $F(\{X\} + \alpha \{S\}_q)$ y asignar $\{X\} \leftarrow \{X\} + \alpha^* \{S\}_q$, para $q = 1, 2, \dots, n$.
4. Asignar a una nueva dirección $\{S\}_{n+1} \leftarrow \{X\} - \{Y\}$ y hallar α^* para minimizar $F(\{X\} + \alpha \{S\}_{n+1})$, estableciendo $\{X\} \leftarrow \{X\} + \alpha^* \{S\}_{n+1}$
5. Reemplazar $\{S\}_q \leftarrow \{S\}_{q+1}$, para $q = 1, 2, \dots, n$
6. Repetir desde el paso 2.

2.3.- MINIMIZACIÓN RESTRINGIDA.

Este es el caso general, en el que las variables están sujetas a limitaciones, como sucede en la realidad. Para enfrentar este tipo de problema existen los Métodos de la Función de Penalidad, los Métodos de las Direcciones Posibles y los Métodos basados en una secuencia de programaciones lineales, de los cuales describiremos los primeros.

2.4.- EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE PENALIDAD.

En realidad hay un conjunto de métodos de la función de penalidad, de los cuales se escogerá uno en particular.

Consideremos el problema general de programación no lineal: hallar $\{X\}$ tal que

$$Z = F(\{X\}) \rightarrow \text{mín}$$

$$g_j(\{X\}) \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, m$$

En lugar de resolver directamente el problema restringido, una expresión llamada "término de penalidad", que considera la importancia de las restricciones, se añade a la función objetivo original F . Así, puede definirse la "función de penalidad" $\Phi(\{X\}, r)$ como sigue (hay varias maneras de definirla):

$$\Phi(\{X\}, r) = F + r \sum_{j=1}^m \langle g_j \rangle^2, \quad \langle g_j \rangle = \begin{cases} g_j, & \text{si } g_j > 0 \\ 0, & \text{si } g_j < 0 \end{cases}$$

Si la minimización se ejecuta para una secuencia de valores de r , la solución es forzada a converger a aquella del problema restringido. El factor r , que pondera el

término de penalidad con respecto a la función objetivo, se llama parámetro de penalidad.

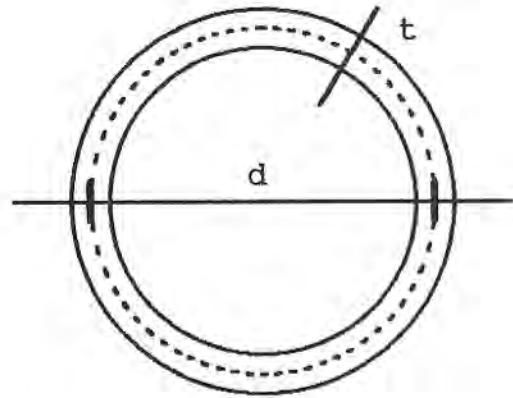
Esto se conoce como "Técnica de minimización no restringida secuencial". El tipo usado aquí es un Método de función de penalidad exterior, en el cual, el punto inicial puede estar en la zona de diseño no posible y se llega a la solución desde afuera.

Se escogen los valores iniciales de $\{X\}$ y r y se calcula $\{X^*\}$ que minimice $F(\{X\}, r)$. Si $\{X^*\}$ está en el espacio posible, el resultado es el óptimo. Si no, r se incrementa $r \leftarrow c r$, ($c > 1$) y el nuevo punto inicial para minimizar $F(\{X\}, r)$ es $\{X^*\}$. Los pasos de incrementar los valores de r y minimizar la función F se repiten hasta que el óptimo esté en la zona de diseño posible.

En este trabajo, adicionalmente, cada restricción es ponderada de acuerdo a su sensibilidad.

EJEMPLO DE APLICACION DEL METODO DE LA FUNCION DE PENALIDAD

Para un tubo circular, bajo compresión axial, se hallará el espesor ($t=X_1$) y el diámetro medio ($d=X_2$) que minimizan el peso y definen el vector $\{X\}$, $\{X\}^t = \{X_1, X_2\}$.



Los datos requeridos son:

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi	$F_y = 36$ ksi
P = Carga axial en kips	$P = 1,000$ kip
K = Factor de longitud efectiva	$K = 1.0$
l = Longitud entre arriostres laterales	$l = 240$ in
d_1, d_u = Valor mín. y máx., diámetro medio	$d_1=5$ in, $d_u=50$ in
t_1, t_u = Valor mín. y máx. del espesor	$t_1=0.25$ in, $t_u=1.5$ in

La función objetivo utilizada es proporcional al área de la sección y viene dada por la expresión:

$$F = \frac{A}{A_r} = \frac{\pi dt}{(P/F_y)} = \frac{\pi X_2 X_1}{(P/F_y)}$$

A = Area de la Sección.

A_r = Area de referencia (constante).

El esfuerzo actuante es $f_a = P / A$, o $f_a = P / (\pi dt)$

El esfuerzo admisible F_a se halla en función de la razón Kl/r , que preferiblemente no deberá exceder a 200 (K =fact. long. efect., l =long. entre soportes later., r =radio de giro). Si el mayor valor Kl/r de cualquier

segmento entre soportes, es menor que C_c , el esfuerzo admisible en la sección gruesa es :

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}}$$

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

Si $Kl/r > C_c$, el esfuerzo admisible en la sección gruesa es:

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

Se calcula el diámetro exterior D : $D = d + t$. Si la razón D/t es menor que $3,300/F_y$, la sección es compacta y el esfuerzo admisible F_a no necesita corregirse.

Si la sección no es compacta y $3,300/F_y < D/t \leq 13,000/F_y$, entonces el esfuerzo permisible es el menor entre el valor anterior y el valor $F_a = 662/(D/t) + 0.40 F_y$

Las restricciones utilizadas son adaptadas para ser adimensionales y vienen dadas por:

$$g_1 = (d_1 - X_2) / (d_1/4) \qquad g_2 = (X_2 - d_u) / (d_u/4)$$

$$g_3 = (t_1 - X_1) / (t_1/4) \qquad g_4 = (X_1 - t_u) / (t_u/4)$$

$$g_5 = (f_a - F_a) / F_a = (P / (\pi X_2 X_1) - F_a(x)) / F_a(x)$$

$$g_6 = (D/t - 13,000/F_y) / (200/F_y) = ((X_2 + X_1) / X_1 - 13,000/F_y) / (200/F_y)$$

$$g_7 = (Kl/r_g - 200) / 10 = (Kl / ((X_1^2 + X_2^2) / 8)^{0.5} - 200) / 10$$

La función de penalidad queda definida por:

$$\Phi(\{X\}, r) = F + r \sum_{j=1}^7 (g_j)^2$$

Se utiliza un valor inicial del parámetro de penalidad r igual a uno y se le amplifica por diez en cada paso. La forma como van progresando los vectores hasta llegar al diseño óptimo, para los dos primeros valores de r , se visualiza en las Figuras 2.1 y 2.2, al final del capítulo. El procedimiento completo tiene en cuenta valores más altos de r , lo que no ha sido graficado, pero sí detallado más adelante.

Cabe resaltar la manera como se obtuvieron las Figuras citadas. Para cada valor de r , se analizó una malla de aproximadamente 4000 puntos, en los que se evaluó la función de penalidad, con más o menos 60 valores del espesor t combinados con unos 60 valores del diámetro medio d . Luego hubo que crear un programa que dibujara una cierta cantidad de curvas de nivel, trabajando de manera interactiva, entre el computador y el usuario. El dominio analizado para cada valor creciente de r , cubría intervalos cada vez menores para t y para d .

En la Fig. 2.1 se ve que el valor óptimo de la función de penalidad es 1.41 para $r=1$, mientras que el valor de la función objetivo es de 1.23, en el punto $\{X\}$, $\{X_1, X_2\}^t = \{0.321, 33.95\}$. Esta diferencia indica una influencia apreciable de las restricciones.

En la Fig. 2.2 se ve que el valor óptimo de la función de penalidad es 1.67 para $r=10$, mientras que el valor de la función objetivo es de 1.62, en el punto $\{X\}$, $\{X_1, X_2\}^t = \{0.372, 38.45\}$. Esto significa que la influencia de las restricciones es menor que en la etapa anterior. Se puede decir que, conforme r aumenta, si bien es importante el valor de la función de penalidad, debe interesarnos más su diferencia con el valor de la función objetivo.

Para $r=100$, el valor óptimo de la función de penalidad es 1.726 y el valor de la función objetivo es 1.719, en el punto $\{X\}$, $\{X\}^t = \{0.3842, 39.555\}$. Ya se comienzan a obtener diseños razonables, pues las restricciones de comportamiento, g_6 y g_7 , que controlan las esbelteces para prevenir el pandeo local y el pandeo global, son negativas, y la diferencia $(f_a - F_a)$, proporcional a g_5 es 0.1775 ksi.

Para $r=10000$, el valor óptimo de la función de penalidad es 1.733045 y el valor de la función objetivo es 1.732983, en el punto $\{X\}$, $\{X\}^t = \{0.3859, 39.707\}$. La expresión $(f_a - F_a)$ proporcional a g_5 vale 0.0016346 ksi, la expresión $(D/t - 13,000/F_y)$ proporcional a g_6 vale -257.2166 y la expresión $(Kl/r_g - 200)$ proporc. a g_7 vale -182.905.

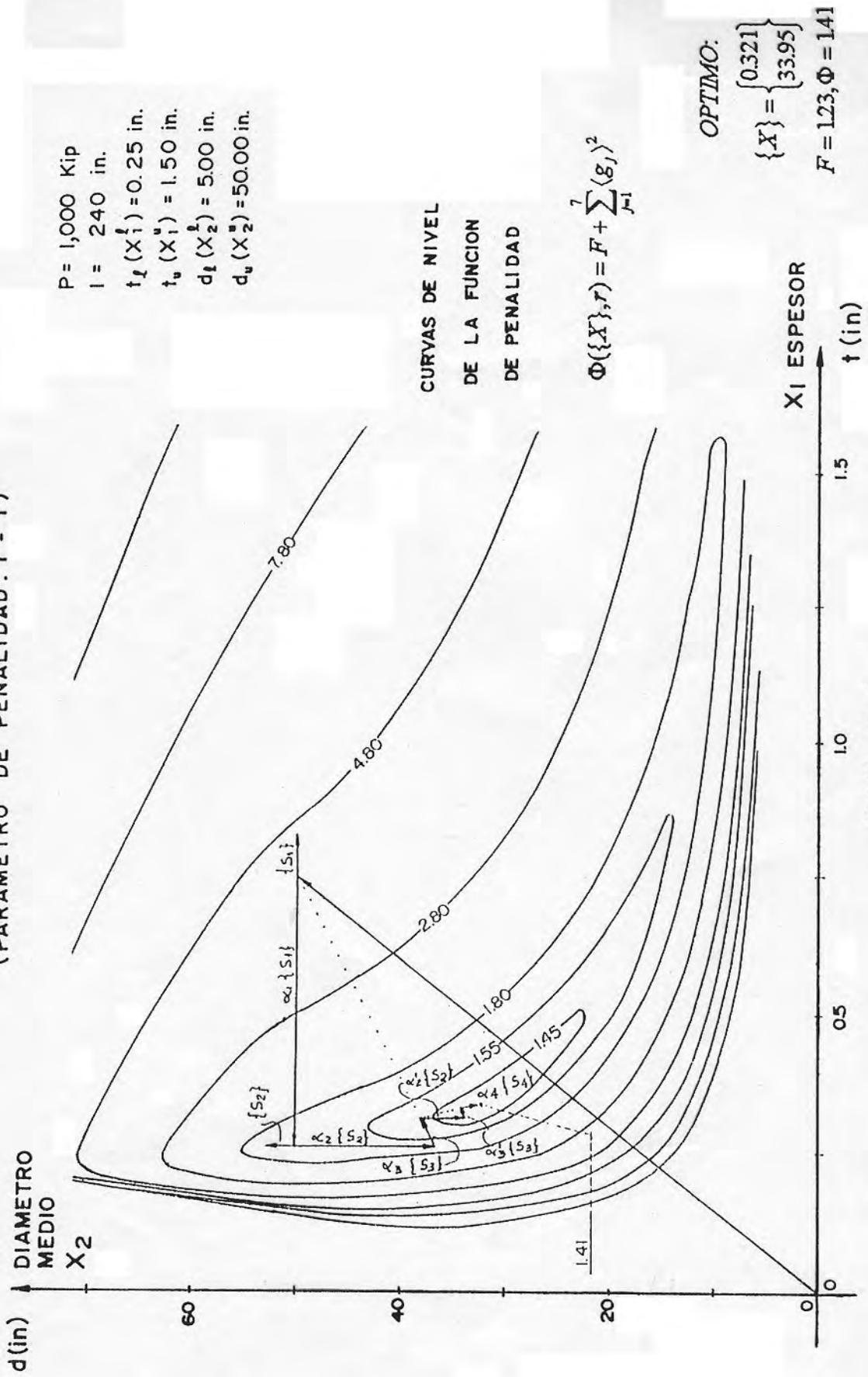
Como se ha visto, la función de penalidad es la suma de dos cantidades, la función objetivo y el término de penalidad (que depende de las restricciones). El problema se considera resuelto con la suficiente aproximación, cuando el término de penalidad es pequeño. Esto se da para

un alto valor de r , al que se llega aumentando paulatinamente su valor y partiendo en cada nueva etapa de la solución de la etapa anterior, para evitar la dispersión que se originaría trabajando bruscamente con altos valores de r , debido a que resultarían involucradas funciones con una alta no linealidad.

Las Figuras permiten visualizar la manera en que el procedimiento conduce al cumplimiento de las restricciones. Para cada valor de r , los puntos evaluados van desde las curvas de nivel que están más afuera (que tienen un nivel más alto) hacia las curvas que están más cerca del punto en el que ocurre el mínimo (que tienen un nivel más bajo), que corresponden, por tanto, a puntos con un término de penalidad de menor valor. Así, en la zona de diseño no posible (donde no se satisface alguna restricción, por ejemplo geométrica) el método asigna un valor alto a la función de penalidad y como lo que se busca es la minimización, la tendencia será a alejarse de esa zona e ingresar al espacio de diseño posible.

Este ejemplo permitió notar que una ponderación más estricta de las restricciones, podía conducir a que se aprecien resultados razonables desde los primeros valores de r , lo que se ha aplicado a los perfiles I optimizados en este trabajo, conforme se describe más adelante.

DIRECCIONES CONJUGADAS - TUBO SUJETO A COMPRESION PURA
(PARAMETRO DE PENALIDAD: $r = 1$)



$P = 1,000$ Kip
 $l = 240$ in.
 $t_f (X_1^f) = 0.25$ in.
 $t_u (X_1^u) = 1.50$ in.
 $d_f (X_2^f) = 5.00$ in.
 $d_u (X_2^u) = 50.00$ in.

CURVAS DE NIVEL
DE LA FUNCION
DE PENALIDAD

$$\Phi(\{X\}, r) = F + \sum_{j=1}^7 \langle g_j \rangle^2$$

OPTIMO:

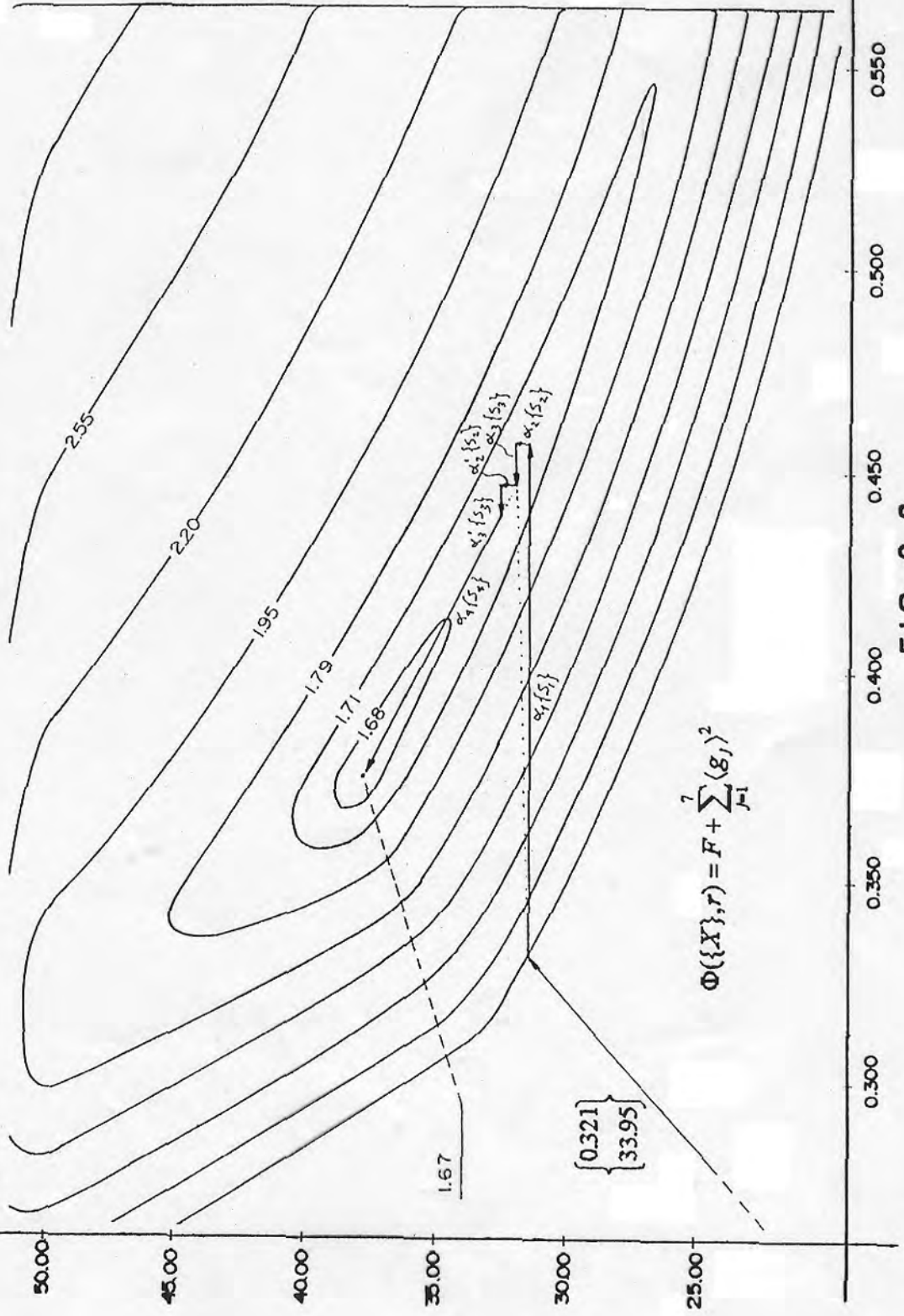
$$\{X\} = \begin{Bmatrix} 0.321 \\ 33.95 \end{Bmatrix}$$

$$F = 123, \Phi = 141$$

FIG. 2.1

DIRECCIONES CONJUGADAS - TUBO SUJETO A COMPRESION PURA
(PARAMETRO DE PENALIDAD: $r = 10$)

d (in.)
DIAMETRO MEDIO
 X_2



$P = 1,000$ Kip
 $l = 240$ in.
 $t_1 (X_1^l) = 0.25$ in.
 $t_u (X_1^u) = 1.50$ in.
 $d_1 (X_2^l) = 5.00$ in.
 $d_u (X_2^u) = 50.00$ in.

CURVAS DE NIVEL
 DE LA FUNCION
 DE PENALIDAD

OPTIMO:

$$\{X^*\} = \begin{Bmatrix} 0.372 \\ 33.95 \end{Bmatrix}$$

$$F = 162, \Phi = 167$$

$$\Phi(\{X\}, r) = F + \sum_{j=1}^7 (g_j)^2$$

X_1 ESPESOR

t (in.)

FIG. 2.2

CAPITULO 3

RESTRICCIONES O ESPECIFICACIONES

Las restricciones que deben cumplir las variables de diseño vienen dadas en este trabajo por las especificaciones del Manual de Diseño por esfuerzos permisibles para construcción en acero del Instituto Americano de Construcción en Acero (Reglamento AISC - 89, ASD) y por las dimensiones máximas y mínimas que deben cumplir las variables para cada caso particular.

Las secciones son compactas, no compactas y esbeltas, con referencia al pandeo local por esfuerzos de compresión. Una sección es compacta cuando las alas están continuamente conectadas al alma y las razones ancho-espesor (esbelteces) de los elementos en compresión no exceden los límites aplicables de la Tabla 3.1 (Reglamento AISC-89, ASD). Si una sección no califica como compacta, se dice no compacta, si las razones ancho-espesor de los elementos en compresión no exceden los valores límites para no compactos, según la Tabla 3.1. Si alguna esbeltez de un elemento en compresión de la sección excede el valor no compacto aplicable, se dice que es una sección con elementos esbeltos. En alas de perfiles I (elementos no rigidizados o soportados a lo largo de un borde paralelo a la dirección de la fuerza de compresión), b es la mitad del ancho nominal total y para las almas (elementos rigidizados o soportados a lo largo de dos bordes paralelos a la dirección de la fuerza de

compresión), h es la distancia libre entre alas y d es el peralte nominal total.

Las restricciones laterales o de diseño tienen expresiones sencillas, como se verá a continuación.

Los datos requeridos son los valores geométricos (en in):

Máx. y mín. de b_f : b_f^u y b_f^l Máx. y mín. de h_w : h_w^u y h_w^l

Máx. y mín. de t_f : t_f^u y t_f^l Máx. y mín. de t_w : t_w^u y t_w^l

Así, las restricciones de diseño vendrán dadas por:

$$b_f < b_f^u \rightarrow b_f - b_f^u < 0 \rightarrow g_1 = X_1 - b_f^u$$

$$b_f^l < b_f \rightarrow b_f^l - b_f < 0 \rightarrow g_2 = b_f^l - X_1$$

$$t_f < t_f^u \rightarrow t_f - t_f^u < 0 \rightarrow g_3 = X_2 - t_f^u$$

$$t_f^l < t_f \rightarrow t_f^l - t_f < 0 \rightarrow g_4 = t_f^l - X_2$$

$$h_w < h_w^u \rightarrow h_w - h_w^u < 0 \rightarrow g_5 = X_3 - h_w^u$$

$$h_w^l < h_w \rightarrow h_w^l - h_w < 0 \rightarrow g_6 = h_w^l - X_3$$

$$t_w < t_w^u \rightarrow t_w - t_w^u < 0 \rightarrow g_7 = X_4 - t_w^u$$

$$t_w^l < t_w \rightarrow t_w^l - t_w < 0 \rightarrow g_8 = t_w^l - X_4$$

Las restricciones de comportamiento se enunciarán en los acápites siguientes, después de presentar la Tabla 3.1.

TABLA 3.1.

RAZONES ANCHO-ESPESOR LIMITES PARA ELEMENTOS EN COMPRESION

Descripción del elemento	Razón Ancho-Espesor	Razones Ancho-Espesor Límites	
		Compacto	No Compacto ^c
Alas de vigas I soldadas en flexión.	b/t	$65/\sqrt{F_y}$	$95/\sqrt{F_y/k_c}$
Alas en compresión de vigas esbeltas.	b/t	-	$95/\sqrt{F_y/k_c}$
Todos los otros elem. rigidizados uniformemente comprimidos	h/t _w	-	$253/\sqrt{F_y}$
Almas en compresión flexionante. ^a	d/t	$640/\sqrt{F_y}$	-
	h/t _w	-	$760/\sqrt{F_b}$
Almas en compresión flexionante y axial combinadas.	d/t _w	Para $f_a/F_y \leq 0.16$ $\frac{640}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 3.74 \frac{f_a}{F_y}\right)$	-
		Para $f_a/F_y > 0.16$ $257/\sqrt{F_y}$	
	h/t _w	-	$760/\sqrt{F_b}$

^a Para vigas híbridas, usar la resistencia a la fluencia del ala F_{yf} en lugar de F_y .

^c Para diseñar secciones esbeltas que excedan estos límites ver Apéndice del Reglamento (Reducción de esfuerzos).

^e $k_c = \frac{4.05}{(h/t)^{0.48}}$ si $h/t > 70$, de lo contrario $k_c = 1.0$

3.1.- ELEMENTOS SUJETOS A COMPRESIÓN.

Para secciones no esbeltas, se halla la razón Kl/r (K =fact. long. efect., l =long. entre soportes later., r =radio de giro). Si el mayor valor Kl/r de cualquier segmento entre soportes, es menor que C_c , el esfuerzo admisible en la sección gruesa es :

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}}$$

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

Si $Kl/r > C_c$, el esfuerzo admisible en la sección gruesa es:

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

El factor de reducción Q_a , para alas esbeltas, es:

$$\text{Para } 95.0/\sqrt{F_y/k_c} < b/t < 195/\sqrt{F_y/k_c}$$

$$Q_r = 1.293 - 0.00309(b/t)\sqrt{F_y/k_c}$$

$$\text{Para } b/t > 195/\sqrt{F_y/k_c}$$

$$Q_r = 26,200k_c \left[F_y (b/t)^2 \right]$$

$$k_c = \frac{4.05}{(h/t)^{0.46}} \text{ si } h/t > 70, \text{ de lo contrario } k_c = 10$$

Cuando las alas son esbeltas, se calcula un ancho reducido efectivo b_e , válido para elementos rigidizados

uniformemente comprimidos, pero la razón b_e/t no necesita ser menor que $253/\sqrt{F_y}$.

$$b_e = \frac{253t}{\sqrt{f}} \left[1 - \frac{44.3}{(b/t)\sqrt{f}} \right] \leq b$$

b = Ancho real del elemento rigidizado (in).

b_e = Ancho reducido (in).

t = Espesor del elemento (in).

f = Esfuerzo de compresión computado (axial más flexionante).

El factor de reducción es:

Q_a = Area efect./Area real.

El esfuerzo admisible no debe exceder a

$$F_a = \frac{Q \left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C'_c} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C'_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C'_c^3}}$$

cuando $Kl/r < C'_c$, donde $C'_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{QF_y}}$ y $Q = Q_s Q_a$

En el caso de que Kl/r exceda a C'_c :

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

DATOS Y ENUNCIADO DE LAS RESTRICCIONES.

Los datos correspondientes a las solicitaciones de compresión son:

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi.

P = Carga axial en kips.

K_x, K_y = Factores longitud efectiva, eje X, eje Y.

l_x, l_y = Longitud no arriostrada, eje X, eje Y, en in

Las restricciones respectivas vienen dadas por:

$$f_a < F_a \quad f_a - F_a < 0 \quad g_9 = f_a - F_a$$

$$Kl/r_g < 200 \quad Kl/r_g - 200 < 0 \quad g_{10} = Kl/r_g - 200$$

Expresadas en función de {X}:

$$g_9 = P / (2X_1X_2 + X_3X_4) - F_a(\{X\})$$

$$g_{10} = Kl/r_g - 200 = (Kl/r_g)_{\{X\}} - 200$$

3.2.- ELEMENTOS SUJETOS A FLEXIÓN.

Si para el alma, se cumple que $h/t_w < 760/\sqrt{F_b}$, (F_b = esfuerzo admisible en flexión), se tiene una viga usual. De lo contrario se tiene una viga esbelta y hay necesidad de corregir los esfuerzos permisibles por la esbeltez del alma.

FLEXION ALREDEDOR DEL EJE FUERTE DE PERFILES I

En miembros de sección compacta, flectados alrededor del eje más fuerte, el esfuerzo de flexión admisible es $F_b = 0.66F_y$, siempre que las alas estén continuamente conectadas al alma y la longitud entre arriostres laterales del ala en compresión L_b no exceda a L_c .

$$L_c \text{ es el menor valor entre } \frac{76b_f}{\sqrt{F_y}} \text{ y } \frac{20,000}{(d/A_f)F_y}.$$

Para miembros con unión artificial de alas no compactas y almas compactas o no compactas, el esfuerzo permisible es:

$$F_b = F_y \left[0.79 - 0.002 \frac{b_f}{2t_f} \sqrt{\frac{F_y}{k_c}} \right]$$

En otros casos de sección no compacta, con L_b que no excede $\frac{76b_f}{\sqrt{F_y}}$, el esfuerzo admisible es $F_b = 0.60 F_y$.

Para secciones no esbeltas, con longitudes libres mayores que L_c , el esfuerzo permisible en compresión debida a la flexión es el mayor valor entre las ecuaciones (1) o (2) y la ecuación (3).

$$\text{Cuando } \sqrt{\frac{102 \times 10^3 C_b}{F_y}} \leq \frac{l}{r_T} \leq \sqrt{\frac{510 \times 10^3 C_b}{F_y}} :$$

$$F_b = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y (l/r_T)^2}{1530 \times 10^3 C_b} \right] F_y \leq 0.60 F_y \quad (1)$$

$$\text{Cuando } \frac{l}{r_T} \geq \sqrt{\frac{510 \times 10^3 C_b}{F_y}} :$$

$$F_b = \frac{170 \times 10^3 C_b}{(l/r_T)^2} \leq 0.60 F_y \quad (2)$$

Para cualquier valor de l/r_T :

$$F_b = \frac{12 \times 10^3 C_b}{ld/A_f} \leq 0.60 F_y \quad (3)$$

l = Distancia entre arriostres del ala en compresión.

r_T = Radio de giro de una sección formada por el ala en compresión más 1/3 del área del alma en compresión, alrededor de un eje en el plano del alma.

A_f = Area del ala en compresión.

$C_b = 1.75 + 1.05(M_1/M_2) + 0.3(M_1/M_2)^2 \leq 2.3$, M_1 y M_2 son el menor y mayor momentos en los extremos de la longitud no arriostrada, alrededor del eje más fuerte. M_1/M_2 es positivo cuando hay curvatura invertida o doble (M_1 y M_2 tienen el mismo signo) y es negativo cuando hay curvatura simple (M_1 y M_2 tienen signos opuestos).

Para alas esbeltas, se halla Q_s , ya definido. El esfuerzo permisible es el menor entre $0.60F_y Q_s$ y el valor anterior de F_b para $L_b > L_c$.

El valor límite para la esbeltez del alma es :

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{14,000}{\sqrt{F_y(F_y + 16.5)}}$$

Cuando la relación h/t_w del alma excede de $760/\sqrt{F_b}$, el máximo esfuerzo de flexión en el ala en compresión no debe exceder

$$F'_b \leq F_b R_{PG} R_e \quad , \quad \text{donde}$$

F_b = Esfuerzo de flexión aplicable según lo anterior.

$$R_{PG} = 1 - 0.0005 \frac{A_w}{A_f} \left(\frac{h}{t} - \frac{760}{\sqrt{F_b}} \right) \leq 1.0$$

$R_e = 1.0$ en vigas no híbridas.

A_w = Area del alma en la sección investigada.

A_f = Area del ala en compresión.

FLEXION ALREDEDOR DEL EJE DEBIL DE PERFILES I

Para flexión alrededor del eje menor, en perfiles I con 2 ejes de simetría, si las alas son compactas, el esfuerzo permisible es $F_b = 0.75 F_y$.

Para alas no compactas, se puede usar un esfuerzo permisible $F_b = F_y \left[1.075 - 0.005 \left(\frac{b_f}{2t_f} \right) \sqrt{F_y} \right]$.

Para alas esbeltas, es conservador aplicar el factor Q_s (la compresión no es uniforme) y el esfuerzo admisible sería $0.60 F_y Q_s$.

ESFUERZOS CORTANTES PERMISIBLES

Los esfuerzos de corte permISIBLES se calculan según:

Para $h/t_w \leq 380/\sqrt{F_y}$, sobre un área de corte dt_w , el esfuerzo permisible es: $F_v = 0.40 F_y$

Para $h/t_w > 380/\sqrt{F_y}$, sobre un área de corte ht_w , el esfuerzo permisible es: $F_v = \frac{F_y}{2.89} (C_v) \leq 0.40 F_y$, donde

$$C_v = \frac{45,000 k_v}{F_y (h/t_w)^2} \text{ cuando } C_v \text{ es menor que } 0.8$$

$$C_v = \frac{190}{h/t_w} \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} \text{ cuando } C_v \text{ es mayor que } 0.8$$

k_v es un factor que depende de la distancia entre rigidizadores transversales. En este estudio, $k_v = 5.34$.

DATOS Y ENUNCIADO DE LAS RESTRICCIONES.

Los datos correspondientes a las sollicitaciones de Flexión y corte son:

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi.

M_x = Momento flector eje X en kip.in
 C_b = Factor de Gradiente de Momentos
 L_b = Longitud no arriostrada en in
 M_y = Momento flector eje Y en kip.in
 V_x = Fuerza cortante eje X en kip
 V_y = Fuerza cortante eje Y en kip

Las restricciones respectivas vienen dadas por:

$$\begin{aligned}
 f_{vx} < F_{vx} & \quad f_{vx} - F_{vx} < 0 & \quad g_9 = f_{vx} - F_{vx} \\
 f_{vy} < F_{vy} & \quad f_{vy} - F_{vy} < 0 & \quad g_{10} = f_{vy} - F_{vy} \\
 f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} < 1 & & \quad g_{11} = f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1 \\
 h_w/t_w < 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5} & & \quad g_{12} = \frac{h}{t_w} - \frac{14,000}{\sqrt{F_y(F_y + 16.5)}}
 \end{aligned}$$

Expresadas en función de {X}:

$$g_9 = f_{vx} (X) - F_{vx} (X)$$

$$g_{10} = f_{vy} (X) - F_{vy} (X)$$

$$g_{11} = f_{bx} (X) / F_{bx} (X) + f_{by} (X) / F_{by} (X) - 1$$

$$g_{12} = h_w/t_w - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5} = X_3/X_4 - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}$$

3.3.- ELEMENTOS SUJETOS A FLEJO-COMPRESIÓN.

Se aplican fórmulas empíricas. Los elementos sujetos a flexo-compresión deben satisfacer los siguientes requerimientos :

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_a}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_a}\right) F_{by}} \leq 10 \quad (i)$$

$$\frac{f_a}{0.60 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 10 \quad (ii)$$

Cuando $f_a/F_a \leq 0.15$ la ecuación (iii) es permitida en lugar de las ecuaciones (i) y (ii) :

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 10 \quad (\text{iii})$$

En las tres ecuaciones los sub-índices x e y combinados con los sub-índices b, m y e, indican el eje de flexión alrededor del cual se aplica un esfuerzo particular o propiedad de diseño, y

F_a = Esf. compr. axial admis. si sólo existiera fuerza axial (ksi).

F_b = Esf. compr. por flexión adm. si sólo existiera mto. flector (ksi).

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

= Esfuerzo de Euler dividido por un factor de seguridad
(En la expresión para F'_e , K, l_b y r_b se refieren a un mismo plano de flexión).

f_a = Esfuerzo axial computado (ksi).

f_b = Esfuerzo de compresión por flexión computado en el punto considerado (ksi).

C_m = Coeficiente cuyo valor depende del arriostre lateral de los pórticos, de la restricción a la rotación en los extremos del elemento y de la existencia de carga transversal intermedia y puede ser tomado como:

- a. Para miembros en compresión en pórticos sujetos a traslación de los nudos, $C_m = 0.85$.

b. Para miembros en compresión restringidos rotacionalmente en pórticos arriostrados contra la traslación de las juntas y no sujetos a carga transversal entre sus apoyos en el plano de flexión,

$$C_m = 0.6 - 0.4 (M_1/M_2)$$

donde M_1/M_2 es la razón del menor momento al mayor momento en los extremos de la porción del elemento no arriostrada en el plano de flexión bajo consideración. M_1/M_2 es positivo cuando el miembro está flectado en curvatura invertida o doble y es negativo cuando está flectado en curvatura simple.

c. Para miembros en compresión en pórticos arriostrados contra la traslación de las juntas en el plano de cargas y sujeto a carga transversal entre sus apoyos, el valor de C_m puede ser determinado por un análisis. Sin embargo, en lugar de tal análisis, se permiten los siguientes valores:

i. Para miembros cuyos extremos están restringidos contra la rotación en el plano de flexión, $C_m = 0.85$

ii. Para miembros cuyos extremos no están restringidos contra la rotación en el plano de flexión, $C_m = 1.0$

DATOS Y ENUNCIADO DE LAS RESTRICCIONES.

Los datos correspondientes a las solicitaciones de Flexo-compresión son :

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi.

P = Carga axial en kips.

K_x, K_y = Factores longitud efectiva, eje X, eje Y.

l_x, l_y = Longitud no arriostrada, eje X, eje Y, en in

M_{ix}, M_{jx} = Mtos. extremos izquierdo y derecho, eje X, en kip.in

M_x = Mto. en pto. considerado (v.g. mayor mto. intermedio), eje X, en kip.in

C_b = Factor de gradiente de Momentos

L_b = Longitud no arriostrada de ala en compresión en in

M_{iy}, M_{jy} = Mtos. extremos izquierdo y derecho, eje Y, en kip.in

M_y = Mto. en pto. considerado (simultáneo con M_x), eje Y, en kip.in

C_{mx}, C_{my} = Factores reducción efectos 2do orden, eje X, eje Y

V_x, V_y = Fuerzas cortantes, eje X, eje Y, en kip

Los mtos. analizados en los ejes X e Y deben ser simultáneos.

Las restricciones respectivas vienen dadas por:

$$f_{vx} < F_{vx} \quad f_{vx} - F_{vx} < 0 \quad g_9 = f_{vx} - F_{vx}$$

$$f_{vy} < F_{vy} \quad f_{vy} - F_{vy} < 0 \quad g_{10} = f_{vy} - F_{vy}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_a}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_a}\right) F_{by}} < 1 \quad g_{11} = \frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_a}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_a}\right) F_{by}} - 1$$

$$\frac{f_a}{0.60F_y Q} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1 \quad g_{12} = \frac{f_a}{0.60F_y Q} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} - 1$$

Cuando $f_a/F_a < 0.15$, en lugar de g_{11} y g_{12} se usa g_{13} :

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

$$g_{13} = \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} - 1$$

$$\frac{h}{t_w} < \frac{14,000}{\sqrt{F_y(F_y + 16.5)}}$$

$$g_{14} = \frac{X_3}{X_4} - \frac{14,000}{\sqrt{F_y(F_y + 16.5)}}$$

Como se ve, a similitud de las solicitaciones de otros tipos, no todos los términos que intervienen en las restricciones, pueden expresarse en función de las variables X_1 , X_2 , X_3 y X_4 , pero son funciones implícitas del vector $\{X\}$.

CAPITULO 4

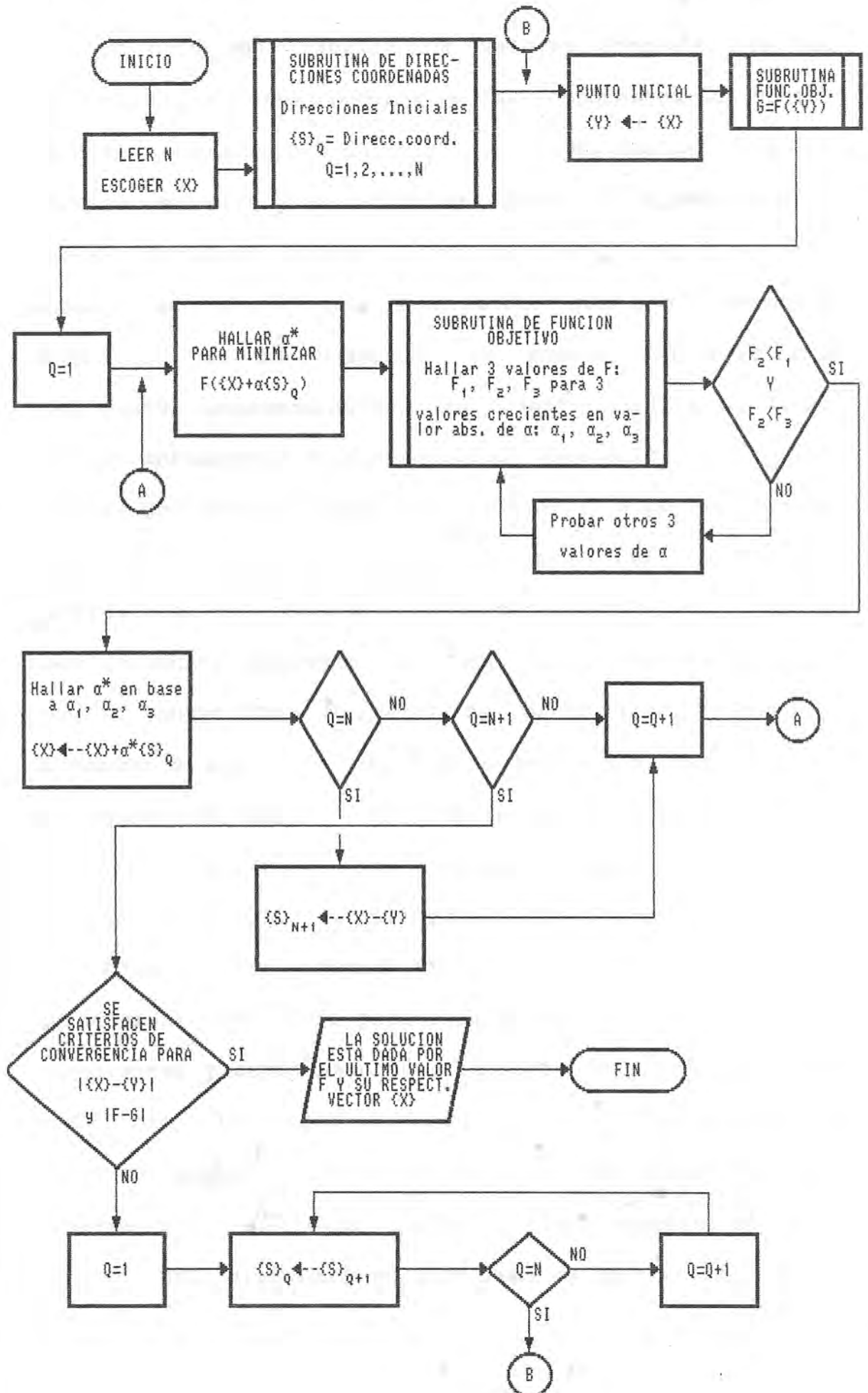
DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTO

En el capítulo anterior se describieron de una manera general los procedimientos disponibles para el problema de programación no lineal resuelto en este trabajo. Al trasladar esos conceptos al desarrollo de un programa (que en este caso se realizó en lenguaje BASIC), hubo que contemplar situaciones específicas, como la de decidir cuál era la variación numérica más adecuada para cada variable de diseño, de manera que se buscara la solución con suficiente acuciosidad, pero sin exagerar, pues éso podía acarrear demasiado tiempo en la evaluación de las funciones no lineales implicadas. Las consideraciones de carácter numérico que se tomaron en cuenta para conseguir una rápida y precisa convergencia del programa, se describen a continuación, divididas en tres grupos.

4.1.- CONSIDERACIONES PARA EL MÉTODO DE LAS DIRECCIONES CONJUGADAS. DIAGRAMA DE FLUJO.

En la Fig. 4.1 se muestra, de una manera muy general, la manera de minimizar una función con el método de las direcciones conjugadas, usando una aproximación cuadrática local para la función objetivo, por lo cual, en cada dirección vectorial, la minimización se basa en tres valores de F.

FIG. 4.1 - SUBROUTINA DE DIRECC. CONJUGADAS



Se notó que trabajar con valores absolutos de las variables, implicaba combinar en las componentes del vector de diseño, dimensiones de valores normales grandes (como el peralte del alma y el ancho del ala) con dimensiones de valores normales pequeños (como el espesor del alma y el espesor del ala). Por ese hecho, que podía provocar dispersión en la búsqueda, se procuró trabajar con componentes adimensionales, que además exhibieran todas valores aproximados en su magnitud. Para ello, bastaba con dividir una dimensión dada entre el valor respectivo mínimo para esa dimensión establecido por las condiciones particulares del problema. Así, por ejemplo, en lugar de usar un vector de diseño $\{X\} = \{b_f \ t_f \ h_w \ t_w\}^t$ se prefirió usar el vector $\{X\} = \{b_f/b_f^1 \ t_f/t_f^1 \ h_w/h_w^1 \ t_w/t_w^1\}^t$, donde:

b_f =Ancho de ala	b_f^1 =Ancho de ala mín. del prob.
t_f =Espesor de ala	t_f^1 =Espesor de ala mín. del prob.
h_w =Peralte de alma	h_w^1 =Peralte de alma mín. del prob.
t_w =Espesor de alma	t_w^1 =Espesor de alma mín. del prob.

Asimismo, se procuró utilizar una función objetivo adimensional que fuera proporcional al área de la sección transversal y cuyos valores estuvieran dentro de un rango predecible. Para ello, dependiendo de la sollicitación, se encontró una expresión para un área de referencia que tuviera un significado similar a una especie de área mínima. Así, dividiendo el área real de la sección A entre

el área de referencia A_r , se tiene un valor adimensional a minimizar.

Las expresiones para A_r dependen de las cargas actuantes y de las propiedades del acero. Así, se tiene :

Para compresión: $A_r = P/F_y$

Para flexión: $A_r = (4/11) (M_x/F_y)^{2/3}$

Para flexo-compresión: $A_r = P/F_y + (4/11) (M_x/F_y)^{2/3}$

Estas expresiones se desarrollaron de manera empírica y lo que se consigue con ellas se ilustrará para el caso de compresión y para el caso de flexión.

En el caso de compresión:

Para $Kl/r=0$, se tiene el máximo esfuerzo admisible:

$$F_a^{\text{máx}} = 0.60F_y.$$

Para $Kl/r=200$, se tiene el mínimo esfuerzo admisible:

$$F_a^{\text{mín}} = 12\pi^2(29000)/(23 \times 200^2) = 0.1037F_y \text{ (si } F_y = 36 \text{ ksi, que es lo usual).}$$

$$0.1037F_y < F_a < 0.60F_y$$

El esfuerzo actuante debe ser $f_a \leq F_a$; en el óptimo, generalmente : $f_a = F_a$

$$0.1037F_y < f_a < 0.60F_y$$

$$0.1037F_y < P/A < 0.60F_y$$

$$1.6667/F_y < A/P < 9.6430/F_y$$

$$1.6667 < A/(P/F_y) < 9.6430$$

$$1.6667 < A/A_r < 9.6430$$

Se aprecia que el uso de un área de referencia adecuada A_r no sólo permite volver adimensional a la

función objetivo sino que limita sus valores a un rango conocido (A/A_x es del orden de las unidades, independientemente de las condiciones particulares de cada problema), lo que es una ayuda notoria para la convergencia del proceso.

En el caso de flexión:

Un rango aceptable para el esfuerzo permisible F_b es :

$$0.10 F_y < F_b < 0.66 F_y$$

El esfuerzo actuante f_b debe ser menor o igual a F_b ; en el óptimo, generalmente: $f_b = F_b$

$$0.10 F_y < f_b < 0.66 F_y$$

$$0.10 F_y < M_x/S_x < 0.66 F_y$$

$$0.10 S_x < M_x/F_y < 0.66 S_x$$

$$(0.10 S_x)^{2/3} < (M_x/F_y)^{2/3} < (0.66 S_x)^{2/3}$$

$$0.21544 S_x^{2/3} < (M_x/F_y)^{2/3} < 0.75805 S_x^{2/3} \quad (i)$$

Se analizó la variación de la razón $S_x^{2/3}/A$ (siendo A el área de la sección) para un amplio rango de valores de b_f , t_f , h_w , t_w . Se usó para ello un programa en BASIC, con b_f y h_w variando de 10 in a 30 in, con incrementos de 1 in y con t_f y t_w variando de 0.1875 in a 0.6875 in, con incrementos de 0.025 in, cubriendo todas las combinaciones (Se consideraron estos valores como usuales). Se encontró que

$$0.7514328 < S_x^{2/3}/A < 2.067277$$

$$0.7514328 A < S_x^{2/3} < 2.067277 A$$

De donde:

$$0.7514328 A < S_x^{2/3}$$

$$0.21544(0.7514328 A) < 0.21544 S_x^{2/3}$$

$$0.16189 A < 0.21544 S_x^{2/3}$$

También:

$$S_x^{2/3} < 2.067277 A$$

$$0.75805 S_x^{2/3} < 0.75805(2.067277 A)$$

$$0.75805 S_x^{2/3} < 1.5671 A$$

Aplicando el principio de transitividad a la expresión (i), se tiene:

$$0.16189 A < (M_x/F_y)^{2/3} < 1.5671 A$$

$$0.16189 < (M_x/F_y)^{2/3}/A < 1.5671$$

$$0.6381 < A/(M_x/F_y)^{2/3} < 6.177$$

$$1.7548 < A/((4/11)(M_x/F_y)^{2/3}) < 16.987$$

$$1.7548 < A/A_r < 16.987$$

De manera que, en este caso, también es posible limitar el valor de la función objetivo a un rango predecible.

Se puede distinguir para el caso de flexo-compresión que el área de referencia es la suma de las expresiones empíricas para los casos de compresión y de flexión.

Otra consideración importante para acelerar el proceso fue el uso de una progresión geométrica de razón 2 para el "salto" o la diferencia entre un cierto diseño y el diseño mejorado a lo largo de una dirección en particular. Esto permite cubrir de manera más rápida un mayor dominio del espacio de diseño que si la variación fuera aritmética,

como se estila convencionalmente. Además, para lograr esto sólo se necesita evaluar la función objetivo en un punto más (para otro vector de diseño), ya que el punto extremo derecho de un cierto paso, sería el nuevo punto medio del siguiente paso; es decir que los valores F_1 , F_2 y F_3 para tres puntos dados en una aproximación cuadrática quedarían como sigue: F_1 y el vector asociado no cambian, el nuevo valor de F_2 es el valor anterior de F_3 (y el vector correspondiente al nuevo F_2 es el vector que da el valor anterior de F_3) y por lo tanto, sólo hay necesidad de evaluar el nuevo valor de F_3 .

Esto se ilustra en la Fig. 4.2

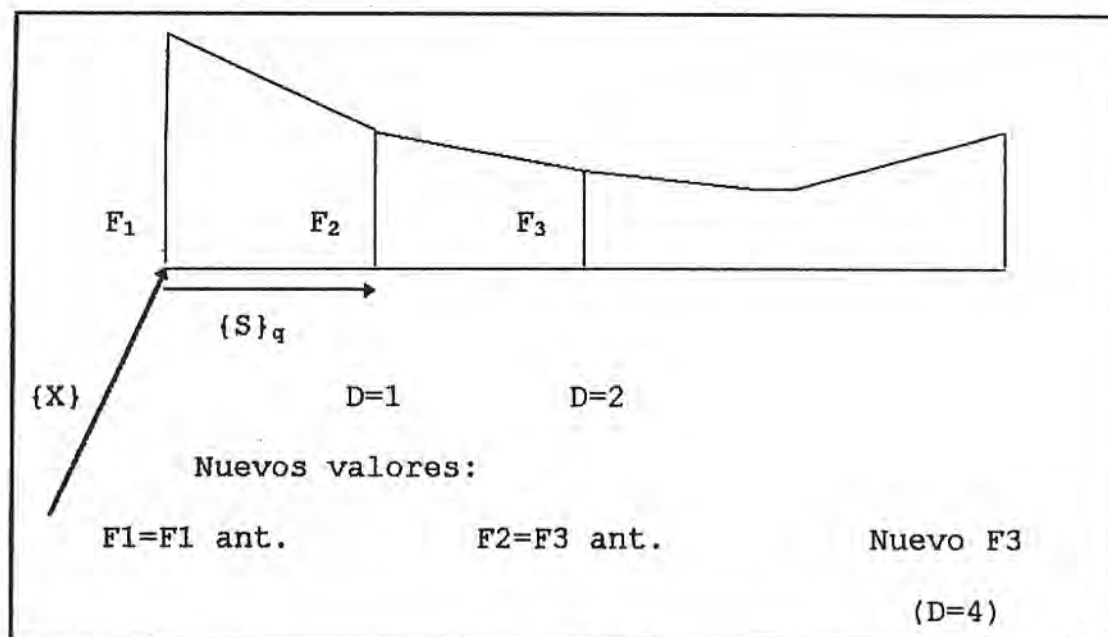


Fig. 4.2

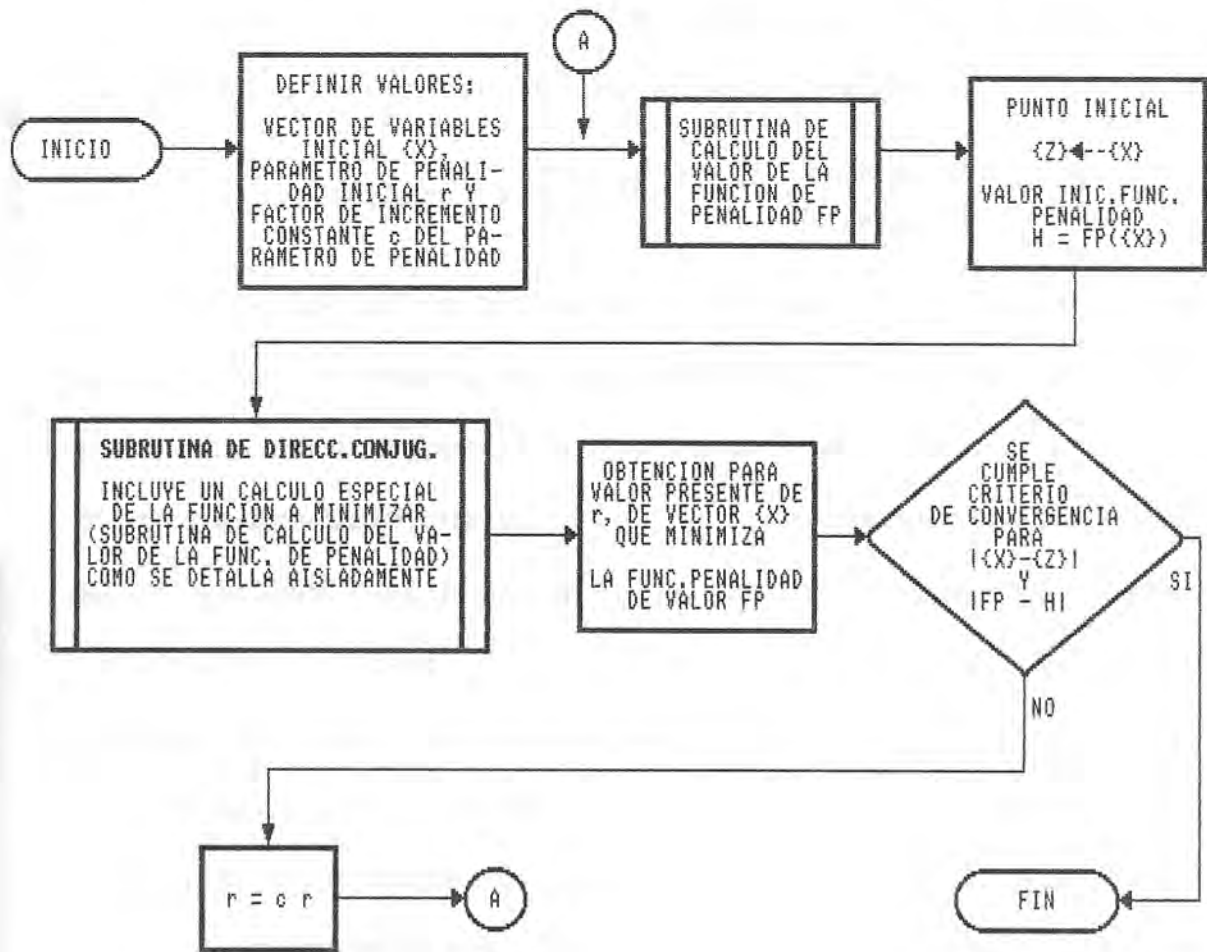
El proceso se continúa hasta que el valor de F_2 sea menor que los valores de F_1 y F_3 , para una aproximación adecuada de la función objetivo por un polinomio de segundo grado. Si en el sentido analizado, progresa la minimización ($F_1 > F_2 > F_3$), se duplica el salto y así sucesivamente.

4.2.- CONSIDERACIONES PARA EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE PENALIDAD. DIAGRAMA DE FLUJO.

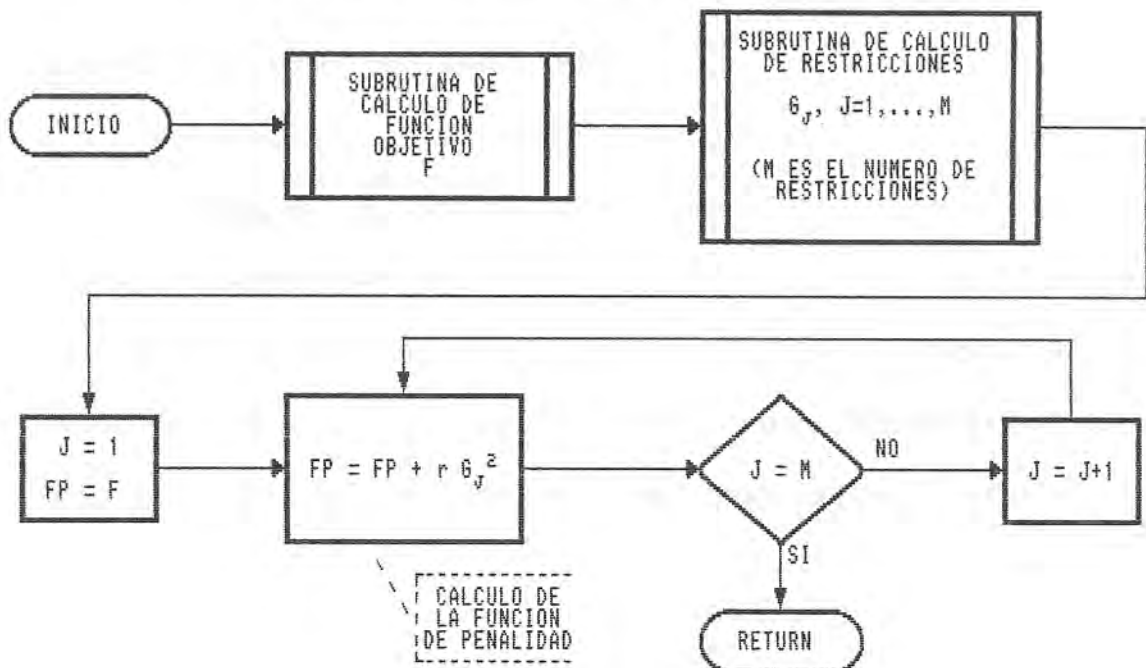
En la Fig. 4.3 se muestra como se aplica el método de la función de penalidad (que en este trabajo, es una función de penalidad exterior), basándose en el método de las direcciones conjugadas.

El propósito es dar una idea del proceso, más que describir las instrucciones del algoritmo, pues en el apéndice respectivo, se lista el programa, pudiéndose apreciar allí los detalles específicos.

FIG. 4. 3-SUBRUT. , METODO DE LA FUNCION DE PENALIDAD



SUBRUTINA DE CALCULO DE CADA VALOR DE LA FUNCION DE PENALIDAD



Recordemos como estaba definida la Función de Penalidad exterior que se usa en este trabajo:

$$\Phi(\{X\}, r) = F + r \sum_{j=1}^m \langle g_j \rangle^2, \quad \langle g_j \rangle = \begin{cases} g_j, & \text{si } g_j > 0 \\ 0, & \text{si } g_j < 0 \end{cases}$$

El parámetro de penalidad r se toma inicialmente igual a uno y se incrementa multiplicándolo por diez en cada paso para forzar a las restricciones a ser cada vez más pequeñas a fin de asegurar que el valor de F se acerque a su mínimo. Estos valores fueron escogidos a criterio y han dado buenos resultados. Además, como algunos de los valores de g_j exhiben un cambio mucho más rápido que otros, hay necesidad de ponderar adecuadamente cada restricción, "escalándola" para que, en caso de no cumplirse, "castigue" lo suficiente a la función objetivo (con valores en su mismo orden de magnitud) y mientras más lejos esté de cumplirse, mayor debe ser su contribución a la función de penalidad, para que sea más fuerte la necesidad de que se cumpla, pues no sólo se busca minimizar el área sino también satisfacer las especificaciones reglamentarias.

Hemos dicho, en el acápite anterior, que el vector $\{X\}$ y la función F se adaptan para que tomen valores adimensionales, de manera que considerando los términos que se suman en la expresión para F , deben adaptarse las restricciones g_j para que también sean adimensionales y debe procurarse que sus valores sean significativos, es

decir ni muy pequeños ni muy grandes comparados con el valor de la función objetivo F.

Las restricciones de diseño son (para cualquier sollicitación):

$$\begin{aligned}
 b_f \leq b_f^u &\rightarrow X_1 \leq b_f^u &\rightarrow g_1 = X_1 - b_f^u \\
 b_f^l \leq b_f &\rightarrow b_f^l \leq X_1 &\rightarrow g_2 = b_f^l - X_1 \\
 t_f \leq t_f^u &\rightarrow X_2 \leq t_f^u &\rightarrow g_3 = X_2 - t_f^u \\
 t_f^l \leq t_f &\rightarrow t_f^l \leq X_2 &\rightarrow g_4 = t_f^l - X_2 \\
 h_w \leq h_w^u &\rightarrow X_3 \leq h_w^u &\rightarrow g_5 = X_3 - h_w^u \\
 h_w^l \leq h_w &\rightarrow h_w^l \leq X_3 &\rightarrow g_6 = h_w^l - X_3 \\
 t_w \leq t_w^u &\rightarrow X_4 \leq t_w^u &\rightarrow g_7 = X_4 - t_w^u \\
 t_w^l \leq t_w &\rightarrow t_w^l \leq X_4 &\rightarrow g_8 = t_w^l - X_4
 \end{aligned}$$

Estas restricciones, dimensionalmente, tienen unidades de longitud (in en este caso) y sus valores numéricos no son del mismo orden de magnitud, puesto que los espesores son bastante menores que los anchos de las planchas que conforman el perfil. Es conveniente, entonces, transformarlas, aprovechando que las variables tienen una interpretación física, para volverlas adimensionales y para que exhiban valores próximos entre sí. Esto se logra dividiendo cada restricción entre un valor que depende de los datos geométricos del problema. Así, se tendrá :

$$\begin{aligned}
 g_1 &= (X_1 - b_f^u) / (b_f^u / 10) & g_5 &= (X_3 - h_w^u) / (h_w^u / 10) \\
 g_2 &= (b_f^l - X_1) / (b_f^l / 10) & g_6 &= (h_w^l - X_3) / (h_w^l / 10) \\
 g_3 &= (X_2 - t_f^u) / (t_f^u / 10) & g_7 &= (X_4 - t_w^u) / (t_w^u / 10) \\
 g_4 &= (t_f^l - X_2) / (t_f^l / 10) & g_8 &= (t_w^l - X_4) / (t_w^l / 10)
 \end{aligned}$$

Si consideramos referencialmente, para una restricción dada, que para conseguir una minimización efectiva el término de penalidad respectivo debe ser menor que un valor fijo, por ejemplo uno, aunque la condición a analizar puede ser un poco más estricta (Recordemos que la función objetivo es del orden de las unidades), tendremos para g_1 , que controla el exceso del ancho de ala en evaluación ($X_1=b_f$) sobre el valor límite b_f^u , para el primer valor del parámetro de penalidad $r=1$, que debe cumplirse

$$rg_1^2 < 1$$

$$(1) \left(\frac{X_1 - b_f^u}{b_f^u / 10} \right)^2 < 1$$

$$X_1 - b_f^u < b_f^u / 10$$

Se estaría forzando a este exceso a ser menor que la décima parte del valor límite.

Para la misma restricción, en una segunda etapa, para el valor de $r=10$, tomando también como referencia a la unidad (como ejemplo, ya que puede usarse un valor menor), se debe cumplir que

$$rg_1^2 < 1$$

$$(10) \left(\frac{X_1 - b_f^u}{b_f^u / 10} \right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{X_1 - b_f^u}{b_f^u / 10} \right) < \sqrt{\frac{1}{10}}$$

$$X_1 - b_f^u < b_f^u / 31.623$$

Se estaría forzando al exceso de X_1 sobre b_f^u a ser menor que aproximadamente la treintava parte del valor límite.

Para un elemento con solicitaciones de compresión pura, las restricciones de comportamiento, convenientemente adaptadas para ser adimensionales, vienen dadas por:

$$g_9 = (f_a - F_a) / (F_a / 10) = (P / (2X_1X_2 + X_3X_4) - F_a_{((X))}) / (F_a_{((X))} / 10)$$

$$g_{10} = (Kl/r_g - 200) / (10/F_y^{0.5}) = ((Kl/r_g)_{((X))} - 200) / (10/F_y^{0.5})$$

Un análisis similar al anterior nos conduce (para el primer valor de $r=1$), para la restricción g_9 , a que

$$\begin{aligned} r g_9^2 &< 1 \\ (1) \left(\frac{f_a - F_a}{F_a / 10} \right)^2 &< 1 \\ f_a - F_a &< F_a / 10 \end{aligned}$$

Se estaría forzando al esfuerzo actuante a no exceder en más de la décima parte al esfuerzo admisible.

Para una segunda etapa, con el valor de $r=10$, se debe cumplir que

$$\begin{aligned} r g_9^2 &< 1 \\ (10) \left(\frac{f_a - F_a}{F_a / 10} \right)^2 &< 1 \\ \left(\frac{f_a - F_a}{F_a / 10} \right) &< \sqrt{1/10} \\ f_a - F_a &< F_a / 31.623 \end{aligned}$$

Se estaría forzando al esfuerzo actuante a no exceder al esfuerzo admisible en más de su treintava parte, aproximadamente.

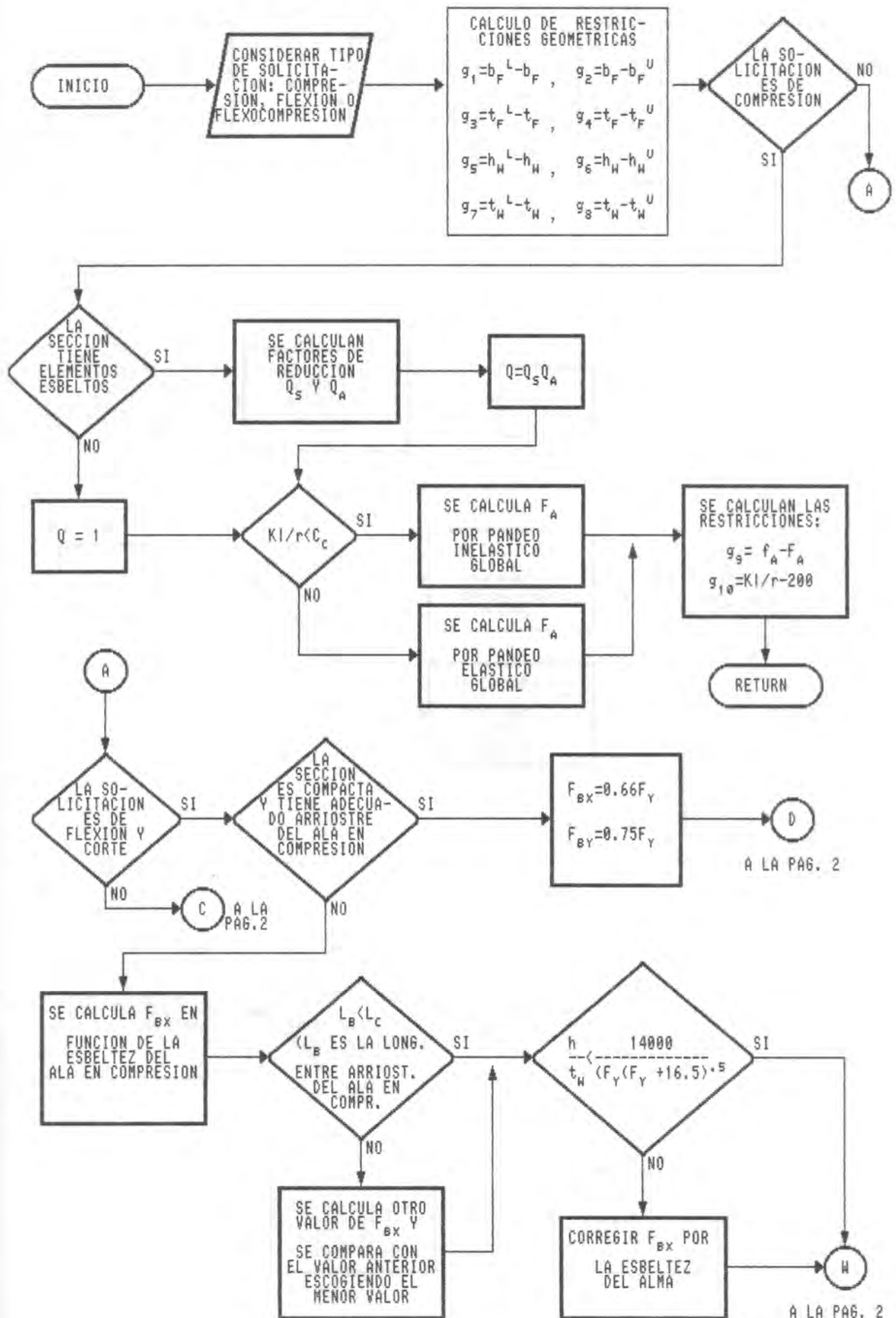
Con lo expuesto se ha pretendido ilustrar la idea del procedimiento ya que, en realidad, desde la primera etapa, el criterio para que se consiga una minimización adecuada, es que los valores de las restricciones sean pequeños, llegando a ser mucho menores que la unidad, la que sin embargo se ha tomado como referencia para poder darle una interpretación al proceso y para hacer notar que las soluciones mejoran conforme se incrementa el valor de r .

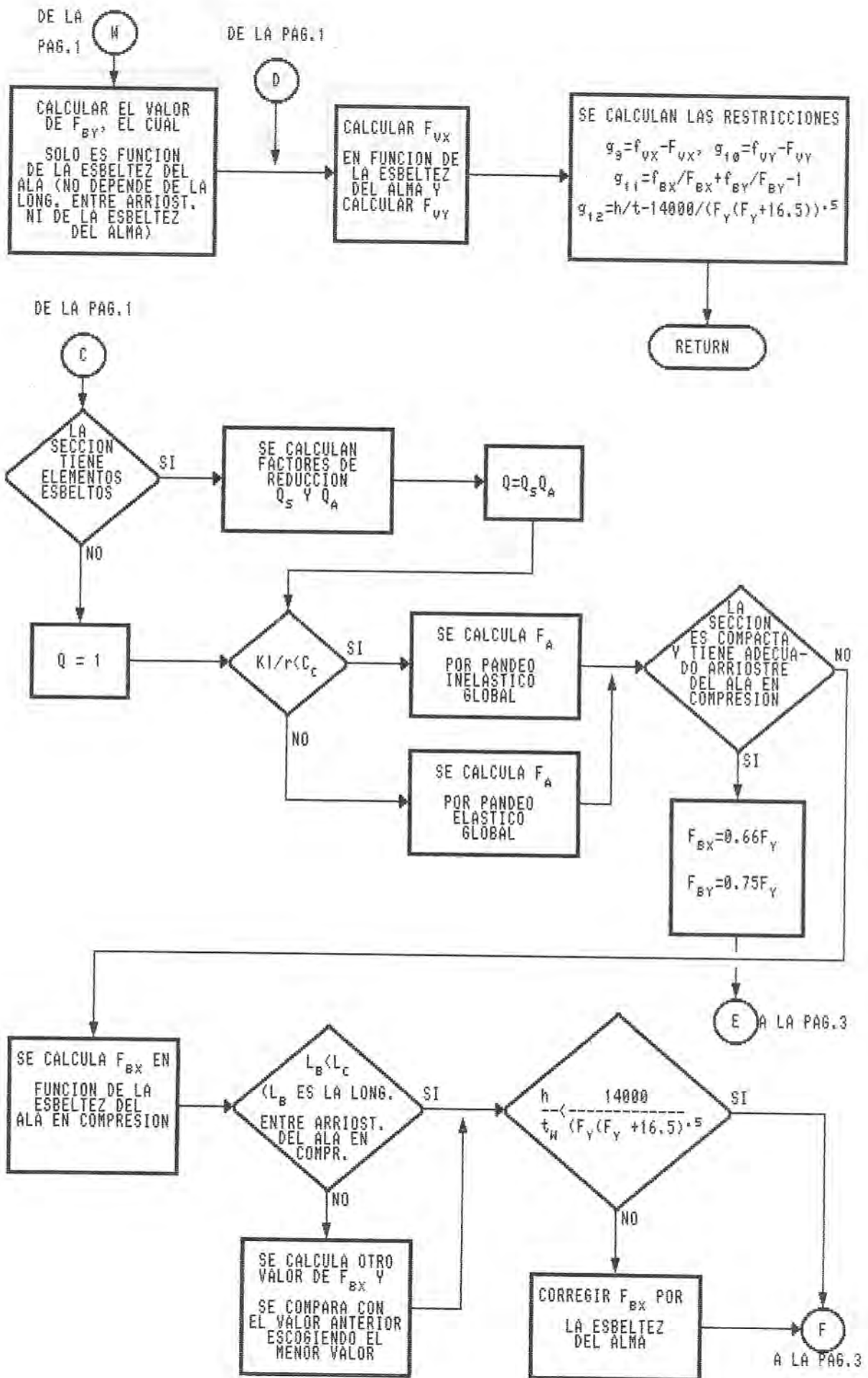
4.3.- CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LAS RESTRICCIONES. DIAGRAMA DE FLUJO.

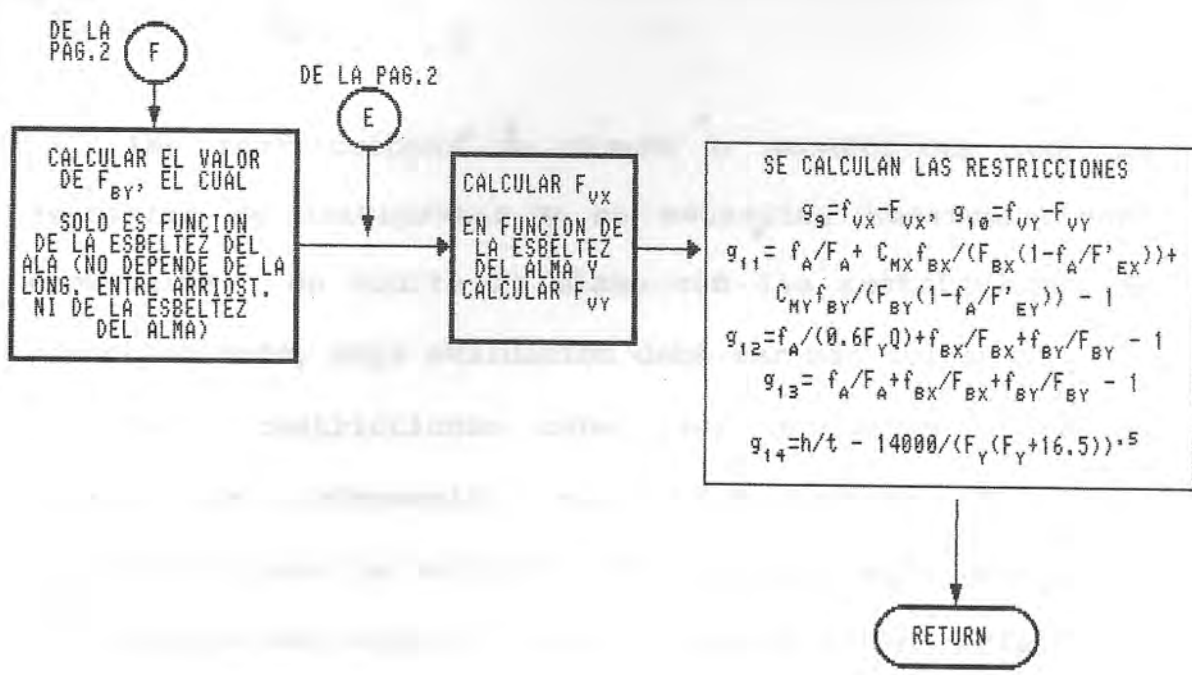
En la Fig. 4.4 se ilustra la manera en que se evalúan las restricciones para cada vector de diseño, empezando por las restricciones geométricas o laterales y prosiguiendo con las restricciones de comportamiento, que dependen del tipo de sollicitación.

No se detallan, en el diagrama de flujo, las adaptaciones a las restricciones (para ponderar sus valores adecuadamente), pues el objeto es ilustrar el proceso, más no entrar en detalles, los que sí son descritos en el texto de este estudio y en el listado del programa.

FIG. 4.4-SUBRUT. DE RESTRICCIONES GEOMETRICAS Y RESTRICCIONES DE COMPORTAMIENTO







DE LA PAG.2

(F)

CALCULAR EL VALOR DE F_{BY} , EL CUAL SOLO ES FUNCION DE LA ESBELTEZ DEL ALA (NO DEPENDE DE LA LONG. ENTRE ARRIOST. NI DE LA ESBELTEZ DEL ALMA)

DE LA PAG.2

(E)

CALCULAR F_{VX} EN FUNCION DE LA ESBELTEZ DEL ALMA Y CALCULAR F_{VY}

SE CALCULAN LAS RESTRICCIONES

$$g_9 = f_{VX} - F_{VX}, \quad g_{10} = f_{VY} - F_{VY}$$

$$g_{11} = f_A/F_A + C_{MX} f_{BX}/(F_{BX}(1-f_A/F'_{EX})) + C_{MY} f_{BY}/(F_{BY}(1-f_A/F'_{EY})) - 1$$

$$g_{12} = f_A/(0.6F_Y Q) + f_{BX}/F_{BX} + f_{BY}/F_{BY} - 1$$

$$g_{13} = f_A/F_A + f_{BX}/F_{BX} + f_{BY}/F_{BY} - 1$$

$$g_{14} = h/t - 14000/(F_Y(F_Y+16.5))^{.5}$$

RETURN

Las restricciones de diseño o geométricas son muy sencillas de interpretar y no necesitan consideraciones especiales. No ocurre lo mismo con las restricciones de comportamiento, cuya evaluación debe ser más cuidadosa.

Estas restricciones deben ser divididas entre un término de referencia, cuya elección es de vital importancia para la solución del problema; esta adaptación les permite ser adimensionales y que su valor refleje, de la mejor manera, su influencia en el término de penalidad respectivo. Se considera que en este trabajo se están dando los términos de referencia más adecuados, resultado de numerosas pruebas, que pueden permitir una convergencia adecuada en cualquier procedimiento de optimización de perfiles de acero, más allá de lo analizado en la presente investigación. Así, las restricciones vienen dadas por las expresiones que siguen.

Para Compresión:

$$g_9 = (f_a - F_a) / (F_a / 10) = (P / (2X_1 X_2 + X_3 X_4) - F_a(x)) / (F_a(x) / 10)$$

$$g_{10} = (Kl / r_g - 200) / (10 / F_y^{0.5}) = ((Kl / r_g)(x) - 200) / (10 / F_y^{0.5})$$

Para Flexión:

$$g_9 = (f_{vx} - F_{vx}) / (F_{vx} / 10) = (f_{vx}(x) - F_{vx}(x)) / (F_{vx}(x) / 10)$$

$$g_{10} = (f_{vy} - F_{vy}) / (F_{vy} / 10) = (f_{vy}(x) - F_{vy}(x)) / (F_{vy}(x) / 10)$$

$$g_{11} = (f_{bx} / F_{bx} + f_{by} / F_{by} - 1) / (1 / 10) = (f_{bx}(x) / F_{bx}(x) + f_{by}(x) / F_{by}(x) - 1) / (1 / 10)$$

$$g_{12} = (h_w / t_w - 14,000 / (F_y (F_y + 16.5))^{0.5}) / (10 / F_y^{0.5}) = (X_3 / X_4 -$$

$$14,000 / (F_y (F_y + 16.5))^{0.5}) / (10 / F_y^{0.5})$$

Para Flexo-Compresión:

$$g_9 = (f_{vx} - F_{vx}) / (F_{vx}/10) = (f_{vx(x)} - F_{vx(x)}) / (F_{vx(x)}/10)$$

$$g_{10} = (f_{vy} - F_{vy}) / (F_{vy}/10) = (f_{vy(x)} - F_{vy(x)}) / (F_{vy(x)}/10)$$

$$g_{11} = (f_a/F_a + C_{mx}f_{bx} / (F_{bx}(1 - f_a/F'_{ex})) + C_{my}f_{by} / (F_{by}(1 - f_a/F'_{ey})) - 1) / (1/10)$$

$$g_{12} = (f_a / (0.60F_y Q) + f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1) / (1/10)$$

$$g_{13} = (f_a/F_a + f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1) / (1/10)$$

$$g_{14} = (h_w/t_w - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}) / (10/F_y^{0.5}) = (X_3/X_4 - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}) / (10/F_y^{0.5})$$

Es importante analizar si es que existe continuidad en los valores de las restricciones, es decir, si no exhiben cambios bruscos para pequeños cambios en los valores de las variables de diseño (en realidad, lo que puede exhibir un cambio brusco es algún término que forma parte de la expresión de la restricción, como por ejemplo, un esfuerzo admisible). Algunas de las restricciones son continuas pero otras no, y en los casos en los que sea posible, se debe tratar de salvar la discontinuidad, adaptando las expresiones para las restricciones (en las inmediaciones del punto en el que ocurre el salto), de manera que no pierdan su espíritu.

Las restricciones para el caso de compresión dependen de la esbeltez del elemento y no exhiben discontinuidades.

De las restricciones para el caso de flexión y corte, las que se refieren al corte son continuas ya que los esfuerzos admisibles por fuerza cortante que intervienen en

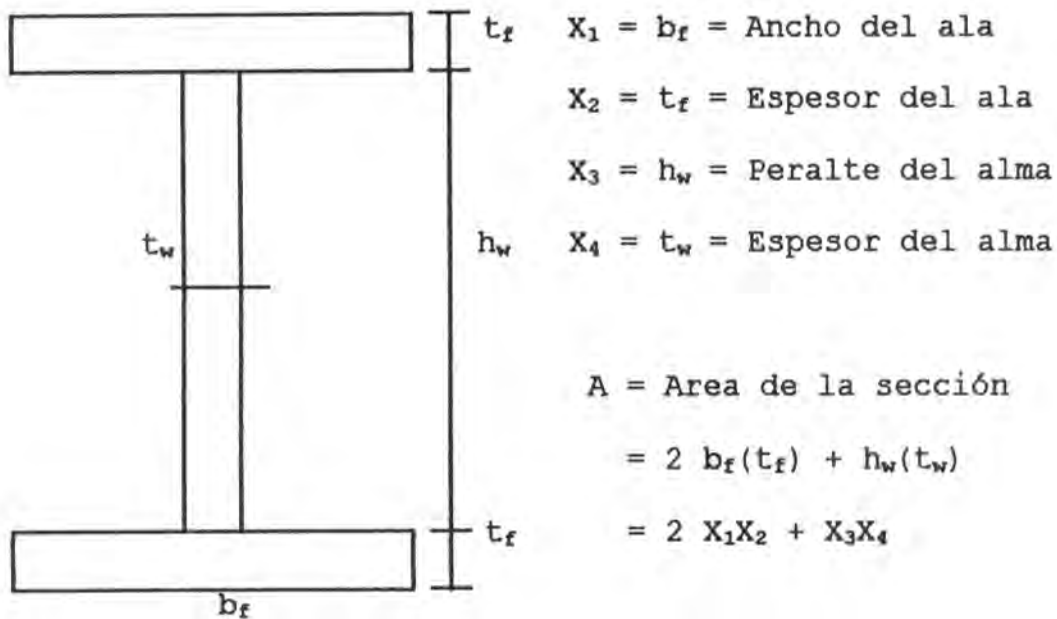
ellas son también continuos. El término F_{by} , esfuerzo admisible alrededor del eje débil del elemento, que forma parte de algunas de las restricciones es también continuo. Por lo tanto, el término cuya continuidad debe tratar de conseguirse es el esfuerzo admisible alrededor del eje fuerte F_{bx} , por ejemplo para el salto entre su valor de $0.66F_y$ para secciones compactas y convenientemente arriostradas y el valor de $0.60F_y$ cuando se incumple alguna de estas condiciones. En los casos donde ha sido posible se han procurado adaptar expresiones que permitan una transición en un intervalo pequeño, de manera que no afecten el dominio analizado, pero que aseguren la continuidad deseable para lograr una mejor convergencia.

Así, por ejemplo, la función $\Delta F_b = 0.06F_y(11-10L_b/L_c)^5$ evaluada para valores de L_b entre L_c y $1.1L_c$ toma valores entre $0.06F_y$ y 0 , por lo que, al ser sumada al esfuerzo F_b , calculado en función de la longitud entre arriostres laterales del ala en compresión, le proporciona continuidad (permite una transición entre el valor $0.66F_y$ y el valor $0.60F_y$), sin distorsionarlo mucho (pues desciende rápidamente) y alterándolo sólo en una zona muy pequeña del dominio en estudio. Con el mismo criterio se prevén transiciones similares para el esfuerzo F_b , calculado en función de otras características del elemento.

CAPITULO 5

EJEMPLOS DE APLICACION

En esta sección se resuelven algunos ejemplos específicos, después de enunciar de la manera más completa, el problema de optimización de esta investigación. Se optimizará un perfil tipo I de planchas soldadas, sometido a compresión, a flexión o a flexo-compresión. Las variables de diseño son:



Los datos geométricos requeridos son los valores (en in):

Máx. y mín. de b_f : b_f^u y b_f^l	Máx. y mín. de h_w : h_w^u y h_w^l
Máx. y mín. de t_f : t_f^u y t_f^l	Máx. y mín. de t_w : t_w^u y t_w^l

Los datos correspondientes a las solicitaciones son:

Para Compresión:

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi.

P = Carga axial en kips.

K_x, K_y = Factores longitud efectiva, eje X, eje Y.

l_x, l_y = Longitud no arriostrada, eje X, eje Y, en in

Para Flexión:

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi.

M_x = Momento flector eje X en kip.in

C_b = Factor de Gradiente de Momentos

L_b = Longitud no arriostrada en in

M_y = Momento flector eje Y en kip.in

V_x = Fuerza cortante eje X en kip

V_y = Fuerza cortante eje Y en kip

Para Flexo-Compresión:

F_y = Esfuerzo de fluencia en ksi.

P = Carga axial en kips.

K_x, K_y = Factores longitud efectiva, eje X, eje Y.

l_x, l_y = Longitud no arriostrada, eje X, eje Y, en in

M_{ix}, M_{jx} = Mtos. extremos izquierdo y derecho, eje X, en kip.in

M_x = Mto. en pto. considerado (v.g. mayor mto. intermedio), eje X, en kip.in

C_b = Factor de gradiente de Momentos

L_b = Longitud no arriostrada de ala en compresión en in

M_{iy}, M_{jy} = Mtos. extremos izquierdo y derecho, eje Y, en kip.in

M_y = Mto. en pto. considerado (simultáneo con M_x), eje Y, en kip.in

C_{mx}, C_{my} = Factores reducción efectos 2do orden, eje X, eje Y

V_x, V_y = Fuerzas cortantes, eje X, eje Y, en kip

Los mtos. analizados en los ejes X e Y deben ser simultáneos.

La función objetivo es: $F = A/A_r$ ($A_r =$ Area de referencia cte.).

La expresión para A_r depende de la sollicitación.

Para Compresión : $A_r = P / F_y$

Para Flexión: $A_r = (4/11) (M_u/F_y)^{2/3}$

Para Flexo-Compresión: $A_r = P/F_y + (4/11) (M_u/F_y)^{2/3}$

Las restricciones laterales son:

$$g_1 = (X_1 - b_f^u) / (b_f^u/10) \qquad g_5 = (X_3 - h_w^u) / (h_w^u/10)$$

$$g_2 = (b_f^l - X_1) / (b_f^l/10) \qquad g_6 = (h_w^l - X_3) / (h_w^l/10)$$

$$g_3 = (X_2 - t_f^u) / (t_f^u/10) \qquad g_7 = (X_4 - t_w^u) / (t_w^u/10)$$

$$g_4 = (t_f^l - X_2) / (t_f^l/10) \qquad g_8 = (t_w^l - X_4) / (t_w^l/10)$$

Las restricciones de comportamiento son:

Para Compresión:

$$g_9 = (f_a - F_a) / (F_a/10) = (P / (2X_1X_2 + X_3X_4) - F_a(x)) / (F_a(x)/10)$$

$$g_{10} = (Kl/r_g - 200) / (10/F_y^{0.5}) = ((Kl/r_g)(x) - 200) / (10/F_y^{0.5})$$

Para Flexión:

$$g_9 = (f_{vx} - F_{vx}) / (F_{vx}/10) = (f_{vx}(x) - F_{vx}(x)) / (F_{vx}(x)/10)$$

$$g_{10} = (f_{vy} - F_{vy}) / (F_{vy}/10) = (f_{vy}(x) - F_{vy}(x)) / (F_{vy}(x)/10)$$

$$g_{11} = (f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1) / (1/10) = (f_{bx}(x)/F_{bx}(x) + f_{by}(x)/F_{by}(x) - 1) / (1/10)$$

$$g_{12} = (h_w/t_w - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}) / (10/F_y^{0.5}) = (X_3/X_4 - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}) / (10/F_y^{0.5})$$

Para Flexo-Compresión:

$$g_9 = (f_{vx} - F_{vx}) / (F_{vx}/10) = (f_{vx}(x) - F_{vx}(x)) / (F_{vx}(x)/10)$$

$$g_{10} = (f_{vy} - F_{vy}) / (F_{vy}/10) = (f_{vy} (x) - F_{vy} (x)) / (F_{vy} (x)/10)$$

$$g_{11} = (f_a/F_a + C_{mx}f_{bx}/(F_{bx}(1-f_a/F'_{ex})) + C_{my}f_{by}/(F_{by}(1-f_a/F'_{ey})) - 1) / (1/10)$$

$$g_{12} = (f_a/(0.60F_yQ) + f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1) / (1/10)$$

$$g_{13} = (f_a/F_a + f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1) / (1/10)$$

$$g_{14} = (h_w/t_w - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}) / (10/F_y^{0.5}) = (X_3/X_4 - 14,000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5}) / (10/F_y^{0.5})$$

Se tienen así una función objetivo equivalente al área de la sección y unas restricciones equivalentes a las limitaciones del AISC, todas adimensionales y ponderadas según su importancia.

5.0.- EJEMPLOS.

A continuación, se presentan algunos ejemplos numéricos, uno para cada tipo de sollicitación.

5.1.- SOLICITACIONES DE COMPRESIÓN.

Sea el ejemplo de compresión con los datos siguientes:

$F_y = 36$ ksi	$P = 1,000$ kip
$L_x = 120$ in	$K_x = 1.0$
$L_y = 100$ in	$K_y = 1.0$
$b_f^l = 5$ in, $b_f^u = 40$ in,	$h_w^l = 5$ in, $h_w^u = 40$ in,
$t_f^l = 0.25$ in, $t_f^u = 1.5$ in	$t_w^l = 0.25$ in, $t_w^u = 1.5$ in

Para el vector tanteado inicialmente $\{X_0\}$, $\{X\}^t = \{10, 1, 10, 1\}$ se obtiene el óptimo $\{X\}$, $\{X\}^t = \{20.7501, 1.059497, 13.19425, 0.3201676\}$, con un área $A = 48.19372$ in².

Las restricciones de comportamiento, sin adaptaciones, en el óptimo, toman los valores:

$$f_a - F_a = 1.335144 \times 10^{-5} \text{ ksi.}$$

$$Kl / r_g - 200 = -182.5222$$

5.2.- SOLICITACIONES DE FLEXIÓN.

Sea el ejemplo de Flexión con los datos siguientes:

$$F_y = 36 \text{ ksi}$$

$$M_x = 800 \text{ kip.in}$$

$$C_b = 1.0$$

$$M_y = 400 \text{ kip.in}$$

$$L_b = 120 \text{ in}$$

$$V_x = 30 \text{ kip}$$

$$V_y = 15 \text{ kip}$$

$$b_f^l = 5 \text{ in, } b_f^u = 30 \text{ in,}$$

$$h_w^l = 5 \text{ in, } h_w^u = 40 \text{ in,}$$

$$t_f^l = 0.25 \text{ in, } t_f^u = 1.5 \text{ in}$$

$$t_w^l = 0.25 \text{ in, } t_w^u = 1.5 \text{ in}$$

Para el vector tanteado inicialmente (X_0) , $(X)^t = \{12, 1, 12, 1\}$ se obtiene el óptimo (X) , $(X)^t = \{11.42793, 0.5271699, 14.40963, 0.2499997\}$, con un área $A = 15.65133 \text{ in}^2$.

Las restricciones de comportamiento, sin adaptaciones, en el óptimo, toman los valores:

$$f_{vx} - F_{vx} = -5.990975 \text{ ksi}$$

$$f_{vy} - F_{vy} = -12.53261 \text{ ksi}$$

$$f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1 = 1.430511 \times 10^{-6}$$

$$h_w/t_w - 14000 / (F_y(F_y + 16.5))^{0.5} = -264.392$$

5.3.- SOLICITACIONES DE FLEJO-COMPRESIÓN.

Sea el ejemplo de Flexo-compresión con los datos siguientes:

Pórtico arriostrado contra la traslación de las juntas.

$F_y=36$ ksi	$P=500$ kip
$K_x=1.0$	$L_x=120$ in
$K_y=1.0$	$L_y=120$ in
$M_x=600$ kip.in	$M_y=300$ kip.in
$M_{ix}=400$ kip.in	$M_{iy}=250$ kip.in
$M_{jx}=500$ kip.in	$M_{jy}=300$ kip.in
$C_{mx}=0.85$	$C_{my}=0.85$
$C_b=1.0$	$L_b=120$ in
$V_x=20$ kip	$V_y=10$ kip
$b_f^l=5$ in, $b_f^u=50$ in,	$h_w^l=5$ in, $h_w^u=50$ in,
$t_f^l=0.25$ in, $t_f^u=1.5$ in	$t_w^l=0.25$ in, $t_w^u=1.5$ in

Para el vector tanteado inicialmente $\{X_0\}$, $\{X\}^t = \{10, 0.5, 10, 0.5\}$ se obtiene el óptimo $\{X\}$, $\{X\}^t = \{20.56083, 0.6634441, 15.46583, 0.3116924\}$, con un área $A=32.10251$ in².

Las restricciones de comportamiento, sin adaptaciones, en el óptimo, toman los valores:

$$f_{vx} - F_{vx} = -10.30864 \text{ ksi}$$

$$f_{vy} - F_{vy} = -13.85019 \text{ ksi}$$

$$\begin{aligned} f_a/F_a + C_{mx}f_{bx}/(F_{bx}(1-f_a/F'_{ex})) + C_{my}f_{by}/(F_{by}(1-f_a/F'_{ey})) - 1 \\ = 4.768372 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

$$f_a/(0.6F_yQ) + f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1 = -2.895677 \times 10^{-2}$$

$$f_a/F_a + f_{bx}/F_{bx} + f_{by}/F_{by} - 1 = 0$$

$$h_w/t_w - 14000/(F_y(F_y+16.5))^{0.5} = -272.4117$$

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha logrado desarrollar un programa que resuelve un problema físico, como es la optimización referida aquí, aunque cabe resaltar que el programa es capaz de resolver el problema general de programación no lineal, en un contexto matemático.

Dada la alta no linealidad de las funciones involucradas en el problema, se ha hecho un análisis exhaustivo de todas las consideraciones que ayudaran a mejorar la convergencia, confiando en haber creado una herramienta útil para el diseñador.

Para tener una idea de la eficiencia, se corrió el programa con un computador de procesador 486-DLC, en un ambiente de MS-DOS QBASIC, resolviendo cada problema del acápite anterior en un tiempo aproximado de 09 seg. Este tiempo resultó ser independiente del punto inicial de tanteo.

El procedimiento descrito permite visualizar la manera de aplicar el método a otros tipos de sección y cualquier tipo de sollicitación. Más aún permite hacer algunas proyecciones del uso del programa desarrollado, convirtiéndolo en una subrutina para optimizar una estructura completa, elemento por elemento. Bastaría con hacer algunas adaptaciones, buscando incluir restricciones

para la estructura en conjunto. Es posible considerar re-análisis y re-diseño, de modo iterativo.

En su nivel actual, se considera que se ha alcanzando la meta propuesta, pues se minimiza rápidamente el peso del elemento sometido a cargas conocidas. Se comprueba que se llega al mismo resultado, con tolerancias aceptables, aun desde puntos totalmente distantes entre sí (tanteos iniciales exageradamente débiles o excesivamente conservadores, indistintamente), lo cual es importante, ya que existiendo cuatro variables sería muy difícil estimar un diseño inicial razonable. En algunos casos, se puede apreciar la existencia de más de un óptimo local, quedando a criterio del diseñador la elección de la solución del problema.

La propiedad de convergencia es la característica más valiosa del programa y fue conseguida después de numerosas pruebas y depuraciones.

**APENDICE.- LISTADO DEL PROGRAMA DE COMPUTO Y DEFINICION DE
VARIABLES USADAS POR EL PROGRAMA.**

DEFINICION DE VARIABLES

SEL = Selección que determina el tipo de problema (1 para compresión, 2 para flexión y corte, 3 para flexo-compresión).

R0 = Valor inicial del parámetro de penalidad.

R = Parámetro de penalidad.

CR = Factor de amplificación del parámetro de penalidad en cada paso.

N = Número de dimensiones del problema = 4.

M = Número de restricciones del problema (10 para compresión, 12 para flexión y corte, 14 para flexo-compresión).

XX() = Vector de diseño antes de cada secuencia de búsqueda a lo largo de las direcciones conjugadas.

XP() = Vector de diseño al final de cada nuevo valor del parámetro de penalidad.

X() = Vector de diseño que varía en cada etapa de la búsqueda por direcciones conjugadas (es el que exhibe mayor variación).

Y() = Vector de diseño al final de una secuencia de direcciones conjugadas.

EP() = Vector diferencia entre {X} y {XP}.

S() = Matriz cuyas columnas son las direcciones conjugadas y la nueva dirección generada.

SA() = Escalar que afecta a un vector direccional que define el salto entre cierto diseño y un diseño mejorado.

H() = Restricciones adaptadas para que sean adimensionales.

G() = Restricciones con sus valores absolutos (con dimensiones de longitud, esfuerzos, etc).

G\$() = Caracteres que representan la interpretación física de las restricciones sin ninguna adaptación.

TP = Variable para almacenar la norma o longitud del vector {EP}.

TX = Variable para almacenar la norma o longitud del vector {XX}.

EFIN = Variable para almacenar el error relativo entre las componentes de {X} comparadas con las de {XP}. En realidad, es la suma de los errores relativos.

EEE = Error relativo del vector {XX} calculado como el cociente de la norma del vector salto {EP} entre la norma del vector {XX}.

L\$ = Variable de caracteres para decidir si se quiere probar otro tanteo inicial.

P = Fuerza axial en kip.

LX = Longitud no arriostrada para tendencia al pandeo alrededor del eje fuerte X-X en in.

KX = Factor de longitud efectiva para tendencia al pandeo alrededor del eje fuerte X-X.

LY = Longitud no arriostrada para tendencia al pandeo alrededor del eje débil Y-Y en in.

KY = Factor de longitud efectiva para tendencia al pandeo alrededor del eje débil Y-Y.

CH\$ = Variable de caracteres para decidir si se quiere volver a ingresar un dato numérico (en previsión de errores).

MX = Momento flector alrededor del eje fuerte X-X en kip.in.

MY = Momento flector alrededor del eje débil Y-Y en kip.in.

CB = Factor de gradiente de Momentos.

VX = Fuerza cortante en el plano del Momento MX en kip.

VY = Fuerza cortante en el plano del Momento MY en kip.

LB = Longitud no arriostrada del ala en compresión en in.

MIX = Momento extremo en el nudo i, alrededor del eje X-X, en kip.in

MIY = Momento extremo en el nudo i, alrededor del eje Y-Y,
en kip.in

MJX = Momento extremo en el nudo j, alrededor del eje X-X,
en kip.in

MJY = Momento extremo en el nudo j, alrededor del eje Y-Y,
en kip.in

CMX = Coeficiente que afecta al esfuerzo de flexión
alrededor del eje fuerte X-X en las fórmulas empíricas del
Reglamento AISC-89.

CMY = Coeficiente que afecta al esfuerzo de flexión
alrededor del eje débil Y-Y en las fórmulas empíricas del
Reglamento AISC-89.

FY = Esfuerzo de fluencia del acero en ksi.

BF = Ancho de ala.

TF = Espesor de ala.

HW = Peralte de alma.

TW = Espesor de alma.

DW = Peralte del elemento = $HW + 2 TF$.

BFU = Máximo ancho de ala.

BFL = Mínimo ancho de ala.

TFU = Máximo espesor de ala.

TFL = Mínimo espesor de ala.

HWU = Máximo peralte de alma.

HWL = Mínimo peralte de alma.

TWU = Máximo espesor de alma.

TWL = Mínimo espesor de alma.

XX(1) = Ancho de ala inicial = BF

XX(2) = Espesor de ala inicial = TF

XX(3) = Peralte de alma inicial = HW

XX(4) = Espesor de alma inicial = TW

FF = Variable para comparar los valores de la función
objetivo antes y después de una serie de direcciones
conjugadas.

CC = Contador para indicar cuántas secuencias, cada una de cuatro direcciones conjugadas y una dirección generada, se están empleando en la búsqueda.

CONV = Factor de reducción de la escala de los vectores de búsqueda, para ajustar el error de convergencia en cada secuencia de direcciones conjugadas.

SAL = Factor para reducir la escala de los vectores de búsqueda de manera más brusca, salteando varios pasos intermedios, cuando se considera que se está en las cercanías de un mínimo local.

TS = Módulo, norma o longitud del vector diferencia (nueva dirección generada) entre el vector {Y}, al final de una secuencia de direcciones conjugadas y el vector {XX} al comienzo de la búsqueda.

CPR = Factor para evaluar si un salteo causará que el número de orden de la secuencia de búsqueda exceda a N^2 (en este caso a 16), que es un punto en el que considera que puede haber cierta distorsión en los vectores, por lo que se les vuelve a hacer paralelos a las direcciones coordenadas, como al comienzo del programa.

ANX = Valor anterior de la norma o longitud del vector de diseño a ser usado para ajustar la escala de los vectores direccionales (cuyo tamaño se considera conveniente que se vaya reduciendo en cada paso para mejorar la convergencia).

FAC = Cociente entre el valor actual de la longitud del vector de diseño {XX} y el valor anterior correspondiente.

Z = Factor cuyo valor es 1 si la búsqueda progresa en el mismo sentido del vector direccional que se está usando y cuyo valor es -1 si la búsqueda progresa en sentido opuesto.

F = Valor más general de la función objetivo (tomando en cuenta las restricciones: función de penalidad) para un cierto vector de diseño {X}.

F1 = Valor de la función objetivo en el punto izquierdo de un proceso de minimización cuadrática, a lo largo de una línea.

F2 = Valor de la función objetivo en el punto medio de un proceso de minimización cuadrática, a lo largo de una línea.

F3 = Valor de la función objetivo en el punto derecho de un proceso de minimización cuadrática, a lo largo de una línea.

D = Factor que permite una variación en progresión geométrica (para acelerar la búsqueda) de razón 2 del salto entre un cierto diseño y un diseño mejorado.

A = Escalar (parcial) que afecta al vector direccional que está siendo probado, que define el salto entre la solución para la línea de minimización anterior y la nueva solución, considerando una aproximación local cuadrática de la función objetivo.

AA = Variable para acumular los valores de A a lo largo de una misma dirección (escalar total que afecta al vector direccional evaluado).

E = Error relativo del vector {XX} tras una secuencia de búsqueda por direcciones conjugadas, definido como el cociente de la longitud del vector diferencia {Y}-{XX} entre la longitud del vector {XX}.

ESC = Suma de los valores absolutos de los escalares que afectaron a cada vector direccional, en una secuencia determinada, que servirá para adecuar el tamaño de la dirección generada para que sea homogéneo con el tamaño de las demás direcciones anteriores, la primera de las cuales se descartará.

ERX = Error relativo del vector {XX}, obtenido conservadoramente como la suma de los valores absolutos de las variaciones relativas de sus componentes, entre un cierto {XX} y el {Y} que obtiene.

ERF = Error relativo de la función objetivo entre el valor FF antes de la última serie de direcciones conjugadas y el valor actual F.

EE = Corrección del error relativo E del vector {XX} respecto al vector {Y}, por haberse efectuado una minimización adicional a lo largo de la dirección generada.

SA1 = Contador para indicar cuántas veces no hubo progreso en la búsqueda a lo largo de la primera dirección conjugada (que es justo la que normalmente debería descartarse), para reducir su tamaño y si por N veces (4 en este caso) los escalares correspondientes son nulos, se agrega a la dirección generada una fracción de la primera dirección no utilizada.

H = Función objetivo sin tomar en cuenta a las restricciones = AR / AREA.

AR = Area de la sección transversal del perfil tipo I.

AREA = Area de referencia según el problema dado, que viene a ser una especie de área mínima.

X(1) = Valor más general del ancho de ala = BF

X(2) = Valor más general del espesor de ala = TF

X(3) = Valor más general del peralte de alma = HW

X(4) = Valor más general del espesor de alma = TW

FA = Esfuerzo axial de compresión actuante en ksi.

IX = Momento de inercia alrededor del eje fuerte X-X en in^4 .

RX = Radio de giro de la sección alrededor del eje fuerte X-X.

IY = Momento de inercia alrededor del eje débil Y-Y en in^4 .

RY = Radio de giro de la sección alrededor del eje débil Y-Y.

ESBX = Esbeltez relativa al eje X-X.

ESBY = Esbeltez relativa al eje Y-Y.

ESB = La mayor de las esbelteces relativas del elemento.

QS = Factor de reducción de esfuerzos permisibles por esbeltez del ala en compresión.

HE = Peralte efectivo del alma, corregido por esbeltez.

QA = Factor de reducción de esfuerzos por esbeltez del alma.

QQ = Factor de reducción de esfuerzos considerando las esbelteces del ala y del alma.

ECR = Esbeltez crítica del perfil que separa el rango de pandeo elástico del rango de pandeo inelástico.

REL = Cociente entre la esbeltez del elemento y la esbeltez crítica.

FAD = Esfuerzo admisible por carga axial de compresión.

SX = Módulo de sección alrededor del eje fuerte X-X.

SY = Módulo de sección alrededor del eje débil Y-Y.

RT = Radio de giro de una sección que está compuesta por el ala en compresión y un tercio del área del alma en compresión.

QE = Momento estático de área de la sección respecto al eje X-X (que pasa por el centro de gravedad de la sección).

FBX = Esfuerzo de flexión actuante alrededor del eje X-X.

FBY = Esfuerzo de flexión actuante alrededor del eje Y-Y.

FVX = Esfuerzo de corte actuante en el plano de flexión alrededor del eje X-X.

FVY = Esfuerzo de corte actuante en el plano de flexión alrededor del eje Y-Y.

CV = Factor que interviene en el cálculo del esfuerzo de corte permisible.

FAVX = Esfuerzo de corte permisible en el plano de flexión alrededor del eje X-X.

FAVY = Esfuerzo de corte permisible en el plano de flexión alrededor del eje Y-Y.

FBI = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un primer caso, en función de la esbeltez del ala.

LB1 = Expresión para longitud no arriostrada límite del ala en compresión.

LB2 = Expresión para longitud no arriostrada límite del ala en compresión.

FB2 = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un segundo caso, cuando la long. entre arriostres del ala L_b es mayor que L_c .

FB2A = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un caso paralelo al segundo.

FB3 = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un tercer caso (cuando el alma es esbelta).

FBIU = Esfuerzo referencial que sirve para el cálculo de FB3 y FB5, definido posteriormente.

FB3A = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un caso paralelo al tercero.

FB5 = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un quinto caso (cuando el alma es esbelta).

FB5A = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un caso paralelo al quinto.

FBAY = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje débil.

FBAX = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte.

FBBX = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte, para uso en la fórmula empírica que considera efectos de segundo orden, si el pórtico es arriostrado contra la traslación de las juntas (se usa $C_b=1$).

FB4 = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un cuarto caso (la long. entre arriostres L_b es mayor que L_c y el pórtico tiene arriostre contra la traslación de las juntas, en un caso de flexo-compresión).

FB4A = Esfuerzo de flexión permisible alrededor del eje fuerte en un caso paralelo al cuarto.

FBIX = Esfuerzo de flexión alrededor del eje X-X, en el nudo i.

FBIY = Esfuerzo de flexión alrededor del eje Y-Y, en el nudo i.

FBJX = Esfuerzo de flexión alrededor del eje X-X, en el nudo j.

FBJY = Esfuerzo de flexión alrededor del eje Y-Y, en el nudo j.

FBREL = $FBX/FBAX + FBY/FBAY$, término a ser usado en las fórmulas empíricas.

FBRELI = $FBIX/FBAX + FBIY/FBAY$, término a ser usado en las fórmulas empíricas.

FBRELJ = $FBJX/FBAX + FBJY/FBAY$, término a ser usado en las fórmulas empíricas.

FBRELE = El mayor valor entre FBRELI y FBRELJ, término a ser usado en las fórmulas empíricas.

FBRELT = El mayor valor entre FBRELE Y FBREL, término a ser usado en las fórmulas empíricas.

FLEX = Esfuerzo de Euler alrededor del eje fuerte X-X.

FLEY = Esfuerzo de Euler alrededor del eje débil Y-Y.

LRCW = Esbeltez límite para almas compactas para el caso de compresión axial y flexionante combinadas.

LISTADO DEL PROGRAMA

```

10 '*****
20 '          NATIONAL UNIVERSITY OF ENGINEERING
30 '          FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
40 '    PENALTY FUNCTION METHOD USING CONJUGATE DIRECTIONS
50 '          SEARCH FOR THE OPTIMIZATION OF
60 '          STRUCTURAL STEEL MEMBERS
70 '          E.SANCHEZ, REVISED BY MSc LUIS F. ZAPATA
75 '          JULY 1995, LIMA, PERU
80 '*****
90 '
100 CLEAR : CLS : LOCATE 8, 8: PRINT "PENALTY FUNCTION
METHOD FOR THE OPTIMIZATION OF STEEL MEMBERS"
110 LOCATE 11, 17: PRINT "[1] AXIAL COMPRESSION"
120 LOCATE 13, 17: PRINT "[2] BENDING AND SHEAR"
140 LOCATE 15, 17: PRINT "[3] AXIAL COMPRESSION AND
BENDING"
150 LOCATE 18, 17: PRINT "SELECTION ( 1 , 2 , 3 )      : "; :
INPUT SEL: CLS
180 N = 4
185 IF SEL = 1 THEN M = 10 ELSE IF SEL = 2 THEN M = 12 ELSE
M = 14
190 DIM XX(N), XP(N), X(N), Y(N), EP(N), S(N, N + 1), SA(N
+ 1), H(M), G(M), G$(M)
200 ON SEL GOSUB 470, 510, 580: REM FORCES DATA
210 GOSUB 740: REM GEOMETRIC DATA
220 R0 = 1: CR = 10: R = R0
230 GOSUB 820: REM INITIAL DATA
240 GOSUB 1740: REM OBJECTIVE FUNCTION AND CONSTRAINTS
250 GOSUB 3290: REM PRINTING CONSTRAINTS
260 PRINT "CURRENT VALUE OF r : r ="; R
270 GOSUB 890: REM CONJUGATE DIRECTIONS SEARCH
280 TP = 0: TX = 0

```

```

290 FOR I = 1 TO N: EP(I) = X(I) - XP(I): XP(I) = XX(I): TP
= TP + EP(I) ^ 2: TX = TX + XX(I) ^ 2: NEXT I
300 IF TX = 0 THEN TX = N * 1E-12
310 IF TP = 0 THEN TP = N * 1E-12
320 TP = SQR(TP): TX = SQR(TX)
330 EFIN = 0: FOR I = 1 TO N: EFIN = EFIN + ABS(EP(I) /
XX(I)): NEXT I
340 EEE = TP / TX: IF EEE < .0001 AND EFIN < .0001 THEN 370
350 R = R * CR
360 GOTO 240
370 BEEP: BEEP: BEEP: PRINT "APPROXIMATE OPTIMUM"
380 GOSUB 1930: REM printing {X}
390 PRINT "RELATIVE ERROR OF {X}="; EEE
400 GOSUB 1740: REM constraints
410 GOSUB 3290: REM constraints printing
420 PRINT : PRINT "DO YOU WANT TO TRY OTHER INITIAL
PROPORTIONS (Y/N) [ N ] "; : INPUT L$
430 IF L$ <> "Y" THEN 460
440 FOR I = 1 TO N: XX(I) = 0: XP(I) = 0: X(I) = 0: NEXT I
450 GOTO 220
460 END
462 '
465 '
470 REM COMPRESSION DATA
480 PRINT "AXIAL FORCE, P (kip) = ["; P; "]" "; : INPUT P:
PRINT "Lx (inch) = ["; LX; "]" "; : INPUT LX: PRINT "Kx =
["; KX; "]" "; : INPUT KX: PRINT "Ly (inch) = ["; LY; "]" ";
: INPUT LY: PRINT "Ky = ["; KY; "]" "; : INPUT KY
490 GOSUB 3340: IF CH$ = "Y" THEN 480
492 G$(9) = " fa - Fa = "
494 G$(10) = " Kl/rg - 200 = "
500 RETURN
505 '
510 REM BENDING DATA

```

```

520 PRINT "BENDING MOMENT, Mx (kip.in) = ["; MX; "]" "; :
INPUT MX
530 PRINT "BENDING MOMENT, My (kip.in) = ["; MY; "]" "; :
INPUT MY: PRINT "MOMENT GRADIENT FACTOR, Cb = ["; CB; "]" "; :
: INPUT CB: PRINT "SHEAR FORCE, Vx (kip) = ["; VX; "]" "; :
INPUT VX
540 PRINT "SHEAR FORCE, Vy (kip) = ["; VY; "]" "; : INPUT VY
550 PRINT "UNBRACED LENGTH, Lb (in) = ["; LB; "]" "; : INPUT
LB
560 GOSUB 3340: IF CH$ = "Y" THEN 520
562 G$(9) = " fvx - Fvx = "
563 G$(10) = " fvy - Fvy = "
564 G$(11) = " fbx/Fbx + fby/Fby - 1 = "
565 G$(12) = " hw/tw - 14000/(Fy(Fy+16.5))^0.5 = "
570 RETURN
575 '
580 REM COMPRESSION AND BENDING DATA
590 REM COMPRESSION DATA
600 PRINT "AXIAL FORCE, P (kip) = ["; P; "]" "; : INPUT P:
PRINT "Lx (inch) = ["; LX; "]" "; : INPUT LX: PRINT "Kx =
["; KX; "]" "; : INPUT KX: PRINT "Ly (inch) = ["; LY; "]" "; :
: INPUT LY: PRINT "Ky = ["; KY; "]" "; : INPUT KY
610 GOSUB 3340: IF CH$ = "Y" THEN 600
620 REM END COMPRESSION DATA
630 REM BENDING DATA
640 PRINT "MAXIMUM BENDING MOMENT BETWEEN POINTS OF
SUPPORT, Mx (kip.in) = ["; MX; "]" "; : INPUT MX
645 PRINT "BENDING MOMENT AT THE SAME SECTION, My (kip.in)
= ["; MY; "]" "; : INPUT MY
650 PRINT "LEFT END MOMENT Mix (kip.in) = ["; MIX; "]" "; :
INPUT MIX: PRINT "LEFT END MOMENT Miy (kip.in) = ["; MIY;
"] "; : INPUT MIY

```

```

660 PRINT "RIGHT END MOMENT Mjx (kip.in) = ["; MJX; "]" "; :
INPUT MJX: PRINT "RIGHT END MOMENT Mjy (kip.in) = ["; MJY;
"] "; : INPUT MJY
665 PRINT "COEFFICIENT, Cmx = ["; CMX; "]" "; : INPUT CMX
670 PRINT "COEFFICIENT, Cmy = ["; CMY; "]" "; : INPUT CMY
680 PRINT "MOMENT GRADIENT FACTOR, Cb = ["; CB; "]" "; :
INPUT CB: PRINT "SHEAR FORCE, Vx (kip) = ["; VX; "]" "; :
INPUT VX
690 PRINT "SHEAR FORCE, Vy (kip) = ["; VY; "]" "; : INPUT VY
695 PRINT "IS THE FRAME BRACED AGAINST JOINT TRANSLATION ?
(Y/N) [ N ]"; : INPUT B$
700 PRINT "UNBRACED LENGTH, Lb (in) = ["; LB; "]" "; : INPUT
LB
710 GOSUB 3340: IF CH$ = "Y" THEN 640
711 G$(9) = " fvx - Fvx = "
712 G$(10) = " fvy - Fvy = "
713 G$(11) = " fa/Fa + Cmx fbx/((1-fa/F'ex)Fbx) + Cmy
fby/((1-fa/F'ey)Fby) - 1 = "
714 G$(12) = " fa/(0.6FyQ) + fbx/Fbx + fby/Fby - 1 = "
715 G$(13) = " fa/Fa + fbx/Fbx + fby/Fby - 1 = "
716 G$(14) = " hw/tw - 14000/(Fy(Fy+16.5))^0.5 = "
720 REM END BENDING DATA
730 RETURN
735 '
740 REM GEOMETRIC AND MATERIAL DATA
750 PRINT "STEEL YIELD POINT, Fy (ksi) = ["; FY; "]" "; :
INPUT FY
760 PRINT "MINIMUM FLANGE WIDTH, bf min (inch) = ["; BFL;
"] "; : INPUT BFL: PRINT "MAXIMUM FLANGE WIDTH, bf max
(inch) = ["; BFU; "]" "; : INPUT BFU
770 PRINT "MINIMUM FLANGE THICKNESS, tf min (inch) = [";
TFL; "]" "; : INPUT TFL: PRINT "MAXIMUM FLANGE THICKNESS, tf
max (inch) = ["; TFU; "]" "; : INPUT TFU

```

```

780 PRINT "MINIMUM WEB DEPTH, hw min (inch) = ["; HWL; "]"
"; : INPUT HWL: PRINT "MAXIMUM WEB DEPTH, hw max (inch) =
["; HWU; "]" "; : INPUT HWU
790 PRINT "MINIMUM WEB THICKNESS, tw min (inch) = ["; TWL;
"] "; : INPUT TWL: PRINT "MAXIMUM WEB THICKNESS, tw max
(inch) = ["; TWU; "]" "; : INPUT TWU
800 GOSUB 3340: IF CH$ = "Y" THEN 750
801 G$(1) = " bfl - bf = "
802 G$(2) = " bf - bfu = "
803 G$(3) = " tfl - tf = "
804 G$(4) = " tf - tfu = "
805 G$(5) = " hwl - hw = "
806 G$(6) = " hw - hwu = "
807 G$(7) = " twl - tw = "
808 G$(8) = " tw - twu = "
810 RETURN
815 '
820 REM INITIAL SECTION PROPORTIONS DATA
830 PRINT "INITIAL DESIGN SECTION DIMENSIONS"
840 PRINT "FLANGE WIDTH, bf = ["; XX(1); "]" "; : INPUT
XX(1): PRINT "FLANGE THICKNESS, tf = ["; XX(2); "]" "; :
INPUT XX(2)
850 PRINT "WEB DEPTH, hw = ["; XX(3); "]" "; : INPUT XX(3):
PRINT "WEB THICKNESS, tw = ["; XX(4); "]" "; : INPUT XX(4)
860 GOSUB 3340: IF CH$ = "Y" THEN 830
865 XX(1) = XX(1) / BFL: XX(2) = XX(2) / TFL: XX(3) = XX(3)
/ HWL: XX(4) = XX(4) / TWL
870 FOR I = 1 TO N: X(I) = XX(I): NEXT I
880 RETURN
885 '
890 REM CONJUGATE DIRECTIONS SEARCH
900 FF = 0: CC = -1: CONV = 100 ^ (1 / N ^ 2): SAL = INT(N
^ 2 / 4)
910 TS = 1: SA(N + 1) = 1

```



```

920 SA(0) = SA(N + 1): TX = 0: IF TS <> 0 THEN CC = CC + 1
ELSE CC = CC + SAL
930 FOR I = 1 TO N: TX = TX + XX(I) ^ 2: NEXT I: IF CC = 0
AND R = R0 THEN 940 ELSE 960
940 IF TX >= N / 4 THEN 970
950 TX = N / 4: GOTO 970
960 IF TX < N * 1E-16 THEN TX = N * 1E-12
970 TX = SQR(TX): IF CC = 0 THEN 1020
980 IF TS <> 0 THEN 1010
990 CPR = (CC - SAL) MOD N ^ 2 + SAL
1000 IF CPR > N ^ 2 THEN 1020
1010 IF CC MOD N ^ 2 <> 0 THEN 1040
1020 GOSUB 1870: REM COORDINATE DIRECTIONS
1040 FAC = TX / ANX: IF TS <> 0 THEN FAC = FAC / CONV ELSE
FAC = FAC / CONV ^ SAL
1060 FOR I = 1 TO N: FOR J = 1 TO N: S(I, J) = S(I, J) *
FAC: NEXT J: NEXT I
1070 ANX = TX: FOR I = 1 TO N: Y(I) = XX(I): NEXT I
1090 FOR Q = 1 TO N + 1: Z = 1: AA = 0
1120 IF SA(Q - 1) = 0 THEN 1150
1130 FOR I = 1 TO N: X(I) = XX(I): NEXT I: GOSUB 1740: REM
OBJECTIVE FUNCTION AND CONSTRAINTS
1140 F1 = F
1150 FOR I = 1 TO N: X(I) = XX(I) + Z * S(I, Q): NEXT I:
GOSUB 1740
1160 F2 = F
1170 D = 1
1190 FOR I = 1 TO N: X(I) = XX(I) + 2 * Z * D * S(I, Q):
NEXT I: GOSUB 1740
1200 F3 = F
1230 IF F2 >= F1 OR F2 >= F3 THEN 1240 ELSE 1300
1240 IF F1 > F3 THEN 1250 ELSE 1270
1250 IF 2 * D < 2 ^ 21 THEN D = 2 * D ELSE 1290
1260 F2 = F3: GOTO 1190

```

```

1270 IF Z = -1 THEN A = 0: GOTO 1400
1280 Z = -1: GOTO 1150
1290 PRINT "DISPERSION OBTAINED:  MINIMUM NOT GUARANTEED",
"NEW INITIAL VECTOR SUGGESTED": GOSUB 1930: END
1300 A = Z * D * (.5 + (F1 - F2) / (F1 + F3 - F2 - F2))
1310 FOR I = 1 TO N: X(I) = XX(I) + A * S(I, Q): NEXT I
1330 IF A = Z * D THEN 1390
1340 GOSUB 1740
1350 IF F < F2 THEN 1390
1360 IF F > F2 THEN A = Z * D: GOTO 1310
1370 IF F = F2 THEN A = (A + Z * D) / 2: IF ABS(A / (Z * D)
- 1) < .025 THEN A = Z * D
1380 GOTO 1310
1390 FOR I = 1 TO N: XX(I) = X(I): NEXT I
1400 AA = AA + A: IF ABS(Z * D) > 1.5 THEN 1130
1405 SA(Q) = AA
1410 IF Q <> N THEN 1530
1420 TS = 0: ESC = 0
1430 FOR I = 1 TO N: S(I, N + 1) = XX(I) - Y(I): TS = TS +
S(I, N + 1) ^ 2: NEXT I
1440 TS = SQR(TS): E = TS / TX
1450 IF E < SQR(3) / (40 * CONV ^ CC) THEN E = 1 / (10 *
CONV ^ CC)
1460 FOR I = 1 TO N: ESC = ESC + ABS(SA(I)): NEXT I
1470 IF TS = 0 THEN ESC = 1: SA(N + 1) = 0
1480 IF TS = 0 THEN 1540
1490 FOR I = 1 TO N: S(I, N + 1) = S(I, N + 1) / ESC
1520 NEXT I
1530 NEXT Q
1540 ERX = 0: FOR I = 1 TO N: ERX = ERX + ABS(1 - Y(I) /
XX(I)): NEXT I
1550 ERF = 1 - FF / F: IF ERX < 1 / (10 * CONV ^ CC) THEN
ERX = 1 / (5 * CONV ^ CC)

```

```

1560 EE = E * ABS(SA(N + 1) + ESC) / ESC: IF EE < .00001
AND ERX < .00001 AND ERF < .000001 THEN 1680
1570 FF = F
1580 IF TS = 0 THEN 920
1590 IF SA(1) <> 0 THEN 1630
1600 SA1 = SA1 + 1: FOR I = 1 TO N: S(I, 1) = S(I, 1) /
CONV: NEXT I
1610 IF SA1 < N THEN 920
1620 FOR I = 1 TO N: S(I, N + 1) = S(I, N + 1) + .25 * S(I,
1): NEXT I
1630 SA1 = 0
1640 FOR Q = 1 TO N: FOR I = 1 TO N
1650 S(I, Q) = S(I, Q + 1): NEXT I
1660 NEXT Q
1670 GOTO 920
1680 FOR I = 1 TO N: X(I) = XX(I): NEXT I
1690 BEEP
1700 GOSUB 1930: REM PRINTING (X)
1710 GOSUB 1740
1720 PRINT "OBJECTIVE FUNCTION="; H, "PENALTY FUNCTION=";
F, "ERROR OF (X)="; E, "E="; E; "EE="; EE, "AREA="; AR
1730 RETURN
1735 '
1740 REM OBJECTIVE FUNCTION AND CONSTRAINTS
1750 BF = X(1) * BFL: TF = X(2) * TFL: HW = X(3) * HWL: TW
= X(4) * TWL: DW = HW + 2 * TF
1760 IF BF < 0 OR TF < 0 OR HW < 0 OR TW < 0 THEN F = F1:
GOTO 1860
1770 AR = 2 * BF * TF + HW * TW
1780 IF SEL = 1 THEN AREA = P / FY: GOTO 1810
1790 IF SEL = 2 THEN AREA = 4 / 11 * (MX / FY) ^ (2 / 3):
IF AREA < 3 * VX / FY THEN AREA = 3 * VX / FY
1795 IF SEL = 2 THEN 1810

```

```

1800 IF SEL = 3 THEN AREA = P / FY + 4 / 11 * (MX / FY) ^
(2 / 3)
1810 H = AR / AREA: F = H
1820 GOSUB 3190: REM GEOMETRIC CONSTRAINTS
1830 ON SEL GOSUB 2020, 2160, 2550: REM BEHAVIOR
CONSTRAINTS
1840 FOR K = 1 TO M: IF G(K) > 0 THEN F = F + R * G(K) ^ 2
1850 NEXT K
1860 RETURN
1865 '
1870 REM COORDINATE DIRECTIONS
1880 FOR I = 1 TO N: FOR J = 1 TO N: S(I, J) = 0
1890 IF I = J THEN S(I, J) = ABS(XX(I)) / TX: IF S(I, J) <
1 / (100 * SQR(N)) THEN S(I, J) = 1 / (100 * SQR(N))
1900 NEXT J, I
1910 ANX = 10 * CONV ^ (CC - 1): SA1 = 0
1920 RETURN
1925 '
1930 REM PRINTING {X}
1951 PRINT "bf="; BF
1952 PRINT "tf="; TF
1953 PRINT "hw="; HW
1954 PRINT "tw="; TW
1960 RETURN
1965 '
2015 '
2020 REM COMPRESSION CONSTRAINTS
2030 FA = P / AR: IX = (BF * (HW + 2 * TF) ^ 3 - (BF - TW)
* HW ^ 3) / 12: RX = SQR(IX / AR): IY = (HW * TW ^ 3 + 2 *
TF * BF ^ 3) / 12: RY = SQR(IY / AR): ESBX = KX * LX / RX:
ESBY = KY * LY / RY: IF ESBX > ESBY THEN ESB = ESBX ELSE
ESB = ESBY
2035 IF (HW / TW) <= 70 THEN KC = 1 ELSE KC = 4.05 / (HW /
TW) ^ .46

```

```

2040 IF BF / (2 * TF) >= 195 / SQR(FY / KC) THEN QS = 26200
* KC / (FY * (BF / (2 * TF)) ^ 2): GOTO 2070
2050 IF BF / (2 * TF) >= 95 / SQR(FY / KC) THEN QS = 1.293
- .00309 * SQR(FY / KC) * BF / (2 * TF): GOTO 2070
2060 QS = 1
2070 IF HW / TW >= 253 / SQR(FY) THEN HE = 253 * TW /
SQR(FA) * (1 - 44.3 / (SQR(FA) * HW / TW)) ELSE 2080
2072 IF HE >= HW THEN HE = HW
2075 IF HE / TW < 253 / SQR(FY) THEN HE = TW * 253 /
SQR(FY)
2078 QA = 1 - TW * (HW - HE) / AR: GOTO 2090
2080 HE = HW: QA = 1
2090 PI = 3.141593: QQ = QS * QA: ECR = SQR(2 * PI ^ 2 *
29000 / (FY * QQ))
2100 IF ESB < ECR THEN REL = ESB / ECR: FAD = QQ * FY * (1
- .5 * REL ^ 2) / (5 / 3 + 3 * REL / 8 - REL ^ 3 / 8)
2110 IF ESB >= ECR THEN FAD = 12 * PI ^ 2 * 29000 / (23 *
ESB ^ 2)
2120 ' BEHAVIOR CONSTRAINTS
2130 H(9) = FA - FAD: G(9) = H(9) / (FAD / 10)
2140 H(10) = ESB - 200: G(10) = H(10) / (10 / SQR(FY))
2150 RETURN
2155 '
2160 REM BENDING CONSTRAINTS
2170 IX = (BF * (HW + 2 * TF) ^ 3 - (BF - TW) * HW ^ 3) /
12: IY = (HW * TW ^ 3 + 2 * TF * BF ^ 3) / 12: SX = 2 * IX
/ (HW + 2 * TF): SY = 2 * IY / BF
2175 JJ = (2 * BF * TF ^ 3 + HW * TW ^ 3) / 3: RT = SQR(IY
* SQR(DW ^ 2 + .156 * LB ^ 2 * JJ / IY) / (2 * SX))
2180 QE = BF * TF * (HW + TF) / 2 + TW * HW ^ 2 / 8: FBX =
MX / SX: FBY = MY / SY: FVX = VX * QE / (IX * TW): FVY =
1.5 * VY / (2 * BF * TF)
2182 IF (HW / TW) <= 70 THEN KC = 1 ELSE KC = 4.05 / (HW /
TW) ^ .46

```

```

2185 IF HW / TW <= 380 / SQR(FY) THEN FAVX = .4 * FY: GOTO
2210
2190 IF HW / TW > 547.305 / SQR(FY) THEN CV = 240300! / (FY
* (HW / TW) ^ 2) ELSE CV = 190 * SQR(5.34 / FY) / (HW / TW)
2200 FAVX = CV * FY / 2.89: IF FAVX > .4 * FY THEN FAVX =
.4 * FY
2210 FAVY = .4 * FY

2212 LC1 = 76 * BF / SQR(FY): LC2 = 20000 * BF * TF / ((HW
+ 2 * TF) * FY): IF LC1 < LC2 THEN LC = LC1 ELSE LC = LC2
2220 IF BF / (2 * TF) < 65 / SQR(FY) THEN 2251
2230 IF BF / (2 * TF) < 95 / SQR(FY / KC) THEN 2253
2240 IF BF / (2 * TF) < 195 / SQR(FY / KC) THEN FB1 = .6 *
FY * (1.293 - .00309 * SQR(FY / KC) * BF / 2 / TF): GOTO
2260
2250 FB1 = 15720 * KC / (BF / 2 / TF) ^ 2: GOTO 2260
2251 IF LB <= LC THEN FB1 = .66 * FY ELSE FB1 = .6 * FY
2252 GOTO 2260
2253 IF LB <= LC THEN FB1 = FY * (.79 - .002 * SQR(FY / KC)
* BF / 2 / TF) ELSE IF LB <= LC1 THEN FB1 = .6 * FY ELSE
FB1 = .6 * FY

2260 LC3 = SQR(510000! * CB / FY) * RT
2280 IF LB < LC THEN FB2 = .66 * FY: GOTO 2350
2290 IF LB = 0 THEN FB2A = .6 * FY ELSE FB2A = 12000 * CB *
BF * TF / (LB * DW)
2300 IF FB2A > .6 * FY THEN FB2A = .6 * FY
2310 IF LB < LC3 THEN FB2 = FY * (2 / 3 - FY * (LB / RT) ^
2 / (1530000! * CB)): IF FB2 > .6 * FY THEN FB2 = .6 * FY:
GOTO 2330
2320 FB2 = 170000! * CB / (LB / RT) ^ 2
2330 IF FB2 < FB2A THEN FB2 = FB2A
2331 IF LB < 1.1 * LC THEN FB2 = FB2 + .06 * FY * (11 - 10
* LB / LC) ^ 5

```

```

2343 '
2350 IF DW / TW < 640 / SQR(FY) THEN FB3 = .66 * FY: GOTO
2435
2360 IF DW / TW < 704 / SQR(FY) THEN FB3 = FY * (.6 + .06 *
(11 - (DW / TW) * SQR(FY) / 64) ^ 5): GOTO 2435
2370 FBIU = .6 * FY: IF FBIU > FB1 THEN FBIU = FB1
2380 IF FBIU > FB2 THEN FBIU = FB2
2390 IF HW / TW < 684 / SQR(FBIU) THEN FB3 = .6 * FY: GOTO
2435
2400 IF HW / TW < 760 / SQR(FBIU) THEN FB3 = .6 * FY +
(FBIU - .6 * FY) * ((HW / TW) * SQR(FBIU) / 76 - 9) ^ 2:
GOTO 2435
2410 FB3 = FBIU * (1 - .0005 * (HW * TW) / (BF * TF) * (HW
/ TW - 760 / SQR(FBIU)))
2420 FB3A = .02 * FBIU / (1 + (.0005 * (HW * TW) / (BF *
TF) * (HW / TW - 760 / SQR(FBIU)))) ^ 4)
2430 IF FB3 < FB3A THEN FB3 = FB3A

2435 FBAX = FB1: IF FBAX > FB2 THEN FBAX = FB2
2436 IF FBAX > FB3 THEN FBAX = FB3

2439 IF BF / (2 * TF) < 65 / SQR(FY) THEN FBAY = .75 * FY:
GOTO 2470
2440 IF BF / (2 * TF) < 95 / SQR(FY / KC) THEN FBAY = FY *
(1.075 - .005 * SQR(FY) * BF / 2 / TF): GOTO 2470
2450 IF BF / (2 * TF) < 195 / SQR(FY / KC) THEN FBAY = .6 *
FY * (1.293 - .00309 * SQR(FY / KC) * BF / 2 / TF): GOTO
2470
2460 FBAY = 15720 * KC / (BF / 2 / TF) ^ 2

2470 ' BEHAVIOR CONSTRAINTS
2480 H(9) = FVX - FAVX: G(9) = H(9) / (FAVX / 10)
2490 H(10) = FVY - FAVY: G(10) = H(10) / (FAVY / 10)

```

```

2500 H(11) = FBX / FBAX + FBY / FBAY - 1: G(11) = H(11) /
(1 / 10)
2530 H(12) = HW / TW - 14000 / SQR(FY * (FY + 16.5)): G(12)
= H(12) / (10 / SQR(FY))
2540 RETURN
2545 '
2550 REM COMPRESSION AND BENDING CONSTRAINTS
2560 '
2570 IX = (BF * DW ^ 3 - (BF - TW) * HW ^ 3) / 12: IY = (HW
* TW ^ 3 + 2 * TF * BF ^ 3) / 12: SX = 2 * IX / DW: SY = 2
* IY / BF
2575 JJ = (2 * BF * TF ^ 3 + HW * TW ^ 3) / 3: RT = SQR(IY
* SQR(DW ^ 2 + .156 * LB ^ 2 * JJ / IY) / (2 * SX))
2580 FBX = MX / SX: FBY = MY / SY: FBIX = MIX / SX: FBIY =
MIY / SY: FBJX = MJX / SX: FBJY = MJY / SY
2582 QE = BF * TF * (HW + TF) / 2 + TW * HW ^ 2 / 8: FVX =
VX * QE / (IX * TW): FVY = 1.5 * VY / (2 * BF * TF)
2585 '
2590 FA = P / AR: RX = SQR(IX / AR): RY = SQR(IY / AR):
ESBX = KX * LX / RX: ESBY = KY * LY / RY: IF ESBX > ESBY
THEN ESB = ESBX ELSE ESB = ESBY
2591 IF (HW / TW) <= 70 THEN KC = 1 ELSE KC = 4.05 / (HW /
TW) ^ .46
2592 IF HW / TW <= 380 / SQR(FY) THEN FAVX = .4 * FY: GOTO
2595
2593 IF HW / TW > 547.305 / SQR(FY) THEN CV = 240300! / (FY
* (HW / TW) ^ 2) ELSE CV = 190 * SQR(5.34 / FY) / (HW / TW)
2594 FAVX = CV * FY / 2.89: IF FAVX > .4 * FY THEN FAVX =
.4 * FY
2595 FAVY = .4 * FY

2600 IF BF / (2 * TF) >= 195 / SQR(FY / KC) THEN QS = 26200
* KC / (FY * (BF / (2 * TF)) ^ 2): GOTO 2630

```


2610 IF $BF / (2 * TF) \geq 95 / \text{SQR}(FY / KC)$ THEN $QS = 1.293$
- $.00309 * \text{SQR}(FY / KC) * BF / (2 * TF)$: GOTO 2630
2620 $QS = 1$

2630 IF $HW / TW \geq 253 / \text{SQR}(FY)$ THEN $HE = 253 * TW /$
 $\text{SQR}(FA) * (1 - 44.3 / (\text{SQR}(FA) * HW / TW))$ ELSE 2654

2640 IF $HE \geq HW$ THEN $HE = HW$

2650 IF $HE / TW < 253 / \text{SQR}(FY)$ THEN $HE = TW * 253 /$
 $\text{SQR}(FY)$

2652 $QA = 1 - TW * (HW - HE) / AR$: GOTO 2660

2654 $HE = HW$: $QA = 1$

2660 $PI = 3.141593$: $QQ = QS * QA$: $ECR = \text{SQR}(2 * PI ^ 2 * 29000 / (FY * QQ))$

2670 IF $ESB < ECR$ THEN $REL = ESB / ECR$: $FAD = QQ * FY * (1$
- $.5 * REL ^ 2) / (5 / 3 + 3 * REL / 8 - REL ^ 3 / 8)$

2680 IF $ESB \geq ECR$ THEN $FAD = 12 * PI ^ 2 * 29000 / (23 * ESB ^ 2)$

2730 '

2770 $LC1 = 76 * BF / \text{SQR}(FY)$: $LC2 = 20000 * BF * TF / ((HW$
+ $2 * TF) * FY)$: IF $LC1 < LC2$ THEN $LC = LC1$ ELSE $LC = LC2$

2772 IF $BF / (2 * TF) < 65 / \text{SQR}(FY)$ THEN 2790

2775 IF $BF / (2 * TF) < 95 / \text{SQR}(FY / KC)$ THEN 2800

2780 IF $BF / (2 * TF) < 195 / \text{SQR}(FY / KC)$ THEN $FBI = .6 *$
 $FY * (1.293 - .00309 * \text{SQR}(FY / KC) * BF / 2 / TF)$: GOTO
2810

2785 $FBI = 15720 * KC / (BF / 2 / TF) ^ 2$: GOTO 2810

2790 IF $LB \leq LC$ THEN $FBI = .66 * FY$ ELSE $FBI = .6 * FY$

2795 GOTO 2810

2800 IF $LB \leq LC$ THEN $FBI = FY * (.79 - .002 * \text{SQR}(FY / KC)$
 $* BF / 2 / TF)$ ELSE IF $LB \leq LC1$ THEN $FBI = .6 * FY$ ELSE
 $FBI = .6 * FY$

```

2810 LC3 = SQR(510000! * CB / FY) * RT
2830 IF LB < LC THEN FB2 = .66 * FY: GOTO 2884
2840 IF LB = 0 THEN FB2A = .6 * FY ELSE FB2A = 12000 * CB *
BF * TF / (LB * DW)
2850 IF FB2A > .6 * FY THEN FB2A = .6 * FY
2860 IF LB < LC3 THEN FB2 = FY * (2 / 3 - FY * (LB / RT) ^
2 / (1530000! * CB)): IF FB2 > .6 * FY THEN FB2 = .6 * FY:
GOTO 2880
2870 FB2 = 170000! * CB / (LB / RT) ^ 2
2880 IF FB2 < FB2A THEN FB2 = FB2A
2881 IF LB < 1.1 * LC THEN FB2 = FB2 + .06 * FY * (11 - 10
* LB / LC) ^ 5
2882 '
2884 IF B$ <> "Y" THEN FB4 = FB2: GOTO 2900
2885 LC4 = SQR(510000! * 1 / FY) * RT
2886 IF LB < LC THEN FB4 = .66 * FY: GOTO 2900
2887 IF LB = 0 THEN FB4A = .6 * FY ELSE FB4A = 12000 * 1 *
BF * TF / (LB * DW)
2888 IF FB4A > .6 * FY THEN FB4A = .6 * FY
2889 IF LB < LC4 THEN FB4 = FY * (2 / 3 - FY * (LB / RT) ^
2 / (1530000! * 1)): IF FB4 > .6 * FY THEN FB4 = .6 * FY:
GOTO 2891
2890 FB4 = 170000! * 1 / (LB / RT) ^ 2
2891 IF FB4 < FB4A THEN FB4 = FB4A
2892 IF LB < 1.1 * LC THEN FB4 = FB4 + .06 * FY * (11 - 10
* LB / LC) ^ 5
2895 '
2900 IF FA / FY <= .16 THEN LRCW = 640 / SQR(FY) * (1 -
3.74 * FA / FY) ELSE LRCW = 257 / SQR(FY)

2902 IF DW / TW < LRCW THEN FB3 = .66 * FY: GOTO 2930
2904 IF DW / TW < 1.1 * LRCW THEN FB3 = FY * (.6 + .06 *
(11 - (DW / TW) * 10 / LRCW) ^ 5): GOTO 2930

```

```

2906 FBIU = .6 * FY: IF FBIU > FB1 THEN FBIU = FB1
2908 IF FBIU > FB2 THEN FBIU = FB2
2910 IF HW / TW < 684 / SQR(FBIU) THEN FB3 = .6 * FY: GOTO
2930 `
2912 IF HW / TW < 760 / SQR(FBIU) THEN FB3 = .6 * FY +
(FBIU - .6 * FY) * ((HW / TW) * SQR(FBIU) / 76 - 9) ^ 2:
GOTO 2930
2914 FB3 = FBIU * (1 - .0005 * (HW * TW) / (BF * TF) * (HW
/ TW - 760 / SQR(FBIU)))
2916 FB3A = .02 * FBIU / (1 + (.0005 * (HW * TW) / (BF *
TF) * (HW / TW - 760 / SQR(FBIU)))) ^ 4)
2918 IF FB3 < FB3A THEN FB3 = FB3A

2930 IF B$ <> "Y" THEN FB5 = FB3: GOTO 2990
2932 IF DW / TW < LRCW THEN FB5 = .66 * FY: GOTO 2990
2934 IF DW / TW < 1.1 * LRCW THEN FB5 = FY * (.6 + .06 *
(11 - (DW / TW) * 10 / LRCW) ^ 5): GOTO 2990
2936 FBIU = .6 * FY: IF FBIU > FB1 THEN FBIU = FB1
2938 IF FBIU > FB4 THEN FBIU = FB4
2940 IF HW / TW < 684 / SQR(FBIU) THEN FB5 = .6 * FY: GOTO
2990
2942 IF HW / TW < 760 / SQR(FBIU) THEN FB5 = .6 * FY +
(FBIU - .6 * FY) * ((HW / TW) * SQR(FBIU) / 76 - 9) ^ 2:
GOTO 2990
2944 FB5 = FBIU * (1 - .0005 * (HW * TW) / (BF * TF) * (HW
/ TW - 760 / SQR(FBIU)))
2946 FB5A = .02 * FBIU / (1 + (.0005 * (HW * TW) / (BF *
TF) * (HW / TW - 760 / SQR(FBIU)))) ^ 4)
2948 IF FB5 < FB5A THEN FB5 = FB5A

2990 FBAX = FB1: IF FBAX > FB2 THEN FBAX = FB2
2995 IF FBAX > FB3 THEN FBAX = FB3
3000 FBBX = FB1: IF FBBX > FB4 THEN FBBX = FB4
3005 IF FBBX > FB5 THEN FBBX = FB5

```

```

3010 IF BF / (2 * TF) < 65 / SQRT(FY) THEN FBAY = .75 * FY:
GOTO 3050
3020 IF BF / (2 * TF) < 95 / SQRT(FY / KC) THEN FBAY = FY *
(1.075 - .005 * SQRT(FY) * BF / 2 / TF): GOTO 3050
3030 IF BF / (2 * TF) < 195 / SQRT(FY / KC) THEN FBAY = .6 *
FY * (1.293 - .00309 * SQRT(FY / KC) * BF / 2 / TF): GOTO
3050
3040 FBAY = 15720 * KC / (BF / 2 / TF) ^ 2

3050 FLEX = 12 * PI ^ 2 * 29000 / (23 * ESBX ^ 2): FLEY =
12 * PI ^ 2 * 29000 / (23 * ESBY ^ 2)

3055 FBREL = FBX / FBAX + FBY / FBAY: FBRELI = FBIX / FBAX
+ FBIY / FBAY: FBRELJ = FBJX / FBAX + FBJY / FBAY
3060 IF FBRELI > FBRELJ THEN FBRELE = FBRELI ELSE FBRELE =
FBRELJ
3065 IF FBREL > FBRELE THEN FBRELT = FBREL ELSE FBRELT =
FBRELE

3070 ' BEHAVIOR CONSTRAINTS
3075 H(9) = FVX - FAVX: G(9) = H(9) / (FAVX / 10)
3080 H(10) = FVY - FAVY: G(10) = H(10) / (FAVY / 10)
3085 IF FA >= FLEX OR FA >= FLEY THEN H(11) = 2 / REL: GOTO
3100
3090 H(11) = FA / FAD + CMX * FBX / FBBX / (1 - FA / FLEX)
+ CMY * FBY / FBAY / (1 - FA / FLEY) - 1: IF FA / FAD <=
.15 THEN H(11) = 0
3100 G(11) = H(11) / (1 / 10)
3110 H(12) = FA / (.6 * FY * QQ) + FBRELE - 1: IF FA / FAD
<= .15 THEN H(12) = 0
3115 G(12) = H(12) / (1 / 10)
3130 H(13) = FA / FAD + FBRELT - 1: IF FA / FAD > .15 THEN
H(13) = 0

```

```

3140 G(13) = H(13) / (1 / 10)
3150 H(14) = HW / TW - 14000 / SQR(FY * (FY + 16.5)): G(14)
= H(14) / (10 / SQR(FY))
3160 `
3170 REM END COMBINED COMPRESSION AND BENDING CONSTRAINTS
3180 RETURN
3185 `
3190 REM GEOMETRIC CONSTRAINTS
3200 H(1) = (BFL - BF): G(1) = H(1) / (BFL / 10)
3210 H(2) = (BF - BFU): G(2) = H(2) / (BFU / 10)
3220 H(3) = (TFL - TF): G(3) = H(3) / (TFL / 10)
3230 H(4) = (TF - TFU): G(4) = H(4) / (TFU / 10)
3240 H(5) = (HWL - HW): G(5) = H(5) / (HWL / 10)
3250 H(6) = (HW - HWU): G(6) = H(6) / (HWU / 10)
3260 H(7) = (TWL - TW): G(7) = H(7) / (TWL / 10)
3270 H(8) = (TW - TWU): G(8) = H(8) / (TWU / 10)
3280 RETURN
3285 `
3290 FOR K = 1 TO M: PRINT "G("; K; ")="; G$(K);
3300 PRINT H(K)
3320 NEXT K
3330 RETURN
3335 `
3340 PRINT "DO YOU WANT TO CHECK OR CHANGE DATA ? (Y/N) [
N ]"; : INPUT CH$: RETURN

```

BIBLIOGRAFIA

1. American Institute of Steel Construction, Inc., "Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design", 9na. Edición, Chicago, Illinois, 1989.
2. Kirsh Uri, "Optimum Structural Design", Mc Graw-Hill, U.S.A., 1981.
3. H.W. Kuhn & A.W. Tucker, "Nonlinear Programming", Proc. 2d Berkeley Symp. Math. Stat. Probab., Berkeley, California, 1950.
4. M.J.D. Powell, "An Efficient Method of Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives", Comput. J., vol. 7, 1964.
5. A.V. Fiacco and G.P. McCormick, "Nonlinear Programming, Sequential Unconstrained Minimization Techniques", John Wiley & Sons, New York, 1968.
6. P.E. Gill and W. Murray (eds.), "Numerical Methods for Constrained Optimization", Academic Press, 1976.