ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

EQUIPARACIÓN DE PERFILES DE ACERO DE NORMAS AISC CON PERFILES DE NORMAS ECUATORIANAS DISPONIBLES EN EL MERCADO NACIONAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ROBERTO CARLOS NÁJERA OCAMPO

email: lucio507986@gmail.com

DIRECTOR: ING. MDI. CARLOS OSWALDO BALDEÓN VALENCIA

Quito, Noviembre 2014

DECLARACIÓN

Yo, Roberto Carlos Nájera Ocampo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Esta obra está sujeta a la licencia Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/.

Roberto Nájera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Roberto Carlos Nájera Ocampo bajo mi supervisión.

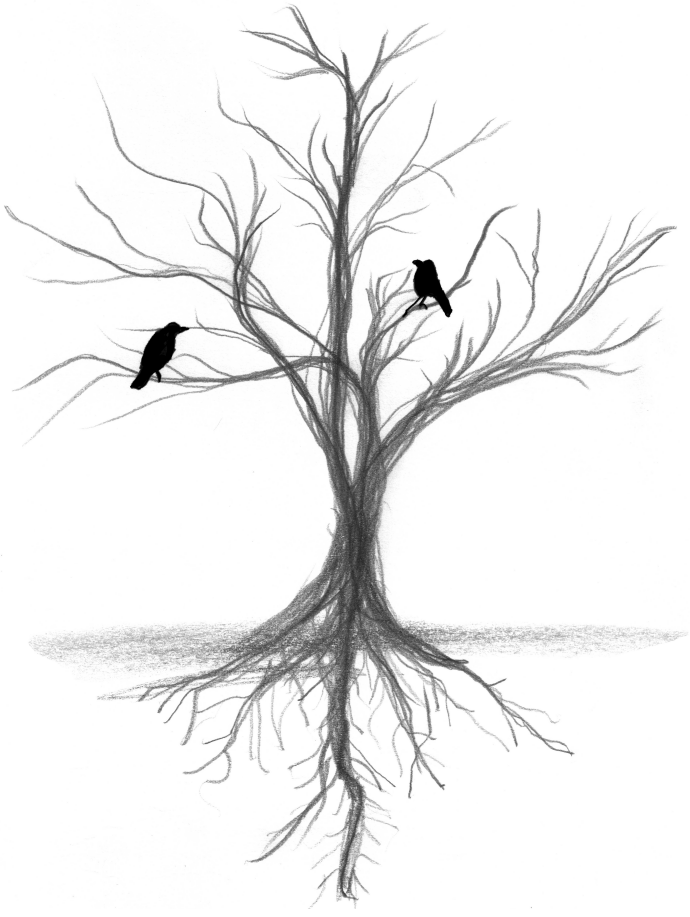
ING. MDI. CARLOS BALDEÓN VALENCIA

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que en todo momento estuvieron a mi lado, apoyándome y soportándome indistintamente de las circunstancias.
Y siempre me regalaron su inconmensurable amor.

Al pajarito que canta al lado de mi corazón, amigo de mi alma, morador universal y Supremo Controlador. Gracias por permitirme existir para servirte y por jamás haberme dejado sin saber que hacer.



DEDICATORIA

Particularmente, a mi director Carlos Baldeón. Espero que el tiempo que ha invertido en mi, resulte en una ayuda en su trabajo.

Y en general a todo diseñador de estructuras de acero en el Ecuador. Aspiro a que este trabajo les sirva de ayuda oportuna, que evite pérdidas de tiempo innecesarias y, sea un aporte para que la construcción en el Ecuador se desarrolle cada día más.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....1
1.1 Importancia del acero como material de construcción.....1
1.1.1 Ventajas del acero estructural como material de construcción.....4
1.1.2 Desventajas del acero estructural como material de construcción.....4
1.2 Diseño de estructuras de acero.....5
1.3 Elementos de las estructuras de acero.....6
1.3.1 Columnas.....6
1.3.1.1 Pandeo de columnas.....6
1.3.2 Vigas.....7
1.3.3 Tensores.....7
1.3.4 Arriostramientos.....8
1.3.5 Placas.....8
1.4 Propiedades geométricas de las secciones transversales.....8
1.4.1 Área de la sección.....8
1.4.2 Centro de masa,.....9
1.4.3 Segundo momento de área y flexión en una viga.....9
1.4.4 Radio de giro.....12
1.4.5 Módulo elástico y plástico de la sección.....12
1.4.6 Constante Torsional.....13
1.5 Perfiles estructurales.....14
1.5.1 Planta industrial de manufactura de acero ,.....15
1.5.2 Descripción y comparación entre laminado en frío y en caliente.....15
1.5.2.1 Laminado en frío.....15
1.5.2.2 Laminado en caliente 16
1.5.3 Perfiles laminados en caliente para la construcción con acero.....17
1.5.3.1 Sección tipo I 17
1.5.3.2 Sección tipo T.....19
1.5.3.3 Sección tipo C.....19
1.5.3.4 Sección tipo L.....19
1.5.4 Combinación de perfiles.....20

1.6 El Manual del AISC.....21
1.6.1 Publicaciones del AISC.....21
1.7 Selección del perfil.....22
CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DEL MERCADO ECUATORIANO DE PERFILES LAMINADOS EN CALIENTE.....24
2.1 Principales productores de acero a nivel mundial.....24
2.2 Recopilación de información del mercado nacional en tanto perfiles de acero laminados en caliente.....26
2.2.1 Normativa oficial sobre los perfiles laminados en caliente en el Ecuador 26
2.2.2 Principales comerciantes y laminadores en el Ecuador.....27
2.2.3 Perfiles encontrados en el mercado nacional.....27
2.3 Base de datos de los Perfiles Nacionales.....28
CAPÍTULO 3 GENERACIÓN DEL PROGRAMA.....29
3.1 Planteamiento de los requerimientos del programa 29
3.2 Entorno y lenguaje de programación.....33
3.3 Arquitectura del funcionamiento del Programa.....33
3.4 Desarrollo del programa 36
3.4.1 Creación de las listas desplegables.....36
3.4.1.1 Estructuración.....36
3.4.1.2 Tipo de perfil.....36
3.4.1.3 Designación.....37
3.4.1.4 Criterio de Selección.....39
3.4.2 Rutina de Equiparación.....40
3.4.2.1 Estructuración.....40
3.4.2.2 Eliminar celdas.....41
3.4.2.3 Conseguir los datos.....41
3.4.2.4 Imprimir los datos en la tabla comparativa (Perfil).....41
3.4.2.5 Posición del criterio de selección dentro de las matrices de perfiles 41
3.4.2.6 Esquema de la rutina de equiparación.....43

3.4.2.7 Seleccionar los 10 más cercanos.....45
3.4.2.8 Imprimir los datos de los perfiles seleccionados en la tabla comparativa.....45
3.4.3 Asignación del macro a un botón de comando.....45
3.5 Comparador Gráfico.....45
3.6 Código completo del programa.....46
CAPÍTULO 4 GENERACIÓN DE FÓRMULAS E ÍNDICES DE CONVERSIÓN. .47
4.1 Conversión de datos del AISC a Sistema Métrico.....47
4.1.1 Parámetros de unidades de longitud y sus exponentes.....47
4.1.2 Parámetros de unidades compuestas o adimensionales.....48
4.2 Fórmulas para parámetros no existentes en normas ecuatorianas.....48
4.2.1 Tipo I.....49
4.2.2 Tipo C.....50
4.2.3 Tipo T.....51
4.2.4 Tubos Rectangulares.....53
4.2.5 Tubos redondos.....54
4.3 Indices de conversión y formulas utilizadas (Completo).....55
CAPÍTULO 5 MANUAL DE TABLAS, NORMATIVA DE USO Y EJEMPLOS.....56
5.1 Manual de uso.....56
5.1.1 Estructuración.....56
5.1.2 Introducción.....56
5.1.3 Notas preliminares.....57
5.1.4 Uso del programa.....59
5.1.5 Ejemplo Práctico del uso del programa.....60
5.1.6 Recomendaciones para el análisis de resultados.....69
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....70

Índice de tablas

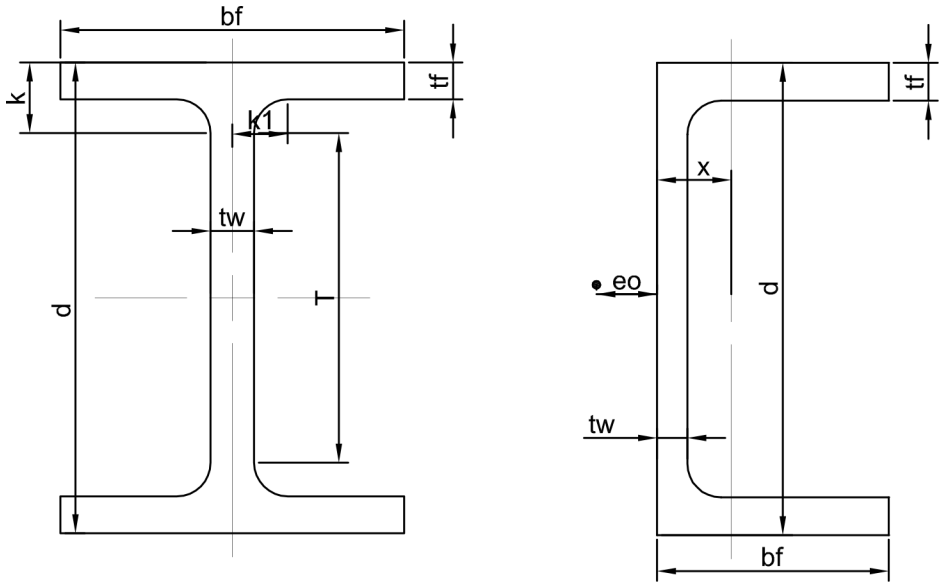
Tabla 1.1: Comparación laminado en frío.....16
Tabla 1.2: Comparación laminado en caliente.....17
Tabla 3.1: Lista de Tipo de Perfil.....37
Tabla 3.2: Lista Auxiliar de Tipos de Perfil.....37
Tabla 3.3: Tabla auxiliar Criterios de Selección (Completa).....39
Tabla 3.4: Matriz que contiene indexados los criterios de selección.....42
Tabla 3.5: Esquema para comparación.....43

Índice de Figuras

Figura 1.1: Cuadro comparativo entre 10 de las estructuras más altas.....2
Figura 1.2: "Bird's Nest" (Beijing).....4
Figura 1.3: Esquema sobre los elementos estructurales.....6
Figura 1.4: Esbeltez de las columnas de acero en base a la Curva de Euler.....7
Figura 1.5: Ruptura de una probeta de tracción.....8
Figura 1.6: Pájaro con su centro de masa en el pico.....9
Figura 1.7: Distribución de esfuerzos dentro de una viga a flexión. 10
Figura 1.8: Comparación del doblado de una regla.....11
Figura 1.9: Sección transversal rectangular.....11
Figura 1.10: Relación T,θ.....14
Figura 1.11: Perfil de aluminio extruido.....14
Figura 1.12: Grano metálico. Laminación en frío.....16
Figura 1.13: Grano metálico. Laminación en caliente.....17
Figura 1.14: Perfil tipo I.....18
Figura 1.15: Perfil tipo T.....19
Figura 1.16: Perfil tipo C.....19
Figura 1.17: Perfil tipo L.....20
Figura 1.18: Viga Curva construida con diferentes tipos de perfiles.....20
Figura 2.1: Producción de acero por países (2013).....24
Figura 3.1: Esquema de la interfaz de usuario.....32
Figura 3.2: Hoja "Equiparación".....34
Figura 3.3: Hoja "Perfiles AISC".....34
Figura 3.4: Hoja "Perfiles Ecuatorianos".....35
Figura 3.5: Hoja "Cálculos".....36
Figura 3.6: Asignación de un nombre a una lista nombrada.....38
Figura 3.7: Diagrama de flujo de la equiparación.....44
Figura 4.1: Parámetros en el perfil I.....49

Figura 4.2: Parámetros en el perfil C.....50
Figura 4.3: Parámetros en el perfil T.....51
Figura 4.4: Parámetros en Tubos rectangulares.....53
Figura 4.5: Parámetros en Tubos Redondos.....54
Figura 5.1: Contenido del archivo descargable.....57
Figura 5.2: Seguridad de Macros.....58
Figura 5.3: Planteamiento del problema.....60
Figura 5.4: Diagramas: Normal, Corte y Momento.....60
Figura 5.5: Determinación de K.....62
Figura 5.6: Sección compuesta por 2 Perfiles C.....63
Figura 5.7: Resultados C8x11.5.....64
Figura 5.8: Resultados W24x76.....69

Glosario de términos



A : Área de la sección transversal de un miembro

A_f : Área del patín a compresión

b_f : Ancho del patín de un miembro

C_b : Coeficiente de flexión dependiente del gradiente de momento

$$= 1.75 + 1.05\,(\frac{M_1}{M_2}) + 0.3\cdot(\frac{M_1}{M_2})^2$$

Cw : Constante de deformación de un miembro

d : Profundidad total de un miembro, paralelo al eje “x”

e_o : Distancia horizontal desde la arista exterior del alma de un canal a su centro de corte

E : Módulo de elasticidad

F_a : Esfuerzo axial admisible en un miembro libre de un momento flector

F_b : Esfuerzo de flexión permitido en un miembro prismático en la ausencia de fuerza axial

F_y : Esfuerzo de fluencia mínimo especificado para el acero a usar

I_x : Momento de inercia de un miembro tomado respecto al eje “x”

ID : Diámetro interior de un Tubo

J : Constante Torsional de un miembro

k : Distancia desde la cara exterior del patín al pie del filete en el alma

k_1 : Distancia del centro del alma al pie del filete en el el patín

λ : Esbeltez del miembro $= l / r_T$

l : Longitud del miembro esbelto

L_u :Longitud máxima sin apuntalar del patín de compresión en la cual se puede tomar $F_b = 0.6 F_y$

OD : Diámetro exterior de un tubo

r_T: Radio de giro de una sección que comprende el patín de compresión más el $1/3$ a compresión del área del alma, tomado sobre el eje “y” en el plano del alma.

r_x : Radio de giro de un miembro respecto al eje “x”

σ : Esfuerzo

S_x : Modulo de sección elástica tomado respecto al eje “x”

t_f : Espesor del patín de un miembro

t_w : Espesor del alma de un miembro

T : Distancia entre filetes de patín ancho o canales

$\bar{x}$: Distancia desde la cara externa del alma de un canal hasta el eje “y”

x_o : Coordenada en el eje “x” del eje de corte respecto al centroide de un miembro

$\bar{y}$: Distancia en el eje “y” al centroide desde el borde superior del patín en un perfil tipo T

y_o : Coordenada en el eje “y” del eje de corte respecto al centroide de un miembro

Z_x : Modulo de sección plástica tomado respecto al eje “x”

RESUMEN

El presente trabajo propone, en base a los parámetros geométricos de las secciones transversales, la equiparación entre los perfiles estructurales normados por el AISC[1] y los encontrados en el mercado nacional.

El resultado práctico de este proyecto es el programa informático "*Equiparador*" (para descargar el programa revisar el anexo 6). Este se compone de:

1. Interfaz del Usuario: Incluye listas desplegables para la entrada de datos, un Comparador Gráfico de proporciones, la tabla de parámetros geométricos de los perfiles más similares al seleccionado del Manual del AISC y una lista de contactos de los comerciantes de acero en el Ecuador.
2. Base de datos de Perfiles AISC: Comprende los perfiles con sus parámetros geométricos listados en el Manual para construcción de acero del AISC. Estos parámetros están convertidos al Sistema internacional para que sea posible su equiparación.
3. Base de datos de Perfiles en Ecuador: Recopila los perfiles encontrados en las normas y catálogos técnicos para la construcción estructural nacional en acero. Contiene: los perfiles de la norma DIN 1025, 1026, EuroNorma 19-57, 53-62 y 54-79 ya que las normas INEN toman las dimensiones de estas anteriores; y los perfiles pertinentes encontrados en los catálogos resultado de un estudio de campo. Están calculados los parámetros propios del AISC para poder equiparar los perfiles en todas sus propiedades.
4. Rutina de equiparación: La programación interna del programa que compara uno a uno los perfiles hasta obtener los más similares.

1 AISC: American Society of Steel Construction es una organización dedicada a la construcción en acero en Estados Unidos, la cual entre otras actividades, fija la norma de los perfiles laminados en caliente.

Equiparador esta construido sobre una hoja de cálculo y tiene su código y bases de datos abiertas para incentivar al posterior desarrollo por parte de los diseñadores de estructuras en el Ecuador. Está sin embargo bajo la licencia internacional "Reconocimiento-CompartirIgual 4.0" que garantiza que este programa se mantenga abierto, mas permite su uso para fines de lucro.

Equiparador tiene como finalidad contribuir a una rápida equiparación entre los perfiles del AISC y los perfiles nacionales.

PRESENTACIÓN

El diseño de estructuras metálicas en el Ecuador es realizado, por la mayoría de los diseñadores, utilizando el manual del AISC, debido a que éste proporciona soluciones prácticas y rápidas a varios problemas de diseño. La utilización de este manual ofrece gran ayuda y eficiencia al momento de diseñar estructuras metálicas. Sin embargo, los perfiles, definidos en este manual, no existen, generalmente, en el mercado nacional, lo que justifica la importancia de generar una herramienta que se adapte a las necesidades del país como es *Equiparador*.

El propósito de este trabajo es facilitar el proceso que actualmente consume tiempo al diseñador ecuatoriano de estructuras metálicas, que utiliza el manual del AISC, en transformar las Unidades Inglesas al Sistema Internacional, y tener que buscar entre todos los perfiles disponibles en el mercado aquel que sea más compatible con el seleccionado con el manual. Para esto se presenta un programa de código abierto, basado en una hoja de cálculo de fácil utilización, que compare y proponga los perfiles más similares, en disponibilidad nacional, para la rápida selección del diseñador; aspirando a que con esta libertad, el diseñador, de acuerdo a sus propios requerimientos, modifique y mejore a conveniencia su copia del programa.

Libertas perfundet omnia luce[1]

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El acero como material para la construcción es de suma importancia en la sociedad contemporánea. En el presente capítulo se indaga acerca de este tema dando explicaciones acerca de sus componentes, fenómenos y las propiedades pertinentes para su diseño. Brevemente se introduce al manual del AISC para la construcción con acero, publicación pertinente para el desarrollo de este proyecto.

1.1 Importancia del acero como material de construcción

Durante toda la historia, la humanidad ha emprendido en una incesante búsqueda por conquistar las alturas en la ejecución de sus estructuras. Una de las estructuras más conocidas por su altura es la Gran Pirámide de Giza (146 metros), que mantuvo el record de la estructura independiente más alta durante más de 3800 años[2]. El problema al construir hacia arriba es que cada piso superior, es un nivel más de peso que tiene que soportar la planta inferior. La única manera de poder seguir subiendo es que la planta pueda resistir la carga de todos los pisos que se sigan añadiendo. Las pirámides son un ejemplo de estructuras que podrían crecer “indefinidamente”. Pero esto, obviamente es rápidamente insostenible pues por cada nivel de altura que se quiera añadir, la base de la pirámide aumenta y esta consume mucho espacio. Para construir edificios de ladrillos de varios pisos, las paredes de cada piso inferior deben ser cada vez más gruesas para soportar el peso combinado de toda la estructura. A una altura determinada esto se vuelve invariablemente absurdo pues el espacio que queda en los pisos de abajo es muy reducido y entonces se pierde totalmente el punto de construir hacia arriba. Es evidente entonces que con los materiales ancestrales disponibles, ciertos sueños constructivos se quedan solamente en sueños.

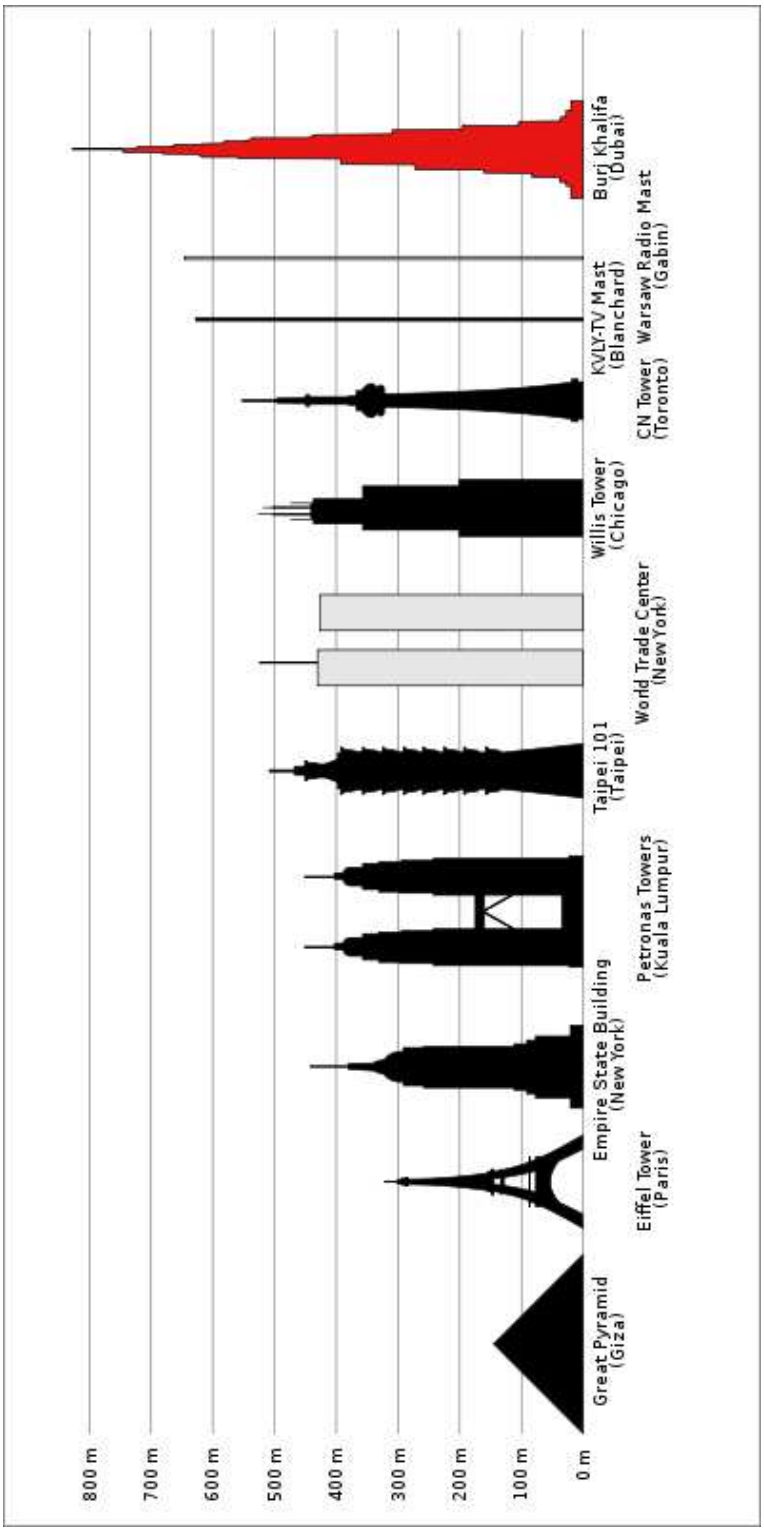


Figura 1.1: Cuadro comparativo entre 10 de las estructuras más altas

Sin embargo, desde la edad moderna hasta el día de hoy, éste record de altura se ha superado repetidas veces, con una frecuencia cada vez más acelerada y con unas alturas cada vez más imponentes. Es interesante notar en la figura 1.1 que mientras que la icónica pirámide reinó durante casi 4 milenios, 9 de las 10 estructuras comparadas fueron construidas en los 2 últimos siglos. Esto sugiere que ocurrió un cambio fundamental en la construcción de estructuras.

El acero era conocido en la antigüedad, pero su uso era escaso y costoso. Fue con la llegada de la revolución industrial y los modernos procesos de fabricación del acero que permiten obtenerlo con una composición química y propiedades mecánicas constantes, y a un precio asequible, cuando este material entró con fuerza en la actividad constructiva. Se empezaron a construir los convenientes rascacielos, permiten mucha área habitable construida sobre poca área al suelo, como el Empire State por ejemplo. Su sistema de construcción se basa en la alta relación: resistencia sobre peso propio del acero. Con esta posibilidad, se arma un armazón de acero que soporta todas las cargas y se recubre el edificio con una pared-cortina que solo tiene que soportar su propio peso[4]. Esto incentivó a que muchos arquitectos rompieran el esquema tradicional de paredes gruesas de mampostería por paredes delgadas de vidrio, sobretodo de los años 50 en Estados Unidos, logrando una gran cantidad de luz en los ambientes, una vista espectacular de la ciudad y, por consiguiente, mayor confort a los usuarios.

Actualmente, la mayor parte de estructuras industriales y comerciales, en tanto al marco que soporta las cargas, son construidas con acero estructural. Este presenta notables ventajas frente a otros materiales. Su alta velocidad en entrega de obra, flexibilidad de diseño, alta resistencia, confiabilidad, sostenibilidad, bajos costos para el proyecto y atractivo estético, hacen que este material sea el preferido de muchos diseñadores y propietarios. El acero ha revolucionado el panorama constructivo de la humanidad. En la antigüedad la altura colosal honraba a dioses y reyes, ahora glorifica a ciudades, corporaciones, pero sobretodo, al ingenio y también a la vanidad del ser humano.

1.1.1 Ventajas del acero estructural como material de construcción[5]

- Se puede entregar la obra en plazos muy cortos
- Los costos de grandes proyectos son menores en relación a otros materiales
- Gran parte de la preparación de los elementos se puede realizar en taller
- Se pueden obtener luces muy amplias sin columnas intermedias
- Se puede ampliar con facilidad la estructura en caso de ser necesario
- A nivel arquitectónico, permite una gama expresiva mucho mayor (figura 1.2)
- Se pueden obtener estructuras de mucha altura y resistencia
- Se puede realizar estructuras desmontables de alta resistencia
- Las propiedades metalúrgicas del acero permiten que este pueda ser reciclado continuamente sin degradación en su desempeño haciéndolo un material sostenible.

Figura 1.2: "Bird's Nest" (Beijing)

6

1.1.2 Desventajas del acero estructural como material de construcción

- Las propiedades de los metales cambian drásticamente con la temperatura. Si se opta por la estructura de acero se debe tomar en cuenta la temperatura de transición (condiciones frías) y los rangos de resistencia mecánica a altas temperaturas (condiciones calientes)

- Desde el punto de vista del aislamiento, la construcción con acero es pobre pues posee una alta conductividad térmica
- El acero es muy susceptible a la corrosión por lo que no se recomienda su uso expuesto en ambientes salinos u otras atmósferas agresivas, sin la debida protección.

1.2 Diseño de estructuras de acero

El diseño de una estructura de acero, como todo proyecto empieza por:

- Estudios preliminares que comprenderán principalmente: Prioridades y objetivos, análisis iniciales de suelos para determinar la capacidad portante, disponibilidad de materiales, equipos y mano de obra, costos unitarios, estudio de mercado, presupuesto estimativo de obra, análisis beneficio-costo y otros similares.
- Diseño de la geometría general de la estructura. Suposición de posibles perfiles a usar para obtener el dato del peso propio del esqueleto.
- Determinación de cargas de acuerdo a las normas vigentes de construcción
- Cálculo y obtención de reacciones en los apoyos y cargas en los elementos estructurales
- Selección de perfiles más adecuados mediante iteración de cálculo de cargas muertas, reacciones y esfuerzos.
- Diseño de acoples, tornillería, soldadura, placas base, arriostramientos de columnas, entre otros.

1.3 Elementos de las estructuras de acero

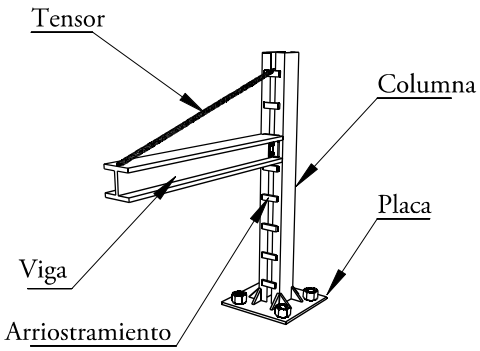


Figura 1.3: Esquema sobre los elementos estructurales

El análisis estructural de un entramado metálico, se puede simplificar dividiendo al armazón complejo en varios elementos simples (figura 1.3). Si bien la estructura funciona como un cuerpo entero, esto es el resultado de las interacciones entre los miembros que la componen, por lo que es necesario entender los comportamientos y particularidades de los elementos estructurales.

1.3.1 Columnas

Estos elementos transmiten por medio de compresión vertical, el peso de la estructura superior hacia los cimientos o columnas inferiores. Son miembros que trabajan a compresión, flexión y ocasionalmente también soportan cargas de torsión.

1.3.1.1 Pandeo de columnas

Un fenómeno representativo en las columnas es el *pandeo*. Una columna sometida a compresión empieza a pandearse en función de su esbeltez. En la figura 1.4 se detalla una clasificación de las columnas en tanto a su comportamiento frente a este fenómeno.

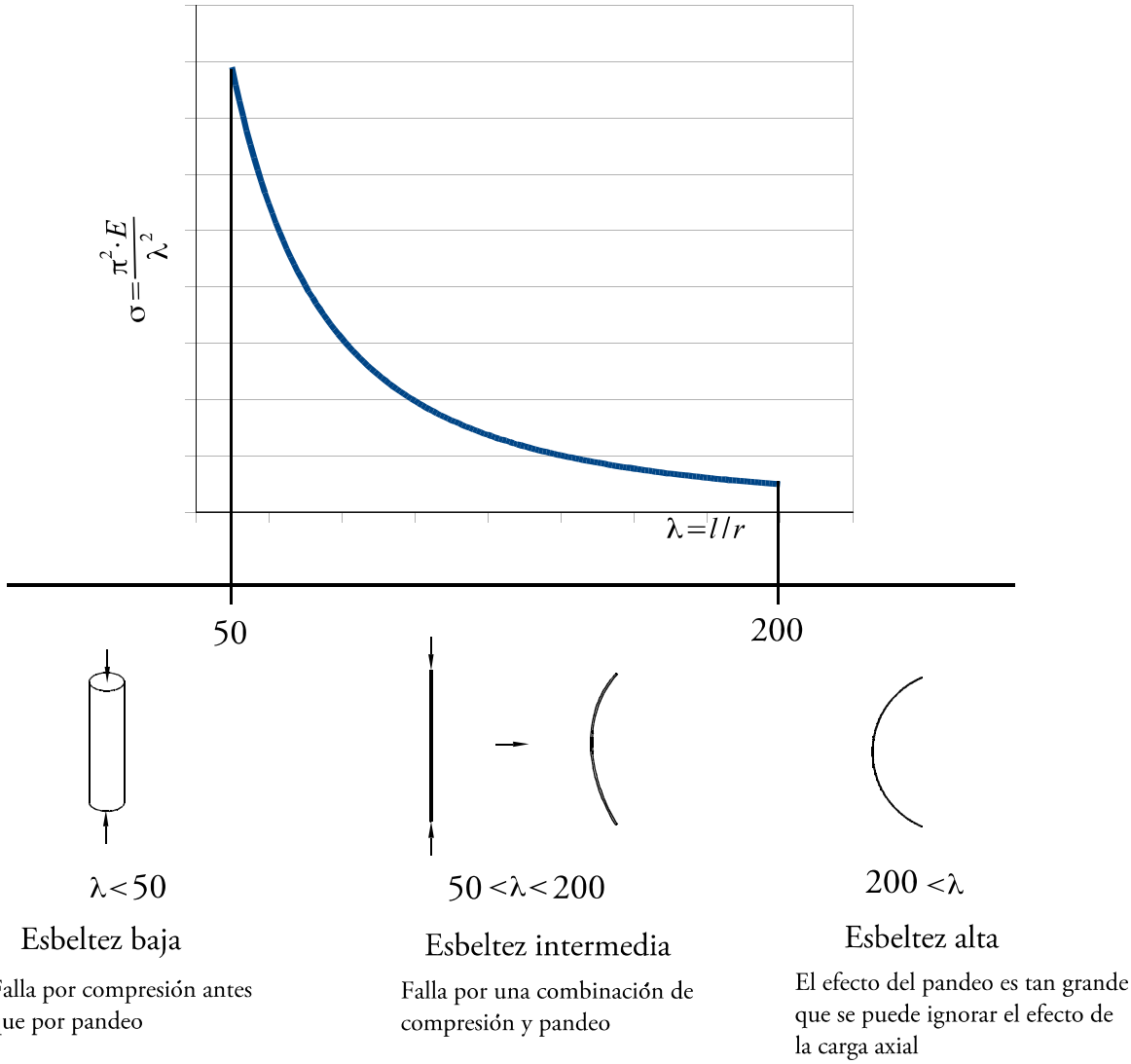


Figura 1.4: Esbeltez de las columnas de acero en base a la Curva de Euler

1.3.2 Vigas

Son elementos estructurales que su carga principal a resistir es de flexión. Generalmente soportan cargas verticales gravitacionales, tales como su propio peso y las cargas vivas, sin embargo en estructuras espaciales también deben ser capaces de resistir cargas axiales y torsionales.

1.3.3 Tensores

Los tensores son elementos que trabajan a exclusivamente tensión, pueden ser rígidos o cables.

1.3.4 Arriostramientos

Son elementos esbeltos que rigidizan sea a un elemento principal o a la estructura en general.

1.3.5 Placas

Se utilizan para conectar las columnas a los cimientos (placas base) o conectar varios miembros entre si.

1.4 Propiedades geométricas de las secciones transversales

En el diseño estructural dicta, por un lado una propiedad crítica del material y por otro lado el factor crítico correspondiente a una propiedad geométrica de la sección. Mientras la propiedad del material determina su resistencia, la propiedad de la sección precisa que tan eficientemente será utilizado ese material. Se expone a continuación los parámetros geométricos de las secciones transversales de miembros estructurales.

1.4.1 Área de la sección[7]

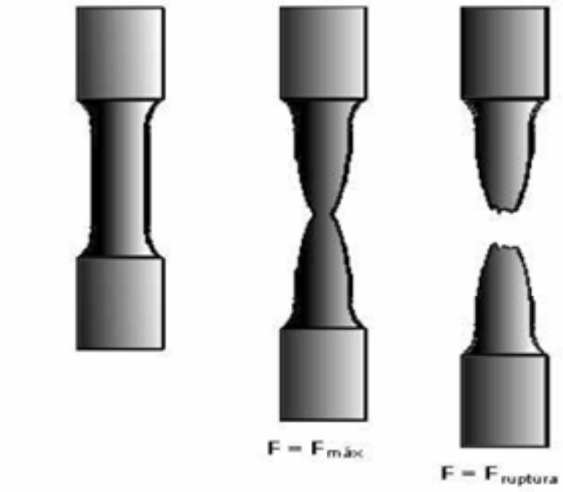


Figura 1.5: Ruptura de una probeta de tracción

La propiedad geométrica de una sección de mayor importancia es el área (A). El área de la sección transversal de un miembro estructural se utiliza en los cálculos de tracción simple, compresión y corte. En un miembro de sección

transversal variable es necesario determinar la sección en la cual ocurre el esfuerzo máximo. En la figura 1.5 de la página anterior[8] se expone una probeta de un ensayo de tracción, esta probeta está construida con un área menor en el cilindro interno para forzar a que la ruptura ocurra en esa sección.

1.4.2 Centro de masa[9],[10]

Está definido como el punto particular en el cual la suma de las distancias ponderadas de la masa distribuida de un objeto es cero. Es el punto en el que se puede considerar concentrado todo su peso (figura 1.6).

Figura 1.6: Pájaro con su centro de masa en el pico

Para el análisis de un miembro de sección transversal constante en toda su longitud y de densidad uniforme, es relevante conocer el centro geométrico bidimensional de la sección transversal o centróide pues allí se encuentra el eje neutro.

1.4.3 Segundo momento de área y flexión en una viga

También conocido como “área momento de inercia” o simplemente “momento de inercia”, es una propiedad geométrica que indica la distribución de los puntos de

un área respecto a un eje de referencia arbitrario. En la sección transversal de un miembro estructural, es la medida de la resistencia que ofrece a la rotación en función de su tamaño y geometría. Se define como:

$$I_{BB} = \int_A \rho^2 \, dA \tag{1.1}$$

donde:

$dA = área\ diferencial\ de\ la\ figura\ arbitraria$

$\rho = distancia\ desde\ el\ eje\ arbitrario\ BB\ hasta\ dA$

Esta propiedad es de importancia en la ingeniería de estructuras pues expresa la rigidez de un miembro, dato que se usa tanto en el pandeo de columnas o flexión de vigas.

La flexión no es más que tracción en una parte y compresión en la otra opuesta como se puede ver en la figura 1.7.

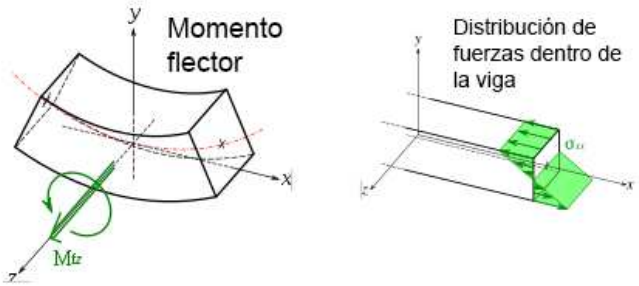


Figura 1.7: Distribución de esfuerzos dentro de una viga a flexión.

Para el uso práctico en la construcción, el eje desde el cual se calcula el momento de inercia, se ha colocado convenientemente en los centróides de la sección. Un ejemplo que ilustra claramente el efecto de la posición del eje de referencia es el de flexionar una regla en los 2 ejes diferentes que se ven en la figura 1.8.

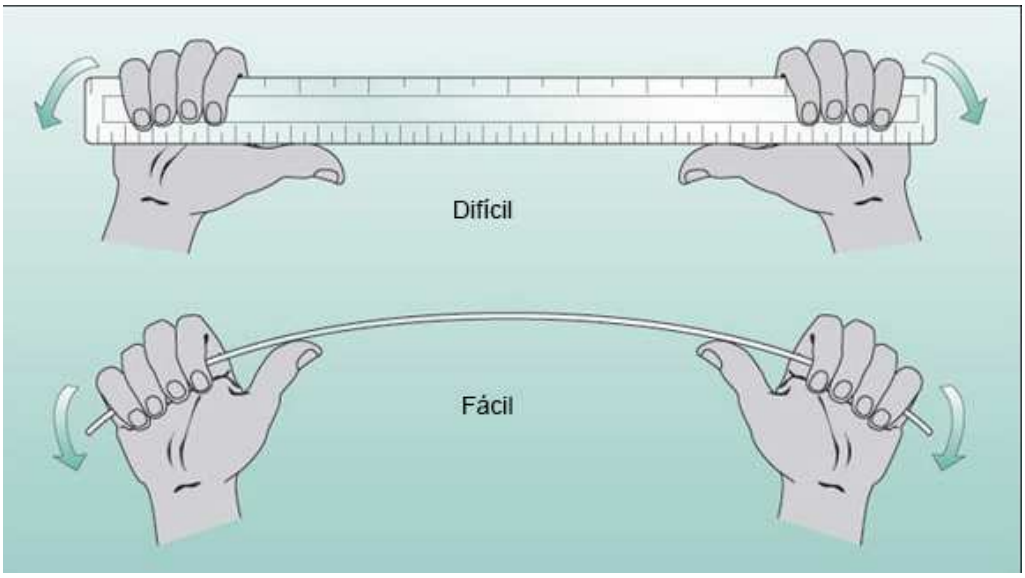


Figura 1.8: Comparación del doblado de una regla

[11]

En la figura 1.9 se puede ver una sección transversal de la regla. Para el primer caso de flexión en la regla se toma al eje "y" para la referencia del momento de inercia y para el segundo el eje "x". La distancia b/2 es mayor que h/2 lo que hace que el momento de inercia sea muy diferente. La regla es la misma pero su resistencia a la flexión, dependiendo de la dirección, cambia significativamente.

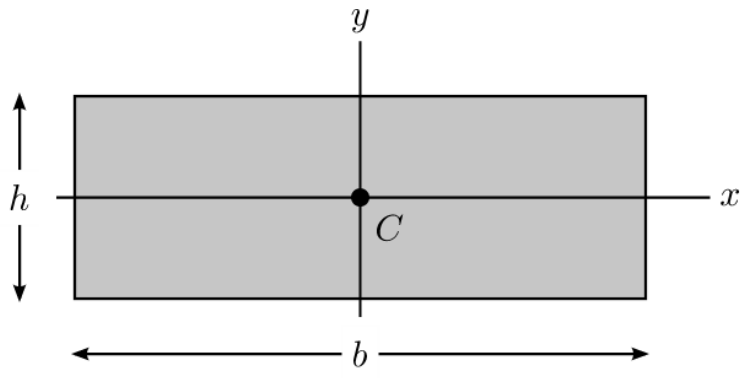


Figura 1.9: Sección transversal rectangular

1.4.4 Radio de giro[12]

Se define al radio de giro como:

$$r_{BB} = \sqrt{\frac{I_{BB}}{A}} \tag{1.2}$$

siendo:

$r_{BB} = Radio\ de\ giro\ respecto\ al\ eje\ BB$

$I_{BB} = Momento\ de\ Inercia\ respecto\ al\ eje\ BB$

$A = Área\ de\ la\ sección\ transversal$

El radio de giro es una propiedad útil en la estimación de la rigidez de una columna. r es la distancia desde el eje neutro de una área plana a un punto en que se puede considerar concentrada toda el área, de tal manera que $I = A \cdot r^2$

Generalmente este eje son los ejes centroidales principales. Si estos no son iguales, la columna tiende a pandearse en el eje con menor momento de inercia. Como ejemplo, una columna elíptica tiende a pandear en la dirección del eje más pequeño.

1.4.5 Módulos elástico y plástico de la sección[13]

El módulo de la sección es una propiedad usada en el diseño de vigas. El módulo elástico se lo aplica hasta el punto de fluencia del material en cuestión. Se define como:

$$S_{BB} = \frac{I_{BB}}{y} \tag{1.3}$$

donde:

$S_{BB} = Módulo\ elástico$

$I_{BB} = Momento\ de\ inercia$

$y = distancia\ desde\ el\ eje\ neutro\ a\ una\ fibra\ determinada$

generalmente se utiliza como valor de y : c = distancia desde el eje a la fibra más externa, $d/2$ = hemiprofundidad de un perfil simétrico y $\bar{y}$ = distancia de la cara externa del patín al eje neutro.

El módulo plástico se lo utiliza en materiales donde el comportamiento plástico (irreversible) es dominante. Normalmente no se encuentra este comportamiento de manera intencional en los diseños. Se lo define como:

$$Z_p = A_C \cdot y_C + A_T \cdot y_T \tag{1.4}$$

donde:

$Z_p = Módulo\ plástico\ de\ la\ sección$

El eje neutro plástico se define como el eje que divide a la sección tal que la fuerza de compresión en el área de compresión iguale a la fuerza de tensión en el área de tensión.

$A_{C,T} = área\ de\ compresión/tracción$

$y_{C,T} = distancia\ desde\ el\ eje\ neutro\ plástico\ a\ los\ centroides\ locales\ de\ las\ áreas\ respectivas$

1.4.6 Constante Torsional

Es una constante de proporcionalidad entre el torque aplicado al eje longitudinal de un miembro de sección transversal uniforme y la deformación angular resultante. Análogo a un momento de Inercia angular. Responde a la siguiente formula:

$$J = \frac{T \cdot L}{\theta \cdot G} \tag{1.5}$$

donde:

$J = Constante\ Torsional$

$T = Torque$

$L = longitud\ de\ la\ viga$

$\theta = ángulo\ de\ deformación$

$G = módulo\ de\ elasticidad\ transversal\ (Corte)$

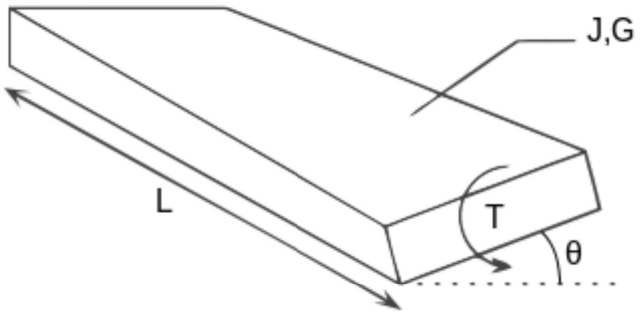


Figura 1.10: Relación T,θ

14

1.5 Perfiles estructurales

Para los elementos estructurales arriba descritos existe un tipo especifico de geometría que responderá de mejor manera a las solicitaciones de cada uno. Esta geometría es el resultado volumétrico de la proyección de un contorno bidimensional(figura 1.3)[15]. A este volumen se lo conoce como “perfil estructural”. Se expondrá a continuación los diferentes tipos de perfiles estructurales fabricados en acero y el proceso más adecuado para obtenerlos.

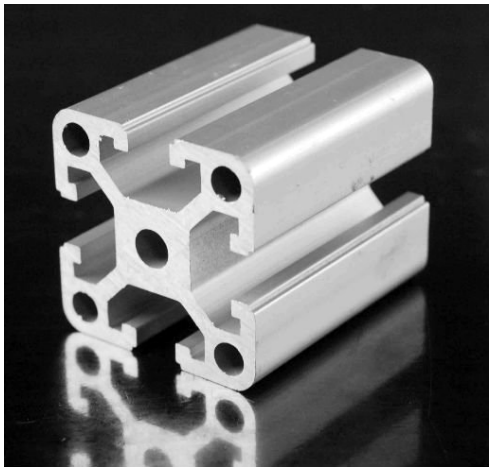


Figura 1.11: Perfil de aluminio extruido

1.5.1 Planta industrial de manufactura de acero [16],[17]

En una planta integrada de acero se realizan las siguientes funciones para la producción primaria de acero.

- Producción de hierro
- Producción de acero
- Fundición y colado
- Laminado de palanquillas (reducción del tamaño final del colado)
- Laminado a producto (Formas terminadas estandarizadas)

En la planta se procesa mineral de hierro, coque, calizas y otros aleantes para producir diferentes tipos de aceros. Para la colada se utiliza también acero de reciclaje y varias técnicas especiales para obtener las cantidades especificas de aleantes deseados. Una vez fundidas las palanquillas de acero se realiza un recocido de homogenización para tener una buena estructura molecular interna y una composición química homogénea antes de llevar al proceso de laminado.

1.5.2 Descripción y comparación entre laminado en frío y en caliente

Durante el proceso de laminación, el material sufrirá otros cambios internos dependiendo de la temperatura a la que se realice la operación. Si se realiza el laminado a una temperatura mayor a la temperatura de recristalización, se conoce como laminado en caliente y si se realiza por debajo de esta, laminado en frío.
El tipo de laminación que se seleccione presentará diversas propiedades que se analizarán a continuación.

1.5.2.1 Laminado en frío

Si se realiza una laminación en frío de acero a temperatura ambiente, el proceso es como una prensa continua. La prensa aplasta al material y este es forzado a

adoptar un volumen más pequeño. Como se puede ver en la figura 1.4, internamente en el material los granos del metal se estiran deformándose permanentemente y causando esfuerzos internos en el material por lo que éste se endurece. [18],[19]

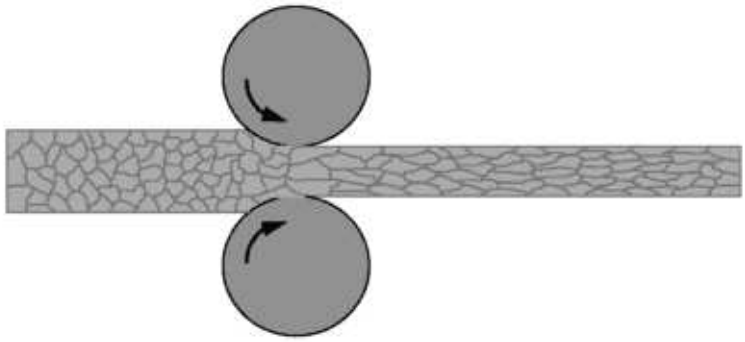


Figura 1.12: Grano metálico. Laminación en frío

Tabla 1.1: Comparación laminado en frío

Ventajas	Desventajas
Buen acabado superficial	Anisotrópico
Buenas tolerancias dimensionales	Material con esfuerzos internos
Alta dureza	Frágiles, poco ductiles
Buena resistencia mecánica	Piezas más pequeñas

1.5.2.2 Laminado en caliente

Para laminar en caliente un volumen de acero, este debe encontrarse a una temperatura de entre 550 y 650°C dependiendo de la composición química y el

grado de sobrecalentamiento estimado. En esta temperatura se dice que se ha superado la temperatura de recristalización. Esto significa que en el material nuevos granos empiezan a crecer desde los límites de grano anteriores. Cuando esto sucede durante la laminación, los granos que fueron deformados por la presión, se transforman a nuevos granos sin previos esfuerzos y sin direccionalidad de propiedades. Esto permite obtener piezas de formas complejas y una reducción importante del espesor del perfil sin la falla del material.

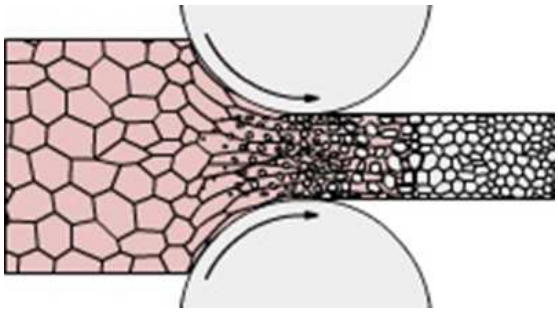


Figura 1.13: Grano metálico. Laminación en caliente

20

Tabla 1.2: Comparación laminado en caliente

Ventajas	Desventajas
Isotrópico	Mal acabado superficial
Buena tenacidad	Tolerancias dimensionales mayores
Estructura cristalina homogenea	
Piezas de gran tamaño	

1.5.3 Perfiles laminados en caliente para la construcción con acero

1.5.3.1 Sección tipo I [21]

La Sección tipo I, también conocida como H, W (por "Wide flange" (patín ancho en inglés)), Universal Beam (UB), Rolled Steel Joist (RSJ), o doble-T es un tipo de perfil diseñado específicamente para resistir una alta carga de flexión con un bajo peso propio.

Este perfil funciona de esta manera debido a la buena relación que se obtiene de un alto momento de inercia respecto a una baja área, que resulta en un bajo peso. Una viga en flexión soporta altos esfuerzos en las fibras mas alejadas del eje neutro, por esto es que en estas regiones es donde más material debe colocarse para prevenir la falla del elemento. Y por el contrario se necesita poco material en el área cerca del eje neutro por lo que el alma de la sección es generalmente delgada.

Figura 1.14: Perfil tipo I

[22]

1.5.3.2 Sección tipo T[23]

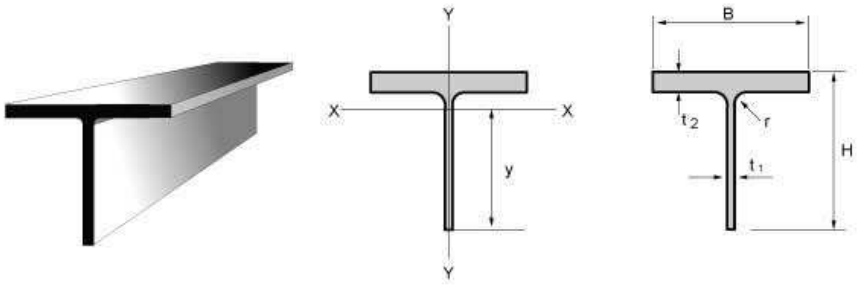


Figura 1.15: Perfil tipo T

[24]

El Perfil tipo T a diferencia del perfil tipo I no posee un patín inferior. El patín resiste cargas de compresión y el alma resiste cualquier posible esfuerzo de corte.

1.5.3.3 Sección tipo C

La sección transversal tipo “C” es comúnmente denominada canal.

Figura 1.16: Perfil tipo C

[25]

1.5.3.4 Sección tipo L

La sección transversal es en “L” y generalmente se los conoce como ángulos. Se utilizan para secciones combinadas y elementos de acople.

Figura 1.17: Perfil tipo L

[26]

1.5.4 Combinación de perfiles

Los perfiles anteriormente indicados solucionan hasta cierto límite una cantidad determinada de necesidades. Es en la combinación de estos que se pueden obtener elementos compuestos de más resistencia o figuras especiales. El la figura 1.18 se puede ver una viga armada por la combinación de tubos cuadrados de diferentes tamaños.

Figura 1.18: Viga curva construida con diferentes perfiles

1.6 El Manual del AISC

El American Institute of Steel Construction (AISC) es una organización técnica sin fines de lucro fundada en 1921 en la ciudad de New York para servir a la comunidad de diseño en acero e industria de la construcción de los Estados Unidos. La idea principal era unificar y estandarizar la construcción en acero de puentes y estructuras que hasta ese entonces era muy desordenado en los Estados Unidos. Los objetivos planteados del AISC fueron al momento de su fundación los siguientes:

- Establecer a la AISC como una única autoridad sobre códigos acerca del acero que sea reconocida por autoridades de códigos de construcción y diseñadores
- El AISC establecería un compendio de tablas y normas para todas las acerías de los Estados Unidos intentando eliminar la confusión creada por la existencia de numerosos y diversos manuales producidos por las empresas laminadoras. La AISC les pediría a las laminadoras que adopten sus estándares para publicaciones siguientes, así aceptando a el AISC como autoridad.
- El AISC establecería un código uniformizado para el uso de toda la industria, incluyendo laminadoras y fabricantes, para establecer una referencia uniforme que contribuya al desarrollo de toda la industria
- Se establecerán y mejorarán cursos universitarios acerca de la construcción en acero
- El AISC servirá como autoridad que comercialice el uso eficiente y económico del acero para arquitectos, ingenieros profesionales y constructores.

1.6.1 Publicaciones del AISC

El apoyo económico continuo y participación activa de sus miembros en actividades de la ingeniería, investigación y desarrollo permitieron la publicación

de varios documentos técnicos. A continuación se expone un resumen de las publicaciones más destacadas:

- Specification for Structural Steel Buildings (ANSI-AISC 360)
- AISC Code of Standards Practice for Structural Steel Buildings and Bridges (AISC 303)
- *AISC Steel Construction Manual*. La publicación más conocida y usada del AISC. Fue desarrollada desde 1923 en varias publicaciones y actualmente contiene fórmulas y gráficos de ayuda para encontrar los esfuerzos admisibles en columnas, entramados de vigas y vigas en voladizo; Tablas de dimensiones, propiedades y cargas admisibles de todos los perfiles de columnas y vigas laminados en los Estados Unidos; Datos sobre ángulos de conexión, placas base, miembros juntos, valores de remaches, pernos y muchas otras herramientas útiles para un diseño practico.

1.7 Selección del perfil

Entendiendo las propiedades geométricas se puede tener un criterio sobre como seleccionar un perfil para una estructura. Como se ha visto anteriormente, existen diferentes tipos de geometrías y posiciones que responden mejor a diferentes tipos de cargas. Por ejemplo: si se va a seleccionar un perfil para una viga, generalmente la carga determinante a soportar es el momento flector máximo por lo que generalmente se utilizarán perfiles tipo I. Los diversos parámetros geométricos como el área y el momento de inercia son las propiedades técnicas que un diseñador revisa para la selección del tipo de perfil. A estos parámetros técnicos geométricos se los llama de ahora en adelante *criterios de selección*.

El diseñador elije el tipo de perfil que va a utilizar basado en el criterio de selección. Con el tipo de perfil, se supone un perfil inicial para aproximar el posible peso de la estructura. Se obtienen los esfuerzos actuantes en cada miembro estructural y se escoge otro que cumpla o sobrepase las condiciones

propuestas. Una vez escogido el perfil, se utiliza el nuevo valor del peso indicado y se vuelven a realizar los cálculos de selección del perfil hasta que se cumplan con seguridad las condiciones de carga y se utilice el perfil más liviano y económico posible. Esto se conoce como el método iterativo de selección del perfil.

CAPÍTULO 2
ANÁLISIS DEL MERCADO ECUATORIANO DE PERFILES LAMINADOS EN CALIENTE

En este capítulo se contempla el estado actual de la producción mundial del acero junto con las normas que se utilizan respecto a su geometría. Se recopilarán tanto la documentación vigente que norma actualmente la geometría de los perfiles laminados en caliente en el Ecuador, como los catálogos de los principales comerciantes de perfiles laminados en caliente del Ecuador.

2.1 Principales productores de acero a nivel mundial

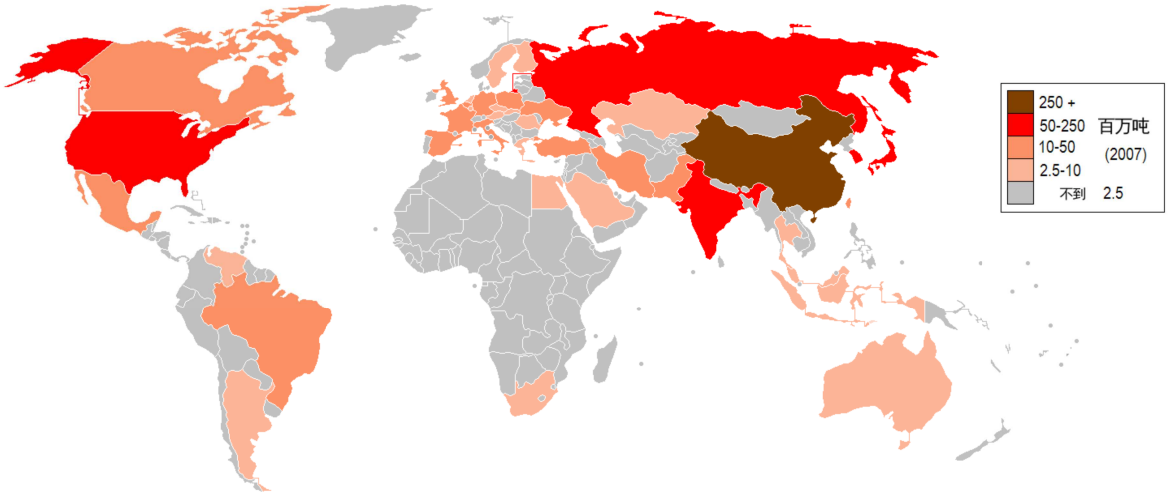


Figura 2.1: Producción de acero por países (2013)

La figura 2.1 muestra el estado mundial de la producción de acero. El único país en el mapa de color café es China. Sólo gráficamente se aprecia que ningún otro país supera las 250 millones de toneladas métricas anuales en producción. Numéricamente, esto es aun más evidente (anexo 1). China hoy por hoy es el mayor productor de acero, superando hasta en 5 veces al volumen del siguiente productor que es la Unión Europea.

Sin embargo, la producción de acero no es realizada en si por un país

determinado, sino concretamente por las empresas establecidas en este. Se debe entonces mencionar que si bien la mayoría de las empresas productoras de acero son establecidas en su país de origen, el panorama de la producción de acero en tanto a las empresas productoras es un tanto diferente (anexo 2). La mayor empresa es la Arcelor-Mittal establecida en Luxemburgo con diversas plantas de producción alrededor de todo el mundo.

La Arcelor-Mittal es la fusión de la Mittal Steel(India) con la antigua Arcelor, que a su vez era la fusión de Aceralia(España), Usinor(Francia) y Arbed (esta última era la asociación de acerías en Luxemburgo de Burbach, Eich y Dudelange que siempre estuvo en constante crecimiento). He ahí la razón de su titánica participación mundial. La Arcelor-Mittal trabaja mundialmente con la norma pedida por el cliente, sin embargo la preferida al parecer debido a la posición, experiencia y equipos de las fábricas previas es la Norma EU 19-57 y EU 53-62.

Como segundo productor de acero en el mundo se encuentra a la unión europea, sin embargo a pesar de que existe una norma general dentro de todos los países (EN), dentro de algunos países se utilizan normas propias, por ejemplo Alemania (DIN) y reino unido (UB) por lo que no se puede considerar como una producción única.

Basado en el análisis supraescrito por volumen de producción y afectado por la norma de uso; las normas más utilizadas a nivel mundial son entonces:

1. GB (China)
2. JIS (Japón)
3. EU (Unión Europea)

Por su proximidad física a nuestro país conviene también mencionar a la Gerdau. Esta empresa establecida en Porto Alegre(Brasil) con varias plantas en Brasil, Argentina, Canadá, Chile, Colombia, República Dominicana, Guatemala, India, México, Perú, España, Estados Unidos, Uruguay y Venezuela ocupa el primer lugar como productor en América y el 15ºto a nivel mundial. Varios de los perfiles importados al Ecuador provienen de esta compañía.

2.2 Recopilación de información del mercado nacional en tanto perfiles de acero laminados en caliente

2.2.1 Normativa oficial sobre los perfiles laminados en caliente en el Ecuador[27]

De una consulta al INEN se obtuvo la siguiente lista de normas relacionadas con los perfiles laminados en caliente y elementos estructurales de construcción:

- NTE INEN 2 215:99 ; Perfiles de acero laminados en caliente. Requisitos.
- NTE INEN 2 224:2008 ; Perfiles angulares estructurales de acero laminados en caliente. requisitos.
- NTE INEN 2 228 ; Perfiles estructurales H de acero laminados en caliente Requisitos. (Serie IPBv)
- NTE INEN 2 230 ; Perfiles estructurales I de acero laminados en caliente. Requisitos. (Serie IPE).
- NTE INEN 2 231 ; Perfiles estructurales I de acero laminados en caliente. Requisitos. (Serie IPN).
- NTE INEN 2 232 ; Perfiles estructurales H de acero laminados en caliente. Requisitos. (Serie IPBI)
- NTE INEN 2 233 ; Perfiles estructurales H de acero laminados en caliente. Requisitos. (Serie IPN)
- NTE INEN 2 234 ; Perfiles estructurales T de acero laminados en caliente. Requisitos

Estas normas hacen referencia a la norma DIN 1025 para sus dimensiones. Las páginas exactas de referencia del INEN se pueden revisar en el anexo 3 y la base de datos de perfiles de las Euronormas EU19-57, EU53-62, DIN 1025 y DIN 1026 (dependiendo del tipo de perfil correspondiente a cada norma) se puede obtener de www.infosteel.be/publicaties/SECTIONS-2008-1-FR-EN-DE.xls.

2.2.2 Principales comerciantes y laminadores en el Ecuador

Se realizó una búsqueda en la red y en la página web de socios de Fedimetal(Federación Ecuatoriana de Industrias del Metal)[28] por los principales comerciantes y laminadores en el Ecuador y se obtuvo la siguiente lista:

- Acero comercial
- IPAC
- Adelca
- Dipac
- Novacero
- Ferro Torre S.A
- Sedemi
- DisHierros

Se enviaron cartas y se acudió personalmente a preguntar a los vendedores de acero que se tomaron la molestia de aceptar la entrevista. De este estudio de campo se obtuvieron las conclusiones del siguiente literal.

2.2.3 Perfiles encontrados en el mercado nacional

Dentro de los catálogos de Novacero, DIPAC, IPAC y DisHierros; se evidencia que tienen como referencia a la norma NTE INEN 2215. Aquellos que laminan sólo proveen perfiles en estas normas como por ejemplo Novacero, mientras que los que importan, pueden tener cualquier tipo de perfil de todo el mundo incluyendo los del AISC pero con la desventaja de que su disponibilidad depende del stock importado.

Algunos comerciantes ofrecen el servicio de perfiles armados de planchas soldadas según especificaciones pedidas por el cliente. Estos son armados por el proceso SAW que permite una gran cantidad de amperaje para la gran cantidad de deposito de material necesario para la correcta unión de las placas. Sin

embargo este bien estructural no se incluirá dentro del programa debido a que no es laminado en caliente y sus propiedades mecánicas varían significativamente debido al proceso de soldadura.

2.3 Base de datos de los Perfiles Nacionales

Como explicado anteriormente, dentro del país circulan perfiles de todas las normas sin embargo no representan un volumen significativo en comparación a los perfiles con geometría semejante a la normada por el INEN. Por lo que no se incluyen estos perfiles dentro de la base de datos y se coloca en el programa un contacto a los comerciantes de acero.

Se organiza los diferentes tipos de perfiles en tanto su semejanza a los perfiles del AISC de la siguiente manera:

- Tipo W, S, M, HP
  - IPE, IPN, HE, HL, HD, HP
- Tipo C, MC
  - UPE, UPN
- Tipo WT, ST, MT
  - ½ IPE, ½ IPN, ½ HE, ½ HL, ½ HD, ½ HP ; Todos obtenidos de la bisección de los originales
- Tipo L
  - ángulos de la norma NTE INEN 2224
- Tubos rectangulares
  - Tubos encontrados en catálogos
- Tubos redondos
  - Tubos encontrados en catálogos

CAPÍTULO 3
GENERACIÓN DEL PROGRAMA

En este capítulo se desarrolla el programa propiamente dicho. Se destaca que este está bajo una licencia “creative commons” que permite su uso, reproducción, modificación e incluso su uso para fines comerciales pero debe ser siempre atribuida su creación y cualquier posterior versión debe llevar la misma licencia. Es de libre acceso, libre edición de base de datos y libre edición del código fuente con la esperanza que evolucione de forma propia con cada diseñador. Personalmente, creo en el poder de la libertad, voluntad y tiempo de los humanos como herramientas de gran potencial si cada uno es otorgado la posibilidad de ser consciente y responsable de las propias decisiones.

3.1 Planteamiento de los requerimientos del programa

El objetivo del programa es proporcionar una herramienta de equiparación entre perfiles del AISC y los disponibles nacionalmente. Para el caso de un diseño con el manual del AISC dentro del Ecuador se proponen los siguientes pasos a seguir:

1. Determinación de la geometría, cargas, deformaciones y apoyos
2. Diseño y selección iterativa de los perfiles adecuados utilizando el manual del AISC
3. Equiparación al perfil disponible en el mercado nacional más conveniente con la utilización del programa.

Como se revisó en el capítulo 1 de este documento, la selección del perfil geométrico de un miembro estructural depende del tipo de carga que este va a resistir. El manual del AISC es una herramienta muy útil pues resume complicados cálculos estructurales en formulas prácticas para obtener un parámetro de un perfil que se buscan en sus propias tablas.

El programa debe entonces ser capaz de comparar los perfiles dependiendo de estos parámetros geométricos o criterios de selección (A, d, Ix, …)

Puesto que los perfiles no son iguales tampoco lo serán sus propiedades y la equiparación que realiza el programa es por cumplimiento porcentual del criterio de selección. Para facilidad del usuario del programa a este cumplimiento se le conocerá como índice comparativo. El perfil AISC siempre lleva entonces el índice = 1 pues es el perfil patrón a comparar y los otros obtienen su índice con la relación de su criterio de selección con la del perfil patrón. Por ejemplo, el perfil AISC con un peso propio por metro de longitud de 59.53 kg/m lleva un índice de 1 y un perfil con 57.4 kg/m llevará un índice de 0.9642 en ese caso de comparación.

$$\frac{C_{EC}}{C_{AISC}} = \frac{57.4}{59.53} = 0.9642 \tag{3.1}$$

donde:

$C_{EC} = Valor\ del\ Criterio\ de\ selección\ del\ perfil\ ecuatoriano$

$C_{AISC} = Valor\ del\ Criterio\ de\ selección\ del\ perfil\ del\ AISC$

Como entradas debe haber 3 ventanas desplegables:

- El tipo de perfil a seleccionar (W,H,S,M, …)
- La designación específica (ej: W36x300)
- El criterio de selección. (Sx)

Existe un botón de comando que da inicio a las rutinas de cálculo y un botón que

cambia las unidades entre el Sistema inglés y el Sistema Internacional una vez realizada la equiparación.

Se presenta en la parte inferior una matriz con los resultados de la equiparación. Esta matriz contiene una cabecera con título y descripción de las celdas inferiores, el perfil seleccionado a equiparar y 10 perfiles equiparados de una lista de perfiles nacionales; 5 de los cuales tienen un índice comparativo menor al seleccionado y los otros 5 restantes tienen uno mayor. Al lado izquierdo de cada perfil hay un botón de opción que permite realizar una comparación gráfica de proporciones en un recuadro en donde se dibujan a escala el perfil del AISC de un color y el perfil nacional adyacente al botón de opción.

Al lado derecho del recuadro para la comparación gráfica hay una tarjeta de contacto de los principales comerciantes de acero en el Ecuador que contiene su página web, un contacto en línea y un teléfono.

Se indica en la figura 3.1 un esquema del resultado final de la interfaz del usuario del Programa de equiparación.

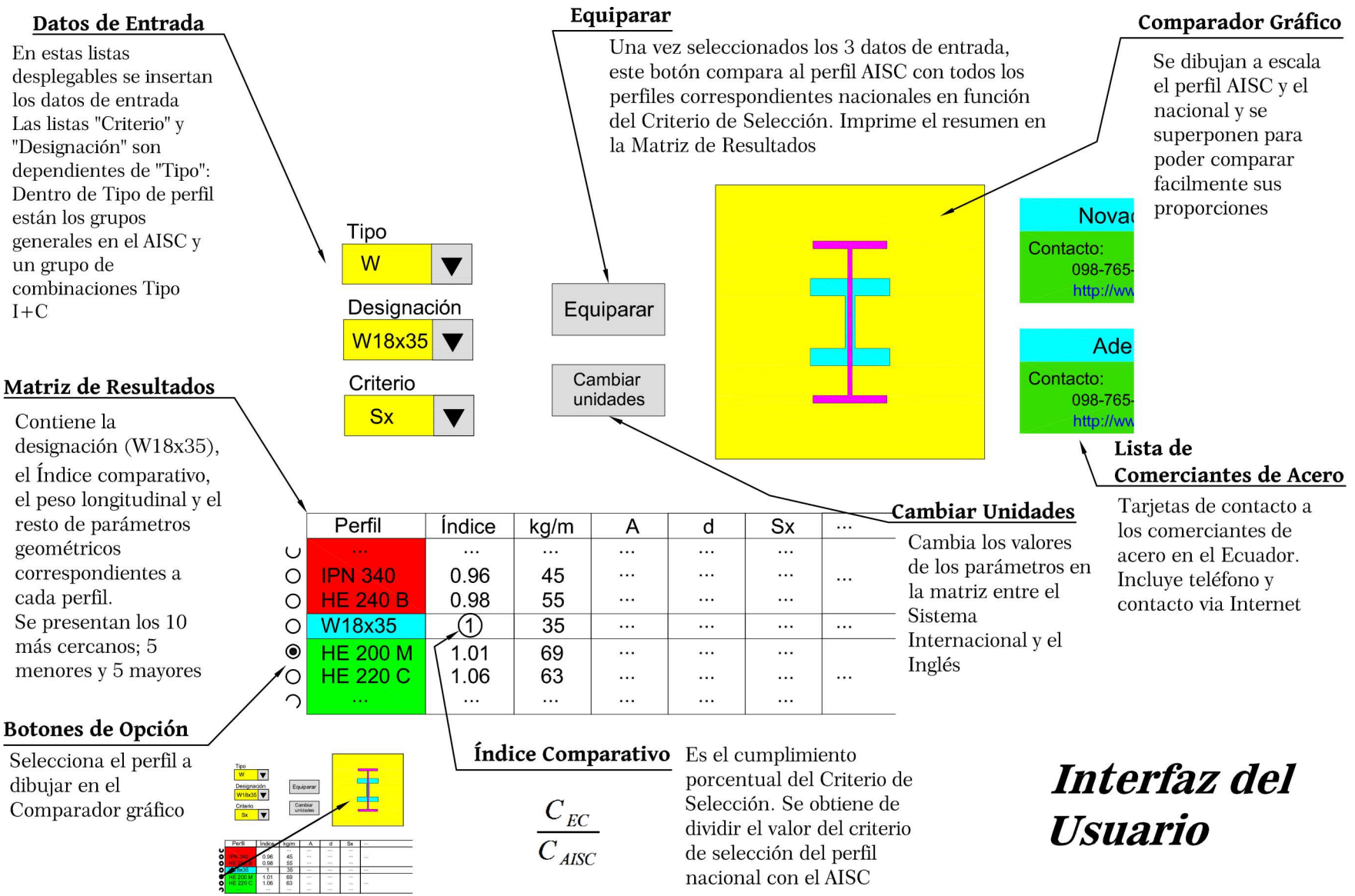


Figura 3.1: Esquema de la interfaz de usuario

Interfaz del Usuario

3.2 Entorno y lenguaje de programación

El programa se lo realiza en el entorno de una hoja de cálculo por su facilidad y familiaridad de uso por cualquier persona que haya tenido contacto con un ordenador. Está publicado en la red con la intención de que cualquier persona pueda descargarlo y utilizarlo para su uso personal en el diseño de estructuras dentro del Ecuador. Con esto en mente se selecciona el OpenOffice Calc debido a que este entorno de hoja de cálculo es de descarga libre y gratuita, asegurando de esta manera de que a ninguna persona se le niegue el uso del programa por no tener licencia ni de un programa ni sistema operativo pagado.

Dentro del OpenOffice Calc, existen 4 diferentes tipos de lenguajes disponibles para la programación de macros:

1. OpenOffice.org Basic
2. JavaScript
3. BeanShell
4. Python

OpenOffice.org BASIC tiene comandos preestablecidos de control sobre las hojas de cálculo que agilitan tanto la programación como el uso de recursos computacionales. Por esto se lo elige como el lenguaje de programación.

3.3 Arquitectura del funcionamiento del Programa

El libro en el cual se desarrolla el programa tiene 4 hojas de cálculo:

1. Equiparación: Esta hoja es la de interacción con el usuario. Aquí se ingresan los datos para la equiparación y también se despliegan los resultados.

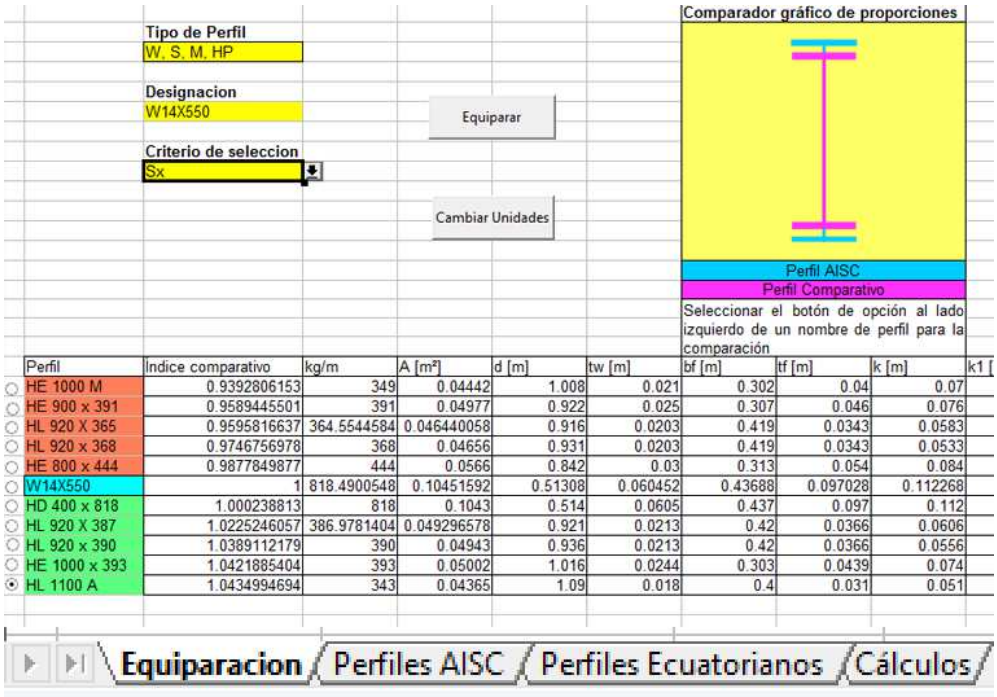


Figura 3.2: Hoja "Equiparación"

2. Perfiles AISC: Están todos los perfiles del AISC junto con los parámetros geométrico técnicos y los índices de conversión.

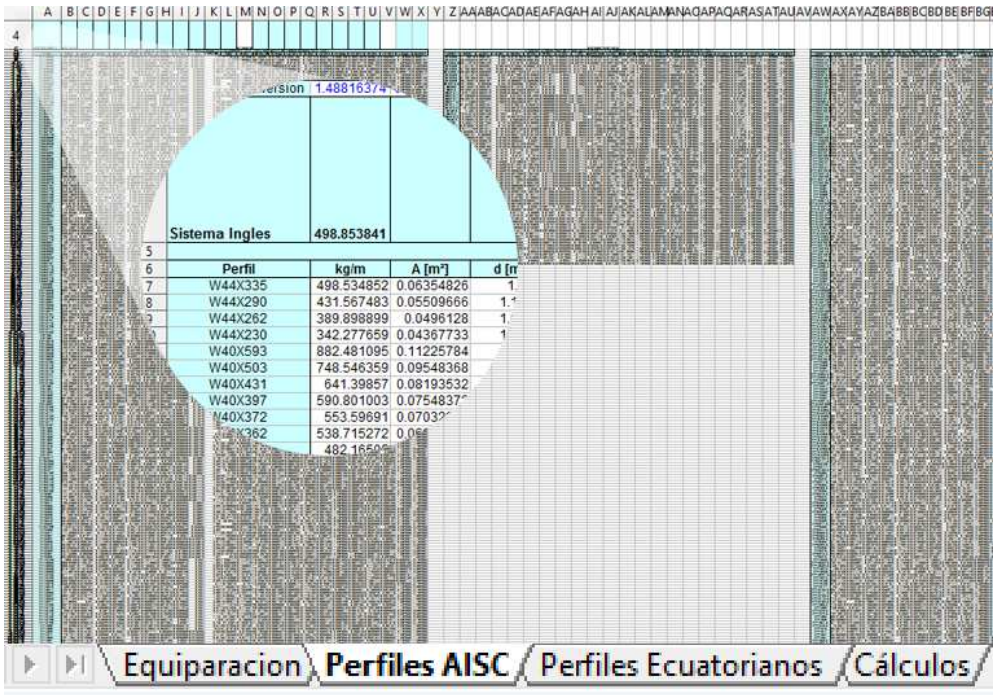


Figura 3.3: Hoja "Perfiles AISC"

3. Perfiles Ecuatorianos: Están todos los perfiles obtenidos de las encuestas a los fabricantes e importadores de perfiles laminados en caliente al Ecuador.

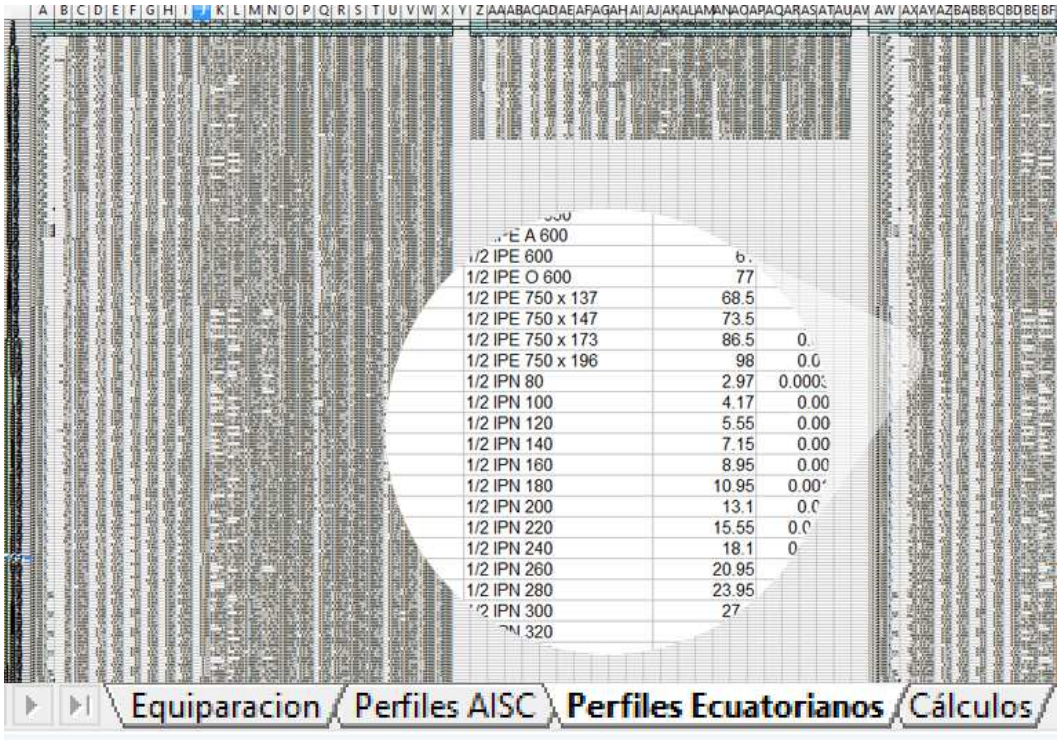


Figura 3.4: Hoja "Perfiles Ecuatorianos"

4. Cálculos: En esta hoja corre el programa. Aquí se realizan los cálculos, la equiparación y ordenamiento. Además aquí se encuentra cualquier objeto auxiliar para el funcionamiento del programa.

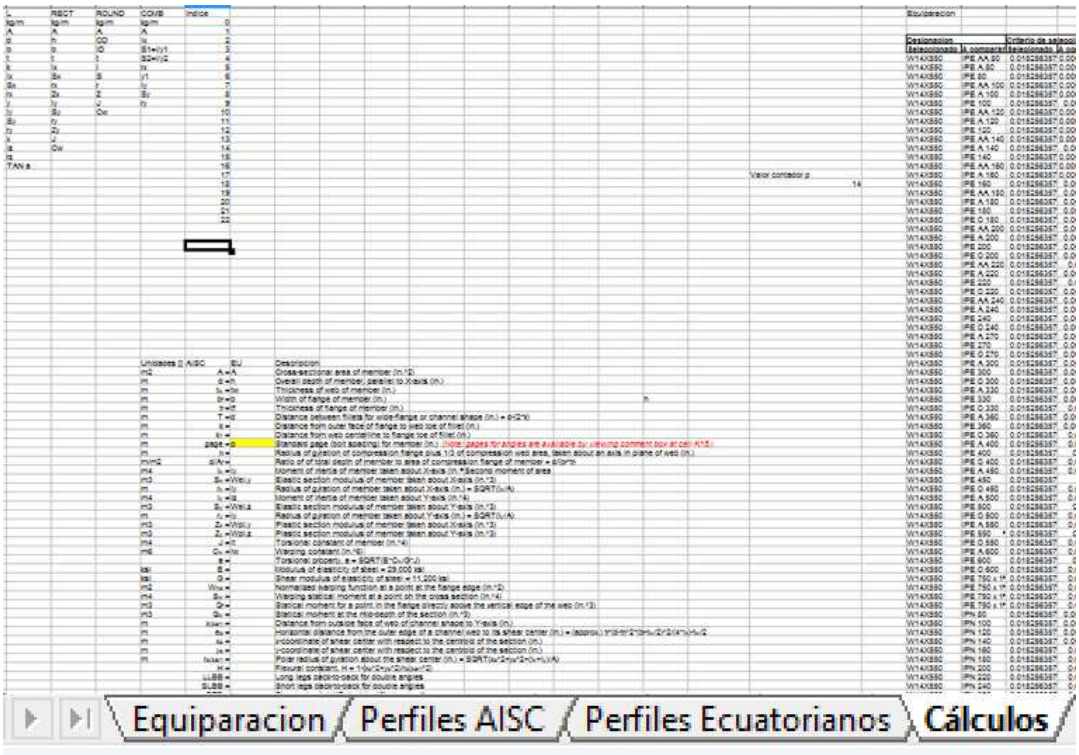


Figura 3.5: Hoja "Cálculos"

Ninguna de estas hojas tiene restricción alguna para el acceso del usuario.

3.4 Desarrollo del programa

3.4.1 Creación de las listas desplegables

3.4.1.1 Estructuración

El Dato principal a seleccionar es el Tipo de perfil. Una vez seleccionado este, se habilitan las opciones correspondientes de selección de la Designación del perfil y del Criterio de Selección. Se crean listas dependientes para cumplir con este requisito.

3.4.1.2 Tipo de perfil

Se selecciona la celda en la cual va a aparecer la lista desplegable. En Datos>Validez>Criterios>Permitir se selecciona Intervalo de celdas. Aparte en la

hoja Cálculos se realiza una lista de todos los elementos que debe contener la lista desplegable (tabla 3.1). En este caso el intervalo de celdas que debe aparecer en origen es $Cálculos.$B$41:$B$48

Tabla 3.1: Lista de Tipo de Perfil

Tipo de Perfil
W, S, M, HP
C, MC
WT, ST, MT
L
RECT – HSS
ROUND – HSS & PIPE
COMBINATIONS

3.4.1.3 Designación

Designación refiere al nombre especifico del perfil. Este depende del tipo de perfil seleccionado. Para lograr que al seleccionar un Tipo de Perfil se habiliten las designaciones correspondientes, cada Tipo de Perfil está asignado a una lista. El OpenOffice Calc permite crear Listas Nombradas. Estas listas son un conjunto de celdas organizadas bajo un nombre. Las listas nombradas sin embargo pueden ser de sólo una palabra y los nombres de la variable Tipo de Perfil son de varias. Esto se resuelve de la siguiente manera:

Tabla 3.2: Lista Auxiliar de Tipos de Perfil

Tipo de Perfil	
W, S, M, HP	WSMHP
C, MC	CMC
WT, ST, MT	WTSTMT
L	L
RECT – HSS	RECTHSS
ROUND – HSS & PIPE	ROUNDHSSPIPE
COMBINATIONS	COMBINATIONS

Al lado de la lista de Tipo de Perfil (B41:B48), ver tabla 3.2, se escribió los nombres que deberán tomar las listas de Designación en celdas de una sola

palabra.

Ahora cada rango de celdas correspondiente se le asigna el nombre de una sola palabra. En la figura 3.6 se encierra dentro del elipse amarillo el lugar donde se asigna una lista nombrada.

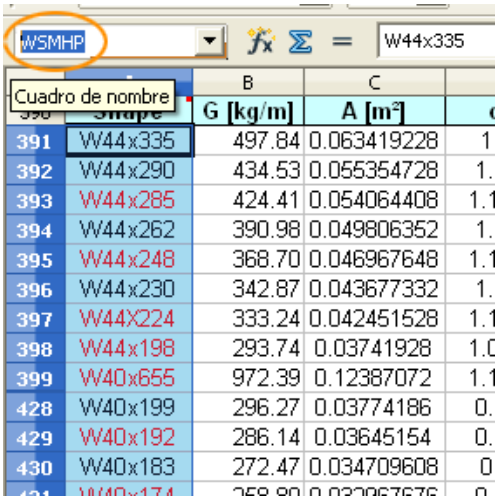


Figura 3.6: Asignación de un nombre a una lista nombrada

Definidos todos los rangos correspondientes con la palabra exacta de la lista auxiliar se procede entonces a asignar el rango de validez de la celda de la cual se selecciona la Designación. En Datos>Validez>Criterios>Permitir se selecciona Intervalo de celdas. En origen se escribirá:

“=INDIRECTO(BUSCARV(C3;Calculos.B41:C48;2;0))”.

La función INDIRECTO devuelve el valor de texto (string) de la referencia especificada. La función BUSCARV busca un valor especifico en la primera columna de una matriz definida y se desplaza a lo largo de la fila hasta el indice especificado y devuelve el valor de la celda.

En este caso, el origen de la lista de designaciones se obtiene siguiendo:

1. Se busca el valor de texto de la celda donde se escogió el Tipo de Perfil en

la matriz auxiliar, tabla 3.2, definida con los nombres completos y los nombre de una sola palabra.

2. Identificado el nombre, devuelve el valor que se encuentra en la celda adyacente, índice 2, devolviendo de la función buscarv un string de una sola palabra.
3. La función indirecto devuelve el valor en string del nombre de la lista de una sola palabra al campo de validez.
4. El origen para la lista es el nombre de una de las listas definida, presentando dentro de la lista desplegable todos los valores de la lista definida con ese nombre.

3.4.1.4 Criterio de Selección

El criterio de selección es igualmente una lista dependiente del valor seleccionado en Tipo de Perfil por lo que el procedimiento para la asignación de lista nombrada a la celda con la lista desplegable es igual que el descrito en Designación. Se asignan nombres de listas de una palabra a los criterios correspondientes para cada tipo de perfil. La lista auxiliar se ampliará a:

Tabla 3.3: Tabla auxiliar Criterios de Selección (Completa)

Tipo de Perfil		
W, S, M, HP	WSMHP	CritW
C, MC	CMC	CritC
WT, ST, MT	WTSTMT	CritWT
L	L	CritL
RECT – HSS	RECTHSS	CritRECT
ROUND – HSS & PIPE	ROUNDHSSPIPE	CritRound
COMBINATIONS	COMBINATIONS	CritCom

y la formula en origen será:

“=INDIRECTO(BUSCARV(C3;Cálculos.B41:D48;3;0))”

3.4.2 Rutina de Equiparación

3.4.2.1 Estructuración

La rutina realiza los siguientes pasos:

1. Limpiar las celdas sobre las cuales va a trabajar, tanto en la hoja Cálculos como en la hoja equiparación de tal manera que todo esté libre de algún valor que pueda afectar el correcto desenvolvimiento del programa.
2. Conseguir los Datos de: Tipo de Perfil, Designación y Criterio de Selección.
3. Imprimir en la matriz de resultados todos los parámetros del perfil del AISC seleccionado.
4. Imprimir los todos perfiles nacionales correspondientes en la hoja Cálculos y compararlos por diferencias en tanto al criterio de selección.
5. Con los datos de las diferencias, seleccionar los 5 mas cercanos por el limite inferior y los 5 más cercanos por el limite superior.
6. Imprimir los parámetros de los 10 perfiles seleccionados junto con el índice comparativo referente al criterio de selección tomado.

Puesto que la rutina es la misma para cualquier tipo de perfil y lo único que cambia son las posiciones iniciales de las matrices que contienen los perfiles dentro de las hojas de cálculo, se crearán 3 contadores específicos:

- o : para la posición horizontal de los tipos de perfil dentro de la matriz que contiene indexados los criterios de selección. (Tabla 3.4)
- p : para la posición vertical del criterio de selección especifico dentro de la matriz que contiene indexados los criterios de selección.
- w : para la posición absoluta de cada matriz de perfiles dentro de la hoja de todos los perfiles Ecuatorianos.

3.4.2.2 Eliminar celdas

Al inicio del macro se define un rango de celdas en la hoja Cálculos y se elimina el rango definido corriendo las celdas hacia arriba.

3.4.2.3 Conseguir los datos

Los datos necesarios para la equiparación se encuentran en la hoja Equiparación en las celdas de las listas desplegables. Se obtiene el valor de las celda C3, C6 y C9 y se les asigna una variable para su posterior uso dentro del macro.

3.4.2.4 Imprimir los datos en la tabla comparativa (Perfil)

Los parámetros y valores a imprimir dependen del Tipo de perfil que fue seleccionado, por esto se realiza un “select Case” en tanto al perfil. Como en cada hoja de datos de los perfiles, las tablas de los tipos de perfiles están separados entre si por una celda, al final de cada una de las tablas hay una celda en blanco, por lo que para imprimir todos los parámetros se usará un bucle “do until” que imprima cada parámetro que encuentre recorriendo la tabla celda a celda hasta que encuentre una celda en blanco. Al final de la rutina se escribe un contador “o” correspondiente a cada tipo de perfil para la búsqueda del criterio de selección matriz que contiene indexados los criterios de selección.

3.4.2.5 Posición del criterio de selección dentro de las matrices de perfiles

El contador “w” se utiliza para marcar la posición horizontal de inicio de cada matriz de perfiles.

```
select case Tipo
       case "W, S, M, HP"
              w=0
       case "C, MC"
              w=25
       case "WT, ST, MT"
              w=48
       case "L"
              w=70
       case "RECT - HSS"
              w=89
       case "ROUND - HSS & PIPE"
              w=106
       case "COMBINATIONS"
              w=119


end select
```

El contador “p”, que sera buscado de un índice en la tabla 3.4 según la posición que se le asignó anteriormente a “o” y el valor seleccionado en la celda C9.

Tabla 3.4: Matriz que contiene indexados los criterios de selección.

WSTHP	CM	WTSTMT	L	RECT	ROUND	COMB	Indice
kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	0
A	A	A	A	A	A	A	1
d	d	d	d	h	OD	OD	2
tw	tw	tw	b	b	ID	ID	3
bf	bf	bf	t	t	t	t	4
tf	tf	tf	k	Ix	I	I	5
k	k	k	Ix	Sx	S	S	6
k1	T	d/tw	Sx	rx	r	r	7
T	x	bf/2tf	rx	Zx	Z	Z	8
bf/2tf	eo	Ix	y	Iy	J	J	9
d/tw	d/Af	Sx	Iy	Sy	Cw	Cw	10
rt	Ix	rx	Sy	ry			11
d/Af	Sx	Zx	ry	Zy			12
Ix	rx	y	x	J			13
Sx	Zx	Iy	Iz	Cw			14
rx	Iy	Sy	rz				15
Zx	Sy	ry	TAN a				16
Iy	ry	Zy					17
Sy	Zy	J					18
ry	J	Cw					19
Zy	Cw						20
J							21
Cw							22

El contador “o” fue definido por el Tipo de Perfil. WSTHP corresponde a o = 0, CM; o = 1, WTSTMT; o = 2, L; o = 3 y así hasta completar todos los tipos de perfiles. Este contador se utilizará para determinar la posición de la columna, se utilizará la fórmula BUSCARV para encontrar el criterio seleccionado y se devolverá como respuesta el índice que será asignado a “p”. La fórmula es la siguiente:

=Vlookup(Equiparacion.C9;"+chr(68+o)+"2:K24;"+(8-o)+";0)

Esta fórmula busca el string de Equiparacion.C9(Criterio de Selección), dentro de la matriz "+chr(68+o)+"2:K24 que significa la matriz que se ve en la tabla 4.4 a partir de la posición dictada por el contador “o”. (chr(68+0) corresponde a la letra D si o = 0, si o = 1, letra E y así sucesivamente. Dentro de esa matriz, encontrado el string, se busca el índice y devuelve el valor de esa celda como valor de “p”, “p”

luego se utilizará para con ese índice buscar la columna correspondiente en las tablas de perfiles nacionales. Con la ayuda de estos 3 contadores se realiza la rutina de equiparación.

3.4.2.6 Esquema de la rutina de equiparación

El método para realizar la comparación es: en la hoja Cálculos se crea una columna con el dato del perfil AISC seleccionado y en la celda siguiente el dato de un perfil disponible en el Ecuador. Se calcula la diferencia entre estos, se escoge entre los que den una diferencia negativa y los que den una diferencia positiva y se repite para todos los perfiles de la tabla correspondiente. El esquema para este cálculo se puede entender claramente siguiendo la figura 3.7 y comparando con la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Esquema para comparación

	A	B	C	D	E	F	G
1	**Designacion**		**Criterio de seleccion**			**Máximos**	**Mínimos**
2	**Seleccionado**	**A comparar**	**Selecionado**	**A comparar**	**Diferencia**	**Negativos**	**Positivos**
3	W6X9	IPE AA 80	C3	D3	=D3-C3	=SI(E3<0;E3;" ")	=SI(E3>0;E3;" ")
4	W6X9	IPE A 80	C4	D4	=D4-C4	=SI(E4<0;E4;" ")	=SI(E4>0;E4;" ")
5	W6X9	…	…	…	…	…	…

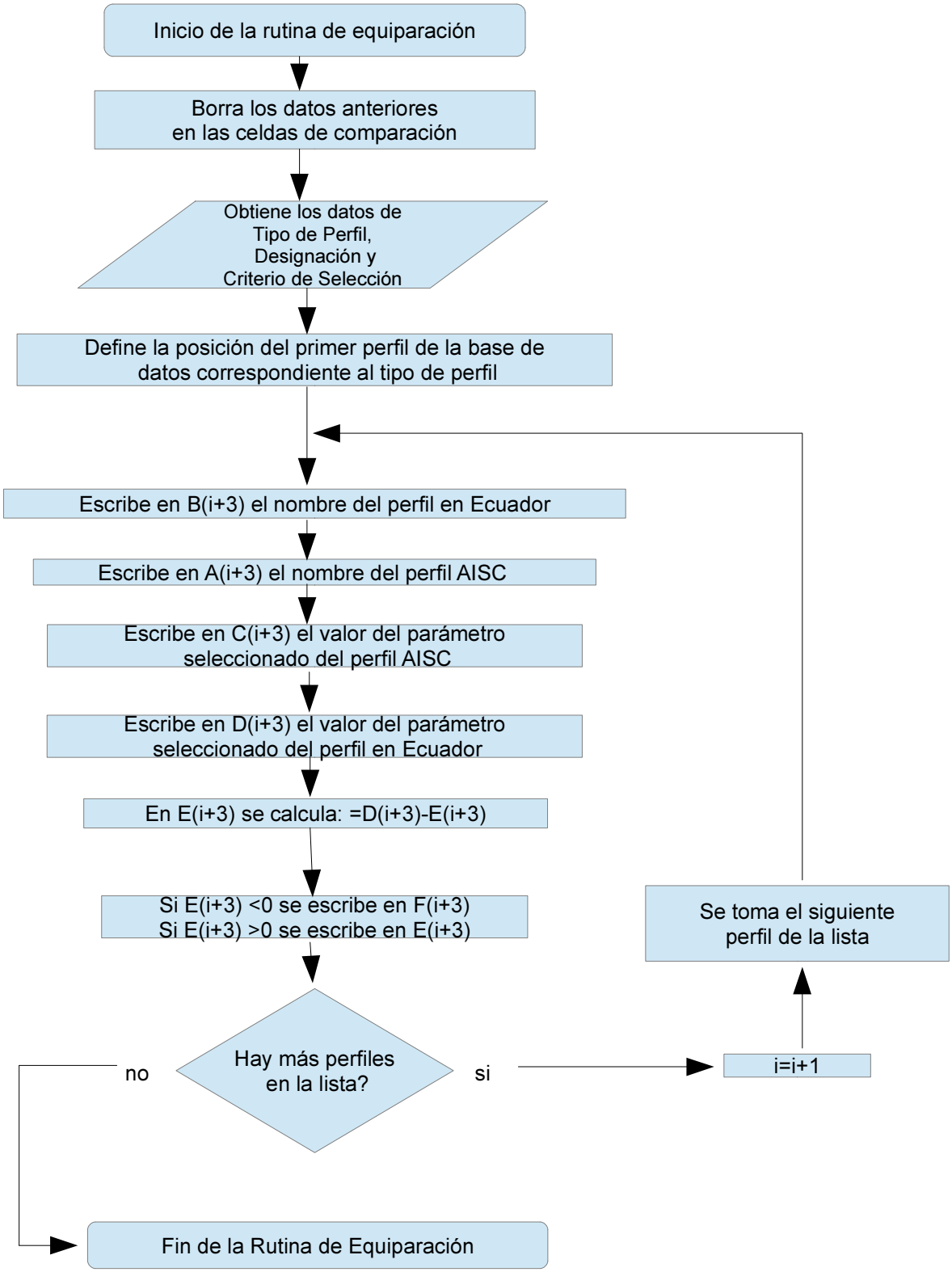


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la equiparación

3.4.2.7 Seleccionar los 10 más cercanos

Ya se tiene en las columnas de positivos y negativos separadas las diferencias. Ahora de los Negativos se busca el valor máximo, se anota el nombre del perfil en una celda aparte y se elimina el valor encontrado para así poder buscar el siguiente máximo sin que se repita la selección. Lo mismo se realiza con los Positivos pero seleccionando el mínimo. Los nombres de los perfiles se anotan en la matriz de resultados en la hoja Equiparación.

3.4.2.8 Imprimir los datos de los perfiles seleccionados en la tabla comparativa.

Nuevamente la posición de los perfiles dentro de las hojas de datos dependen del tipo de perfil seleccionado, por lo que se hace un Select Case especificando la matriz de cada grupo de tipos de perfiles. Con el grupo de perfiles y los nombres de los perfiles se realiza un Vlookup del nombre de los perfiles y se hace un loop hasta que la celda esté en blanco y se continua con el siguiente perfil.

3.4.3 Asignación del macro a un botón de comando

Una vez completo todo el código de la rutina de equiparación, se crea un botón el cual la ejecuta.

Para insertar un botón de control se entra a: Ver>Barras de Herramientas>Campos de Control de Formulario. Allí se selecciona el Botón y se lo dibuja en la hoja de cálculo. Dibujado el Botón se da click derecho sobre el mismo y se selecciona “Campo de Control”. Dentro de la ventana propuesta, en “Acontecimientos” se selecciona “[…]” en ejecutar una acción y se asigna la dirección del macro que se ha creado. Ahora cada vez que se de click sobre el botón, se ejecuta el código para este programa.

3.5 Comparador Gráfico

Dentro del cuadro amarillo aparecen el perfil AISC y el que se seleccione con el botón de opción. Para que ambos perfiles entren dentro del recuadro se comparan las profundidades, aquella que sea más grande sirve como valor de referencia para el resto de medidas. Después simplemente se cambian la escala

y posición de algunos objetos(rectángulos, tubo cuadrado, tubo circular) para formar el dibujo.

3.6 Código completo del programa

Se puede acceder al código completo del programa dentro de equiparador.ods.

Entrar en Herramientas>Macros>Organizar macros>OpenOffice Basic.

Dentro, Desde la Macro> equiparador.ods>Standard>equiparar.

CAPÍTULO 4
GENERACIÓN DE FÓRMULAS E ÍNDICES DE CONVERSIÓN

La equiparación se realiza con el sistema métrico utilizando las unidades propuestas por el sistema internacional[29]. Es decir cada dato se convertirá en el correspondiente de la misma dimensión ($[pulg] \Rightarrow [m]$, $[pulg^2] \Rightarrow [m^2]$, $[pulg^3] \Rightarrow [m^3]$, …). Como ejemplo, los datos de área de los perfiles proporcionados por el manual del AISC se encuentran en pulgadas cuadradas [in²], estos datos se deberán transformar a [m²]. Para realizarlo, los datos obtenidos de la base de datos tanto de la AISC o de los perfiles Nacionales se multiplicarán por los índices correspondientes. A continuación se realiza el análisis de todos los datos que sean necesarios convertir o parámetros que sean necesarios calcular.

4.1 Conversión de datos del AISC a Sistema Métrico

La conversión de estos datos comprende en la transformación de unidades. Para esto se utiliza una multiplicación por equivalentes divididos entre si, lo mismo que multiplicar por la unidad.

4.1.1 Parámetros de unidades de longitud y sus exponentes

Empezando por el área:

$$Area_{SI}[m^2] = Area_{AISC}[pulg^2] \cdot \frac{25.4^2[mm^2]}{[pulg^2]} \cdot \frac{[m^2]}{1000^2[mm^2]} \qquad (4.1)$$

lo que genera un índice a multiplicar en la celda de:

=25.4^2/1000^2=0.00064516

Los datos unidimensionales como las medidas de los perfiles (d, tw, bf, tf, T, k, k1, rt, rx, ry)(Ver glosario de términos) siguen el siguiente patrón de conversión:

$$d_{SI}[m] = d_{AISC}[pulg] \cdot \frac{25.4[mm]}{[pulg]} \cdot \frac{[m]}{1000[mm]} \quad (4.2)$$

El parámetro del segundo momento de área:

$$I_{SI}[m^4] = I_{AISC}[pulg^4] \cdot \frac{25.4^4[mm^4]}{[pulg^4]} \cdot \frac{[m^4]}{1000^4[mm^4]} \quad (4.3)$$

Y así conforme al exponente de cada parámetro.

4.1.2 Parámetros de unidades compuestas o adimensionales

El dato d/Af es un parámetro $[pulg/pulg^2]$ y se transforma:

$$d/Af_{SI} = d/Af_{AISC} \cdot \frac{25.4}{25.4^2} \cdot \frac{1000^2}{1000} \quad (4.4)$$

En la AISC se utiliza [plf] (pound per linear foot) (libras por pie linear). Para convertir el peso por longitud:

$$wt/ft = Peso/longitud = [\frac{lbf}{ft}] \cdot \frac{1\,kgf}{2.204623\,lbf} \cdot \frac{3.28084\,ft}{1\,m} = [\frac{kgf}{m}] \quad (4.4)$$

Los parámetros adimensionales no son necesarios convertir pues no cambian su valor debido a que no dependen de ninguna unidad sino se tratan de relaciones entre magnitudes iguales.

4.2 Fórmulas para parámetros no existentes en normas ecuatorianas

Ciertos criterios útiles para el diseño son proporcionados por el manual del AISC que sin embargo no se encuentran tabulados en la información provista en las normas INEN. En los siguientes puntos se calculan los parámetros faltantes para cada tipo de perfil.

4.2.1 Tipo I

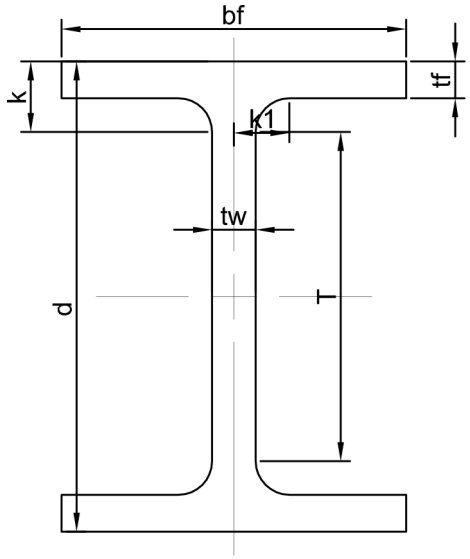


Figura 4.1: Parámetros en el perfil I

El parámetro k corresponde a la distancia entre la cara exterior del patín hasta el final del radio interno hacia el alma. La fórmula para calcularse es:

$$k = \frac{(d - T)}{2} \tag{4.5}$$

El parámetro k_1 se define como la distancia entre el centro del alma hasta el final del radio que da la patín:

$$k_1 = \frac{t_w}{2} + k - t_f \tag{4.6}$$

4.2.2 Tipo C

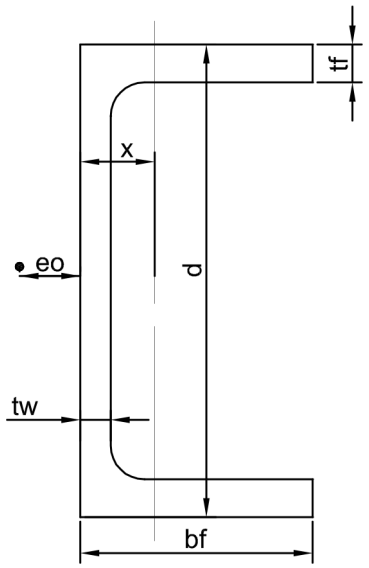


Figura 4.2: Parámetros en el perfil C

El parámetro e_o en canales es la distancia que hay desde la cara exterior del canal hasta el centro de corte del perfil. Se utiliza la formula:

$$e_o = \frac{t_f \cdot \left(b_f - \frac{t_w}{2}\right)^2}{2 \cdot \left(b_f - \frac{t_w}{2}\right) \cdot t_f + \frac{(d - t_f) \cdot t_w}{3}} - \frac{t_w}{2} \quad {}^{30} \tag{4.7}$$

4.2.3 Tipo T

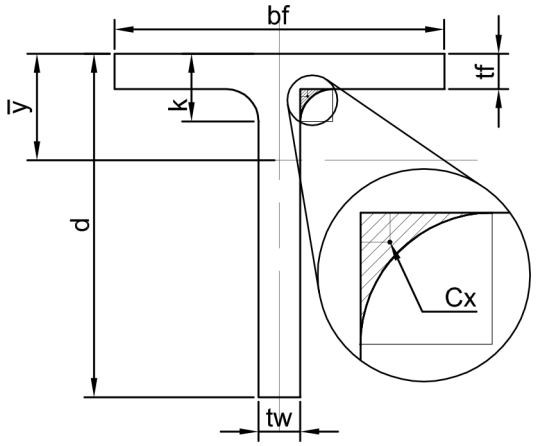


Figura 4.3: Parámetros en el perfil T

Para los perfiles tipo T que son obtenidos de la bisección de perfiles tipo I se necesita calcular $\bar{y}$, I_x , S_x , Z_x y C_w . A continuación las fórmulas utilizadas:

$$\bar{y} = \textit{Distancia en el eje 'y' al centro de masa desde el borde superior del patín}$$

$$\bar{y} = \frac{\left(d - \frac{d - t_f}{2}\right) t_w \cdot (d - t_f) + \left(d - t_f + \frac{t_f}{2}\right) t_f \, b_f + \frac{\left(d - t_f - (k - t_f)(1 - C_x)\right) \cdot (k - t_f)^2 \cdot (4 - \pi)}{2}}{t_w \cdot (d - t_f) + (t_f \cdot b_f) + \frac{(k - t_f)^2 \cdot (4 - \pi)}{2}} \tag{4.8}$$

donde

$C_x = \textit{centro de gravedad del área entre un cuarto de círculo y un cuadrado unitario} \approx 0.776632$

obtenido $\bar{y}$ se pueden calcular el resto de propiedades;

El momento de inercia respecto a “x”:

$$I_x = \frac{t_f^3 \, b_f}{12} + \left(\bar{y} - \frac{t_f}{2}\right)^2 \cdot t_f \, b_f + \frac{(d - t_f)^3 \cdot t_w}{12} + \left(\frac{(d - t_f)}{2} + t_f - \bar{y}\right)^2 \cdot (d - t_f) \, t_w + (k - t_f)^4 \cdot C_I$$
$$+ \left(\bar{y} - \left(t_f + (k - t_f)(1 - C_x)\right)\right)^2 \cdot \left(\frac{(k - t_f)^2 \cdot (4 - \pi)}{2}\right) \tag{4.9}$$

donde

$C_1 = Factor\ del\ momento\ de\ Inercia\ del\ área\ de\ un\ cuarto\ de\ círculo = 0.015090251282$

El módulo elástico de la sección:

$$S_x = \frac{I_x}{(d - \bar{y})} \tag{4.10}$$

El radio de giro:

$$r_x = \sqrt{\left(\frac{I_x}{A}\right)} \tag{4.11}$$

El módulo plástico de la sección:

$$Z_x = \frac{b_f \cdot \tilde{y}^2}{2} + \frac{b_f \cdot (t_f - \tilde{y})^2}{2} + (d - t_f)\, t_w \cdot \left(\frac{(d - t_f)}{2} + (t_f - \tilde{y})\right) \tag{4.12}$$

donde

$$\tilde{y} = \frac{b_f \cdot t_f + d \cdot t_w - t_f \cdot t_w}{2 \cdot b_f} \quad 31$$

La constante de alabeo:

$$C_w(tees) = \frac{b_f^3 \cdot t_f^3}{144} + \frac{\left(d - \frac{t_f}{2}\right)^3 \cdot t_w^3}{36} \tag{4.13}$$

4.2.4 Tubos Rectangulares

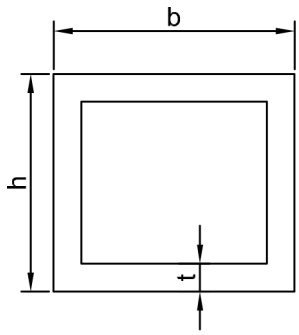


Figura 4.4: Parámetros en Tubos rectangulares

Para los tubos cuadrados se toma: [32]

$$C_w = 0 \tag{4.14}$$

El momento de Inercia en “x”:

$$I_x = 2 \cdot \left(\frac{(b \cdot t^3)}{12} + \left(\frac{(h - t)}{2} \right)^2 \cdot b \cdot t + \frac{(t \cdot (h - 2 \cdot t)^3)}{12} \right) \tag{4.15}$$

El módulo plástico de la sección en “x”:

$$Z_x = \frac{2 \cdot b \cdot t \cdot (h - t)}{2} + \frac{4 \, t \cdot \left(\frac{(h - 2 \cdot t)}{2} \right)^2}{2} \tag{4.16}$$

El momento de Inercia en “y”:

$$I_y = 2 \cdot \left(\frac{h \cdot t^3}{12} + \left(\frac{(b - t)}{2} \right)^2 \cdot h \cdot t + \frac{t \cdot (b - 2 \cdot t)^3}{12} \right) \tag{4.17}$$

El módulo plástico de la sección en “y”:

$$Z_y = \frac{2 \cdot h \cdot t \cdot (b - t)}{2} + \frac{4 \cdot t \cdot \left(\frac{(b - 2 \cdot t)}{2}\right)^2}{2} \tag{4.18}$$

La constante torsional:

$$J = \frac{\left(4 \left((b - t) \cdot (h - t)\right)^2 \cdot t\right)}{\left(2 \cdot \left((b - t) + (h - t)\right)\right)} \tag{4.19}$$

4.2.5 Tubos redondos

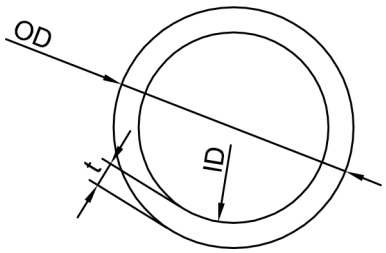


Figura 4.5: Parámetros en Tubos Redondos

El momento de inercia:

$$I = \frac{\pi \left(\left(\frac{OD}{2}\right)^4 - \left(\frac{ID}{2}\right)^4\right)}{4} \tag{4.20}$$

El módulo plástico de la sección:

$$Z = \frac{(OD^3 - ID^3)}{6} \tag{4.21}$$

La constante torsional:

$$J = 2 \cdot I \tag{4.22}$$

4.3 Indices de conversión y formulas utilizadas (Completo)

Anexo 5

CAPÍTULO 5
MANUAL DE TABLAS, NORMATIVA DE USO Y EJEMPLOS

En este capítulo se forma el manual de uso en formato PDF que va adjunto con el mismo *Equiparador* dentro de un archivo comprimido descargable desde la red. Este indica como realizar la equiparación de los perfiles paso a paso, explica como funciona el programa y da recomendaciones de uso y selección.

5.1 Manual de uso

5.1.1 Estructuración

El manual se compone de:

- Introducción
- Notas preliminares
- Uso del programa
- Ejemplo Práctico
- Recomendaciones

5.1.2 Introducción

El Equiparador de perfiles proporcionado dentro del archivo comprimido que contiene este manual (figura 5.1), permite al usuario realizar sus diseños de estructuras de acero siguiendo el manual del AISC y obtener rápidamente un perfil equivalente disponible en el mercado ecuatoriano.

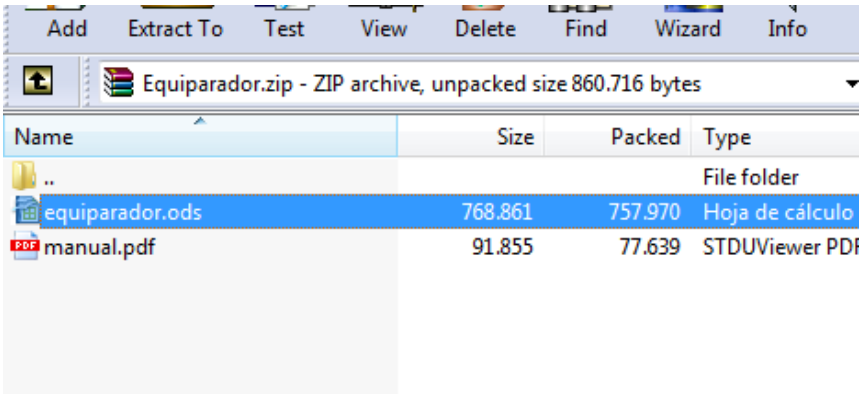


Figura 5.1: Contenido del archivo descargable

5.1.3 Notas preliminares

El programa está hecho en OpenOffice.org Calc para garantizar su asequibilidad a cualquier persona con Internet. Si usted no posee todavía OpenOffice.org, puede descargar gratuitamente la versión más reciente desde http://www.openoffice.org/es/descargar/. Instálelo en su computador previamente al uso del programa de equiparación de perfiles.

Antes de abrir el programa, será necesario que usted permita la ejecución de macros no firmados en OpenOffice.org. Para realizarlo siga los siguientes pasos:

1. Abra un documento nuevo en OpenOffice.org Calc
2. En la parte superior, desde Herramientas, ingrese a Opciones
3. Dentro de la ventana, en la parte izquierda, subordinado a OpenOffice, escoja la opción Seguridad
4. A su derecha seleccione Seguridad de Macros
5. Escoja la pestaña Orígenes de Confianza
6. Seleccione Agregar, bajo Ubicaciones de archivos de confianza
7. Seleccione la dirección de la carpeta donde se encuentra actualmente el Equiparador.ods o donde usted lo colocará posteriormente en su ordenador
8. Ejecute Equiparador.ods

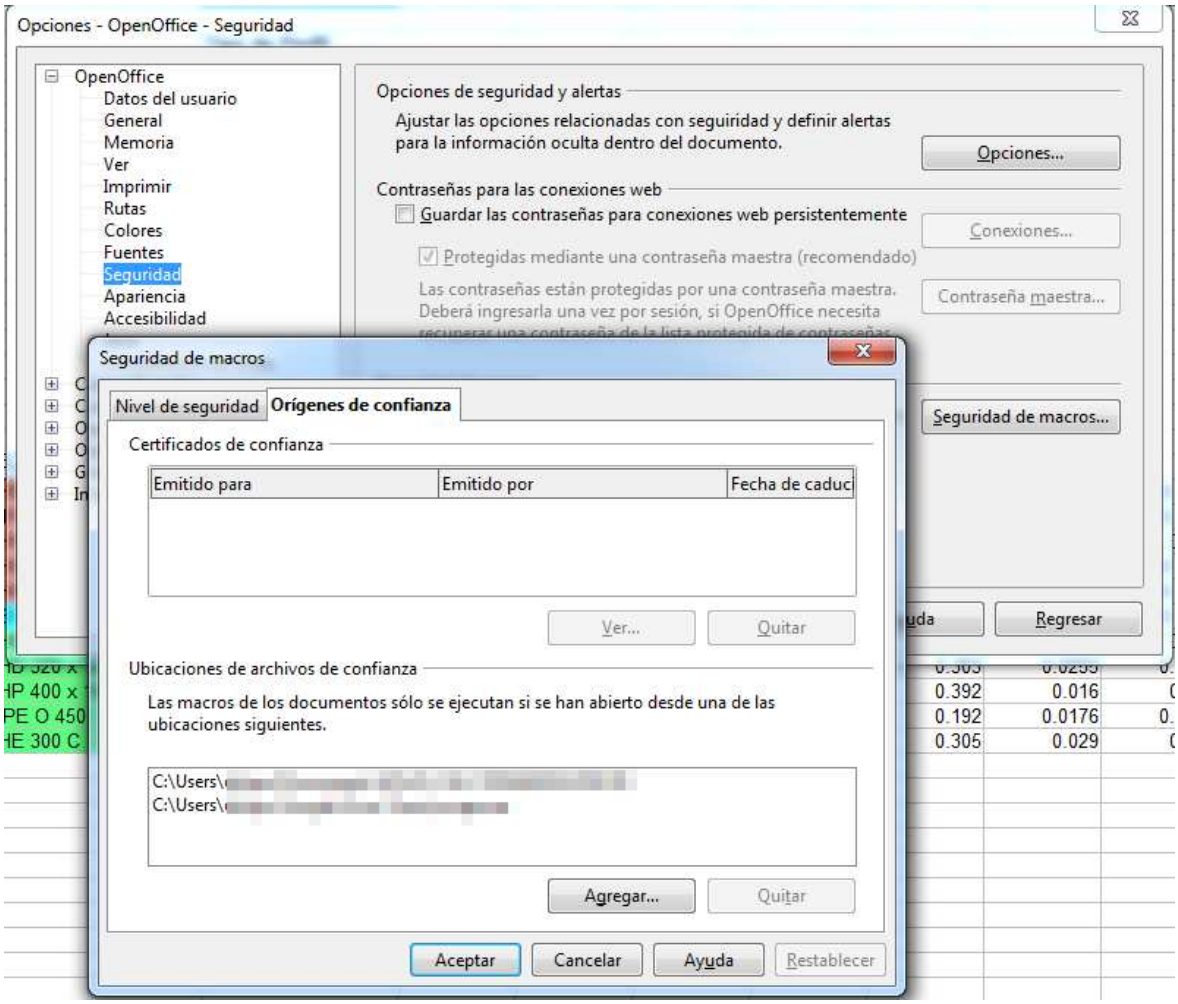


Figura 5.2: Seguridad de Macros

Solo en caso de que con los anteriores cambios le aparezca un mensaje impidiendo ejecutar los macros de Equiparador.ods, en la misma ventana de Seguridad de macros, pestaña Nivel de seguridad, cambie a la opción Medio o Bajo previo al uso del programa, ejecute el programa y después del uso, restablezca la opción Alto por su propia seguridad.

Dentro de Equiparador.ods existen 4 hojas de Cálculo (Equiparación, Perfiles AISC, Perfiles Ecuatorianos y Cálculos). Únicamente la hoja Equiparación será de utilidad directa para el usuario. Las siguientes 3 son las bases de datos de los perfiles y una hoja auxiliar para el funcionamiento del programa. Por esto se recomienda solo realizar modificaciones en las siguientes 3 hojas si el usuario ha

revisado el código fuente y entendido el funcionamiento del programa.

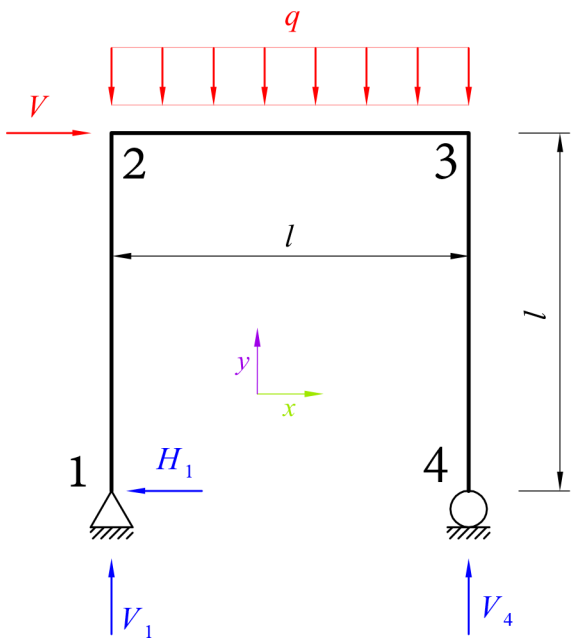
Como nota final es importante recalcar que este no es un programa de diseño sino simplemente un comparador. El usuario deberá previamente haber realizado el diseño y selección del perfil adecuado según el AISC y ser consciente del Criterio de selección determinante en el miembro a equiparar.

5.1.4 Uso del programa

1. Ejecute Equiparador.ods
2. En la hoja Equiparacion, celda C3, seleccione el Tipo de perfil de la lista desplegable
3. Una vez seleccionado el Tipo de perfil, seleccione la designación especifica y el criterio de selección correspondiente a su diseño, desde las celdas C6 y C9 respectivamente
4. Presione el botón Equiparar y espere. El cálculo tardará dependiendo de la cantidad de perfiles comparables y de la velocidad de su computador
5. Escoja de entre los perfiles desplegados el más ajustado a sus necesidades
    - Utilice los botones de opción al lado izquierdo de los nombres de los perfiles para obtener una comparación gráfica de proporciones
    - Utilice el botón “Cambiar Unidades” para alternar los valores de los parámetros entre el sistema inglés y el sistema internacional

5.1.5 Ejemplo Práctico del uso del programa

Seleccionar los perfiles para la siguiente estructura continua. Se construirá con acero A-588 ($F_y = 50\,ksi$)



$$l = 8[m] = 315[\text{in}] = 26{,}25[ft]$$

$$V = 3[T]$$

$$q = 1[\frac{T}{m}]$$

Figura 5.3: Planteamiento del problema

Determinación de reacciones y diagramas:

$$\sum F_x = 0 \qquad H_1 = V = 3\text{T}$$

$$\sum F_y = 0 \qquad V_1 + V_4 = q \cdot l = 8\text{T}$$

$$\sum M_1 = 0 \qquad l \cdot V_4 = \frac{q \cdot l^2}{2} + V \cdot h$$

$$8 \cdot V_4 = \frac{1 \cdot 8}{2} + 3 \cdot 8$$

$$\rightarrow V_4 = 7\text{T},\ V_1 = 1\text{T}$$

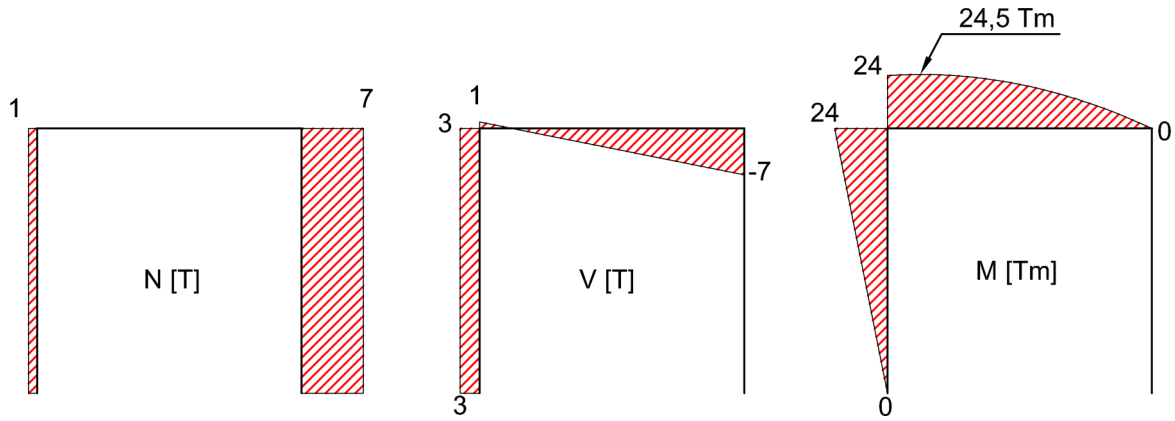


Figura 5.4: Diagramas: Normal, Corte y Momento

Diseño de la columna:

Con los datos del diagrama de normal y el valor de $V_4 = 7[T]$ se determina que a compresión la columna crítica es $3\text{-}4$.

El análisis inicial considera a la esbeltez λ como parámetro de diseño, por lo que se toma su límite máximo de acuerdo con la curva de Euler:

$$\lambda_{máx} = \frac{K \cdot L}{r_{mín}} = 200$$

siendo:

K : *Factor de Apoyo*

L : *Longitud de la columna*

$K \cdot L$: *longitud efectiva de la columna*

$r_{mín}$: *radio mínimo de giro* $(eje\ menor)$

Para determinar K se utiliza el nomograma de la página 5-125 del manual del AISC (8va edición)[33] (figura 5.5).

Se determinan los G de los nodos extremos:

4 es un apoyo simple de rigidez cero y para fines prácticos se toma $G_4 = 10.0$

3 , de acuerdo a la formula propuesta en la misma página del nomograma,

responde a: $$G_3=\frac{\sum \frac{I_c}{L_c}}{\sum \frac{I_g}{L_g}}=\frac{I/h}{I/l}=\frac{I/8}{I/8}=1.0$$

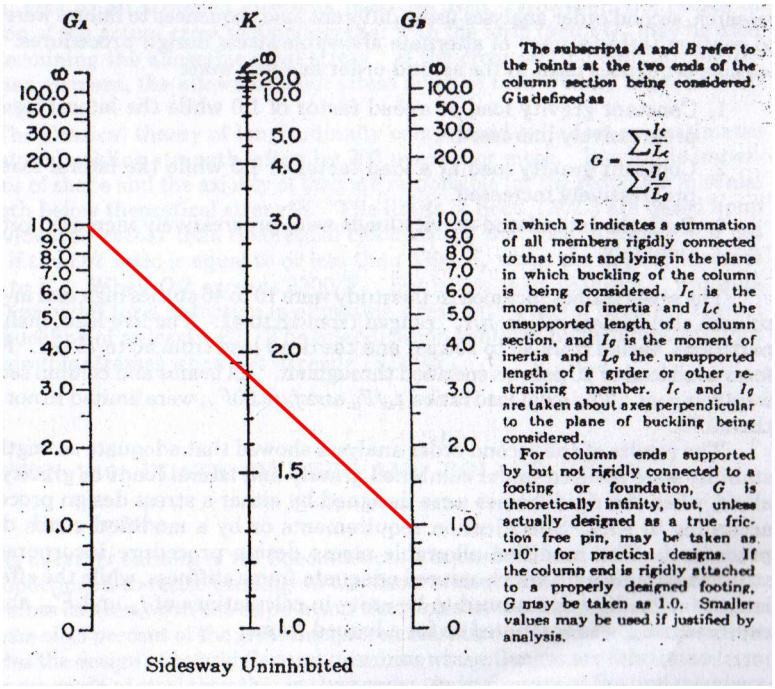


Figura 5.5: Determinación de K

con lo que se obtiene $k=1.9$ como se puede ver en la figura 5.5.

La columna debe cumplir:

$$f_a \leq F_a \qquad f_a=\frac{P\,c}{A} \leq F_a \qquad \lambda_{máx}=\frac{K\cdot L}{r_{mín}}=200 \qquad r_{mín}=\frac{K\cdot L}{200}=\frac{1.9\ 315}{200}$$

$$r_{mín}=2.99[\text{in}]$$

Para el perfil de la columna se propone la sección compuesta de 2 perfiles laminados en caliente tipo C soldados como se muestra en la figura 5.6. La

distancia do se puede calcular de tal manera que $I_x \simeq I_y$, de esta forma $r_y = r_x = r_{mín}$ como se comprueba continuación:

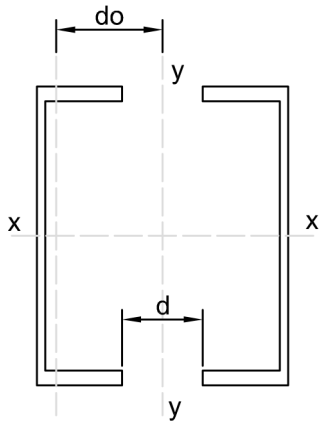


Figura 5.6: Sección compuesta por 2 Perfiles C

$$I_{x_{2C}} = 2 \cdot I_{x_{1C}}$$

$$I_{y_{2C}} = 2 \cdot [I_{y_{1C}} + A_{1C} \cdot d_0^{\,2}] \qquad I_{x_{2c}} \simeq I_{y_{2c}}$$

$$r_{x_{2C}} = \sqrt{\frac{I_{x_{2C}}}{A_{2C}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{x_{1C}}}{2 \cdot A_{1C}}} = \sqrt{\frac{I_{x_{1C}}}{A_{1C}}} = r_{x_{1C}} \Rightarrow \sqrt{\frac{I_{x_{2C}}}{A_{2C}}} = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = r_{y_{2C}} \qquad \rightarrow r_x = r_y \rightarrow r_x = r_{mín}$$

Se busca un perfil C tal que $r_x \geq 2.99[\text{in}]$

Se selecciona del AISC el C8x11.5 con un $r_x = 3.11[\text{in}]$

Con *Equiparador* se introduce el perfil C8x11.5 y como criterio de selección el rx, se da click en el botón “Equiparar” y se obtienen los resultados de la figura 5.7:

Tipo de Perfil: C, MC

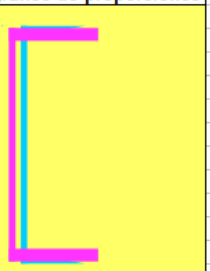
Designacion: C8X11.5

Criterio de seleccion: rx

Equiparar

Cambiar Unidades

Comparador gráfico de proporciones



Perfil AISC

Perfil Comparativo

Seleccionar el botón de opción al lado izquierdo de un nombre de perfil para la comparación

Perfil	Índice comparativo	wt/ft	A [in²]	Ix [in4]	Sx [in³]	rx [in]	Zx [in³]	Iy [in4]	Sy [i
UPN 160	0.7861356559	12.6330185	3.72000744	22.22321389	7.078754315	2.44488189	8.421276685	2.049340697	1.11
UPE 160	0.8207661145	11.42347417	3.363506727	21.88830713	6.949537514	2.552582616	8.031361023	2.56647331	1.37
UPN 180	0.8798136567	14.78331952	4.34000868	32.43387974	9.153561614	2.736220472	10.92325019	2.738860955	1.36
UPE 180	0.9293420534	13.23779066	3.890507781	32.43387974	9.176882228	2.890253786	10.55652314	3.452520184	1.74
UPN 200	0.9747575765	17.00081744	4.991009982	45.88793355	11.65553512	3.031496063	13.91341365	3.555714223	1.64
C8X11.5	1	11.5	3.37	32.5	8.14	3.11	9.63	1.31	
UPE 200	1.0270780632	15.32089477	4.49500899	45.88793355	11.65123733	3.194212777	13.4307733	4.499819461	2.10
UPN 220	1.0734992531	19.75589063	5.797011594	64.62750851	14.9508173	3.338582677	17.81893328	4.732943932	2.05
UPE 220	1.126652209	17.87437723	5.254510509	64.38725755	14.88091596	3.50388837	17.17719262	5.934198737	2.59
UPN 240	1.167177254	22.30937309	6.556513113	86.49034596	18.30712323	3.62992126	21.84650039	5.958223833	2.41

Figura 5.7: Resultados C8x11.5

Con la ayuda de los botones de opción del lado derecho de los nombres de los perfiles se activa el comparador gráfico de proporciones dentro del recuadro amarillo que permite escoger aquel de mayor similaridad geométrica. Así también usar el botón “Cambiar unidades” para poder comparar los parámetros en las unidades más convenientes. Se selecciona entonces el perfil **UPE 200** pues es el más similar, el más liviano que cumple el criterio de $r_{min} \geq 2.99[\text{in}]$.

$$r_x = 3.1942[\text{in}] \quad A = 4.49[\text{in}^2] \quad I_y = 4.4948[\text{in}^4] \quad I_x = 45.8879[\text{in}^4]$$

Se calcula la esbeltez: $\lambda = \frac{K \cdot L}{r_{min}} = \frac{1.9 \cdot 315}{3.19} = 187$

sabiendo que la columna es un miembro principal, se obtiene el esfuerzo permisible $F_a = 4.27[ksi]$ de la tabla en la página 5-75 del manual del AISC (8va edición) y se lo compara con el esfuerzo real sobre esta columna f_a

$$f_a = \frac{Pc}{A} = \frac{V_4}{2 \cdot A_{1C}} = \frac{7 \cdot 2.2[klb]}{2 \cdot 4.49[\text{in}^2]} = 1.71[ksi] \leq F_a = 4.27[ksi] \quad \checkmark$$

el índice de trabajo de la columna

$$I_a = \frac{f_a}{F_a} = \frac{1.71}{4.27} = 0.40 < 1.0 \quad \checkmark$$

La estabilidad de la sección determina:

$$I_{x_{2c}} = 2 \cdot I_{x_{1c}} = 2 \cdot \left(I_{y_{1c}} + A_{1C} \cdot d_o^2 \right)$$

$$2 \cdot 45.88 = 2 \cdot \left(4.49 + 4.49 \cdot d_o^2 \right) \quad \rightarrow d_o = 3.04 [\text{in}]$$

Para fines constructivos es inútil el d_o por lo que se calcula la distancia entre los 2 perfiles a ser soldados $d = 2 \cdot \left(d_o - \left(b_f - \bar{x} \right) \right) = 1.79 [\text{in}] = 46 [mm]$

con lo que queda diseñada la columna a compresión.

Para la viga, de los diagramas expuestos en la figura 6.4 se toma el momento flector máximo:

$$M_{máx} = 24{,}5\, Tm$$

para iniciar el análisis se asume $F_b = 0.6 \cdot F_y = 30 [ksi]$

$$S_x (req) = \frac{M}{F_b} = \frac{24.5 \cdot 2.2 \cdot 100}{30 \cdot 2.54} = 70.7 [\text{in}^3]$$

Se escoje el W16x45 con un $S_x = 72.7 [\text{in}]$ como primer perfil para entrar en el proceso de iteración.

El procedimiento para el diseño de vigas implica la siguiente secuencia de análisis:

- Comprobar si $l \leq L_u$ para aceptar $F_b = 0.6 \cdot F_y$
- Si $l > L_u$ se debe calcular un F_b distinto. Para esto se realiza:

1. Determinación de $\lambda = l / r_T$ y C_b
2. Comparación entre rangos:

   - Si $\lambda \leq \sqrt{\left(\frac{102 \cdot 10^3 \cdot C_b}{F_y}\right)}$: $F_b = 0.60 \cdot F_y$
   - Si $\sqrt{\left(\frac{102 \cdot 10^3 \cdot C_b}{F_y}\right)} \leq \lambda \leq \sqrt{\left(\frac{510 \cdot 10^3 \cdot C_b}{F_y}\right)}$:

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

   - Si $\lambda \geq \sqrt{\left(\frac{510 \cdot 10^3 \cdot C_b}{F_y}\right)}$: $F_b = \frac{170 \cdot 10^3 \cdot C_b}{(l/r_T)^2}$ ó

   $$F_b = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot C_b}{l \cdot d / A_f}$$

3. Cálculo de S_x con el nuevo dato de F_y y nueva selección de perfil
4. Repetir pasos del 1 al 3 con los parámetros geométricos de la nueva selección hasta encontrar convergencia en un perfil determinado

donde:

l: longitud de la viga

F_y: Esfuerzo de fluencia mínimo especificado para el acero a usar

F_b: Esfuerzo de flexión permitido en un miembro prismático en la ausencia de fuerza axial

L_u: Longitud máxima sin apuntalar del patín de compresión en la cual se puede tomar $F_b = 0.6\,F_y$

r_T: Radio de giro de una sección que comprende el patín de compresión más el $1/3$ a compresión del área del alma, tomado sobre el eje “y” en el plano del alma.

λ: Esbeltez del miembro $= l/r_T$

C_b: Coeficiente de flexión dependiente del gradiente de momento

$$= 1.75 + 1.05\left(\frac{M_1}{M_2}\right) + 0.3\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2$$

d: Profundidad del elemento

A_f =Área del patín a compresión

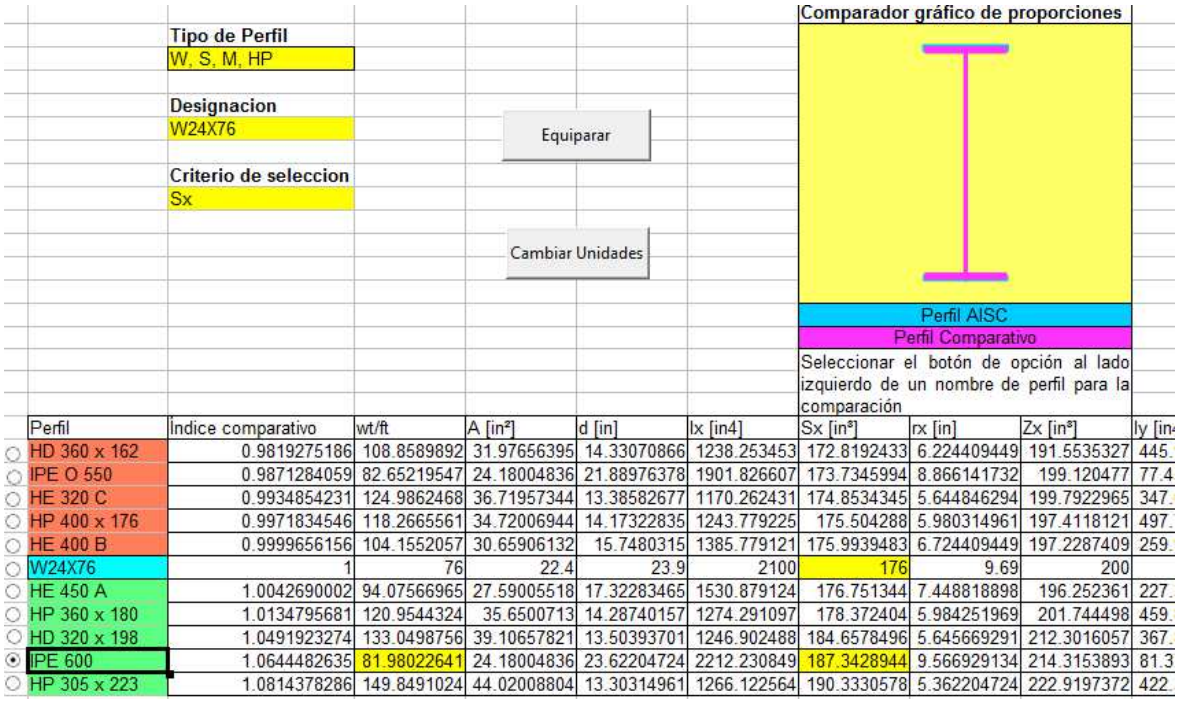
La mejor manera de explicar este proceso es con el ejemplo de la primera iteración del problema:

- **W16x45** tiene $L_u = 8.2[ft] < 315 \cdot 12 = 26.3[ft]$
- Puesto que $l > L_u$ se debe calcular un F_b distinto. Para esto se realiza:

1. $\lambda_F = \frac{l}{r_t} = \frac{315}{1.88} = 167$ y $C_b = 1$ pues el momento máximo no se encuentra en los extremos de la viga
2. $\lambda_F = \frac{l}{r_t} = \frac{315}{1.88} = 167 \geq \sqrt{\frac{510 \cdot 10^3 \cdot C_b}{F_y}} = 100.995$

   $F_b = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot C_b}{l \cdot d / A_f} = 9.41[ksi]$
3. $S_x(req) = \frac{M}{F_b} = \frac{24.5 \cdot 2.2 \cdot 100}{9.41 \cdot 2.54} = 225[\text{in}^3]$
4. se obtiene el **W21x101** tiene $S_x = 227[\text{in}^3]$, pero se escoge el **W27x94** pues es el más liviano de su grupo. Se vuelve a realizar este procedimiento con los datos de **W27x94**

Al cabo de la sexta iteración de este procedimiento se obtiene una convergencia en el perfil **W24x76**. Se introduce este perfil en *Equiparador* y se obtienen los resultados de la figura 5.8. Se escoge el perfil **IPE 600** por su similaridad geométrica, cumplimiento del criterio de selección y por ser el de menor peso.



Perfil	Índice comparativo	wt/ft	A [in²]	d [in]	Ix [in4]	Sx [in³]	rx [in]	Zx [in³]	Iy [in
HD 360 x 162	0.9819275186	108.8589892	31.97656395	14.33070866	1238.253453	172.8192433	6.224409449	191.5535327	445.
IPE O 550	0.9871284059	82.65219547	24.18004836	21.88976378	1901.826607	173.7345994	8.866141732	199.120477	77.4
HE 320 C	0.9934854231	124.9862468	36.71957344	13.38582677	1170.262431	174.8534345	5.644846294	199.7922965	347.
HP 400 x 176	0.9971834546	118.2665561	34.72006944	14.17322835	1243.779225	175.504288	5.980314961	197.4118121	497.
HE 400 B	0.9999656156	104.1552057	30.65906132	15.7480315	1385.779121	175.9939483	6.724409449	197.2287409	259.
W24X76	1	76	22.4	23.9	2100	176	9.69	200	
HE 450 A	1.0042690002	94.07566965	27.59005518	17.32283465	1530.879124	176.751344	7.448818898	196.252361	227.
HP 360 x 180	1.0134795681	120.9544324	35.6500713	14.28740157	1274.291097	178.372404	5.984251969	201.744498	459.
HD 320 x 198	1.0491923274	133.0498756	39.10657821	13.50393701	1246.902488	184.6578496	5.645669291	212.3016057	367.
IPE 600	1.0644482635	81.98022641	24.18004836	23.62204724	2212.230849	187.3428944	9.566929134	214.3153893	81.3
HP 305 x 223	1.0814378286	149.8491024	44.02008804	13.30314961	1266.122564	190.3330578	5.362204724	222.9197372	422.

Figura 5.8: Resultados W24x76

5.1.6 Recomendaciones para el análisis de resultados

El programa entregará los perfiles más cercanos al buscado en tanto el criterio de selección. La selección final sigue siendo decisión del diseñador. Se recomienda entonces para facilitar la selección los siguientes criterios generales:

- Tener en cuenta las solicitaciones mecánicas y factores de seguridad en el diseño. Esto permitirá saber cuando se podrá utilizar un perfil de mayor o de menor resistencia.
- Siempre considerar el peso del perfil. Un perfil de mayor peso no será necesariamente más resistente (depende del criterio de selección) pero será seguramente más costoso y además aumentará cargas al peso muerto
- En lo posible elegir el perfil que geométricamente sea el más similar. Las dimensiones entre normas son diferentes pero existen perfiles de correspondiente utilidad, por ejemplo W – IPE, S – IPN, entre otros.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se ha cumplido con el objetivo del presente estudio[2], que implica que una vez que el diseñador de acuerdo a sus criterios ha seleccionado un perfil de la normativa AISC, pueda en base a la realidad del mercado nacional optar por un perfil disponible en el Ecuador.
- El programa abierto *Equiparador*, satisfactoriamente ordena por similaridad de diferencias paramétricas y permite su comparación visual en tanto a las proporciones de las secciones transversales.
- De acuerdo a la investigación de campo realizada para la base de datos de la disponibilidad de perfiles dentro del mercado ecuatoriano, obteniendo catálogos y entrevistando directamente a los vendedores de las acerías más importantes; las siderúrgicas laminadoras como Novacero, crean perfiles según las normas ecuatorianas INEN, que geométricamente son idénticas a las exigencias pedidas por la norma DIN 1025 para tipo "I" y DIN 1026 para tipo "C" basadas en los perfiles de las EuroNormas 19-57, 53-62 y 54-79 vigentes en varios países de la unión europea. Sin embargo, el comercio de acero es en gran parte la importación de perfiles del exterior y venta dentro del país, como lo realiza la empresa IPAC. La base de datos incluida dentro del programa refleja los perfiles laminados en caliente más comunes dentro de los comerciantes de acero y es válida para su uso en el diseño de estructuras metálicas en el Ecuador.
- El programa presenta ayudas para facilitar la selección y ahorrar tiempo en este proceso como el comparador gráfico y el botón de cambio de unidades. Ninguna operación del programa está escrita ni probada para funcionar de otra manera de la que no fue diseñada, es decir el programa

2 Equiparación de perfiles de acero de normas AISC con perfiles de normas ecuatorianas disponibles en el mercado nacional

no es infalible y es posible la aparición de problemas si no es usado correctamente, dando el suficiente tiempo para que terminen las rutinas de cálculo.

Recomendaciones

- El alcance de este proyecto no es establecer un procedimiento de diseño. Este queda a responsabilidad del diseñador, por lo que el uso de *Equiparador* solo se circunscribe a la equiparación numérica de los perfiles.
- Al realizar un diseño con el manual del AISC para luego equiparar los perfiles seleccionados con el programa, tener siempre en cuenta el valor del criterio de selección mínimo. Esto permitirá una facilidad en poder elegir con mayor libertad los perfiles que presenten un menor índice comparativo en referencia al seleccionado del AISC pero que puedan resultar más convenientes por similitudes geométricas o peso.
- Varios comerciantes de acero importan perfiles del resto del mundo y no los incluyen en sus catálogos pues no es regla su disponibilidad. Esto significa que se puede tener cualquier tipo de perfil de cualquier tipo de norma que se pueda encontrar en el mundo independientemente de lo promocionado en el catálogo del proveedor, sin embargo su disponibilidad depende de si existe o no en stock; debido a esto no se colocó en el programa una referencia directa a proveedores en cada perfil sino que se incluyó tarjetas de contacto de los comerciantes de acero dentro de la interfaz del usuario. Se recomienda mantenerse en contacto con el proveedor, pues siempre prima la palabra del vendedor contra la base de datos realizada de esta investigación para saber cuales son los perfiles inmediatamente disponibles.

- Al ser un programa abierto se recomienda al usuario familiarizarse con su funcionamiento, código y bases de datos; de esta manera podrá añadir nuevas herramientas, perfiles disponibles y más, conforme a las propias necesidades. Se incentiva al usuario que modifique libremente su copia personal. Tener en cuenta que *Equiparador* se encuentra bajo la licencia Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 de creative commons, requiriendo su referencia de autoría original y la continuación de la misma licencia en siguientes versiones.
- Dado que el programa se encuentra colgado en SourceForge, se recomienda al usuario que ya ha modificado su copia y quisiera contribuir al futuro desarrollo de esta herramienta, unirse a la comunidad de software libre en SourceForge debido a que este ofrece varias ayudas para el desarrollo de software por colaboración vía Internet.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros

American Institute of Steel Construction. (2003) *AISC Torsion Guide*

American Institute of Steel Construction. (1980) *Manual of Steel Construction.* 8va Edición

Bauer, Dominique Bernard. (1997). *Calculation of the Plastic Section Modulus Using the Computer*

Canadian Institute of Steel Construction. (2002) *Torsional section properties of steel shapes*

Blodgett, Omer. (1982). *Design of welded structures.* 12va edición. Ohio. James F. Lincoln arc welding foundation

Padilla Ulloa, Edgar. (2009). *Guía para la formulación de proyectos de Investigación*. Quito

Parker, Harry. (1972). *Texto simplificado de mecánica y resistencia de materiales*.

Vallejo, Raúl. (2003) *Manual de Escritura Académica*

Articulos de Revistas

Time magazine. *A Brief History of the World's Tallest Buildings*

Apuntes personales de entrevistas

Cámara de la Construcción Ecuatoriana. (2014) *Apuntes sobre la norma ecuatoriana de construcción*

IPAC, Patricia Tirado . (2014) *Apuntes sobre la disponibilidad de perfiles laminados en caliente*

Novacero. (2014). *Apuntes sobre la disponibilidad de perfiles laminados en caliente, perfiles armados y normas ecuatorianas*

Ing. Rodrigo Ruiz. EPN. (2009) *Apuntes de la Materia: Ciencia de Materiales,*

Soporte en línea

OpenOffice.org BASIC Programming Guide.

https://wiki.openoffice.org/wiki/Documentation/BASIC_Guide

OpenOffice Community forum

https://forum.openoffice.org/en/forum/

Referencias directas

En la lista de las siguientes página se exponen en orden de aparición de los superíndices a lo largo de toda la memoria escrita a su referencia bibliográfica correspondiente.

[1] http://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_de_Barcelona

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_and_structures_in_the_world

[3] http://4.bp.blogspot.com/_FRRwJeg1p-I/S78ShFjKmXI/AAAAAAAAALw/YCXLNzhF7IY/s1600/towerss.png

[4] http://science.howstuffworks.com/engineering/structural/skyscraper6.htm

[5] https://www.aisc.org/content.aspx?id=3792

[6] http://www.pvmgarage.com/2010/09/sport-stadiums-with-great-architecture/

[7] Blodgett, Omer W. Design of Welded Structures

[8] http://carlosdamiani.blogspot.com/2010/11/control-de-calidad-para-el-acero.html

[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Center_of_mass

[10] Parker, Harry. (1972). Texto simplificado de mecánica y resistencia de materiales.

[11] http://labspace.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=399803

[12] http://en.wikipedia.org/wiki/Radius_of_gyration

[13] http://en.wikipedia.org/wiki/Section_modulus

[14] http://en.wikipedia.org/wiki/Torsion_constant

[15] http://www.alibaba.com/product-detail/Extruded-aluminum-beams_538415092.html

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Steel_mill

[17] http://en.wikipedia.org/wiki/Hot_rolling#Hot_rolling

[18] Apuntes de la Materia: Ciencia de Materiales, Ing. Rodrigo Ruiz. EPN

[19] http://www.the-warren.org/ALevelRevision/engineering/grainstructure.htm

[20] http://www.steeluniversity.org/content/media/images/rx-dynamic-rex-

thumbnail.jpg

[21] http://en.wikipedia.org/wiki/I_beam

[22] http://www.huddlesteelbuildings.com/article.asp?ArtID=6&PgLbl=Our-Buildings&PagID=3

[23] http://en.wikipedia.org/wiki/T-beam

[24] http://www.grdsteel.com/mobile/index.php?option=com_content&view=article&id=71&Itemid=243

[25] http://techstudies.myblog.arts.ac.uk/2013/02/20/task-3/

[26] http://www.ssslmachinery.com/SSSL_Inventory_Sold.asp

[27] http://www.normalizacion.gob.ec/

[28] http://www.fedimetal.com.ec/

[29] http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Internacional_de_Unidades

[30] AISC Torsion Guide

[31] Bauer, Dominique Bernard. (1997). Calculation of the Plastic Section Modulus

Using the Computer

[32] Canadian Institute of Steel Construction. (2002) TORSIONAL SECTION PROPERTIES OF STEEL SHAPES

[33] American Institute of Steel Construction. AISC Steel Construction Manual.