PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero/a Civil

Tema: Determinación de la eficiencia de múltiples secciones transversales sometidas a pandeo global

AUTORES:

JÁTIVA IZQUIERDO EMILIA JULIANA

GALLEGOS TORRES GEOVANNI FABRIZIO

QUITO DM, JUNIO DE 2023

DEDICATORIA EMILIA

A Karina Izquierdo y Fabricio Játiva, mis amados padres que siempre creyeron en mí incluso cuando yo no lo hacía y quienes son pilar fundamental de todo lo que he logrado.

A Mateo Játiva, mi hermano y compañero de vida quien me brindo su amor y cariño en todo momento.

A Iralda Herrera y Edisón Játiva, mis preciados bititos a quienes no me alcanzan las palabras para expresar el profundo amor que les tengo.

DEDICATORIA GEOVANNI

A Ramiro Antonio Aranda Zambrano, mi preciado mejor amigo que ya no me acompaña en esta vida.

A mis padres Mirian Torres y Victor Gallegos, gracias por todo su cariño y por haberme criado como alguien fuerte y ambicioso.

A mi hermana María José, por haberme cuidado desde el primer momento y enseñarme tantas cosas.

AGRADECIMIENTOS EMILIA

A Dios por haberme permitido llegar tan lejos y guiar mi camino.

A Nicole Romo, mi amada prima quien considero una hermana por haberme brindado apoyo y cariño incondicional.

A Geovanni Gallegos, mi colega y mejor amigo quien ha estado junto a mí en todo momento.

A MSc. Ing. Carlos Celi quien ha sido un referente y una gran influencia para cada día "ser mejor".

A mi familia, amigos y cada una de las personas que se cruzaron en mi camino en esta hermosa etapa que acaba de culminar.

AGRADECIMIENTOS GEOVANNI

Aitana Martinez, gracias por ser mi confidente en los momentos difíciles, mi amada.

Emilia Játiva, gracias por brindarme tu sincera amistad durante este arduo camino.

MSc. Ing. Nicolas Mora Bowen, gracias por ser *un guía y mi mayor inspiración para seguir el hermoso camino de las estructuras.*

MSc. Ing. Carlos Celi Sánchez, gracias por ser un referente, cultivar la curiosidad por la investigación, el hambre por aprender más y ser un ejemplo a seguir para mí.

Ryan, Snapi, Chela y Blue, mis amadas mascotas que me hicieron compañía en las diferentes etapas de mi vida.

ÍNDICE

1.CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 9
1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 9
1.3. HIPÓTESIS 9
1.4. ALCANCE 9
1.5. OBJETIVOS 10
1.5.1. OBJETIVO GENERAL: 10
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: 10
1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 10
2.CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 12
2.1. ANTECEDENTES O MARCO REFERENCIAL 12
2.2. MARCO TEÓRICO 12
2.2.1. Análisis probabilístico 12
2.2.2. Descripción del cálculo de matrices de rigidez locales 13
2.2.3. Pandeo de Euler 19
2.2.4. Tipos de Pandeo 20
2.2.5. Restricciones de los extremos y longitud efectiva de una columna 22
2.2.6. Metodología AISC 360 23
2.2.7. Perfiles usados para columnas 24
2.2.8. Teoría de la Estabilidad 26
2.2.9. Análisis de segundo orden 26
2.3. No linealidad de material 27
2.3.1. Clasificación de no linealidad de material 27
2.3.2. Análisis plástico 29
2.4. MARCO CONCEPTUAL 31
3.CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN 32
3.1. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA 32
3.2. PROGRAMACIÓN 38
3.2.1. Algoritmo 38
3.2.2. Código JF Section en Python 39
4.CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS 42

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS....42
4.1.1. Gráfico de Esbeltez vs Esfuerzo....42
4.1.2. Tablas de resultados....43
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS....44
4.2.1. Factor de Utilización....44
4.2.2. Costos....47
5.CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....51
5.1. CONCLUSIONES....51
5.2. RECOMENDACIONES....51
6.BIBLIOGRAFÍA....53
7.ANEXOS....55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 2-1: Integral de función de densidad de probabilidad 13

Ec. 2-2: Matriz de transformación 13

Ec. 2-3: Deducción de la matriz de transformación 14

Ec. 2-4: Ecuación de transformación de coordenadas 15

Ec. 2-5: Ecuación de rigidez extendida 15

Ec. 2-6: Ecuación de rigidez 17

Ec. 2-7: Acciones del sistema global 17

Ec. 2-8: Desplazamientos de la estructura 18

Ec. 2-9: Ecuación de la carga crítica de Euler 19

Ec. 2-10: Ecuación del pandeo Inelástico 24

Ec. 2-11: Ecuación del pandeo Elástico 24

Ec. 3-1: Combinación de carga 1 34

Ec. 3-2: Combinación de carga 2 35

Ec. 3-3: Combinación de carga 3 35

Ec. 3-4: Combinación de carga 4 35

Ec. 3-5: Combinación de carga 5 35

Ec. 3-6: Combinación de carga 6 35

Ec. 3-7: Combinación de carga 7 35

Ec. 3-8: Combinación de carga 8 35

Ec. 3-9: Combinación de carga 9 35

Ec. 3-10: Combinación de carga 10 35

Ec. 3-11: Combinación de carga 11 36

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. Capítulo 2-1: Distribución Normal (C.Gómez, 210) 13
Fig. Capítulo 2-2: Elementos a compresión (A. Guzmán, 2017) 22
Fig. Capítulo 2-3: Valores aproximados del factor de longitud efectiva (AISC, 2010) 23
Fig. Capítulo 2-4: Perfiles de acero (J. McCormac, 1999) 25
Fig. Capítulo 2-5: Teoría de la Estabilidad (T. Galambos, 2008) 26
Fig. Capítulo 2-6: Determinación del módulo de rigidez del acero (T. Galambos, 2008) 27
Fig. Capítulo 3-1: Cercha ubicada en el Bicentenario 32
Fig. Capítulo 3-2: Cercha ubicada Pifo 32
Fig. Capítulo 3-3: Cercha teórica (R. Hibbeler, 1997) 33
Fig. Capítulo 3-4: Área cooperante 34
Fig. Capítulo 3-5: Modelación en Python de la Cercha 1 36
Fig. Capítulo 3-6: Modelación en Python de la Cercha 2 37
Fig. Capítulo 3-7: Modelación en Python de la Cercha 3 37
Fig. Capítulo 3-8: Diagrama de flujo de JF Section (G. Gallegos, E. Játiva, 2023) 38
Fig. Capítulo 4-1: Gráfico de esbeltez vs esfuerzo (G. Gallegos, E. Játiva, 2023) 42
Fig. Capítulo 4-2: Gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización de la cercha 1 44
Fig. Capítulo 4-3: Gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización de la cercha 2 45
Fig. Capítulo 4-4: Gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización de la cercha 3 46
Fig. Capítulo 4-5: Gráfico de densidad de probabilidad del costo de la cercha 1 47
Fig. Capítulo 4-6: Gráfico de densidad de probabilidad del costo de la cercha 2 48
Fig. Capítulo 4-7: Gráfico de densidad de probabilidad del costo de la cercha 3 49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. Capítulo 4-1: Resultados técnicos y económicos 43

Tabla. Capítulo 4-2: Resultados del factor de utilización cercha 1. 45

Tabla. Capítulo 4-3: Resultados del factor de utilización cercha 2. 46

Tabla. Capítulo 4-4: Resultados del factor de utilización cercha 3. 47

Tabla. Capítulo 4-5: Resultados de costo cercha 1. 48

Tabla. Capítulo 4-6: Resultados de costo cercha 2. 49

Tabla. Capítulo 4-7: Resultados de costo cercha 3. 50

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Según Moya (2023). La pandemia del Covid-19 y la guerra entre Rusia y Ucrania han desencadenado múltiples problemas en la industria de la construcción, entre ellos el alza del precio del acero. Por consiguiente, tanto el desequilibrio generado por la excesiva compra del material por parte de la República Popular China durante la pandemia y el declive de uno de los principales exportadores a nivel mundial del acero como lo es Ucrania, el precio mundial de este recurso se ha disparado en los últimos años. Por ende, se requiere de una exhaustiva investigación para encontrar la mayor eficiencia de los perfiles de acero utilizados en la industria de la construcción y así conseguir una optimización para un mayor ahorro de recursos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La información actual relacionada con la comparativa de eficiencia entre secciones transversales mediante un análisis por estabilidad del pandeo global de estructuras metálicas es escasa. Por lo cual pueden ocurrir errores en la etapa de diseño estructural y con ello llegar a tragedia, como por ejemplo la ocurrida en Quito-Ecuador el pasado 7 de mayo del 2022 en el sector La Florida en el cual una cercha de una cancha sintética falló posiblemente por una mala selección de cargas o de perfiles causando la muerte de una persona y la destrucción de la estructura (El Universo, 2022).

1.3. HIPÓTESIS

Mediante el modelo computacional se puede determinar la sección eficiente para este tipo de elementos estructurales bajo los parámetros planteados.

1.4. ALCANCE

La obtención del perfil de sección transversal óptimo se obtendrá mediante un análisis paramétrico con múltiples simulaciones de pandeo global. Se usarán diferentes secciones transversales utilizando como parámetros establecidos carga y longitud para la obtención de una tendencia de datos aceptable en la dispersión de los resultados. Los modelos planteados tendrán las siguientes pautas: se considerará un elemento perfectamente recto, se trabajará con

un modelo perfectamente elástico, las cargas serán aplicadas directamente al centroide de los elementos, no se considerarán esfuerzos residuales intrínsecos del acero.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL:

Determinar las secciones transversales más eficientes para los elementos a ser utilizados en cerchas de estructuras industriales sometida a cargas gravitacionales típicas de Quito.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Modelar un conjunto de cerchas en un software de análisis estructural.
- Crear un modelo matemático computacional capaz de calcular la carga crítica del elemento de la cercha conformada por diferentes secciones transversales.
- Determinar un parámetro de eficiencia de las diferentes iteraciones.
- Comparar la eficiencia de los elementos con diferentes secciones transversales planteadas.
- Determinar el perfil óptimo para las condiciones de carga aplicadas.

1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

VARIABLES

Variables independientes:

- Longitud no arriostrada: Es la medida de su dimensión en la dirección en la que está diseñado para soportar cargas externas sin estar apoyada en otro elemento.
- Material: Es el elemento o elementos extraídos de la naturaleza con el cual el componente estructural está conformado.
- Sección transversal: Es la forma que tiene el área del elemento la cual soporta los esfuerzos a los cuales está sometido el mismo.
- Tipo de apoyo: Es la condición de libertad mediante la cual el elemento estructural está sujetado en sus extremos.
- Cargas gravitacionales: Son todas las cargas verticales paralelas a la dirección de la gravedad que actúan sobre el sistema estructural.

Variables dependientes:

- Inercia: Es la resistencia que tiene un elemento a cambiar de su estado de reposo o movimiento, depende de la sección transversal y como esté dispuesta la misma.

- Área de la sección transversal: Es la superficie que tiene la sección transversal y depende de la geometría de esta.
- Deformación: Es el cambio de longitud en cualquier sentido que puede sufrir un elemento ya sea de forma definitiva o indefinida, depende de las cargas aplicadas y la resistencia de la sección transversal a las mismas.
- Costo: Es el valor monetario por el cual se puede adquirir un objeto o servicio, depende del elemento y la cantidad de material que tenga el mismo.
- Eficiencia: Es la variable mediante la cual se puede cuantificar la satisfacción respecto a múltiples parámetros.

INDICADORES

- Indicador de carga: acumulación de lluvia o granizo, deformaciones.
- Indicador de eficiencia: sección más económica respecto a su capacidad de carga, sección con mayor capacidad de carga respecto a su peso por metro lineal.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES O MARCO REFERENCIAL

Las investigaciones relacionadas con el análisis por estabilidad se empezaron a desarrollar por Galambos (1992) para posteriormente seguir con su discípulo Ziemian (2010) a más de otros cientos de investigadores pero, a pesar de todo el esfuerzo desarrollado los modelos matemáticos planteados para la resolución de los problemas de estabilidad siendo el pandeo la principal preocupación ya sea pandeo global, pandeo local, pandeo torsional, pandeo lateral torsional de alta complejidad para la captación de comportamientos más próximos a la realidad como por ejemplo el análisis de segundo orden no lineal o análisis de pandeo lineal. Actualmente las investigaciones acerca del acero son respecto a los diferentes programas de análisis estructural, como, por ejemplo, una implementación de un modelo con pandeo en OpenSees para secciones de acero en donde se presenta un modelo eficiente que simula el comportamiento histerético de elementos de acero de sección doble T, tubular circular y tubular cuadrada utilizados como diagonales incluyendo el efecto del pandeo global dentro de la plataforma OpenSees.

2.2.MARCO TEÓRICO

2.2.1. Análisis probabilístico

- Campana de Gauss

Según Santander (2022) la Campana de Gauss se representa gráficamente, muestra la distribución de datos en torno a un valor central, la media aritmética, y es simétrica alrededor de la misma; por lo que esta herramienta es utilizada para reflejar la dispersión y tendencia de los datos con el objetivo de identificar patrones o comportamientos en diferentes situaciones.

El nombre “Campana de Gauss” se debe a su forma que es normal y suave que se dibuja en forma de campana sobre las abscisas. El punto en el que se concentran la mayor cantidad de datos es alrededor de la media aritmética, siendo este sector el lugar en donde existe más probabilidad de que ocurra algún hecho analizado.

De esta forma, con la Campana de Gauss es posible establecer una serie de parámetros que ayudan a predecir y racionalizar lo que aparentemente son resultados aleatorios, obteniendo una versión más clara y visual de la distribución normal de un conjunto de números.

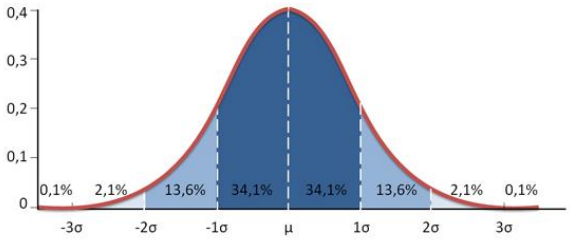


Fig. Capítulo 2-1: Distribución Normal (C.Gómez, 210)

- Función de densidad de probabilidad

Es una función matemática que describe la probabilidad de que una variable aleatoria continua tome un determinado valor. La función de densidad asociada a una variable define matemáticamente las probabilidades de que la variable tome cualquier valor. Para hallar la probabilidad de que una variable continua tome un valor dentro de un intervalo se debe calcular la integral de la función de densidad asociada a dicha variable entre los límites del intervalo.

$$P[a \leq x \leq b] = \int_a^b f(x)dx$$

Ec. 2-1: Integral de función de densidad de probabilidad

Donde f(x) es la función de densidad de la variable aleatoria continua. La probabilidad de que la variable tome un valor dentro de un intervalo es equivalente al área debajo de la función de densidad en ese intervalo.

2.2.2. Descripción del cálculo de matrices de rigidez locales

Según Aslam Kassimali (1993) para el cálculo de la matriz de rigidez local SM de forma arbitraria se tomará un elemento m de la estructura con ángulo θ con convención de signos positivos: a la derecha y desplazamiento hacia arriba y determinamos las fuerzas aplicadas al elemento en su extremo como j de manera que tenemos que las fuerzas j aplicadas en el elemento m llamadas fuerzas locales Qi, Qj son equivalente a las fuerzas globales Fi, Fj y vi hasta vl son los desplazamientos de dicho elemento en concordancia a los ejes globales de la estructural, de tal manera que tendríamos:

$$Q_i = F_i * cos\ \theta + F_j * sen\ \theta$$

$$Q_j = -F_i * sin\ \theta + F_j * cos\ \theta$$

Ec. 2-2: Matriz de transformación

De tal manera tendríamos las fuerzas en el extremo opuesto del elemento k:

$$Q_k = F_k * cos\,\theta + F_l * sen\,\theta$$

$$Q_l = -F_k * sen\,\theta + F_l * cos\,\theta$$

Entonces podemos escribir la matriz como:

$$\begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \\ Q_k \\ Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\theta & sen\,\theta & 0 & 0 \\ -sen\,\theta & cos\,\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\,\theta & sen\,\theta \\ 0 & 0 & -sen\,\theta & cos\,\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \\ F_l \end{bmatrix}$$

La cual se puede definir como Q = T * F, donde T se llama matriz de transformación.

2.2.2.1. Cálculo de matrices de transformación

La matriz de transformación se puede determinar mediante las siguientes relaciones:

$$\cos\theta = \frac{X_k - X_j}{L} = \frac{X_k - X_j}{\sqrt{(X_k - X_j)^2 + (Y_k - Y_j)^2}}$$

$$\text{sen}\,\theta = \frac{Y_j - Y_k}{L} = \frac{Y_k - Y_j}{\sqrt{(X_k - X_j)^2 + (Y_k - Y_j)^2}}$$

Ec. 2-3: Deducción de la matriz de transformación

Donde Xj y Yj son las coordenadas globales del nodo j en el inicio del elemento y Xk y Yk son las coordenadas globales del nodo k del extremo final del elemento y L es la longitud del elemento, de la misma forma podemos usar la matriz T para transformar los desplazamientos al sistema de coordenadas globales a locales quedando como: u = T * v.

2.2.2.2. Cálculo de las matrices de rigidez globales

Para transformar las fuerzas y desplazamientos de un sistema local a un sistema global del nodo j del elemento m, su fuerza global Fi debe ser igual a la resta de componentes de las fuerzas locales Qi y Qj en dirección del eje global X:

$$F_i = Q_i * cos\,\theta - Q_j * sen\,\theta$$

Y de manera similar se puede tener Fj con la suma de las fuerzas locales Qi y Qj en dirección del eje global Y:

$$F_j = Q_i * sen\,\theta + Q_j * cos\,\theta$$

Usando la misma filosofía se pueden tener las fuerzas Fk, Fl en el nodo k:

$$F_k = Q_k * cos\ \theta - Q_l * sen\ \theta$$

$$F_l = Q_k * sen\ \theta + Q_l * cos\ \theta$$

Entonces se puede escribir las fuerzas globales como un arreglo de la forma:

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \\ F_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\ \theta & -sen\ \theta & 0 & 0 \\ sen\ \theta & cos\ \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\ \theta & -sen\ \theta \\ 0 & 0 & sen\ \theta & cos\ \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \\ Q_k \\ Q_l \end{bmatrix}$$

El cual se puede definir $\boldsymbol{F = T^T * Q}$ la cual transforma las fuerzas de coordenadas locales al sistema de coordenadas globales y de igual forma se puede usar la transpuesta de la matriz de transformación para determinar los desplazamientos del vector u (en coordenadas locales) para llevarla a coordenadas globales:

$$v = T^T * u$$

Ec. 2-4: Ecuación de transformación de coordenadas

Ahora, si sustituimos la relación de rigidez local $\boldsymbol{Q = K * u}$ en la relación de transformación $\boldsymbol{F = T^T * Q}$, podemos obtener:

$$F = T^T * Q = T^T * k * u$$

Ec. 2-5: Ecuación de rigidez extendida

Y luego sustituimos la relación de transformación de desplazamientos $\boldsymbol{u = T * v}$, podemos determinar la relación entre las fuerzas F y los desplazamientos v en el sistema coordenado global:

$$F = T^T * k * T * v$$

y finalmente usando la ecuación $\boldsymbol{F = k * v}$ podemos obtener la matriz de rigidez en coordenadas globales o Joint Stiffness:

$$Sj = T^T * k * T$$

$$Sj = \frac{AE}{L} * \begin{bmatrix} \cos^2\theta & cos\ \theta\ sen\ \theta & -\cos^2\theta & -cos\ \theta\ sen\ \theta \\ cos\ \theta\ sen\ \theta & -\text{sen}^2\theta & -cos\ \theta\ sen\ \theta & -\text{sen}^2\theta \\ -\cos^2\theta & -cos\ \theta\ sen\ \theta & \cos^2\theta & cos\ \theta\ sen\ \theta \\ -cos\ \theta\ sen\ \theta & -\text{sen}^2\theta & sen\ \theta & \text{sen}^2\theta \end{bmatrix}$$

2.2.2.3. Ensamble de la matriz de rigidez de la estructura

El ensamble de la matriz de rigidez global de la estructura esta por el orden de los índices de cada matriz de rigidez individual de los m miembros de la estructura total de tal forma que la matriz de rigidez global será cuadrada del orden de GLxGL donde GL son los grados de libertad de la estructura total (incluyendo free displacement y restricted displacement) y cada elemento de la matriz de rigidez individual se colocara en el orden de sus índices en la matriz de rigidez global. Entonces tendríamos:

$$S_J = \sum_{i,j=1}^{m} (S_{Jij})_m$$

Donde:

$(S_{Jij})_m$: Elemento i, j de la matriz de rigidez del elemento m.

2.2.2.4. Solución del sistema de ecuaciones

Cuando el nodo b sufre un desplazamiento unitario v1 = 1 y el otro nodo se mantiene sin deformación, el miembro vive un acortamiento y una fuerza axial de compresión, cuando hay pequeñas deformaciones, la deformación axial ua del miembro debido a v1 es igual a v1 = 1 en la dirección no deformada, entonces:

$$u_a = v_1 * \cos\theta = 1 * \cos\theta = \cos\theta$$

La fuerza de compresión axial Qa en el miembro causado por la deformación ua:

$$Q_a = \left(\frac{AE}{L}\right) * \cos^2\theta$$

Mediante la fuerza axial Qa podemos calcular los coeficientes de rigidez en dirección de los ejes globales X, Y.

$$K_{ij} = Q_a * \cos\theta = \left(\frac{AE}{L}\right) * \cos^2\theta$$

Mediante las relaciones establecidas anteriormente podemos escribir una relación de regides global del miembro

$$\mathrm{F} = \mathrm{K} * \mathrm{v}$$

Ec. 2-6: Ecuación de rigidez

- Considerando una estructura de 3 elemento y 3 nodos:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

Entonces podemos describir como la ecuación de acciones en sistema coordenado local: $[\boldsymbol{a}] = [\boldsymbol{S_M}][\boldsymbol{d}]$

$$a_1 = (K_{33} + K_{11} + K_{33}) * d_1 + (K_{34} + K_{12} + K_{34}) * d_2$$

Si despejamos: $[\boldsymbol{d}] = [\boldsymbol{T}][\boldsymbol{D}]$, entonces podemos determinar las acciones del sistema global de la estructural como:

$$[A] = [T]^T [a]$$

Ec. 2-7: Acciones del sistema global

2.2.2.5. Ecuaciones de transformación de acciones

En la ecuación de transformación de acciones vamos a necesitar de el vector AML el cual expresa las acciones externas que se producen en los nodos y AE donde se adjuntan las acciones externas de signo cambiado que se producen en los nodos debido a todos los elementos conectados al mismo del cual tomaremos solo las componentes cosenoidales en dirección X para el cálculo de las acciones de tal forma que podamos quedarnos con la contribución del nodo j por la carga equivalente esta dado por al elemento m:

$$-C_{Xm}(A_{ML})_{1,m} + C_{Ym}(A_{ML})_{2,m}$$

Donde CXm y CYm son la dirección cosenoidal del miembro m producido por la carga equivalente en los nodos j y k. Entonces tenemos:

$$(A_E)_{2j-1} = -\sum A_{MS} - C_{Xm}(A_{ML})_{1,m} + C_{Ym}(A_{ML})_{2,m}$$

$$(A_E)_{2j} = -\sum A_{MS} - C_{Ym}(A_{ML})_{1,m} - C_{Xm}(A_{ML})_{2,m}$$

$$(A_E)_{2k-1} = -\sum A_{MS} - C_{Xm}(A_{ML})_{3,m} + C_{Ym}(A_{ML})_{4,m}$$

$$(A_E)_{2k} = -\sum A_{MS} - C_{Ym}(A_{ML})_{3,m} - C_{Xm}(A_{ML})_{4,m}$$

De tal manera que la carga equivalente total de un nodo puede ser conseguida por la suma de todos los nodos.

2.2.2.6. Ecuaciones de transformación de desplazamiento

Los desplazamientos de la estructura se pueden calcular por partes, primero para los grados de libertad no restringidos DF podemos obtenerlos mediante la ecuación:

$$D_F = S_{FF}^{-1} * A_F$$

Ec. 2-8: Desplazamientos de la estructura

Donde:

AF: Vector de carga combinada aplicada en los nodos correspondientes a Df

Y después podemos conseguir un vector de deformaciones considerando todos los nodos de la estructura llamado DJ (displacement joint) el cual incluye los grados de libertad restringidos donde la deformación será cero.

En consiguiente podemos obtener el vector DM (displacement member) el cual indica las deformaciones en extremo de elemento en dirección de los axis, DM1 indica el desplazamiento del nodo j en dirección xm. Este desplazamiento puede ser calculado como:

$$D_{M1} = (D_J)_{j1} * C_{Xm} + (D_J)_{j2} * C_{Ym}$$

Donde $(D_J)_{j1}$ y $(D_J)_{j2}$ son los desplazamientos del nodo b en la dirección x, y respectivamente, de forma similar para el cálculo en dirección ym puede ser obtenida como:

$$D_{M2} = -(D_J)_{j1} * C_{Ym} + (D_j)_{b2} * C_{Xm}$$

Finalmente, para el cálculo de los desplazamientos en el nodo e tenemos:

$$D_{M3} = (D_J)_{k1} * C_{Xm} + (D_J)_{k2} * C_{Ym}$$

$$D_{M4} = -(D_J)_{k1} * C_{Ym} + (D_J)_{k2} * C_{Xm}$$

2.2.3. Pandeo de Euler

Es el fenómeno físico mediante el cual un elemento sometido a compresión tiene una falla en la cual ocurre un cambio de geometría brusco fuera de su eje. Este se considera un tipo de inestabilidad que se genera cuando se alcanza la carga de pandeo o carga crítica causada por las cargas externas aplicadas en el elemento.

Según Galambos (2008) la teoría clásica de Euler hace ciertas consideraciones las cuales son:

- El material tiene un comportamiento perfectamente elástico.
- No se consideran los esfuerzos residuales intrínsecos de los materiales.
- El elemento es perfectamente recto y sin imperfecciones en su longitud, por lo cual se desprecian los efectos de segundo orden.
- No se consideran los aportes de rigidez de los elementos conectados.
- Las cargas son directamente aplicadas al centro de gravedad del elemento.

Por dichas consideraciones, la teoría clásica de Euler es poco precisa con el comportamiento real de las estructuras cuando la relación de esbeltez significativa por lo que los códigos de diseño cuales tratan de representar estas características con factores de seguridad.

2.2.3.1. Ecuación de pandeo de Euler

$$EI\frac{d^2x}{dy^2} = -M$$

Considerando que el momento es fuerza por distancia:

$$EI\frac{d^2x}{dy^2} = -Px$$

Si se tiene que $r = \sqrt{I/A}$ y $F_{cr} = P_{cr}/A$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} * A$$

Ec. 2-9: Ecuación de la carga crítica de Euler

Donde:

P= Carga critica del pandeo de Euler

E= Módulo de elasticidad del material

L= Longitud del elemento no arriostrada

A_g= Área bruta de la sección transversal

r= Radio de giro

Rotaciones de los nodos en construcción son restringidas por vigas para pórticos y de forma muy similar para celosías. Euler considera una columna articulada en ambos extremos para la anterior ecuación, por lo cual se deberá considerar los diferentes casos de nodos restringidos para la misma ecuación si se quiere obtener la carga critica de tal manera que tenemos:

$$EI\frac{d^2x}{dy^2} = -Px + M_o$$

$$x = A\,sen\,ky + B\cos ky - \frac{M_o}{P}$$

Donde $k = \left(\frac{P}{EI}\right)^{\frac{1}{2}}$, considerando las condiciones de borde x = 0 en ambos extremos, y = 0 se obtiene:

$$x = \frac{M_o}{P}\left(\frac{1 - cos\ kL}{senkL} * sen\ ky\ + \cos ky - 1\right)$$

2.2.4. Tipos de Pandeo

Los miembros a compresión son elementos estructurales sometidos únicamente a fuerzas axiales de compresión en donde se idealiza un sistema en el cual las cargas son aplicadas a lo largo de un eje longitudinal que pasa por el centroide de la sección transversal. Las cargas muertas pueden o no ser axiales o concéntricas, sin embargo, las cargas vivas nunca lo serán, por tanto, es lejano a la realidad encontrar un elemento cargado axialmente. Existen diferentes miembros que trabajan a compresión, siendo el más conocido la columna, sin embargo, también se encuentran: cuerdas superiores de armaduras y diversos tipos de arriostramiento. A más de eso, muchos tipos de miembros no presentan compresión pura y en vez de la misma presentan compresión en alguna de sus partes, como por ejemplo: patines a compresión de vigas laminadas y armadas y miembros sujetos simultáneamente a cargas de flexión y compresión.

Existen tres modos generales de pandeo en los cuales las columnas cargadas axialmente pueden fallar: pandeo flexionante, pandeo local y pandeo torsionante.

- **Pandeo flexionante:** Se llama también el pandeo de Euler y es un tipo de pandeo primario en el cual los miembros están sometidos a flexión cuando se vuelven inestables.
- **Pandeo local:** Se da cuando una o alguna de las partes de la sección transversal de la columna son tan delgadas que se pandean localmente en compresión antes que los otros modos de pandeo puedan ocurrir. La susceptibilidad de una columna al pandeo local se mide por las relaciones ancho a espesor de las partes de su sección transversal, es decir su relación de esbeltez.

  Según Jack McCormac (2013) los elementos sometidos a compresión pueden ser elementos no esbeltos o esbeltos dependiendo de su relación ancho-espesor. Un elemento no esbelto es aquel cuya relación ancho-espesor no excede a λr de la Tabla B4.1a de la Especificación AISC. Por otro lado, si la relación ancho-espesor excede a λr se trata de un elemento esbelto.

  Para miembros a compresión no esbeltos se deberá hacer referencia a la sección E3 de la Especificación AISC y la resistencia nominal a compresión será obtenida con el estado límite del pandeo a flexión. Para miembros a compresión esbeltos se deberá hacer referencia a la sección E7 de la Especificación AISC y la resistencia nominal a compresión se obtendrá con el valor más bajo entre los estados límite del pandeo a flexión, pandeo por torsión y el pandeo flexo-torsión.
- **Pandeo torsionante flexionante:** Ocurre en columnas que fallan por torsión o por una combinación de pandeo torsional y flexionante. Si las líneas de acción de las cargas laterales pasan por sus centros de cortante la torsión no será presente. El centro de cortante es el punto ubicado en la sección transversal del elemento y a través de él pasan las resultantes de las cargas transversales para evitar la torsión, el centro de cortante coincide con el centroide de las secciones doblemente simétricas. El pandeo torsionante puede ocurrir a pesar de que las cargas pasen por los centros de cortante, esto se debe a que la carga de pandeo no depende de la naturaleza de la carga axial o transversal, sino de las propiedades de la sección transversal, de la longitud de la columna y de las condiciones en los apoyos.

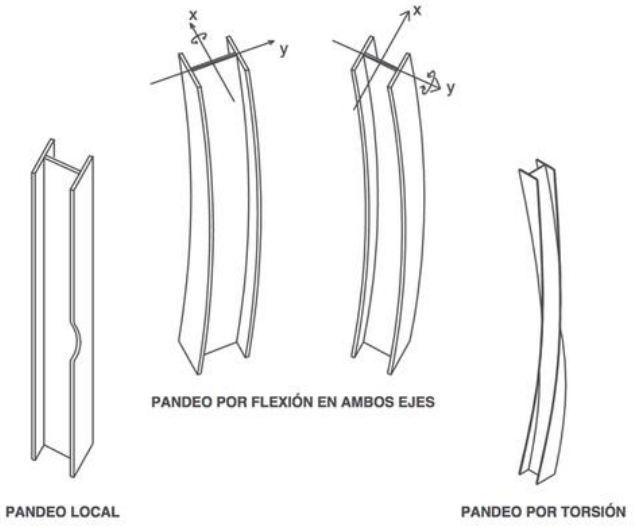


Fig. Capítulo 2-2: Elementos a compresión (A. Guzmán, 2017)

La capacidad de pandearse de una columna se ve influenciada por su longitud, debido que mientras mayor sea la longitud de esta, mayor es su tendencia a pandearse y menor será la carga que pueda soportar. Otros factores que influyen en la probabilidad de pandearse de un elemento son: tipo de conexión en los extremos, excentricidad de la aplicación de la carga, imperfecciones en el material de la columna, torceduras iniciales en la columna y esfuerzos residuales de fabricación. La tendencia a pandearse de un elemento se mide por su relación de esbeltez que es la relación entre la longitud del miembro y su radio de giro mínimo.

2.2.5. Restricciones de los extremos y longitud efectiva de una columna

Las restricciones en rotación y desplazamiento son determinantes en la capacidad que tienen las columnas de soportar cargas. Las columnas con apreciables restricciones en rotación y desplazamiento son capaces de soportar mayores cargas que aquellas con poca restricción en los extremos. La longitud efectiva de una columna se define como la distancia entre sus puntos de inflexión. Según American Institute of Steel Construction (2016) a la longitud efectiva se le denomina KL en donde K es el factor de longitud efectiva y es el número por el cual debe multiplicarse la longitud de la columna. El valor de K depende de la resistencia al movimiento lateral de la columna y de las restricciones rotacionales existentes en los extremos.

McCormack (2013) plantea que el objetivo de la longitud efectiva es simplificar el problema, reemplazar la columna con cualquier condición en los extremos por una equivalente que tenga los extremos articulados. El factor K se determina encontrando la columna articulada con una longitud equivalente que proporcione el mismo esfuerzo crítico. Entre menor sea la longitud

efectiva de una columna, menor será el peligro de que se pandee y mayor su capacidad de carga.

Otro factor que influye en la longitud efectiva de un elemento es su condición de arriostramiento. En un marco arriostrado el desplazamiento en sus nodos está restringido por medio de riostras, muros de cortante o por el soporte lateral de las estructuras adjuntas.

Para diseños preliminares son útiles los siguientes valores:

Tabla 5.1 Valores aproximados del factor de longitud efectiva, *K*.

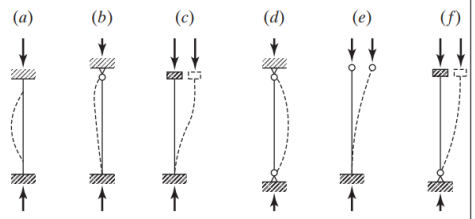
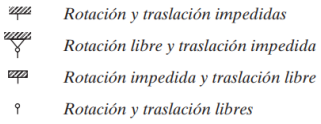
Las líneas punteadas muestran la forma pandeada de la columna						
	(*a*)	(*b*)	(*c*)	(*d*)	(*e*)	(*f*)
Valor *K* teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son aproximadas	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Símbolos para las condiciones de extremo	 *Rotación y traslación impedidas* *Rotación libre y traslación impedida* *Rotación impedida y traslación libre* *Rotación y traslación libres*					

Fig. Capítulo 2-3: Valores aproximados del factor de longitud efectiva (AISC, 2010)

Para diseños de marcos continuos sometidos a pandeo lateral, es necesario hacer un cálculo más profundo de k, determinando su valor con nomogramas previamente establecidos.

2.2.6. Metodología AISC 360

En base a lo establecido por el American Institute of Steel Construction (2016) el diseño de elementos a compresión por medio de fórmulas es un proceso de ensayo y error. El esfuerzo de diseño $Ø_cF_{cr}$ del LRFD no se conocen hasta que se ha seleccionado un perfil y viceversa. Una vez que se escoge una sección de prueba, se obtiene del Manual o se calculan los valores r para esa sección, y se determina el esfuerzo de diseño por sustitución en la fórmula para columnas que sea apropiada. Entonces puede ser necesario probar con una sección más larga o pequeña.

El primer paso es suponer un esfuerzo de diseño ya sea por el método LRFD o un esfuerzo permisible ASD, se obtiene el área estimada de la columna dividiendo la carga apropiada de la misma entre el esfuerzo supuesto. Luego se selecciona una sección de columna con el área

aproximada, se obtiene el esfuerzo de diseño y se lo multiplica por el área de la sección transversal de la columna para finalmente obtener la resistencia de diseño del miembro. Finalizado el diseño, el proyectista puede analizar si la sección está subdimensionada o sobredimensionada y repetir el proceso si es necesario.

2.2.6.1. Ecuaciones del AISC 360-22

$$\emptyset_C = 0.90\ (LRFD)$$

$$P_n = F_n A_g$$

$$When\ \frac{L_c}{r} \leq 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_n = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) F_y$$

Ec. 2-10: Ecuación del pandeo Inelástico

$$When\ \frac{L_c}{r} > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_n = 0.877 F_e$$

Ec. 2-11: Ecuación del pandeo Elástico

2.2.7. Perfiles usados para columnas

Los tipos de perfiles a ser utilizados en columnas puede variar notablemente, pero se debe considerar la practicidad de escoger el adecuado además que los mismos se ven limitados por el tipo de secciones disponibles en el mercado, por problemas de conexión y el tipo de estructura donde se va a usar la sección. El tipo de sección transversal a utilizar varía dependiendo las condiciones en las que la estructura se encuentre. Para seleccionar un perfil correcto a compresión se debe considerar que se requieren miembros rígidos. Las barras, placas y varillas individuales son generalmente demasiado esbeltas para funcionar en forma satisfactoria como miembros a compresión, a menos que sean muy cortas y reciban carga ligera.

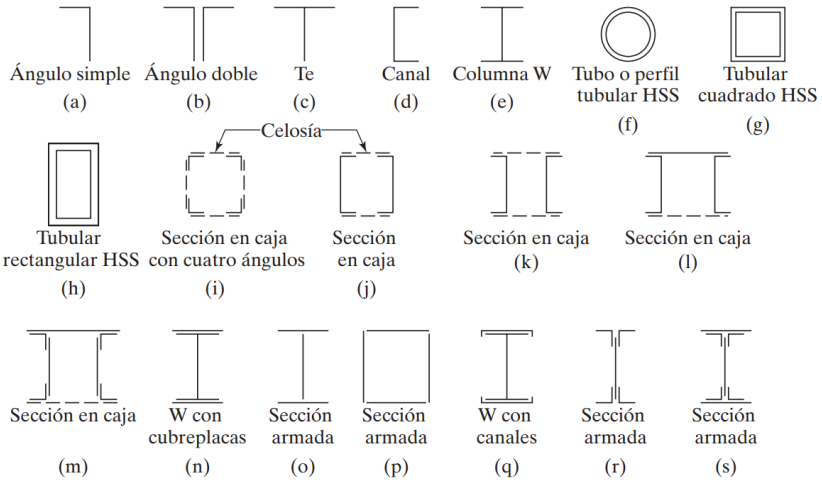


Figura 5.2

Fig. Capítulo 2-4: Perfiles de acero (J. McCormac, 1999)

Los elementos que son formados por ángulos sencillos (a) son eficientes como arriostramientos y miembros a compresión de armaduras ligeras. Los ángulos con mismas dimensiones en sus lados tienen un radio de giro mínimo r mayor a los ángulos con diferentes dimensiones en sus lados en una misma área de acero lo cual beneficia en el ahorro. Los pares de ángulos espalda con espalda (b) son utilizados en las cuerdas superiores de armaduras atornilladas para techos, el espacio entre éstos suele ser con el posicionamiento posterior de una placa de unión o nudo para conexiones. Un examen de esta sección mostrará que probablemente sea conveniente usar ángulos de lados desiguales con los lados largos espalda con espalda para lograr una mejor distribución de los radios de giro r respecto a los ejes x y y. Las tes estructurales (c) se usan cuando se sueldan las armaduras y las placas de nudo no son necesarias, son eficientes para miembros a compresión de la cuerda superior ya que los miembros de la celosía pueden soldarse directamente al alma de las tes. Los canales sencillos (d) no son satisfactorios como miembros a compresión por su pequeño radio de giro r, respecto a los ejes centroidales paralelos al alma. Se recomienda su uso proporcionando soporte lateral adicional en la dirección débil. Los perfiles W (e) son usados y comunes para columnas de edificios y para los miembros a compresión de puentes carreteros. Los valores de radios de giro r son diferentes en sus dos ejes, pero están mejor balanceados que en las canales. Los perfiles tubulares tienen problemas en sus conexiones y costo de fabricación, sin embargo, se han desarrollado tubos soldados económicos.

Las secciones estructurales huecas (HSS: Hollow Structural Sections) (cuadradas, rectangulares o redondas) y los tubos en acero se fabrican y se montan fácilmente, son usadas en edificios, puentes, entre otros. Las secciones tubulares (f) son ideales para cargas pequeñas

y medianas, su ventaja es que son igualmente rígidas en todas las direcciones y por lo general son económicas, a menos que los momentos sean demasiado grandes para los tamaños disponibles. Los perfiles tubulares poseen varias ventajas como: poseen un radio de giro constante respecto a su centroide, tienen menos área superficial para pintar o proteger contra fuego, alta resistencia a la torsión, estéticos. A pesar de sus ventajas, los perfiles tubulares presentan momentos resistentes mucho menores para el mismo peso que los perfiles W.

2.2.8. Teoría de la Estabilidad

La inestabilidad es la condición en la cual un miembro sometido a compresión o un sistema estructural pierde la capacidad de resistir los incrementos de carga y decrece su capacidad, el elemento se deforma más y carga menos. La inestabilidad ocurre en el punto máximo de la curva carga-deformación.

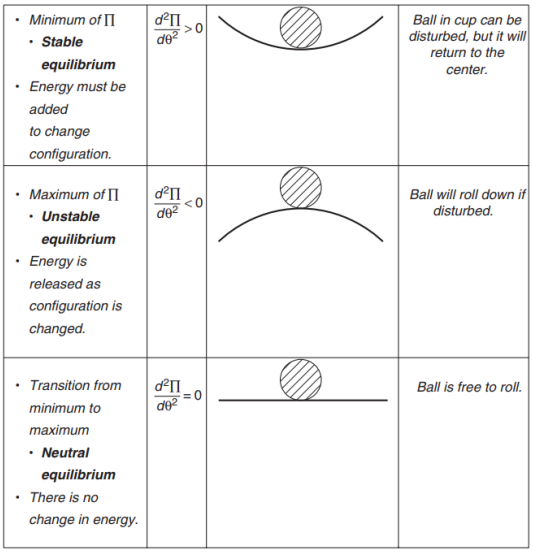


Fig. Capítulo 2-5: Teoría de la Estabilidad (T. Galambos, 2008)

2.2.9. Análisis de segundo orden

Es un análisis que se realiza para asegurar la condición de equilibrio del sistema estructural en la condición deformada, el material se considera elástico y lineal. Es el análisis geométrico que genera momentos debidos a los efectos P-Δ en donde Δ es la deriva lateral, el efecto P- Δ quiere decir que ocurre la deflexión P veces y es una reducción de la resistencia al rotar.

El análisis de segundo orden se puede obtener de dos maneras aproximadas:

a) Un análisis directo de segundo orden usando un software que calcula directamente las fuerzas y los momentos.

b) La aproximación NT-LT en el cual los resultados del análisis elástico se usan y se aplican factores de amplificación.

El análisis de segundo orden afecta al sistema estructural modificando las fuerzas axiales, cortes, fuerzas internas, componentes de los miembros, etc. Sin embargo, la variable más afectada es el momento, siendo el mismo mayor que la fuerza axial y cortante. Los efectos de segundo orden no tienen necesariamente la misma distribución de los momentos de primer orden. Existen dos tipos de efectos de segundo orden:

- P- Δ: Cuya causa es la traslación
- P-$\boldsymbol{\delta}$: Cuya causa es la rotación (flexión)

Ambos efectos están presentes en todos los elementos del pórtico y, si no se utiliza algún método de aproximación, se calcula con análisis no lineal ya que no se permite hacer superposición lineal de efectos. Todo análisis de segundo orden debe ser realizado bajo "factored loads" y es menester mencionar que las cargas lineales no pueden ser escaladas.

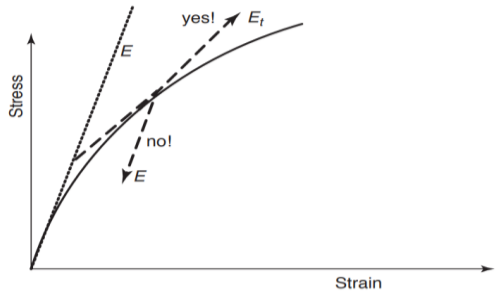


Fig. Capítulo 2-6: Determinación del módulo de rigidez del acero (T. Galambos, 2008)

Para realizar el análisis no lineal se requieren métodos numéricos como el de Newton-Raphson o el "Arc lenght or displacement method" de manera que la rigidez se modifica con cada incremento de carga y por tanto cambia su pendiente en cada punto de manera en que se asemeje a la realidad. Cabe recalcar que los métodos simplificados no toman en cuenta P-$\boldsymbol{\delta}$.

2.3.No linealidad de material

2.3.1. Clasificación de no linealidad de material

No linealidades de material ocurren en la mecánica del solido cuando la relación entre esfuerzo vs deformación no es lineal por lo cual ya no se puede asumir directamente proporcional como el caso de la idealización "perfectamente lineal".

Así que la relación constitutiva ahora puede ser una función de esfuerzos combinados o individuales, ratio de deformación y también puede ser independiente de la carga en la historia.

Estos cambios de las relaciones constitutivas generan cambios en la rigidez global de la estructura o del elemento en estudio por lo que la rigidez de la estructura o el elemento puede variar en función de la combinación o individualidad del nivel de carga y su historia.
Los modelos lineales describen el comportamiento macroscópico de los materiales, por lo que las aproximaciones al comportamiento real del material como el comportamiento real, también están relacionados con los efectos microscópicos en el material.
Por lo planteado anteriormente podemos decir que hay dos posibles clasificaciones para el comportamiento no lineal de la mecánica de solidos: ratio independiente y ratio dependiente.

2.3.1.1. Ratio independiente de no linealidad del material

Este describe que su comportamiento es independiente del tiempo, pero hay que tener presente que todos los materiales dependen hasta cierto punto de la velocidad de aplicación de la carga, pero para ciertos materiales. El ratio de dependencia de ciertos materiales sometidos a una especifica condición de carga es tal que puede ser despreciado sin una perdida significativa de precisión.

2.3.1.2. Elasticidad no lineal

En el caso de no linealidad de material donde se asume que el ratio es independiente. El comportamiento es elástico no lineal donde el esfuerzo no es una relación lineal de la deformación. Aquí la deformación es recuperable y la energía no se pierde de sistema.

Un caso particular es el comportamiento hiperelástico del material tal como una goma donde los esfuerzos son función de una relación constitutiva de deformación dependiente.

2.3.1.3. Plasticidad

Otro caso de no linealidad de material que puede ser asumido como independiente para condiciones particulares es la plasticidad.

La plasticidad describe el comportamiento no lineal donde el material se deforma de manera permanente debido a la aplicación de carga.

La mayoría de los materiales usado en la ingeniería en su comportamiento mecánico muestran comportamiento elastoplástico, en este caso una transición al comportamiento plástico mayormente ocurre en algún momento cuando el nivel de esfuerzo in la estructura cargada o elemento excede el esfuerzo de fluencia.

2.3.1.4. Ratio dependiente de no linealidad de material

Este caso describe la categoría donde existe un tiempo dependencia del material. Este es el caso para un gran número de materiales bajo esta condición especifica donde el ratio de dependencia no es despreciable.

Existen varios casos como: Viscoelasticidad, Viscoplasticidad y Creep y perdida de esfuerzo.

2.3.2. Análisis plástico

Las ecuaciones que son usadas generalmente en el proceso de diseño han sido obtenidas por el análisis elástico de las estructuras, por lo tanto, son necesarias una serie de suposiciones:

- La plasticidad a lo largo de un miembro estructural sólo puede existir en rótulas plásticas idealizadas como rótulas rígidas perfectamente plásticas de cero, longitud y capacidad MP.
- La teoría de la pequeña deformación es aplicable y la no linealidad geométrica no es considerado.
- Se desprecia el efecto del endurecimiento por deformación.
- Los elementos estructurales están debidamente arriostrados para evitar la inestabilidad debida al pandeo local o al pandeo lateral torsional.
- Las rótulas plásticas pueden sufrir una cantidad infinita de deformación plástica (o al menos, deformaciones lo suficientemente grandes como para permitir que la estructura alinee su máxima resistencia).
- Las cargas constantes de magnitud relativa se aplican monótonamente, es decir, aumentan progresivamente sin carga inversa.

2.3.2.1. Teoremas del análisis plástico

Cualquier problema de análisis plástico, se deben cumplir tres condiciones:

- Debe existir equilibrio entre las cargas aplicadas externamente y las acciones internas que resisten estas cargas.
- El momento calculado en cualquier sección transversal nunca debe exceder el momento plástico en esa sección transversal.
- Debe desarrollarse un mecanismo de colapso plástico válido cuando se alcanza la carga de colapso plástico.

2.3.2.2. Teorema del límite superior

Una carga de colapso calculada sobre la base de un mecanismo supuesto siempre será mayor o igual que la carga de colapso real.

2.3.2.3. Teorema del límite inferior

Una carga de colapso calculada sobre la base de un diagrama de momento asumido en el que los momentos no son mayores que M_p es menor o igual que la carga de colapso real.

2.3.2.4. Teorema de unicidad

La verdadera carga de colapso es aquella que tiene la misma solución límite superior e inferior.

2.4. MARCO CONCEPTUAL

Histograma: Gráfico de la representación de distribuciones de frecuencias, en el que se emplean rectángulos dentro de unas coordenadas.

Variable aleatoria continua: Aquella que puede tomar cualquier valor (al menos teóricamente) entre 2 fijados. Los valores de la variable (al menos teóricamente) no se repiten.

Comportamiento perfectamente elástico: Considera que el material tiene un comportamiento lineal positivo en su curva carga vs deformación.

Esfuerzos residuales: Son los esfuerzos generados en el interior del elemento debido a su proceso de fabricación.

Respuesta estructural: El comportamiento que tiene una estructura o un elemento frente a cargas o fuerzas que actúan sobre la misma. Un elemento que tiene mejor respuesta estructural frente a otro será aquel que tiene mayor capacidad para resistir o adaptarse a las diferentes cargas a las que está sometido sin sufrir mayores alteraciones (deformaciones excesivas o falla), por tanto, tendrá menor factor de utilización al poseer a su vez mayor capacidad frente a una demanda dada.

3. CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN

3.1. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

a) Recopilar información sobre los tipos de cerchas, materiales y geometrías utilizadas en la ciudad.

- Cercha 1:



Fig. Capítulo 3-1: Cercha ubicada en el Bicentenario

- Cercha 2:



Fig. Capítulo 3-2: Cercha ubicada Pifo

- Cercha 3:

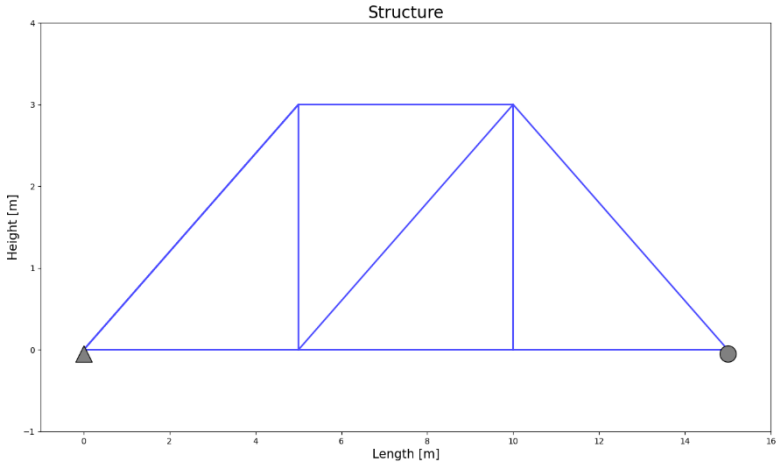


Fig. Capítulo 3-3: Cercha teórica (R. Hibbeler, 1997)

b) Definir las secciones transversales a utilizar: L, T, I, tubular cuadrada, tubular circular y Z.

c) Análisis de cargas

➢ Área cooperante

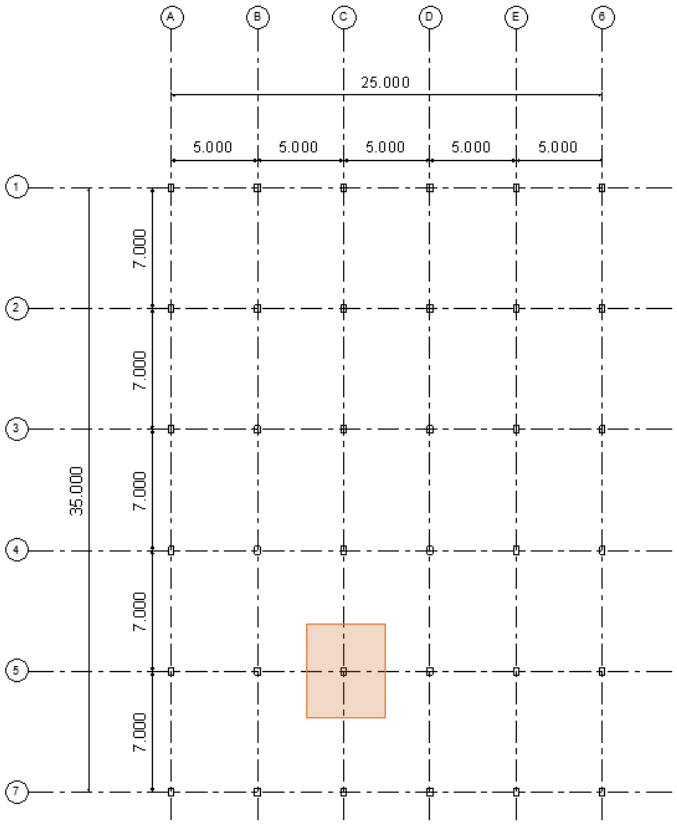


Fig. Capítulo 3-4: Área cooperante

$$A = 7\,m * 5\,m = 35\,m^2$$

- Cargas aplicadas

$$W_C = 90\frac{kg}{m^2}$$

$$W_S = 50\frac{kg}{m^2}$$

$$W_R = 81\frac{kg}{m^2}$$

$$W_w = 35\frac{kg}{m^2}$$

$$W_D = 0.10(150 + 51 + 71 + 37)\frac{kg}{m^2} = 20.5\frac{kg}{m^2}$$

Donde:

W_C: Carga de ceniza

W_S: Carga de granizo

W_R: Carga de lluvia

W_W: Carga de viento

W_D: Carga muerta (considerada el 10% de la suma de las cargas anteriores)

Multiplicar las cargas por el área cooperante

Entonces:

$$W_C = 90\frac{kg}{m^2} * 35m^2 * \frac{1T}{1000\,kg} = 3.15\,T$$

$$W_S = 50\frac{kg}{m^2} * 35m^2 * \frac{1T}{1000\,kg} = 1.75\,T$$

$$W_R = 81\frac{kg}{m^2} * 35m^2 * \frac{1T}{1000\,kg} = 2.835\,T$$

$$W_w = 35\frac{kg}{m^2} * 35m^2 * \frac{1T}{1000\,kg} = 1.225\,T$$

$$W_D = 20.5\frac{kg}{m^2} * 35m^2 * \frac{1T}{1000\,kg} = 0.7175\,T$$

- Combinaciones de carga
  - Caso 1:

    W_T = 1.4 W_D = 1.0045 T

Ec. 3-1: Combinación de carga 1

- Caso 2:

  $W_T = 1.2\ W_D + 0.5\ W_S = 1.736\ T$

  Ec. 3-2: Combinación de carga 2

- Caso 3:

  $W_T = 1.2\ W_D + 0.5\ W_C = 2.436\ T$

  Ec. 3-3: Combinación de carga 3

- Caso 4:

  $W_T = 1.2\ W_D + 1.6\ W_S + 0.5\ W_w = 4.2735\ T$

  Ec. 3-4: Combinación de carga 4

- Caso 5:

  $W_T = 1.2\ W_D + 1.6\ W_R = 3.661\ T$

  Ec. 3-5: Combinación de carga 5

- Caso 6:

  $W_T = 1.2\ W_D + 1.6\ W_C = 5.901\ T$

  Ec. 3-6: Combinación de carga 6

- Caso 7:

  $W_T = 1.2\ W_D + 1.6\ W_R + 0.5\ W_w = 6.0095\ T$

  Ec. 3-7: Combinación de carga 7

- Caso 8:

  $W_T = 1.2\ W_D + W_w + 0.5\ W_S = 2.961\ T$

  Ec. 3-8: Combinación de carga 8

- Caso 9:

  $W_T = 1.2\ W_D + W_w + 0.5\ W_R = 3.486\ T$

  Ec. 3-9: Combinación de carga 9

- Caso 10:

  $W_T = 1.2\ W_D + W_w + 0.5\ W_C = 3.661\ T$

  Ec. 3-10: Combinación de carga 10

- Caso 11:

  $W_T = 0.9\ W_D + W_W = 1.87075\ T$

Ec. 3-11: Combinación de carga 11

Se escoge el caso más crítico, caso 7.

$$W_T = 6.0095\ T$$

d) Se modelarán las cerchas en el software de análisis computacional que en este caso es OpenSeespy, despreciando las deformaciones por flexión y corte de tal manera que no afecte la sección transversal en la obtención de la demanda del elemento.

- Cercha 1

  Se obtuvo una demanda de 1966.08 kg y la longitud del elemento es de 141.42 cm.

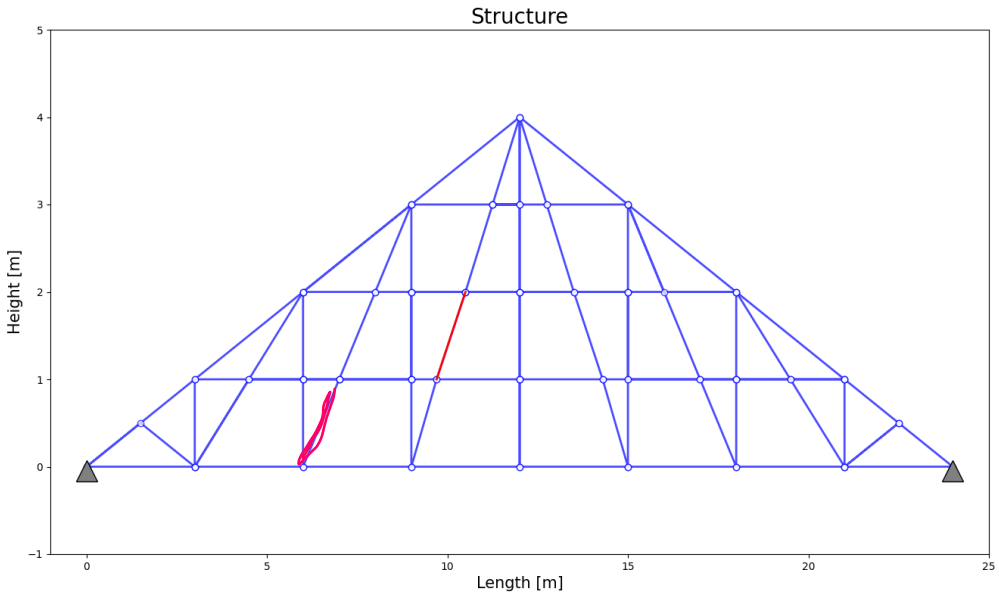


Fig. Capítulo 3-5: Modelación en Python de la Cercha 1

- Cercha 2

  Se obtuvo una demanda de 575.38 kg y la longitud del elemento es de 223.6 cm.

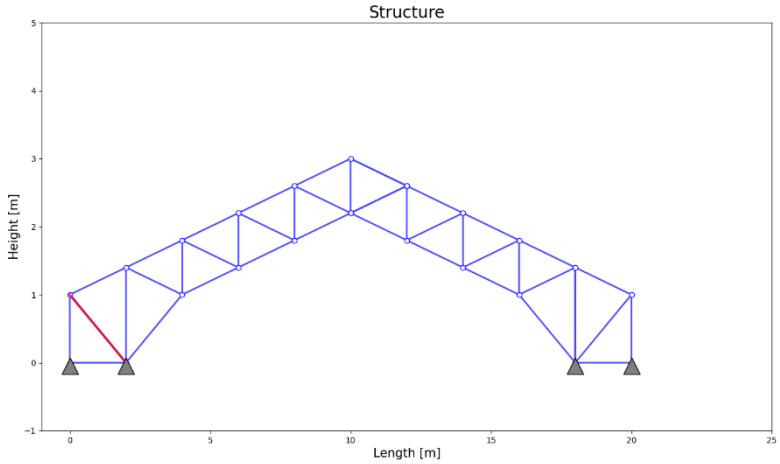


Fig. Capítulo 3-6: Modelación en Python de la Cercha 2

- Cercha 3

  Se obtuvo una demanda de 1000 kg y la longitud del elemento es de 500 cm.

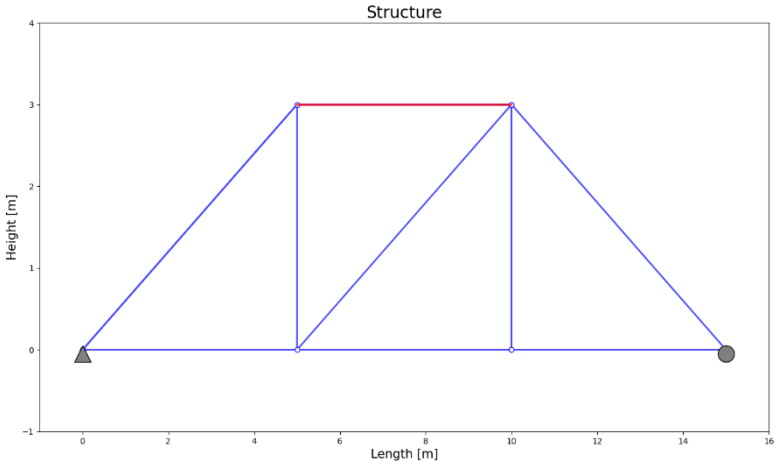


Fig. Capítulo 3-7: Modelación en Python de la Cercha 3

e) Se escoge un elemento de la cercha y se obtiene la carga axial del mismo, la cual será la demanda.

3.2. PROGRAMACIÓN

3.2.1. Algoritmo

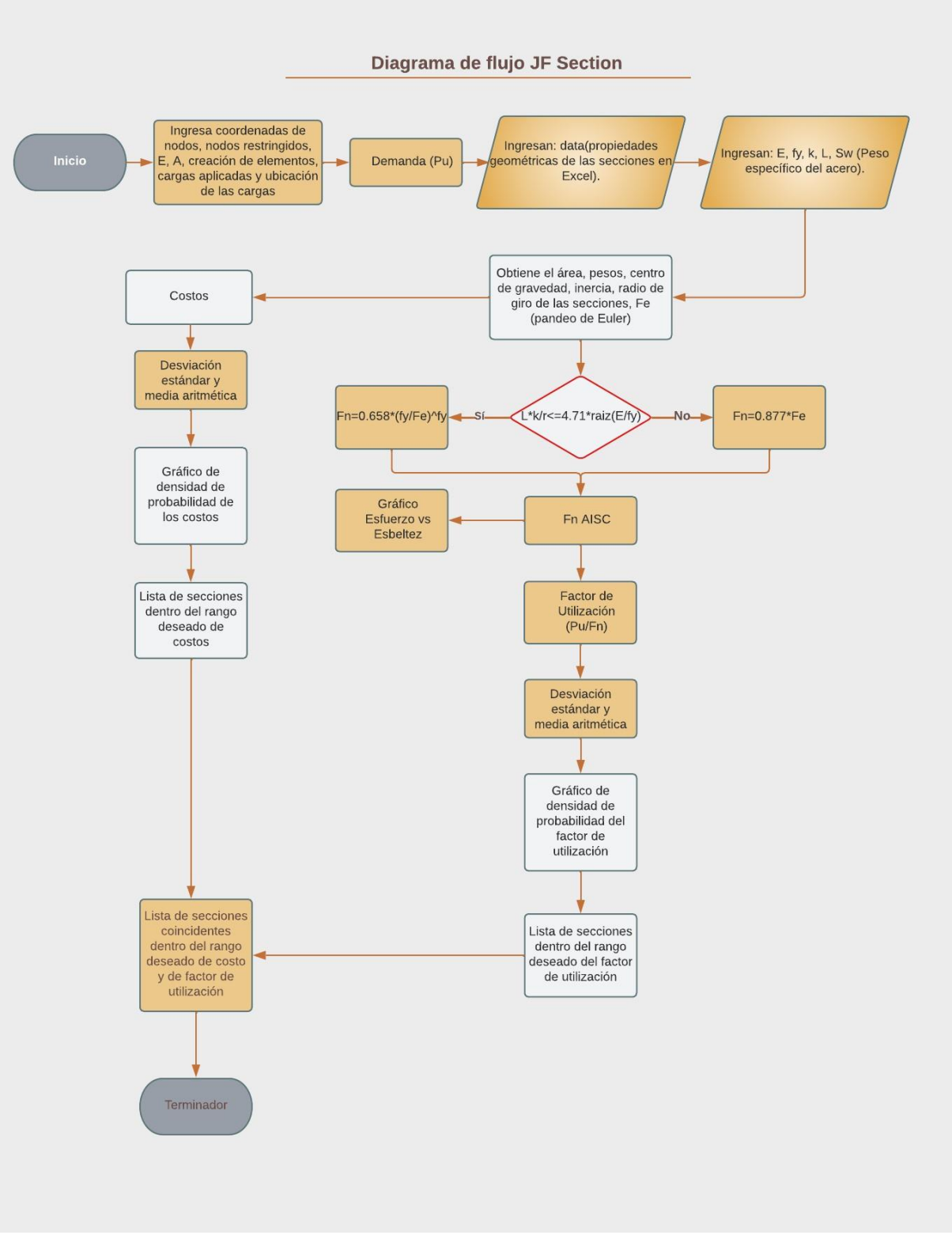
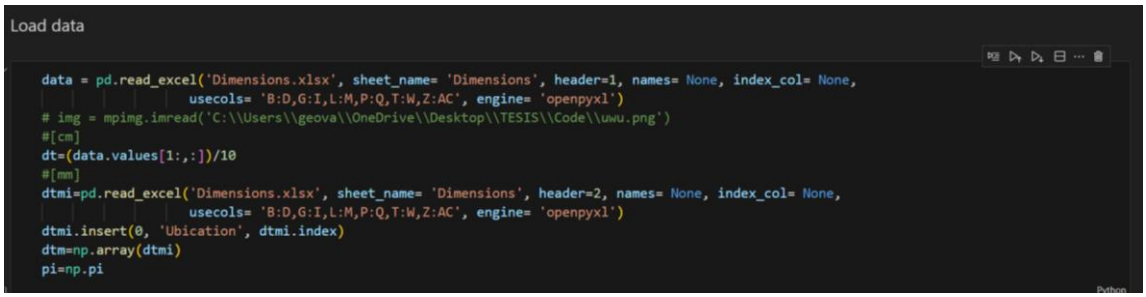


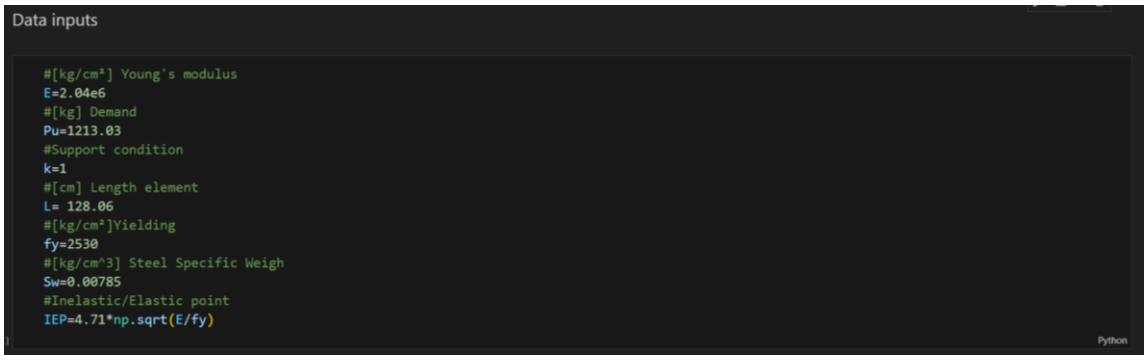
Fig. Capítulo 3-8: Diagrama de flujo de JF Section (G. Gallegos, E. Játiva, 2023)

3.2.2. Código JF Section en Python

a) Se cargan los datos previamente establecidos en un Excel con las dimensiones de los perfiles de acero con diferentes secciones transversales.



b) Se insertan los datos deseados de cada cercha y que servirán para el posterior análisis paramétrico: Pu (demanda), L (longitud del elemento). También se especificarán valores correspondientes a las propiedades del acero.



c) De cada sección transversal calcula: área, peso, costo, centro de gravedad, inercia, radio de giro, pandeo de Euler y obtiene la capacidad del elemento con la capacidad al pandeo del AISC.



AISC BUCKLING

```
Fn_L=np.zeros(len(data)-1)
Fn_T=np.zeros(len(data)-1)
Fn_O=np.zeros(len(data)-1)
Fn_C=np.zeros(len(data)-1)
Fn_I=np.zeros(len(data)-1)
Fn_Z=np.zeros(len(data)-1)
j=0
for i in range(len(Fn_L)):
    if (L*k/r_L[j]<=4.71*np.sqrt(E/fy)).any():
        Fn_L[j]=((0.658**(fy/Fe_L[j]))*fy)
    else:
        Fn_L[j]=0.877*Fe_L[j]
    if (L*k/r_T[j]<=4.71*np.sqrt(E/fy)).any():
       Fn_T[j]=(0.658**(fy/Fe_T[j]))*fy
    else:
        Fn_T[j]=0.877*Fe_T[j]
    if (L*k/r_O[j]<=4.71*np.sqrt(E/fy)).any():
        Fn_O[j]=(0.658**(fy/Fe_O[j]))*fy
    else:
        Fn_O[j]=0.877*Fe_O[j]
    if (L*k/r_C[j]<=4.71*np.sqrt(E/fy)).any():
        Fn_C[j]=(0.658**(fy/Fe_C[j]))*fy
    else:
        Fn_C[j]=0.877*Fe_C[j]
    if (L*k/r_I[j]<=4.71*np.sqrt(E/fy)).any():
        Fn_I[j]=(0.658**(fy/Fe_I[j]))*fy
    else:
        Fn_I[j]=0.877*Fe_I[j]
    if (L*k/r_Z[j]<=4.71*np.sqrt(E/fy)).any():
        Fn_Z[j]=(0.658**(fy/Fe_Z[j]))*fy
    else:
        Fn_Z[j]=0.877*Fe_Z[j]
    j=j+1
    Fni=[Fn_L,Fn_T,Fn_O,Fn_C,Fn_I,Fn_Z]
Fn=np.transpose(Fni)
```

d) Se obtiene el factor de utilización del elemento, el cual es una relación entre la demanda sobre la capacidad.

Utilization Factor

```
U_L=np.zeros(len(data)-1)
U_T=np.zeros(len(data)-1)
U_O=np.zeros(len(data)-1)
U_C=np.zeros(len(data)-1)
U_I=np.zeros(len(data)-1)
U_Z=np.zeros(len(data)-1)
j=0
for i in range(len(U_L)):
    U_L[j]=Pu/Fn_L[j]
    U_T[j]=Pu/Fn_T[j]
    U_O[j]=Pu/Fn_O[j]
    U_C[j]=Pu/Fn_C[j]
    U_I[j]=Pu/Fn_I[j]
    U_Z[j]=Pu/Fn_Z[j]
    j=j+1

Ui=[U_L,U_T,U_O,U_C,U_I,U_Z]
U=np.transpose(Ui)
Ui_index=U
Ui_index=pd.DataFrame(Ui_index)
Ui_index.insert(0,'1', Ui_index.index)
U_index=np.array(Ui_index)
```

e) Se grafica la función de densidad de probabilidad del Factor de Utilización ajustada a una distribución normal. Se escoge entre los valores 0,1,2 dependiendo el rango en el que desee trabajar.

f) Se grafica la función de densidad de probabilidad del Costo ajustada a una distribución normal. Se escoge entre los valores 0,1,2 dependiendo el rango en el que desee trabajar.

Nota: Para la determinación de los rangos de las secciones ya sea para la gráfica de densidad de probabilidad del Factor de Utilización o del Costo, se usaron los siguientes criterios:

- Luego de la obtención del factor de utilización, el mismo es filtrado en el rango entre [0-1] y con las secciones transversales que cumplen con este requisito se construyen las gráficas de densidad de probabilidad.
- Left side (0): Partiendo de la media aritmética, la cual es el pico más alto de la gráfica, se resta una desviación estándar hacia la izquierda y el sector restante es el rango deseado. Se encuentran aproximadamente el 13.6% de los datos.
- Middle side (1): Partiendo de la media aritmética se suma media desviación estándar a la derecha y se resta media desviación estándar hacia la izquierda, el sector entre estos valores es el rango deseado. Se encuentran aproximadamente el 60% de los datos.
- Right side (2): Partiendo de la media aritmética se suma una desviación estándar hacia la derecha y el sector restante es el rango deseado. Se encuentran aproximadamente el 13.6% de los datos.

```
#Define axis for color
x_pin_der=media_u + desviacion_u
x_pin_izq=media_u - desviacion_u
x_pin_med1= media_u + desviacion_u/2
x_pin_med2= media_u - desviacion_u/2
```

```
plt.fill_between(x_u, pdf_u, where=(x_u <= x_pin_izq), interpolate=True, alpha=0.9,color=('#FFD39B'))
plt.fill_between(x_u, pdf_u, where=(x_u >= x_pin_med2) & (x_u <= x_pin_med1), interpolate=True, alpha=0.5,color=('#7A67EE'))
plt.fill_between(x_u, pdf_u, where=(x_u >= x_pin_der), interpolate=True, alpha=0.9, color=('#C1FFC1'))
```

g) Una vez obtenidos los rangos deseados, el programa muestran las secciones que se encuentran en los mismos.

h) Los resultados se muestran en un archivo Excel.

4. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1. Gráfico de Esbeltez vs Esfuerzo

Con el presente gráfico se representa el comportamiento de las dos ecuaciones de pandeo utilizadas. Se puede ver con claridad la necesidad de utilizar la ecuación de pandeo planteada por el American Institute of Steel Construction (AISC) debido a que esta se asemeja al comportamiento real de las secciones.

Esta ecuación empírica fue determinada para mostrar que la capacidad tiene como limite el esfuerzo de fluencia F_y y la diferencia entre la curva original planteada por Euler es debida a los esfuerzos residuales generados por la fabricación de las secciones.

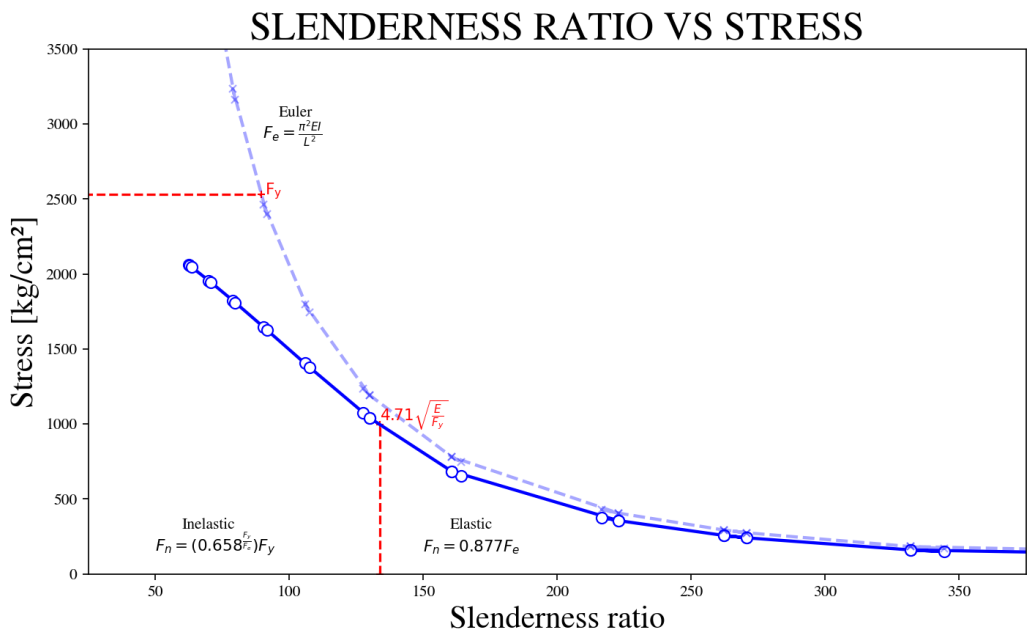


Fig. Capítulo 4-1: Gráfico de esbeltez vs esfuerzo (G. Gallegos, E. Játiva, 2023)

4.1.2. Tablas de resultados

Factor de utilización – Técnico

UTILIZATION FACTOR - LEFT SIDE	Truss 1	#Rep	Prom	Desv
	L	-	-	-
	T	-	-	-
	O	-	-	-
	C	-	-	-
	I	-	-	-
	Z	-	-	-
	Truss 2	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	-	-	-
	T	-	-	-
	O	-	-	-
	C	-	-	-
	I	-	-	-
	Z	-	-	-
	Truss 3	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	3	0.5448	0.00131
	T	-	-	-
	O	-	-	-
	C	-	-	-
	I	-	-	-
	Z	11	0.5123	0.01929
UTILIZATION FACTOR - MIDDLE SIDE	**Truss 1**	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	10	0.5489	0.02902
	T	11	0.5452	0.02554
	O	11	0.5323	0.01247
	C	12	0.5495	0.03993
	I	21	0.5463	0.02779
	Z	4	0.5440	0.02510
	Truss 2	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	11	0.2047	0.03964
	T	13	0.2068	0.04237
	O	12	0.1897	0.04020
	C	13	0.1964	0.04524
	I	21	0.1945	0.03202
	Z	5	0.2155	0.05827
	Truss 3	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	5	0.6968	0.05891
	T	-	-	-
	O	5	0.7014	0.04890
	C	9	0.7052	0.03081
	I	-	-	-
	Z	6	0.6884	0.04020
UTILIZATION FACTOR - RIGHT SIDE	**Truss 1**	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	6	0.7612	0.08684
	T	4	0.7368	0.05154
	O	4	0.7822	0.02445
	C	4	0.6921	0.01622
	I	5	0.8292	0.08376
	Z	4	0.8676	0.11162
	Truss 2	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	4	0.5507	0.10705
	T	6	0.6030	0.22790
	O	4	0.5268	0.03364
	C	2	0.4147	0.01439
	I	5	0.5855	0.11117
	Z	5	0.6693	0.14629
	Truss 3	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	3	0.9731	0.01088
	T	3	0.8697	0.00014
	O	3	0.9138	0.01330
	C	5	0.8988	0.05564
	I	-	-	-
	Z	2	0.8406	0.00416

Costo – Económico

TRUSS 1	Left side	#Rep	Prom	Desv
	L	15	$ 4.69	1.604
	T	1	$ 6.27	-
	O	4	$ 4.13	1.645
	C	5	$ 3.88	1.591
	I	-	-	-
	Z	5	$ 5.57	1.031
	Middle side	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	6	$ 15.73	3.123
	T	10	$ 16.79	2.564
	O	12	$ 15.91	2.609
	C	14	$ 14.85	2.416
	I	11	$ 15.65	2.789
	Z	12	$ 16.30	2.498
	Right side	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	-	-	-
	T	4	$ 28.15	3.080
	O	8	$ 33.59	5.691
	C	-	-	-
	I	10	$ 33.82	4.678
	Z	11	$ 31.37	4.989
TRUSS 2	**Left side**	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	14	$ 7.92	2.699
	T	3	$ 10.20	1.547
	O	4	$ 7.20	2.872
	C	5	$ 6.77	2.779
	I	-	-	-
	Z	5	$ 9.73	1.800
	Middle side	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	6	$ 27.46	5.454
	T	12	$ 27.80	5.379
	O	12	$ 27.78	4.555
	C	14	$ 25.93	4.219
	I	11	$ 27.33	4.869
	Z	12	$ 28.46	4.362
	Right side	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	-	-	-
	T	4	$ 49.15	5.378
	O	8	$ 58.65	9.937
	C	-	-	-
	I	10	$ 59.06	8.169
	Z	11	$ 54.78	8.711
TRUSS 3	**Left side**	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	8	$ 32.01	6.911
	T	-	-	-
	O	-	-	-
	C	4	$ 41.02	2.635
	I	-	-	-
	Z	1	$ 41.97	-
	Middle side	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	3	$ 80.12	9.027
	T	1	$ 75.36	-
	O	6	$ 79.35	11.040
	C	8	$ 79.34	10.774
	I	-	-	-
	Z	9	$ 78.54	9.426
	Right side	**#Rep**	**Prom**	**Desv**
	L	-	-	-
	T	1	$ 125.60	-
	O	6	$ 138.92	19.976
	C	-	-	-
	I	-	-	-
	Z	6	$ 136.12	15.724

Tabla. Capítulo 4-1: Resultados técnicos y económicos

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los siguientes análisis se utilizó la sección Z como una sección de geometría teórica para trabajar como riostra entre cordones pero no se considerara para las conclusiones ni recomendaciones.

4.2.1. Factor de Utilización

4.2.1.1. Cercha 1

En el gráfico de función de densidad de probabilidad del factor de utilización se observa que los valores más probables del mismo se encuentran aproximadamente entre 0.7-1. Indica que la media se encuentra desplazada a la derecha del gráfico. Esto debe a que la demanda colocada de 1966.08 kg es alta y las secciones válidas son de mayor área y por tanto mayor tamaño.

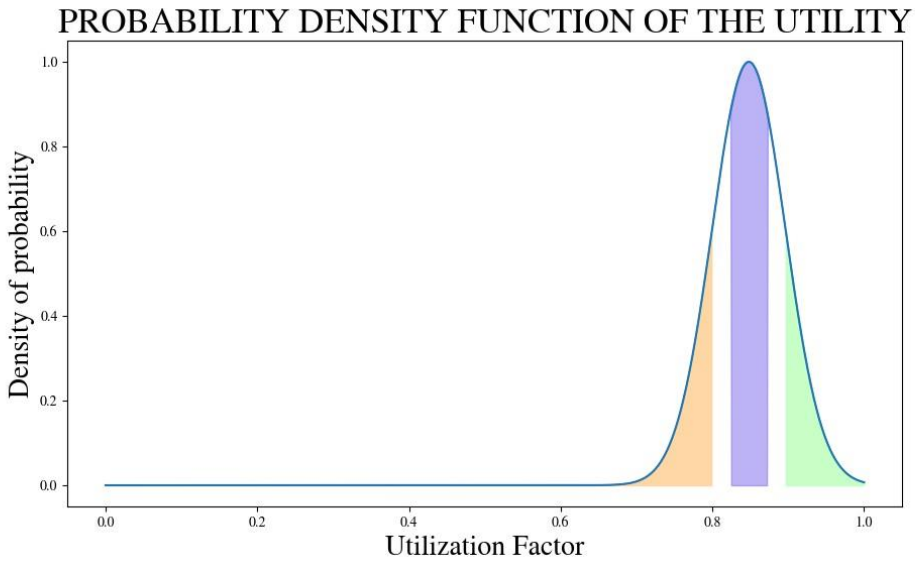


Fig. Capítulo 4-2: Gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización de la cercha 1

- En el "left side" se observa que debido a su alta carga, se desprecian secciones transversales de pequeñas dimensiones ya que su capacidad alcanzará su estado límite y su factor de utilización será mayor que 1. Se observa que la gráfica de densidad de probabilidad se desplaza a la derecha. Las secciones tubular circular y L obtuvieron la mayor incidencia con 3 variantes posibles, siendo la sección L la que posee mejor respuesta estructural con un factor de utilización de 0.7973. La sección que tiene menor dispersión de datos la sección tubular circular con una desviación estándar de 0.0133.

- En el "middle side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección tubular rectangular con 13 repeticiones siendo la misma la sección con mejor respuesta estructural con un promedio de factor de utilización de 0.8408, con una desviación estándar de 0.01367.
- En el “right side” se obtuvo mayor incidencia en la sección I con 7 repeticiones, sin embargo, la sección con mejor respuesta estructural es la circular con un factor de utilización promedio de 0.9138 y con una desviación estándar de 0.0394.

TRUSS 1	Left side		Middle side		Right side	
Max repetitions	L - O	3	C	13	I	7
Best structural response	L	0.7973	C	0.8408	O	0.9138
Standard deviation		0.00133		0.01366		0.00394

Tabla. Capítulo 4-2: Resultados del factor de utilización cercha 1.

4.2.1.2. Cercha 2

En el gráfico de función de densidad de probabilidad del factor de utilización se observa que los valores más probables del mismo se encuentran aproximadamente entre 0.3-0.4. Indica que la media se encuentra desplazada a la izquierda del gráfico. Esto debe a que la demanda colocada de 575.38 kg es baja por lo cual la mayoría de las secciones poseen una capacidad mucho mayor a la demanda.

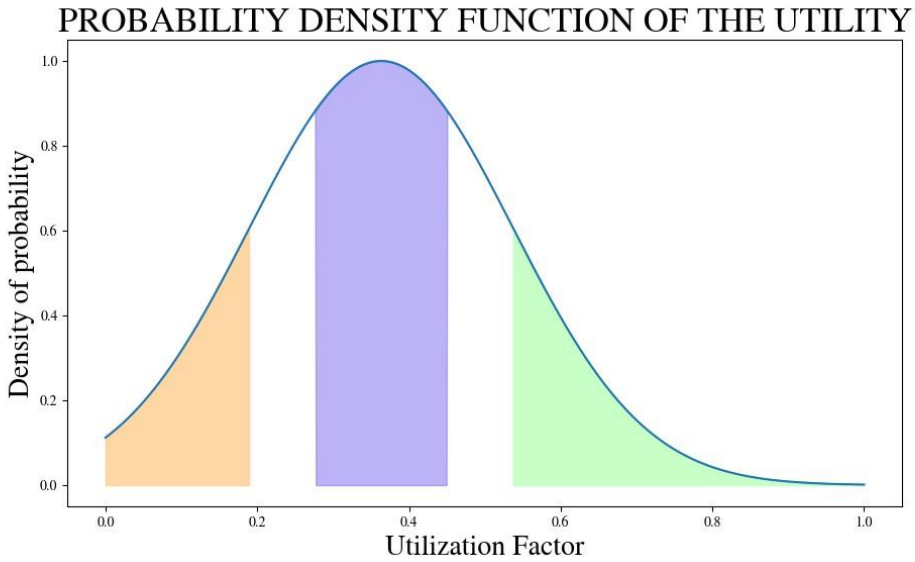


Fig. Capítulo 4-3: Gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización de la cercha 2

- En el "left side" se observa que no hay resultados, lo que nos indica que se necesitan secciones con un mayor factor de utilización.

- En el “middle side” se obtuvo mayor incidencia en la sección I con 19 repeticiones, sin embargo, la sección con mejor respuesta estructural es la tubular circular con un factor de utilización promedio de 0.3087 y con una desviación estándar de 0.0471.
- En el “right side” se obtuvo mayor incidencia en la sección tubular circular con 8 repeticiones, sin embargo, la sección con mejor respuesta estructural es la sección L con un factor de utilización promedio de 0.6672 y con una desviación estándar de 0.0189.

TRUSS 2	Left side		Middle side		Right side	
Max repetitions	-	0	I	19	O	8
Best structural response	-	0.0000	C	0.3087	L	0.6672
Standard deviation		0.00000		0.04705		0.01894

Tabla. Capítulo 4-3: Resultados del factor de utilización cercha 2.

4.2.1.3. Cercha 3:

En el gráfico de función de densidad de probabilidad del factor de utilización se observa que los valores más probables del mismo se encuentran entre 0.6-0.8. Indica que la media está desplazada hacia la derecha lo cual se debe a que la demanda de esta cercha es alta y las secciones válidas son de mayor área y por tanto mayor tamaño.

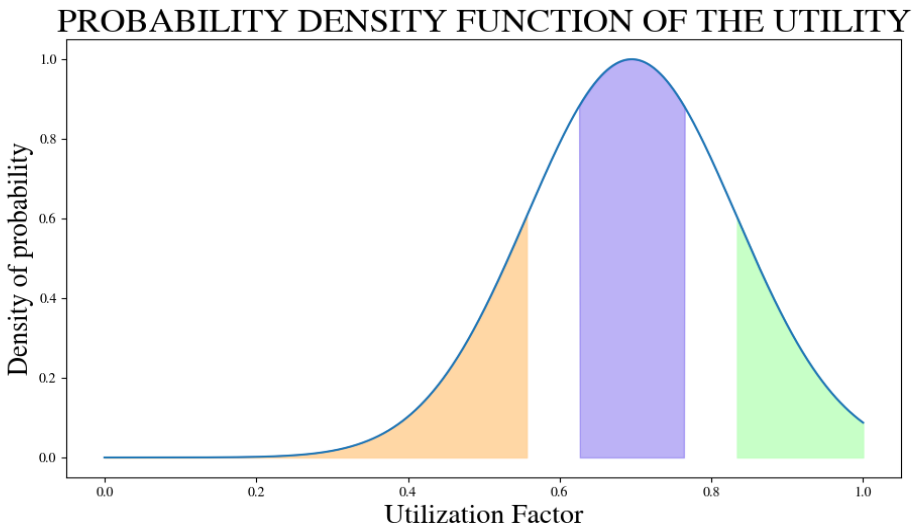


Fig. Capítulo 4-4: Gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización de la cercha 3

- En el “left side” se obtuvo mayor incidencia en la sección L con 3 repeticiones, siendo la misma la que posee mejor respuesta estructural con un factor de utilización promedio de 0.5448 y con una menor desviación de resultados con 0.0013.

- En el “middle side” se obtuvo mayor incidencia en la sección tubular rectangular con 9 repeticiones y con una menor desviación de resultados con 0.0308. La sección con mejor respuesta estructural es la L con un factor de utilización promedio de 0.6968.
- En el “right side” se obtuvo mayor incidencia en la sección tubular rectangular con 5 repeticiones, sin embargo, la sección con mejor respuesta estructural es la Tee con un factor de utilización promedio de 0.8697 y con una desviación estándar de 0.0001.

TRUSS 3	Left side		Middle side		Right side	
Max repetitions	L	3	C	9	C	5
Best structural response	L	0.5448	L	0.6968	T	0.8697
Standard deviation		0.00131		0.05891		0.00014

Tabla. Capítulo 4-4: Resultados del factor de utilización cercha 3.

4.2.2. Costos

4.2.2.1. Cercha 1

En el gráfico de función de densidad de probabilidad del costo se observa que los valores más probables del mismo se encuentran entre 15-25. No se ve afectado en gran medida el costo debido a que la longitud del elemento es la menor entre las 3 cerchas analizadas, siendo esta de 1.4m.

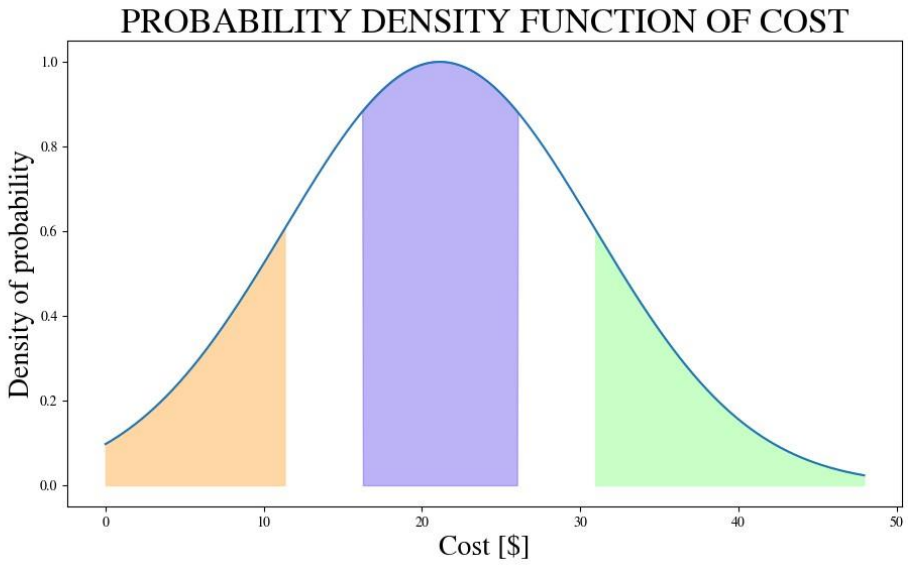


Fig. Capítulo 4-5: Gráfico de densidad de probabilidad del costo de la cercha 1

- En el "left side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección L con 15 repeticiones siendo la misma la más económica con un promedio de precio de $8.04, con una desviación estándar de 1.970.
- En el "middle side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección Tee con 10 repeticiones. La sección tubular rectangular tiene un precio promedio de $20.36 el cual se acerca más al promedio de los costos del mercado, con una desviación estándar de 3.2326.
- En el "right side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección I con 9 repeticiones y la sección Tee es la más económica en el rango de secciones cuyos precios son los más elevados del catálogo con un promedio de precio de $33.75, con una desviación estándar de 2.51198.

TRUSS 1	Left side		Middle side		Right side	
Max repetitions	L	15	T	10	I	9
Best weight cost	L	$ 8.04	C	$ 20.36	T	$ 33.75
Standard deviation		1.97054		3.23264		2.51198

Tabla. Capítulo 4-5: Resultados de costo cercha 1.

4.2.2.2. Cercha 2

En el gráfico de función de densidad de probabilidad del costo se observa que los valores más probables del mismo se encuentran entre 20-40. El costo es mayor al analizado en la cercha 1 debido a que la longitud del elemento de 2.24m es mayor.

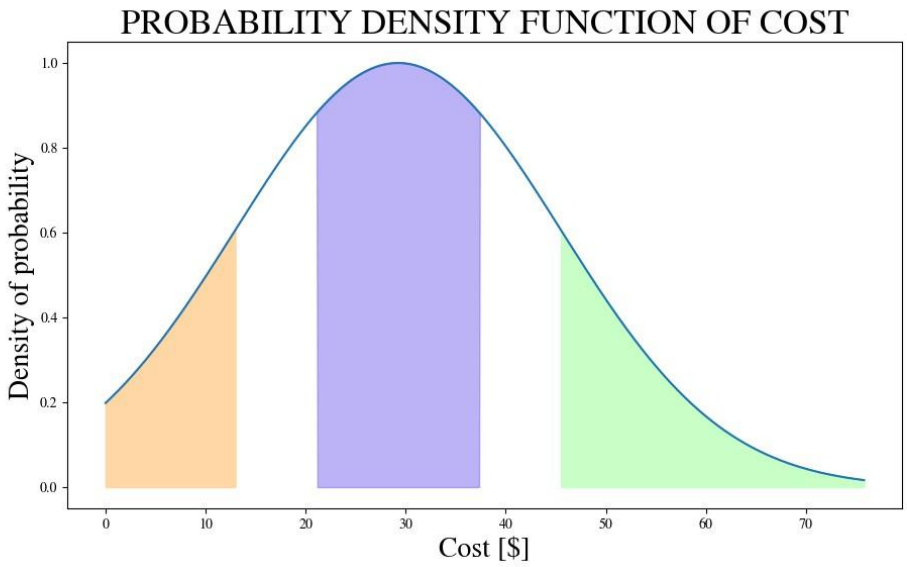


Fig. Capítulo 4-6: Gráfico de densidad de probabilidad del costo de la cercha 2

- En el "left side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección L con 13 repeticiones y la sección más económica es la tubular circular con un promedio de precio de $7.79, con una desviación estándar de 7.7887.
- En el "middle side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección tubular rectangular con 13 repeticiones. La sección L tiene un precio promedio de $27.46 el cual se acerca más al promedio de los costos del mercado, con una desviación estándar de 5.4537.
- En el "right side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección I con 10 repeticiones y la sección Tee es la más económica en el rango de secciones cuyos precios son los más elevados del catálogo con un promedio de precio de $53.36, con una desviación estándar de 3.9717.

TRUSS 2	Left side		Middle side		Right side	
Max repetitions	L	13	C	13	I	10
Best weight cost	C	$ 7.79	L	$ 27.46	T	$ 53.36
Standard deviation		7.78867		5.45368		3.97170

Tabla. Capítulo 4-6: Resultados de costo cercha 2.

4.2.2.3. Cercha 3

En el gráfico de función de densidad de probabilidad del costo se observa que los valores más probables del mismo se encuentran entre 60-100. Las cerchas son más costosas debido a que la longitud del elemento es mayor, siendo esta de 5m.

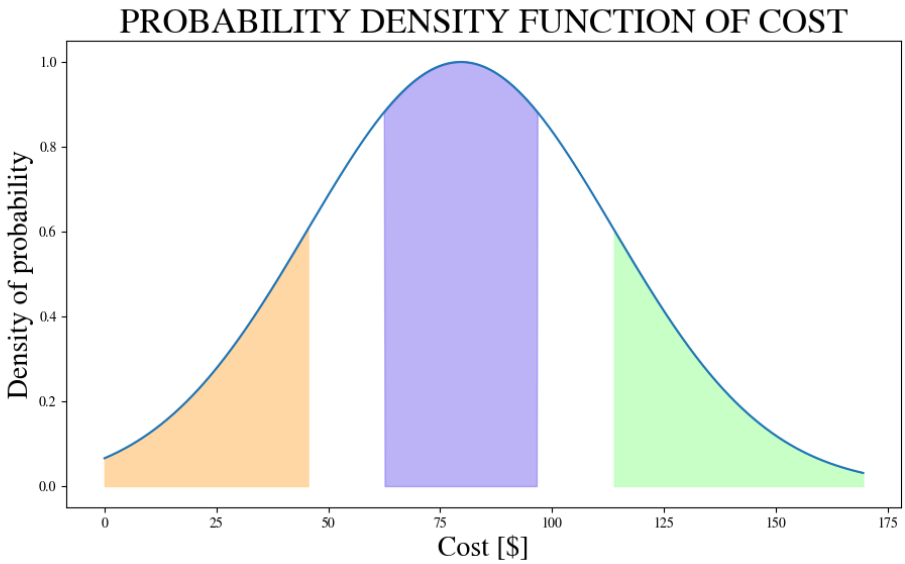


Fig.Capítulo 4-7: Gráfico de densidad de probabilidad del costo de la cercha 3

- En el "left side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección L con 8 repeticiones y siendo la misma la más económica con un promedio de precio de $32.01, con una desviación estándar de 6.91096.
- En el "middle side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección tubular cuadrada con 8 repeticiones, la sección más económica del rango de los precios más probables es la sección Tee con un precio promedio de $75.36, con una desviación estándar de 10.2805.
- En el "right side" se obtuvo la mayor incidencia en la sección tubular circular con 6 repeticiones y la sección Tee es la más económica en el rango de secciones cuyos precios son los más elevados del catálogo con un promedio de precio de $125.60, con una desviación estándar de 18.2370.

TRUSS 3	Left side		Middle side		Right side	
Max repetitions	L	8	C	8	O	6
Best weight cost	L	$ 32.01	T	$ 75.36	T	$ 125.60
Standard deviation		6.91096		10.28051		18.23700

Tabla. Capítulo 4-7: Resultados de costo cercha 3.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Debido a su bajo costo de producción, reducidas dimensiones y buena capacidad la sección L es la más eficiente desde el punto de vista económico presentando los menores costos en el rango izquierdo de la función de densidad representado por los mejores costes para posibles secciones a utilizar para los múltiples análisis paramétricos.
- La sección I fue la que presentó mayor número de posibles secciones a utilizar desde el punto de vista técnico con cargas relativamente bajas y sus respuestas estructurales tendrán la menor dispersión de datos al existir una gran masa de datos para las múltiples secciones posibles.
- La sección tubular rectangular fue la que presentó mayor número de posibles secciones a utilizar desde el punto de vista técnico con cargas relativamente altas.
- La sección Tee en el rango de secciones cuyos precios son los más elevados del catálogo, son las secciones más económicas para los múltiples análisis paramétricos permitiendo una optimización de la utilidad económica en el caso de la necesidad de elementos de gran resistencia referenciado a nuestro catálogo de análisis base.
- Debido a la incidencia y buenas respuestas estructurales se concluye que las secciones tubular rectangular y tubular circular son las más adecuadas cuando existen grandes cargas o extensas longitudes de elemento desde el punto de vista técnico. Esto se debe a que tienen un mejor comportamiento inercial con respecto a las demás secciones y a diferencia de las secciones con simetría simple, los perfiles tubulares tienen mayor y mejor resistencia en ambos sentidos: X, Y. Además, esto influye a su alta relación inercia/área la cual consigue aumentar nuestra capacidad crítica de pandeo de Euler.

5.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable utilizar secciones tubulares rectangulares desde el punto de vista económico cuando se quiera utilizar una sección que tengan la mayor cantidad de sus costos próximos a la media del mercado por posibles fluctuaciones de este.
- Cuando se tienen condiciones críticas de carga y/o longitud, es decir, en el gráfico de densidad de probabilidad del factor de utilización la media se encuentra desplazada a la derecha por lo que los valores más probables del factor de utilización están próximos

a uno. Se recomienda utilizar secciones con forma Tee para minimizar los costos y maximizar la utilidad económica.

- Se recomienda el uso de secciones tubulares rectangulares cuando se quiera la mejor respuesta estructural posible y debido a la alta incidencia en los rangos intermedios para los diferentes análisis se recomienda el uso de secciones tubulares rectangulares cuando no se tiene un gran número de posibilidades de secciones para asegurar que nuestra opción tenga disponibilidad.
- Se recomienda la utilización de la sección L debido a que tiene un buen comportamiento estructural desde el punto de vista del pandeo global. Sin embargo, debido a la asimetría de su forma se deberá analizar el pandeo torsional para evitar problemas de “warping”.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bruneau, M., Uang, C., & Sabelli, R. (2011). Ductile design of Steel Structures. New York: McGraw-Hill.

Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. (2010). NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4 - Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers

El Universo. (2022, 7 de mayo). Fuerte lluvia en Quito: una persona fallecida y varios heridos por colapso del techo en una cancha sintética. Recuperado de https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/fuerte-lluvia-en-quito-dejo-una-persona-fallecida-y-varios-heridos-por-colapso-del-techo-en-una-cancha-sintetica-nota/

Gallagher, R. H., Ziemian, R. D., & McGuire, W. (2000). *Matrix Structural Analysis: Second Edition* (Second Edition). Createspace Independent Publishing Platform.

Galambos, T. V., Galambos, T. V., & Galambos, T. V. (1998). Guide to stability design criteria for metal structures. New York, NY: Wiley.

Kassimali, A. (2011). *Matrix Analysis of Structures* (2.ª ed.). Cengage Learning.

Mora Bowen, N. (2022). *Método de la Rigidez* [Clase]. Análisis Matricial de Estructuras, Quito, Ecuador.

Moya, A. (03 de 2023). Acero: su precio seguirá subiendo en los próximos meses. Ferretería y Bricolaje. Recuperado de: https://ferreteria-y-bricolaje.cdecomunicacion.es/noticias/155981/acero-precios-febrero-2023

McCormac, J., Csernak, F. (1999). Diseño de Estructuras de Acero. Carolina del Sur. V Ediciónn.

Santander. (2022, 12 28). *Universidad Santander*. Retrieved from Cómo hacer una campana de Gauss: https://www.becas-santander.com/es/blog/campana-de-gauss-excel.html#:~:text=La%20Campana%20de%20Gauss%20es,que%20se%20encuentran%20los%20valores.

Weaver, W., & Gere, J. M. (1990). *Matrix Analysis Framed Structures: Vol. 1st Edition* (Softcover Reprint of the Original 1st 1990 ed.). Springer.

Ziemian, R. D. (2010). Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures (6th ed.). Wiley.

<table>
<tr><td>Elaborado por:</td><td>Revisado y Aprobado por:</td></tr>
<tr><td>
ESTUDIANTE: Geovanni Fabrizio Gallegos Torres
CC: 0850106048</td><td rowspan="2">NOMBRE: Jorge Américo Cisneros Gallegos
CC: 1716762578

DOCENTE DIRECTOR/TUTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DOCENTE DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</td></tr>
<tr><td>
ESTUDIANTE: Emilia Juliana Játiva Izquierdo
CC: 1719929778</td></tr>
<tr><td>Fecha: 26/05/2023</td><td>Fecha: 26/05/2023</td></tr>
</table>

7. ANEXOS

Se presentarán los anexos en las páginas posteriores:

JF SECTION®

Manual para el uso del programa JF SECTION para la determinación de secciones optimas a utilizar desde el punto de vista técnico y económico

Autores:

Emilia Juliana Játiva Izquierdo

Geovanni Fabrizio Gallegos Torres

PUCE, Quito, Ecuador

15 de mayo del 2023

COPYRIGHT

El programa informático JF SECTION y toda la documentación asociada son productos propietarios y con derechos de autor. Los derechos de propiedad en todo el mundo corresponden a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. El uso no autorizado del programa o la reproducción de la documentación en cualquier forma, sin previa autorización por escrito de Pontificia Universidad Católica del Ecuador, está explícitamente prohibido. Para obtener más información y copias de esta documentación, puedes dirigirte a:

Emilia Juliana Játiva Izquierdo

e-mail: ejjativa@hotmail.com

tel: (+593) 996139940

Geovanni Fabrizio Gallegos Torres

e-mail: geovanni.gallegos.torres@hotmail.com

tel: (+593) 992052593

DISCLAIMER

Se ha invertido un tiempo considerable, esfuerzo y gastos en el desarrollo y documentación de JF SECTION. El programa ha sido ampliamente probado y utilizado. Sin embargo, al utilizar el programa, el usuario acepta y comprende que los desarrolladores o los distribuidores no ofrecen ninguna garantía expresa o implícita sobre la precisión o confiabilidad del programa.

El usuario debe comprender explícitamente las suposiciones del programa y verificar de forma independiente los resultados.

TABLA DE CONTENIDO

A. Descripción del modelo estructural 2
1. Modelo matemático 2
2. Secciones 3
2.1. Shapes 3
B. Guía de uso 6
1. Data inputs 6
2. Condición de análisis 6
2.1. Criterio técnico: Factor de utilización (U) 6
2.2. Criterio económico: Costo ($) 7
2.3. Generación de resultados 8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura B-1: Estructura original vs Estructura deformada 2
Figura B-2: Catálogo de secciones 3
Figura B-2.1.1: Angle (L) Section 3
Figura B-2.1.2: Tee (T) Section 4
Figura B-2.1.3: Circular tubular (O) Section 4
Figura B-2.1.4: Square tubular (C) Section 4
Figura B-2.1.5: I (I) Section 5
Figura B-2.1.6: Z (Z) Section 5
Figura C-2.1: Función de densidad de probabilidad del factor de utilización 7
Figura C-2.2: Función de densidad de probabilidad del costo 7

Introducción

Este tutorial es bastante detallado. Su objetivo es introducir y demostrar muchas de las capacidades de JF SECTION. Debido a que se trata de mostrar tantas capacidades diferentes como sea razonable, el problema de ejemplo no necesariamente ha sido creado y los resultados no necesariamente han sido revisados de la manera más eficiente y rápida. A menudo, con los programas informáticos, lo que es eficiente para una persona puede no ser el mejor método para la siguiente persona. Se asume que una vez que los usuarios se familiaricen con las capacidades y métodos de JF SECTION en este tutorial, ellos decidirán qué métodos funcionan mejor para ellos en sus circunstancias particulares. A continuación se presenta un esquema de este tutorial (consulte la Tabla de Contenidos para obtener un esquema más completo):

A. Descripción del modelo estructural

1. Modelo matemático

El problema de ejemplo de este tutorial es un elemento sometido a compresión de una cercha (Figura B-1) muestran las dimensiones básicas y los tamaños de los elementos para el modelo.

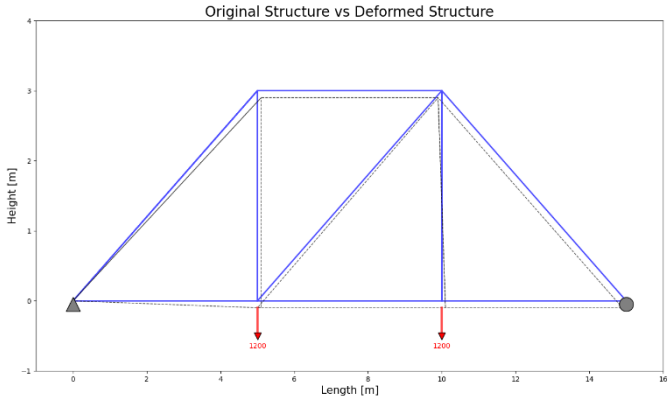


Figura B-1: Estructura original vs Estructura deformada

Posteriormente se obtendrá la demanda del elemento deseado para introducirlo en el programa de análisis.

2. Secciones

Las secciones que utiliza el programa son definidas por el usuario en un catálogo entregado en Excel para la forma de secciones transversales especificadas en el mismo (L, T, O, C, I, Z).

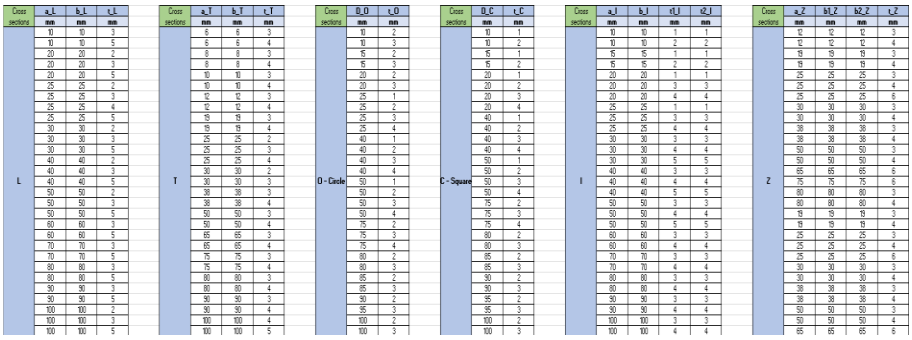


Figura B-2: Catálogo de secciones

La referencia de las cotas de este apartado se especifica en la segunda hoja del archivo llamada ‘’Shape” para la implementación de nuevas dimensiones.

Nota:

En el caso de querer introducir una nueva dimensión para cualquiera de las formas propuestas será necesario borrar una de las preexistentes ya que de lo contrario el programa no funcionará adecuadamente.

2.1. Shapes

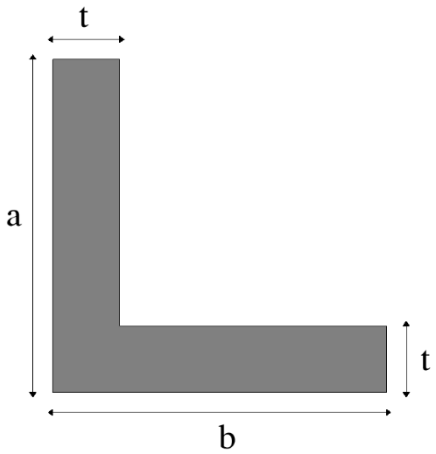


Figura B-2.1.1: Angle (L) Section

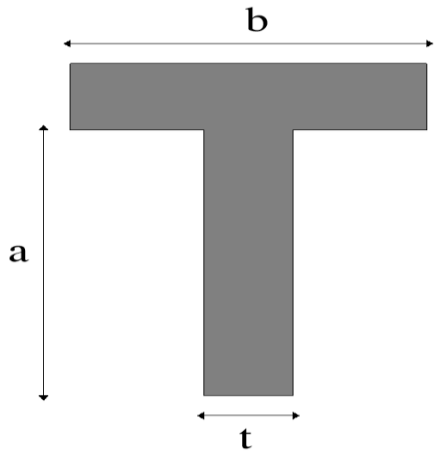


Figura B-2.1.2: Tee (T) Section

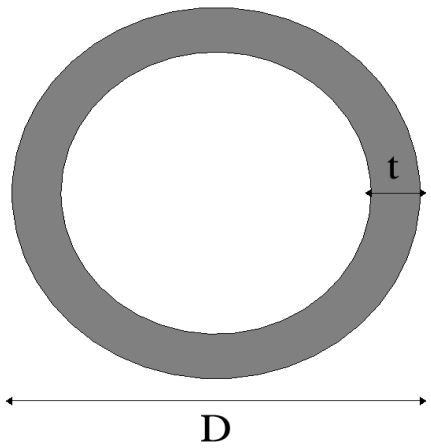


Figura B-2.1.3: Circular tubular (O) Section

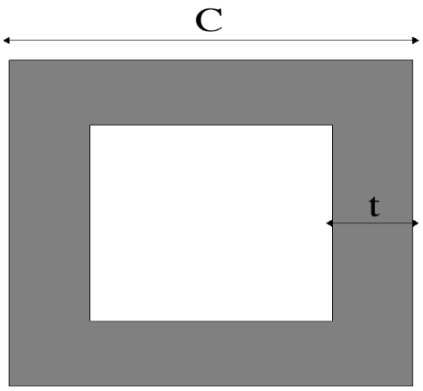


Figura B-2.1.4: Square tubular (C) Section

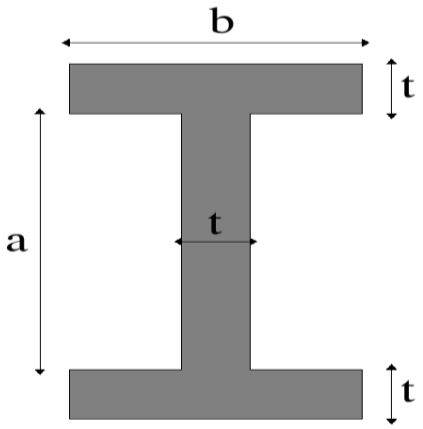


Figura B-2.1.5: I (I) Section

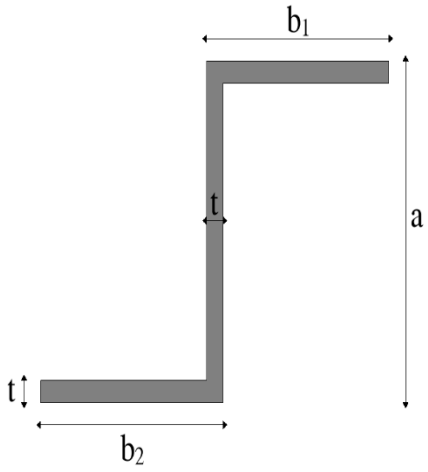


Figura B-2.1.6: Z (Z) Section

B. Guía de uso

1. Data inputs

En este apartado el usuario debe ingresar múltiples propiedades tanto de material como geométricas del modelo.

- Young's modulus
  Módulo de elasticidad del material en $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Yielding stress
  Esfuerzo de fluencia del material en $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Support condition
  Condición de borde k
- Element length
  Longitud del elemento en cm
- Demand
  Demanda a la cual está sometido el elemento en compresión en cm

2. Condición de análisis

Aquí el usuario deberá seleccionar el rango de análisis de una Función de densidad de probabilidad (PDF) en base a los criterios sugeridos para cada rango de análisis de donde se extraerán las posibles secciones a utilizar y mostrará una PDF para el punto de vista técnico y una PDF para el punto de vista económico.

2.1. Criterio técnico: Factor de utilización (U)

- Left side: Cola izquierda de la función:
  En este rango las secciones transversales son más útiles lo cual es beneficioso en múltiples casos.
  Se recomienda su uso cuando no se tenga un estudio de microzonificación sísmica, incertidumbre en los estudios hidrológicos, poca confiabilidad en los estudios de suelos y mano de obra poco calificada.
- Middle side: Rango central de la función:
  Aquí las secciones transversales son las más probables de acercarse al factor de utilización promedio por lo cual tendremos más posibilidades de secciones para escoger de nuestro catálogo y su factor de utilización no es tan conservador.
- Right side: Cola derecha de la función:
  Las secciones que se encuentren en este rango a pesar de cumplir con el criterio de *U < 1.0* están próxima a la fluencia por lo que no se recomienda para estructuras que necesiten ser resilientes.

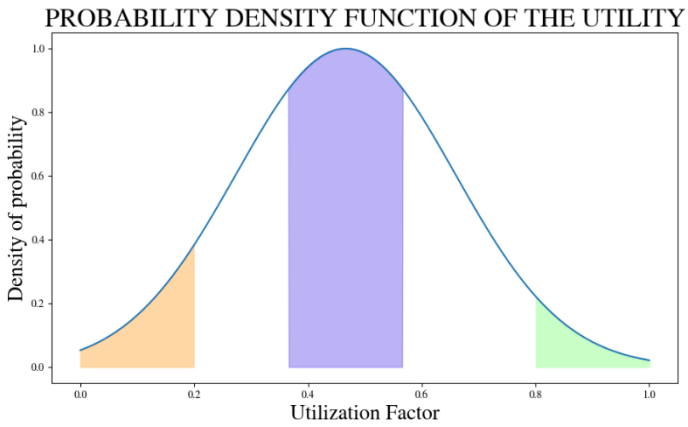


Figura C-2.1: Función de densidad de probabilidad del factor de utilización

2.2. Criterio económico: Costo ($)

- Left side: Cola izquierda de la función:
  En este rango las secciones serán las de menor costo posible por lo que se puede maximizar la utilidad, pero presenta secciones menos resistentes.
- Middle side: Rango central de la función:
  Aquí las secciones están próximas a la media del costo posibles por lo que la diversidad de elementos permite la cotización con múltiples casas comerciales.
- Right side: Cola derecha de la función:
  Las secciones que se encuentren en este rango serán las más costosas, pero nos darán las mejores respuestas estructurales para combatir la incertidumbre del análisis.

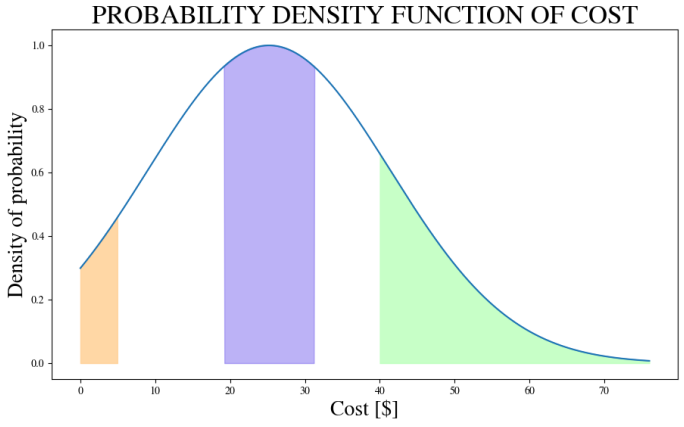


Figura C-2.2: Función de densidad de probabilidad del costo

Nota:

El diseñador deberá de tener presente que al momento trabajar en cualquiera de las colas, las posibilidades de secciones se reducirán y esto podría dificultar la obtención de estas.

2.3. Generación de resultados

Finalmente, el programa generará dos archivos .xlsx con las posibles secciones a utilizar en los rangos anteriormente configurados para que el ingeniero diseñador escoja desde el punto de vista técnico - económico la mejor opción para su proyecto.

Referencias

Bruneau, M., Uang, C., & Sabelli, R. (2011). Ductile design of Steel Structures. New York: McGraw-Hill.

Celi, C. (2022). Pandeo Global [Clase]. Estructuras Metálicas, Quito, Ecuador.

Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. (2010). NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4 - Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers

Gallagher, R. H., Ziemian, R. D., & McGuire, W. (2000). *Matrix Structural Analysis: Second Edition* (Second Edition). Createspace Independent Publishing Platform.

Galambos, T. V., Galambos, T. V., & Galambos, T. V. (1998). Guide to stability design criteria for metal structures. New York, NY: Wiley.

Kassimali, A. (2011). *Matrix Analysis of Structures* (2.ª ed.). Cengage Learning.

Mora Bowen, N. (2022). *Método de la Rigidez* [Clase]. Análisis Matricial de Estructuras, Quito, Ecuador.

McCormac, J., Csernak, F. (1999). Diseño de Estructuras de Acero. Carolina del Sur. V Edicióonn.

Santander. (2022, 12 28). *Universidad Santander*. Retrieved from Cómo hacer una campana de Gauss: https://www.becas-santander.com/es/blog/campana-de-gauss-excel.html#:~:text=La%20Campana%20de%20Gauss%20es,que%20se%20encuentran%20los%20valores.

Weaver, W., & Gere, J. M. (1990). *Matrix Analysis Framed Structures: Vol. 1st Edition* (Softcover Reprint of the Original 1st 1990 ed.). Springer.

Ziemian, R. D. (2010). Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures (6th ed.). Wiley.