

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS**

(COMPONENTE II)  
EVALUACIÓN

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**NICOLÁS MONTALVO GONZÁLEZ**

nicolas.montalvo@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. LUIS FELIPE FERNÁNDEZ AYALA, PHD**

luis.fernandez@epn.edu.ec

**Quito, septiembre 2024**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Nicolás Montalvo González, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Luis Felipe Fernández Ayala, PHD**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Nicolás Montalvo González, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Nicolás Montalvo González**

## **DEDICATORIA**

Le dedico todo mi esfuerzo y trabajo depositado en este proyecto a mi Pazita, mi angelito. Mi hermanita que el destino no permitió que vengas a la Tierra, pero que vives en nuestros corazones y te pensamos todos los días. Nos llenas el corazón con cada señal que nos das que estás con nosotros.

Aunque no te pueda ver ni escuchar, yo sé que siempre estás ahí cuidándome y de alguna manera jugando conmigo.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme salud y fuerza cada mañana y empujarme a seguir mis objetivos. Porque con su bondad infinita se ha encargado de mostrarme el camino a seguir y ha sabido poner siempre a las personas y situaciones necesarias que cada día me impulsan a crecer y a salir adelante. Porque aunque muchas veces me cuestiono sus motivos, el tiempo me sigue enseñando que todo pasa por algo, y confío que cada suceso en mi vida tiene una firma de autor, y ésta lleva su nombre, Dios.

A mi papi y mi mamita, que toda mi vida me han dado todo y más uno de lo que necesite. Siempre han sido mi pilar, mi ejemplo y mi apoyo en absolutamente todo. Sinceramente no sé qué sería de mi sin todo lo que ustedes hacen por mi papis, y no saben cuánto les agradezco y sé que toda mi vida tendré una deuda con ustedes por todo lo que han hecho y hacen por mi. Papi tú eres mi héroe y mi ejemplo por siempre, y eres la persona que sé que puedo confiar con los ojos cerrados y nunca me vas a fallar y en verdad agradezco todo lo que haces por mi, porque debo reconocer, todo pero absolutamente todo han sido aciertos y por eso he llegado hasta donde estoy ahora. Mamita, tú eres el núcleo de nuestra familia y el ser más bueno y cariñoso que pueda conocer en mi vida, tu bondad y tu cariño no tiene límites y sé que siempre has estado para mi y que seguirás estando ahí siempre que lo necesite, pendiente que nunca me falte nada, pendiente de mi salud y mis éxitos. Papis les tengo un agradecimiento más grande de lo que ustedes se podrían imaginar, porque ha sido gracias a ustedes que he podido convertirme en la persona que soy ahora y llegar a donde estoy. Perdón por los problemas y discusiones, pero solo quiero que sepan que no importa qué pase, siempre estaré inmensamente agradecido con ustedes y espero algún día poder retribuir un poco de todo lo que ustedes han hecho por mi.

A mis amigos que me acompañaron y me apoyaron durante toda la carrera, Mijin (Carlos Markley) y Salo. Fuimos compañeros desde el primer día en prepo y me llena el corazón saber que pudimos salir adelante con nuestras carreras y siempre estuvimos ahí. Salo gracias por todas las veces que me ayudabas con cualquier cosa, gracias por escucharme y tenerme paciencia, yo sé que muchas veces pude haber sido muy difícil pero te quiero y valoro mucho tu amistad. Mijin, fuiste mi amigo más leal toda la carrera, siempre me diste

la mano cuando necesitaba de tu ayuda con diferentes cosas de la carrera y te quiero como a un hermano que nunca tuve. Gracias a los dos por su tiempo, paciencia y amistad, los quiero chicos.

A mi Noe que en este último año ha sido mi apoyo en absolutamente todo. Gracias por todo lo que haces por mi, por darme tu cariño, por ser con quien me pueda desahogar cuando siento que no puedo más, por tolerarme y porque siempre estás pendiente de lo que me gusta. Gracias por ser como eres conmigo y por dedicarme todo el tiempo que lo haces y por permitirme soñar.

Al Ing. Felipe Fernández quiero agradecerle por su infinita paciencia y por su constante apoyo desde el día 1 con nuestro proyecto de titulación. Me ha permitido que pueda profundizar mis conocimientos en la parte de estructuras de acero que es lo que ahora entiendo que verdaderamente me apasiona.

De forma general a todas las personas que de una u otra forma aportaron en mi crecimiento profesional dentro de la Universidad, y de quienes me llevo los mejores recuerdos.

# CONTENIDO

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1 Objetivo general . . . . .	5
1.2 Objetivos específicos . . . . .	5
1.3 Alcance . . . . .	5
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1 Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD) y diseño por esfuerzos admisibles (ASD) . . . . .	8
2.1.1 Combinación de cargas siguiendo la filosofía de diseño de la LRFD . . . . .	9
2.1.2 Combinación de cargas siguiendo la filosofía de diseño de la ASD . . . . .	9
2.2 Cálculo de la resistencia para miembros a tensión . . . . .	10
2.2.1 Verificación para fluencia de la sección total . . . . .	11
2.2.2 Verificación para resistencia de fractura a la tensión . . . . .	11
2.2.3 Verificación de la relación de esbeltez . . . . .	12
2.3 Cálculo de la resistencia para miembros cargados axialmente a compresión . . . . .	13
2.3.1 Pandeo a flexión de miembros sin elementos esbeltos . . . . .	14
2.3.2 Pandeo local de los elementos de miembros cargados axialmente a compresión . . . . .	16
2.4 Cálculo de la resistencia para miembros a flexión . . . . .	18
2.5 Cálculo de la resistencia para miembros con cargas de cortante . . . . .	19
2.6 Cálculo de la resistencia para miembros con cargas de flexión y carga axial . . . . .	20
<b>3 METODOLOGÍA</b>	<b>22</b>
3.1 Interacción con el módulo de análisis . . . . .	22
3.2 Desarrollo del catálogo de perfiles localmente disponibles . . . . .	24
3.3 Validación de perfiles según la Norma AISC-LRFD . . . . .	25
3.3.1 Función para fuerzas axiales de tensión . . . . .	26
3.3.2 Función para fuerzas axiales de compresión . . . . .	28

3.3.3	Función para análisis de miembros sometidos solo a flexión . . . . .	30
3.3.4	Función para análisis de miembros sometidos solo a cortante . . . . .	31
3.3.5	Función para análisis de miembros sometidos a flexión y fuerza axial	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>35</b>
4.1	Ejemplo 1 . . . . .	35
4.2	Ejemplo 2 . . . . .	38
4.3	Ejemplo 3 . . . . .	40
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>I</b>



## RESUMEN

Se ha desarrollado una herramienta computacional en Python para el análisis de estructuras de acero, que permite determinar la validez de la norma de la AISC de todos los miembros de una estructura, siguiendo la filosofía de diseño de la LRFD (Load and Resistance Factor Design). Dicho programa computacional analiza estructuras bidimensionales bajo el efecto de cargas concentradas y distribuidas no sísmicas.

Como punto de partida esta herramienta computacional requiere que se conozcan todas las fuerzas internas y reacciones de los miembros que conforman la estructura y, bajo la aplicación de las diversas ecuaciones de la AISC determina la validez de la norma en cuestión de segundos. Este programa se lo ha desarrollado de forma paralela con el módulo I del presente TIC que trata sobre ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS METÁLICAS CON EL MÉTODO DE LA RIGIDEZ USANDO PYTHON, por lo que resulta conveniente tomar los resultados proporcionados por el método de la rigidez para validar la normativa vigente.

Adicional a esto, se ha recopilado la información de los perfiles IPE e IPN actualmente disponibles en el país, con los cuales se ha realizado una base de datos actualizada que incluye las propiedades físicas y geométricas de cada tipo de perfil. Esto supone una herramienta de ayuda adicional para la selección de perfiles en el diseño de estructuras de acero.

Este programa tiene algunas limitaciones que se han considerado al momento del desarrollo del código en Python, pero que se espera en un futuro dicho código pueda ser modificado y actualizado para superar dichas restricciones.

**Palabras clave:** herramienta computacional, Python, AISC, LRFD, estructuras de acero.

## ABSTRACT

A computational tool has been developed in Python for the analysis of steel structures, which allows determining the validity of the AISC norm for all members of a structure, following the design philosophy of the LRFD (Load and Resistance Factor Design). This computer program analyzes two-dimensional structures under the effect of concentrated and distributed non-seismic loads.

As a starting point, this program requires that all the internal forces and reactions of the members that conform the structure be determined and, by applying the various AISC equations, it determines the validity of the standard in a matter of seconds. This program has been developed in parallel with module I of this project, which deals with ANALYSIS OF METAL STRUCTURES WITH THE RIGIDITY METHOD USING PYTHON, so it would be convenient to take the results provided by the rigidity method to validate the regulations in force.

In addition to this, the IPE and IPN profiles currently available in the country have been compiled, with which an updated database has been created that includes the physical and geometric properties of each type of profile. This provides an additional help tool for the selection of profiles in the design of steel structures.

This program has some limitations that have been considered when developing the code in Python, but it is expected that in the future said code can be modified and updated to overcome these restrictions.

**Keywords:** computational tool, Python, AISC, LRFD, steel structures.

# 1 INTRODUCCIÓN

El empleo del acero como elemento estructural en edificaciones se remonta a mediados del siglo XIX, cuando se utilizó por primera vez en la construcción de puentes y edificios. Algunas de las edificaciones más importantes construidas a finales del XIX e inicios del XX son el puente de Brooklyn que se muestra en la Figura 1.1, el Empire State Building y el Chrysler Building en Nueva York o la Torre Eiffel en París [1].



**Figura 1.1:** Puente de Brooklyn. (Fuente: [2])

Con el transcurso de los años, se han desarrollado diversas teorías que son fundamentales y siguen siendo vigentes para el análisis estructural en la ingeniería moderna. En este contexto, han surgido cuatro importantes exponentes en el estudio de los esfuerzos y el diseño estructural, éstos son: Cristian O. Mohr (1835-1918), Alberto Castigliano (1847-1884), Hardy Cross (1885-1959) y Alexander Hrennikoff (1896-1984). Cristian O. Mohr fue el responsable de desarrollar un método que permita la representación gráfica que indica como cambian las componentes de los esfuerzos y los planos de corte bajo diferentes orientaciones, conocido posteriormente como el *Círculo de Mohr*. Alberto Castigliano se destacó por la creación de nuevos métodos de análisis para sistemas elásticos, relacionando el desplazamiento con la energía de deformación respecto a la fuerza, lo que posteriormente pasó a conocerse como el diseño por *Métodos Energéticos*. Hardy Cross desarrolló un método de cálculo para resolver grandes estructuras isostáticas e hiperestáticas, conocido como el

Método de Distribución de Momentos. Este método se basa en operaciones iterativas para lograr el equilibrio en los nodos y sentó las bases para el desarrollo del cálculo matricial. Finalmente, en la década de 1940 Alexander Hrennikoff, conocido por ser el fundador de los elementos finitos, publicó varios trabajos sobre la aplicación de los métodos numéricos para el análisis estructural. Fue entonces cuando Hrennikoff propuso discretizar una estructura tomando como base el método de elementos finitos (FEM), pero cada uno modelado con funciones de forma que permitieron representar los desplazamientos y deformaciones dentro del elemento. Posteriormente, esta aproximación permitió resolver ecuaciones diferenciales parciales complejas mediante la solución de ecuaciones algebraicas más simples para cada elemento. Años más tarde esto sentaría los pilares de las ecuaciones con las cuales varios de los actuales softwares analizan las estructuras hoy en día [3].

En 1921 se funda la AISC en Estados Unidos con el propósito de '... crear un conjunto de reglas y parámetros con un código de comunicación uniforme que pueda ser empleado por toda la industria de modo que '... los profesionales del diseño y la construcción podrían usar la tecnología para trabajar juntos de manera más eficiente' [4]. El Manual de Construcciones de Acero de la AISC es una guía técnica desarrollada por la AISC, siglas en inglés para *American Institute of Steel Constructions*, que proporciona criterios y especificaciones detalladas para el diseño, la fabricación y el montaje de estructuras de acero. Este manual ayuda a los ingenieros estructurales, arquitectos y constructores al proporcionar normas claras y específicas que aseguran la seguridad, la eficiencia y la economía en la construcción de edificaciones de acero. Este manual aborda aspectos fundamentales como las dimensiones de perfiles estandarizados. Además, proporciona directrices sobre la selección adecuada de materiales, métodos de análisis estructural y criterios de diseño sísmico y de resistencia al fuego, entre otros aspectos relevantes.

Con este proyecto de integración curricular, se pretende automatizar el proceso de diseño y validación de normas para construcciones de acero, mediante la implementación de una herramienta computacional. Esta herramienta se encargará de verificar el cumplimiento de la normativa AISC para estructuras sometidas a cargas axiales de tensión o compresión, así como a cargas internas de corte, momentos flexionantes o combinaciones de estas fuerzas. Esta automatización no solo agilizará significativamente el proceso de análisis y diseño, sino que también mejorará la precisión y repetibilidad del mismo.

Además de las funciones mencionadas, la herramienta incluirá una base de datos que contendrá los perfiles estructurales tipo IPE disponibles comercialmente en Ecuador. Este as-

pecto será fundamental para un componente futuro del proyecto, el cual se enfocará en optimizar el peso de la estructura. Esta optimización garantizará que, bajo cualquier circunstancia, se cumplan rigurosamente las normativas aplicables, asegurando así la seguridad y funcionalidad de las estructuras sin recurrir a dimensiones excesivas y usando perfiles disponibles.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una herramienta computacional para evaluar la resistencia y el cumplimiento de la normativa AISC en perfiles estructurales de acero sometidos a flexión y carga axial en estructuras bidimensionales, así como crear un catálogo de perfiles disponibles en Ecuador.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar los criterios de validación para asegurar el cumplimiento de las normativas AISC de perfiles estructurales de acero que soportan cargas axiales, flexión y corte.
- Diseñar un algoritmo que, considerando las condiciones de carga en elementos estructurales, tanto en flexión como en fuerza axial, determine si los perfiles elegidos cumplen con los estándares establecidos por las normativas AISC.
- Elaborar un catálogo de perfiles estructurales tipo IPE (perfil europe en I) e IPN (perfil normalizado en I) disponibles localmente en Ecuador, que contenga información detallada sobre sus propiedades geométricas y mecánicas.
- Desarrollar un programa eficiente en Python utilizando herramientas de código abierto que brinde al usuario una interfaz intuitiva.

## **1.3 ALCANCE**

Se busca desarrollar un programa en Python que por medio de los parámetros establecidos en la AISC de miembros de estructuras de acero se valide el cumplimiento de la normativa de una manera eficiente. Con este programa se pretende reducir el tiempo de trabajo del diseñador, así como también validar que toda la estructura cumpla con la normativa vigente

de manera precisa. Los perfiles estructurales serán evaluados por la herramienta computacional bajo diferentes condiciones de carga, y automáticamente verificar si cada elemento estructural satisface o no la norma de la AISC.

El desarrollo de la esta herramienta computacional tendrá algunas limitantes para su correcto funcionamiento, y que deberán ser tomadas en cuenta por el usuario para su correcto uso. En primer lugar, se debe considerar que la longitud de soporte lateral del patín de compresión (longitud arriostrada) no supere el valor de la longitud límite dictada por la norma de la AISC, denominada  $L_p$ . De esta manera se asegurará que el diseño de las vigas se lo realice en la zona plástica (zona 1). Se ha optado por introducir esta limitante en la longitud de soporte lateral, puesto que en dicha zona es más frecuente que fallen las vigas que trabajan a flexión. En un futuro se pretende extender este trabajo a las zonas 2 y 3 que incluyen pandeo lateral y torsional inelástico y elástico.

Adicionalmente, se considera que todos los miembros se encuentran simplemente apoyados, eliminando de esta manera cualquier conexión empotrada. Esto supone un diseño mas conservador en elementos a flexión porque implica que cada elemento puede formar una sola rótula plástica para que ocurra la falla, y no tres como es el caso de elementos doblemente empotrados. Profundizando un poco en el concepto de una rótula o articulación plástica, se refiere al punto de una viga en el que se ha alcanzado la máxima capacidad admisible del momento resultando en una rotación significativa del miembro sin necesidad de que aumente la magnitud del momento en este punto [1]. Esta consideración además de simplificar el análisis y la programación de la herramienta computacional, también proporciona un margen de seguridad adicional para la estructura analizada.

Se ha considerado además, un factor de retraso de cortante ( $U$ ) igual a 1, puesto que se asume que la conexión entre todos los miembros se transmite directamente a la sección transversal mediante sujetadores que permitan la rotación pero no la traslación. Entiéndase por factor de retraso de cortante al fenómeno de reducción en la capacidad que tiene un material para resistir esfuerzos cortantes y se ve afectado por la presencia de agujeros, discontinuidades o concentradores de esfuerzos [1]. Esto ha simplificado el análisis, y plantea un desafío para un futuro trabajo como extensión de este proyecto. Este trabajo futuro puede abordar diversas conexiones disponibles y determinar automáticamente los valores del factor de retraso de cortante específico para ese tipo de conexión.

Para el caso de los miembros cargados axialmente a compresión se analizarán únicamente

te los 2 primeros casos de fallo que son el pandeo flexionante y el pandeo local de los miembros. El fallo por pandeo torsional se propone como una continuación a futuro de este trabajo que incluya esta situación de falla.

Por último, se creará un catálogo de perfiles estructurales tipo IPE y IPN disponibles actualmente en el Ecuador. Con este catálogo los diseñadores podrán tener un acceso simplificado y rápido para la selección de perfiles adecuados para diferentes proyectos, permitiendo de esta manera asegurar el cumplimiento de estándares de diseño y resistencia requeridos en cada caso. El catálogo ofrecerá información relevante sobre las propiedades geométricas y mecánicas de los perfiles.

## 2 MARCO TEÓRICO

A continuación se presentará el detalle de todo el fundamento teórico detrás de la programación de la herramienta computacional para el análisis de las estructuras y la respectiva validación del cumplimiento de la norma de la AISC (empleando el criterio de la LRFD) y la NEC. Como se mencionó anteriormente, este análisis está limitado a la verificación del cumplimiento de la norma para fuerzas axiales (tensión y compresión), fuerzas cortantes y momentos flectores.

### 2.1 DISEÑO CON FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA (LRFD) Y DISEÑO POR ESFUERZOS ADMISIBLES (ASD)

La especificación de la norma de la AISC considera 2 filosofías de diseño para las estructuras de acero, y que son: Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD por sus siglas en inglés que provienen de Load and Resistance Factor Design) y el Diseño por esfuerzos permisibles (ASD por sus siglas en inglés que provienen de Allowable Strength Design) y, aunque ambos métodos de diseño tienen como objetivo determinar un margen de diferencia entre la capacidad o resistencia de un miembro y la carga aplicada, se diferencian en el hecho de que cómo se calculan las cargas de diseño y el uso de factores de resistencia ( $\phi$ ) para el LRFD y factor de seguridad ( $\Omega$ ) para el ASD.

Así mismo, debe notarse que para el diseño tanto para el LRFD o ASD, la AISC considera la interacción simultánea de diferentes cargas de servicio. Entre las cargas más importantes que se consideran se tiene siempre a la carga viva y muerta; por un lado, la carga viva es aquella carga móvil que actúa sobre una estructura como lo son las personas o cualquier objeto que puede movilizarse por sí sola, mientras que la carga muerta es aquella carga permanente que se encuentra presente en la estructura en todo momento como el peso propio de la estructura, materiales de construcción o cualquier elemento fijo.



A continuación, se definen las combinaciones de carga para la LRFD y la ASD:

### **2.1.1 Combinación de cargas siguiendo la filosofía de diseño de la LRFD**

La carga factorizada  $U$  o también llamada carga de diseño se calcula con las siguientes combinaciones de carga para la LRFD:

1.  $U = 1.4 D$
2.  $U = 1.2 D + 1.6 L + 0.5(L \text{ ó } S \text{ ó } R)$
3.  $U = 1.2 D + 1.6 (L \text{ ó } S \text{ ó } R) + (L^* \text{ ó } 0.5 W)$
4.  $U = 1.2 D + 1.0 W + L^* + 0.5 (L \text{ ó } S \text{ ó } R)$
5.  $U = 1.2 D + 1.0 E + L^* + 0.2 S$
6.  $U = 0.9 D + 1.0 W$
7.  $U = 0.9 D + 1.0 E$

donde  $U$ : es la carga factorizada o de diseño,  $D$ : es la carga muerta,  $L$ : es la carga viva debido a la ocupación,  $L^*$ : es la carga viva del techo,  $S$ : es la carga de nieve,  $R$ : es la carga nominal debido a la precipitación pluvial,  $W$ : es la carga del viento y  $E$ : es el factor de sismo.

### **2.1.2 Combinación de cargas siguiendo la filosofía de diseño de la ASD**

La combinación de cargas siguiendo la filosofía de la ASD se da como se presenta a continuación:

1.  $D$
2.  $D + L$
3.  $D + (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$

4.  $D + (0.6 W \text{ o } 0.7 E)$
5.  $D + L + (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
6.
  - a)  $D + 0.75 L + 0.75 (0.6 W) + 0.75 (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
  - b)  $D + 0.75 L + 0.75 (0.7 E) + 0.75 (S)$
7.  $0.6 D + 0.6 W$
8.  $0.6 D + 0.7 E$

En conclusión, ambas filosofías de diseño son actualmente válidas y empleadas indistintamente en el diseño de diversas estructuras de acero. Aunque el diseño por esfuerzos admisibles históricamente es más antiguo, el diseño por la LRFD suele proponer perfiles más ligeros que los requeridos cuando se emplea la ASD. Por esta razón en el presente trabajo se considerará únicamente el diseño empleando la filosofía de la LRFD.

## **2.2 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA PARA MIEMBROS A TENSION**

El cálculo de la resistencia para los miembros que trabajan a tensión en una estructura de acero es de suma importancia en el cálculo estructural, puesto que garantiza la seguridad y estabilidad de las estructuras que soportan fuerzas de tracción. Mediante el estudio de la resistencia de los miembros a tensión es posible determinar la capacidad que tienen los materiales de soportar cargas, sin que éstas generen fallos por fluencia o fractura.

Por esta razón, la filosofía de diseño LRFD de la AISC estipula que la resistencia nominal de un miembro que trabaja a tensión es la menor de 2 criterios. El primer criterio de análisis es la prevención del alargamiento excesivo del miembro, mientras que el segundo criterio estudia la resistencia para fractura por tensión en el área neta en la que se puedan encontrar agujeros de pernos o remaches.

Puesto que se estudiará la resistencia empleando la filosofía de diseño de la LRFD, es necesario conocer la carga de diseño con la que se debe trabajar, por lo que se deberán emplear las 2 combinaciones de carga descritas en la sección anterior para determinar la carga de diseño.

## 2.2.1 Verificación para fluencia de la sección total

Una vez que se haya determinado la máxima carga factorizada, debe encontrarse la resistencia nominal del miembro para el primer caso, *fluencia de la sección total*, y que se determina como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$P_n = F_y A_g , \quad (2.1)$$

donde  $P_n$  es la resistencia nominal del miembro en [klb],  $F_y$  es el esfuerzo mínimo de fluencia del acero en [ksi] y  $A_g$  es el área bruta de la sección en [in<sup>2</sup>].

En este punto la LRFD menciona la importancia de introducir una incertidumbre en la resistencia del material debido a factores varios, y que se conoce como factor de resistencia. En el caso de la LRFD el factor de resistencia es un valor numérico, generalmente menor a 1 que se multiplica por la resistencia nominal. Este factor de resistencia es  $\phi_t = 0.9$ , por lo que para la validación de la norma se debe cumplir que:

$$\phi_t P_n \geq P_u .$$

## 2.2.2 Verificación para resistencia de fractura a la tensión

En el caso de miembros que cuentan con agujeros de tornillos o remaches se debe verificar la resistencia nominal del miembro para el segundo caso, *fractura a la tensión*, y que se determina como se muestra a continuación:

$$P_n = F_u A_e , \quad (2.2)$$

donde  $P_n$  es la resistencia de diseño a la fractura por tensión en [klb],  $F_u$  es el límite de resistencia última a la tensión en [ksi] y  $A_e$  es el área neta efectiva, la cual se supone que resiste la tensión en la sección de los agujeros (si corresponde) en [in<sup>2</sup>].

Para el caso de conexiones emperradas o con remaches, la LRFD distingue 3 áreas que son: área bruta ( $A_g$ ), área neta ( $A_n$ ) y área efectiva ( $A_e$ ). Esto permite introducir en el estudio la reducción de la sección transversal debido a perforaciones y considerar el porcentaje del

área que resiste los esfuerzos de fractura.

El área bruta ( $A_g$ ) es el área total de la sección transversal del perfil sin considerar las perforaciones para pernos o pasadores. Por otro lado, el área neta ( $A_n$ ) se refiere a la diferencia entre el área bruta y la contribución de todas las áreas de los agujeros. Finalmente, el área efectiva ( $A_e$ ) es el producto del área neta por un factor de reducción adimensional ( $U$ ) que toma en cuenta la distribución no uniforme de los esfuerzos. El área efectiva es de suma importancia para el diseño seguro de estructuras de acero puesto que considera cualquier reducción en la capacidad de carga de los perfiles debido a modificaciones en su sección transversal a causa de los tipos de conexiones empleadas.

El área efectiva se determina como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A_e = A_n U . \quad (2.3)$$

La AISC ha resumido en la Tabla D3.1 del capítulo D los diferentes casos de conexiones para miembros a tensión con los respectivos valores del factor de reducción debido al retraso del cortante, ( $U$ ). Sin embargo, como se mencionó en el alcance del presente trabajo, se considerará un factor de retraso de cortante igual a 1 en todos los casos. Por lo tanto, el área neta ( $A_n$ ) es igual al área efectiva ( $A_e$ ), y ésta a su vez es la misma que el área bruta ( $A_g$ ) puesto que las conexiones serán solamente con soldadura y no existirán perforaciones para pernos o pasadores, por lo que la carga de tensión será transmitida directamente a la sección transversal de cada uno de los perfiles de la estructura.

De manera similar a la sección 2.2.1, es necesario introducir un factor de resistencia del material  $\phi_t = 0.75$ . Por lo tanto, para la validación de la norma se debe cumplir que:

$$\phi_t P_n \geq P_u . \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Verificación de la relación de esbeltez

En los miembros que trabajan a tensión, se recomienda realizar una tercera verificación que la norma sugiere pero no exige, la cual es la verificación de la relación de esbeltez. La AISC menciona que la relación de esbeltez ( $L/r$ ) máxima preferible es de 300, por lo que para la validación de la norma se debe cumplir que:

$$\frac{L}{r} \leq 300, \quad (2.5)$$

donde  $L$  es la longitud del miembro en [in] y  $r$  es el radio de giro mínimo, i.e.,  $\min(r_x, r_y)$ , de la sección del perfil en [in].

## 2.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA PARA MIEMBROS CARGADOS AXIALMENTE A COMPRESIÓN

El estudio de la resistencia de miembros sometidos a compresión axial es crucial debido a que el diseño de estos miembros es más crítico en comparación con los de tracción. Las pequeñas imperfecciones en el material o en las dimensiones pueden afectar gravemente su estabilidad. La complejidad en el diseño de miembros a compresión radica en que cualquier deformación inicial tiende a agravar el riesgo de pandeo por flexión. En contraste, los miembros sometidos a tracción experimentan cargas de flexión que tienden a corregir estas deformaciones, haciendo que el diseño de los miembros en compresión sea especialmente delicado y fundamental para garantizar la seguridad estructural.

En el estudio y diseño de miembros cargados axialmente a compresión la AISC considera 3 modos generales en los cuales los miembros a compresión tienden a fallar y que son los siguientes:

1. Pandeo a flexión sin elementos esbeltos. Considera que los miembros se someten a cargas axiales a compresión uniforme. En este caso puede estar en régimen elástico o inelástico.
2. Pandeo local. Este tipo de fallo ocurre cuando una o más partes del elemento que trabaja a compresión son demasiado delgadas, por lo que se pandean localmente debido a la compresión.
3. Pandeo torsional. Este tipo de fallo ocurre cuando se tienen cargas de torsión o una combinación de cargas entre pandeo torsional y flexionante.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente en la Sección 1.3 en el alcance, se abordarán únicamente los casos de falla para pandeo a flexión y pandeo local.

### 2.3.1 Pandeo a flexión de miembros sin elementos esbeltos

Para determinar la resistencia de los miembros cargados axialmente a compresión se debe calcular el esfuerzo de pandeo elástico (conocido también como esfuerzo de Euler), que se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}, \quad (2.6)$$

donde  $F_e$  es el esfuerzo elástico en [ksi],  $E$  es el módulo de elasticidad del acero (también conocido como módulo de Young) e igual a  $29 \times 10^3$  ksi,  $K$  es el factor de longitud efectiva (adimensional) que depende de las restricciones de los extremos de la columna o miembro a compresión,  $L$  es la longitud del miembro en [in] y  $r$  es el radio de giro del miembro en [in].

El factor de longitud efectiva  $K$  depende de las restricciones de los extremos del miembro, y para esto, la AISC en la TABLA C-A-7.1 detalla los valores del factor según el tipo de conexión de los miembros y que se muestra en el apartado de anexos en la sección 7. Sin embargo, como se mencionó en el alcance, este proyecto asumirá conexiones con sujetadores por lo que se adoptará un valor de  $K$  igual a 1.0 para todos los casos.

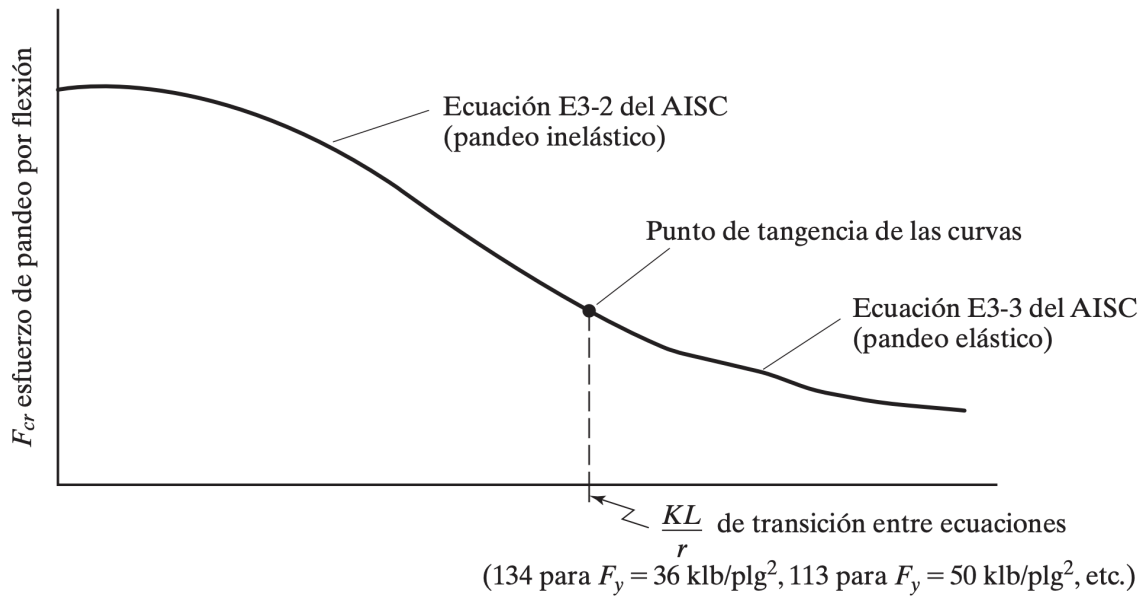
Cuando se haya determinado el esfuerzo de Euler se debe calcular el esfuerzo crítico  $F_{cr}$ , pero éste dependerá de la longitud efectiva del miembro puesto que puede ser un pandeo elástico o inelástico como se muestra en la Figura 2.1. Para esto es necesario determinar primero el límite elástico y la esbeltez del miembro ya considerando el factor de longitud efectiva  $K$ .

La esbeltez del miembro estructural que es calculada por:

$$\text{esbeltez del miembro} = \frac{KL}{r}. \quad (2.7)$$

Si esta esbeltez es menor al límite elástico definido por:

$$\text{límite elástico} = 4.71 \left( \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right), \quad (2.8)$$



**Figura 2.1:** Esfuerzo de pandeo por flexión. (Fuente: [1])

se tiene un pandeo inelástico. Caso contrario se tiene un pandeo elástico. Estos casos se definen mejor con la siguientes fórmulas:

$$F_{cr} = \begin{cases} F_{cr} = \left(0.658^{\left(\frac{F_y}{F_e}\right)}\right) F_y, & \text{si } KL/r \leq 4.71 \left(\sqrt{\frac{E}{F_y}}\right) \\ F_{cr} = 0.877 F_e, & \text{si } KL/r > 4.71 \left(\sqrt{\frac{E}{F_y}}\right) \end{cases} \quad (2.9)$$

Una vez que se haya determinado el esfuerzo crítico  $F_{cr}$  se puede calcular la resistencia nominal del miembro sujeto a cargas axiales de compresión como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_n = F_{cr} A_g, \quad (2.10)$$

donde:  $P_n$  es la resistencia nominal del miembro sujeto a cargas axiales de compresión en [kips],  $F_{cr}$  es el esfuerzo crítico en [ksi] y  $A_g$  es el área bruta de la sección del perfil empleado en [ $\text{in}^2$ ].

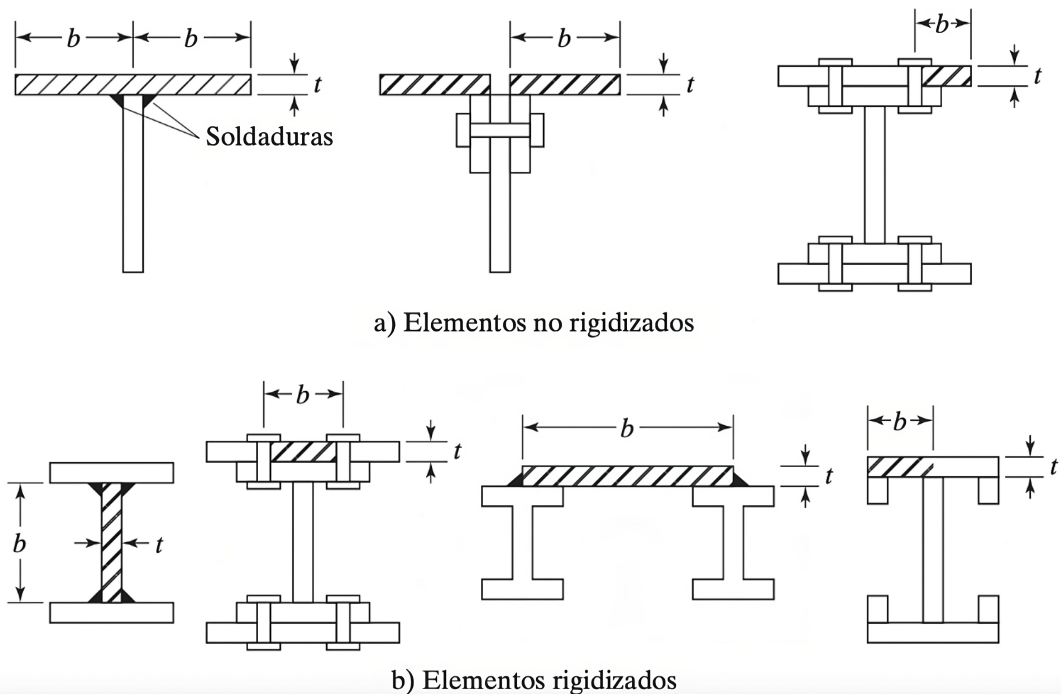
Finalmente, se introduce el factor de resistencia del LRFD  $\phi_c$  igual a 0.9, de modo que para la validación de la norma se debe cumplir que:

$$0.9 P_n > P_u . \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Pandeo local de los elementos de miembros cargados axialmente a compresión

Para el estudio del pandeo local de los elementos que deben soportar cargas de compresión la AISC los clasifica entre miembros rigidizados y miembros no rigidizados. Los miembros no rigidizados son piezas proyectantes con un borde libre paralelo a la dirección de la fuerza de compresión, mientras que un miembro rigidizado está soportado a lo largo de los dos bordes en esa dirección.

En la Figura 2.2 se muestran varios ejemplos para apreciar de mejor manera algunos elementos rigidizados y otros no rigidizados. Sin embargo, en el caso del presente trabajo al trabajarse solamente con perfiles tipo IPE y IPN, los patines son miembros no rigidizados, mientras que el alma es un elemento rigidizado.



**Figura 2.2:** Ejemplos de elementos rigidizados y No rigidizados. (Fuente: [1])

Para verificar la esbeltez de los miembros es necesario determinar la relación ancho/espesor de los elementos y compararlo con la relación límite ancho/espesor ( $\lambda_r$ ). Si se verifica



que la relación ancho/espesor es menor a la relación límite entonces los elementos están en la capacidad de soportar la carga de compresión sin experimentar pandeo local.

Específicamente para el caso de perfiles tipo IPE se tiene que la relación ancho espesor para patines se determina como ilustra la Ecuación (2.12).

$$\text{relación ancho/espesor para patín} = b/t \quad (2.12)$$

Donde:  $b$ : es el ancho del patín en [in] y  $t$  es el espesor del patín en [in]

Mientras que la relación límite ancho/espesor está dada por la ecuación (2.13).

$$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.13)$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad del acero (también llamado módulo de Young) y  $F_y$  es el límite del esfuerzo a la fluencia del acero.

Por lo tanto, para la validación de la norma para los patines se debe cumplir que:

$$\frac{b}{t} < 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.14)$$

Para el caso de el alma de perfiles tipo IPE se tiene que la relación ancho/espesor se determina como ilustra la ecuación (2.15).

$$\text{relación ancho/espesor para alma} = \frac{h}{t_w} = \frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} \quad (2.15)$$

Donde:  $h$  es la altura del alma sin considerar el espesor de los patines en [in],  $t_w$  es el espesor del alma en [in],  $d$ : es el peralte del perfil en [in] y  $t_f$ : es el espesor del patín en [in].

Mientras que la relación límite está dada por la ecuación (2.16).

$$\text{relación límite ancho/espesor para alma} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.16)$$

Por lo tanto, para la validación de la norma para el alma debe cumplirse que:

$$\frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} < 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.17)$$

## 2.4 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA PARA MIEMBROS A FLEXIÓN

Las vigas son componentes fundamentales en la mayoría de las estructuras, desempeñando un papel crucial en la resistencia de cargas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal. Estas cargas generan esfuerzos significativos que deben ser soportados tanto en términos de corte como de momentos flectores que generan tanto esfuerzos de tensión como de compresión.

Es por esta razón que el correcto diseño de las vigas es de vital importancia para la integridad estructural, y es por medio de la teoría de la flexión que se estudia la capacidad de carga que puede tener una viga para soportar momentos flectores y fuerzas de corte. En este análisis la AISC toma en cuenta algunos parámetros desde la resistencia del material hasta la geometría de los miembros.

Para estudiar la resistencia a la flexión de miembros estructurales es importante primero determinar el momento generado en el perfil debido a la carga aplicada, y que se calcula como sigue:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8}, \quad (2.18)$$

donde:  $M_u$ : es el momento de la carga aplicada en [klb in],  $w_u$ : es la carga distribuida a todo lo largo de la viga responsable de generar el momento flector en la misma en [klb in] y  $L$ : es la longitud del miembro en [in].

Por otro lado, la resistencia del miembro para soportar las cargas de flexión se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$M_n = F_y Z, \quad (2.19)$$

donde:  $M_n$ : es el momento nominal de la sección en [klb in] y

$Z$ : es el módulo plástico de la sección en [in<sup>3</sup>].

El módulo plástico de la sección ( $Z$ ) es un parámetro geométrico de la sección del perfil y que en el caso de los perfiles IPE es igual al producto del área por el centroide en el eje vertical como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z = A_g \bar{y}. \quad (2.20)$$

Una vez que se haya determinado el momento nominal de la sección ( $M_n$ ), que es igual al momento plástico por la consideración del diseño por deformación plástica, se debe introducir el factor de resistencia  $\phi_b = 0.9$ , por lo que para validar el cumplimiento de la norma se debe cumplir que:

$$0.9 \cdot M_n > M_u \quad (2.21)$$

## 2.5 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA PARA MIEMBROS CON CARGAS DE CORTANTE

En el caso de los perfiles que deben soportar cargas de corte se determina su resistencia al corte por medio de:

$$V_n = 0.6 \cdot F_y \cdot A_w \cdot C_v, \quad (2.22)$$

donde  $V_n$  es la resistencia nominal al corte en [kips],  $F_y$  es el límite de esfuerzo a la fluencia en [ksi],  $A_w$ : es el área del alma en [in<sup>2</sup>] y  $C_v$ : es el coeficiente de cortante del alma (adimensional) y es igual a 1.0.

El área del alma está dada por:

$$A_w = d t_w. \quad (2.23)$$

Finalmente, introduciendo el factor de resistencia  $\phi_v = 1.0$ , para la validación de la norma se debe cumplir que:

$$1.0 \cdot V_n > V_u \quad (2.24)$$

Un aspecto importante a mencionar sobre los valores de los coeficientes  $C_v$  y  $\phi_v$ , es que la AISC indica que en el caso de cumplirse la expresión de la ecuación (2.25), es que éstos son igual a 1.0. Sin embargo, se ha verificado que todos los perfiles del catálogo nacional cumplen con esta condición, por lo que es posible emplear los valores de  $C_v$  y  $\phi_v$  igual a 1.0.

$$\frac{h}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.25)$$

## 2.6 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA PARA MIEMBROS CON CARGAS DE FLEXIÓN Y CARGA AXIAL

La última verificación que se realizará para validar la norma de los miembros es para los casos en los que se tenga carga axial, tensión o compresión, y momentos flectores. Para validar esto se deben estudiar los dos siguientes casos:

1. Si  $P_r/P_c \geq 0.2$ :

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ry}}{M_{cx}} + \frac{M_{rx}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.26)$$

2. Si  $P_r/P_c < 0.2$ :

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{ry}}{M_{cx}} + \frac{M_{rx}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.27)$$

Donde:

$$P_r = P_u$$

$$P_c = \phi_c P_n$$

$$M_r = M_u$$

$$M_c = \phi_b M_n$$

En el caso que se cumpla que las expresiones de las Ecuaciones (2.26) o (2.27) sean  $\leq 1.0$ , entonces se valida el cumplimiento de la norma, caso contrario el perfil no cumple

las condiciones de carga y se debe buscar un perfil más robusto.

### **3 METODOLOGÍA**

Se ha desarrollado un programa en el lenguaje Python para la evaluación del cumplimiento de la norma para estructuras de acero en un análisis estático y bi-dimensional. El propósito de este programa es facilitar el proceso de diseño de estructuras de acero, permitiendo que los cálculos teóricos para la verificación de la seguridad de los perfiles empleados bajo las condiciones de carga dadas no deban ser realizados a mano y se automatice este proceso. Como resultado, el usuario podrá verificar rápidamente si los perfiles propuestos en su diseño estructural son seguros. En caso de que no lo sean, podrá proponer nuevos perfiles y validar su cumplimiento con la Norma AISC de manera eficiente.

Este programa corresponde al segundo módulo del trabajo de integración curricular, que requiere las fuerzas internas y momentos flectores de los elementos estructurales para verificar el cumplimiento de la Norma AISC. Afortunadamente, los resultados del primer módulo de este TIC se pueden usar convenientemente para esta operación. El primer módulo, titulado 'Análisis de Estructuras Metálicas con el Método de la Rigidez usando Python', permite ingresar datos geométricos y de cargas de estructuras para su análisis mediante el método de la rigidez. Este primer módulo proporciona las fuerzas internas en los elementos, las reacciones en los nodos prescritos y los desplazamientos de los nodos libres. En la siguiente sección se discutirá en detalle la interacción de nuestro módulo con el de análisis de estructuras utilizando el método de la rigidez.

#### **3.1 INTERACCIÓN CON EL MÓDULO DE ANÁLISIS**

Como ya se mencionó anteriormente, para realizar la validación de la norma de los perfiles estructurales, se recomienda que el programa reciba los resultados proporcionados por el primer módulo del proyecto que se refiere al análisis de estructuras metálicas con el método de la rigidez usando Python. Para esto, se han desarrollado 2 archivos de python, el primero

con toda la librería de funciones necesarias para la resolución del problema mediante el método de la rigidez, y el segundo donde se realiza el ingreso de los datos y se vincula con un tercer archivo que se discutirá más adelante y es el responsable de realizar la validación de la norma.

En el archivo al que el usuario tendrá acceso directo y donde deberá ingresar los datos del problema a analizarse se requiere que se especifique la geometría de la estructura, los perfiles usados en cada elemento con sus propiedades mecánicas. Cada perfil debería estar asociado a datos de su geometría y propiedades como son el área, inercia, peso, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, entre otros.

Se especifican también las condiciones geométricas de la ubicación de los nodos y perfiles en general y, como resultado de este módulo se obtienen los valores numéricos para carga axial, cortante y momentos flectores de todos los perfiles enlistados con un arreglo de resultados. Por lo tanto se obtendrá tantos arreglos como el número de miembros. Para cada elemento, la matriz de resultados tiene la siguiente estructura:

$$\begin{bmatrix} \text{máx}(N) & b_{CT} \\ \text{máx}(V) & x_V \\ M_{\text{inicio}} & x_{\text{inicio}} \\ M_{\text{centro}} & x_{\text{centro}} \\ M_{\text{final}} & x_{\text{final}} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde  $\text{máx}(N)$  es el valor máximo de la fuerza axial,  $b_{CT} = 0$  si la fuerza es de compresión,  $b_{CT} = 1$  si la fuerza es de tensión,  $\text{máx}(V)$  es el valor máximo de la carga cortante,  $x_V$  es la ubicación de la carga cortante máxima,  $M_{\text{inicio}}$  es el valor del momento al inicio de la viga,  $x_{\text{inicio}}$  es la ubicación del momento al inicio de la viga,  $M_{\text{centro}}$  es el valor del momento al centro de la viga,  $x_{\text{centro}}$  es la ubicación del momento al centro de la viga,  $M_{\text{final}}$  es el valor del momento al final de la viga y  $x_{\text{final}}$  es la ubicación del momento al final de la viga.

Como se mencionó anteriormente, para realizar el análisis estructural es vital definir el área de los elementos estructurales. Se puede optar por una área transversal similar para todos los elementos. Sin embargo, en este proyecto, se establece un vínculo con el catálogo de perfiles disponibles en el país, lo que permite seleccionar diferentes perfiles de manera que los valores de las áreas se asignen fácilmente a los miembros del problema en cuestión. En la siguiente sección describiremos el desarrollo de este catálogo.

## 3.2 DESARROLLO DEL CATÁLOGO DE PERFILES LOCALMENTE DISPONIBLES

Para el desarrollo del catálogo de perfiles localmente disponibles en el Ecuador ha sido necesario contactar con las diferentes empresas dedicadas a la comercialización de perfiles IPE e IPN laminados en caliente. Algunas empresas que se dedican a esta actividad son:

- Kubiec
- Import Aceros
- Dismetel
- Acero Comercial
- Novacero.

De esta investigación se ha elaborado un catálogo completo con todos los perfiles estructurales IPE e IPN disponibles en el país. Se ha incluido también sus propiedades geométricas y mecánicas. En las Tablas 7.1 y 7.2 que se encuentran en los Anexos se presenta el catálogo de perfiles localmente disponibles.

A continuación se detalla cada uno de los parámetros geométricos disponibles en el catálogo desarrollado:

- $d$ : peralte (alto) del perfil en [in]
- $b_f$ : ancho del patín del perfil en [in]
- $t_w$ : espesor del alma en [in]
- $t_f$ : espesor del patín en [in]
- $r_{in}$ : radio de giro en [in]
- $T$ : longitud de la parte plana del alma en [in]
- $u$ : perímetro de la sección en [in]
- $A$ : área de la sección transversal en [in<sup>2</sup>]



- $S_x$ : momento estático de media sección, respecto a  $x$  en [in<sup>3</sup>]
- $I_x$ : momento de inercia de la sección en [in<sup>4</sup>]
- $W_x$ : módulo resistente a la sección respecto a  $x$  en [in<sup>3</sup>]
- $i_x$ : radio de giro de la sección respecto a  $x$  en [in]
- $I_y$ : momento de inercia de la sección respecto a  $y$  en [in<sup>4</sup>]
- $W_y$ : módulo resistente a la sección respecto a  $y$  en [in<sup>3</sup>]
- $i_y$ : momento de inercia de la sección respecto a  $y$  en [in]
- $I_z$ : módulo de torsión de la sección en [in<sup>4</sup>]
- $I_a$ : módulo de alabeo de la sección en [in<sup>4</sup>]
- $y_{cent}$  o  $\bar{y}$ : centroide de la sección respecto al eje  $y$  en [in]
- $Z$ : módulo plástico de la sección en [in<sup>3</sup>]

### 3.3 VALIDACIÓN DE PERFILES SEGÚN LA NORMA AISC-LRFD

Para validar el cumplimiento de la norma AISC en los diferentes perfiles de las estructuras, se ha seguido la filosofía de diseño LRFD (Load and Resistance Factor Design). Se ha calculado la resistencia nominal de los perfiles y se ha comparado con la carga que debe soportar cada miembro. Dado que los miembros pueden estar sometidos a diferentes condiciones de carga, se desarrolló un programa que determina el proceso adecuado para validar el cumplimiento de la norma según dichas condiciones.

Entre las posibles combinaciones de carga consideradas para el diseño del programa se han incluido las siguientes:

1. Miembro cargado solamente con fuerzas axiales a tensión
2. Miembro cargado solamente con fuerzas axiales a compresión
3. Miembro cargado solamente con cargas de flexión

4. Miembro cargado con fuerzas cortantes

5. Miembro cargado tanto con fuerzas axiales (tensión o compresión) y de flexión

A continuación se describe con mayor profundidad el funcionamiento de cada una de las funciones desarrolladas para estudiar los diferentes casos descritos.

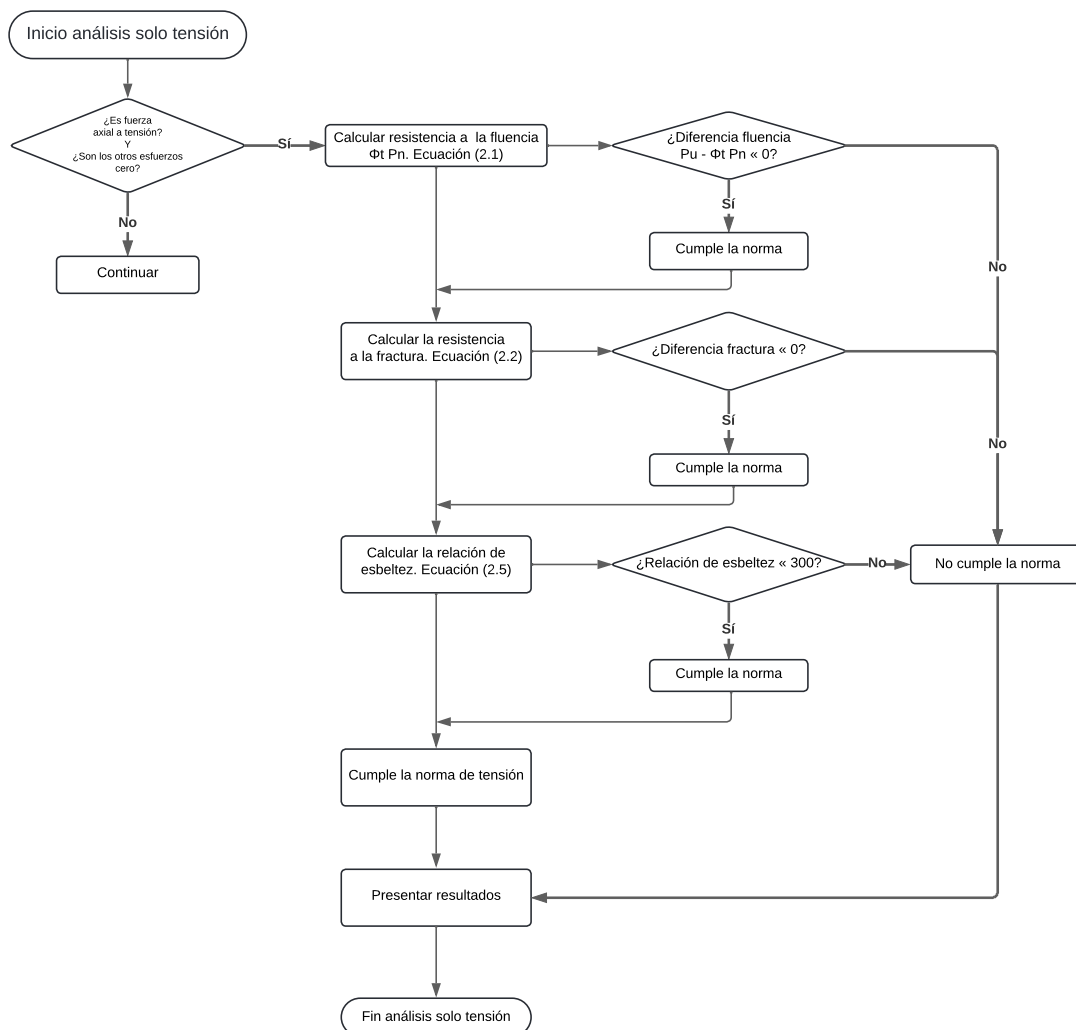
### **3.3.1 Función para fuerzas axiales de tensión**

El primer caso de estudio de las estructuras es cuando los miembros trabajan solamente bajo la acción de fuerzas axiales a tensión. En este tipo de casos las fibras del material se ven sometidas a un proceso de tracción o estiramiento y deben estar en la capacidad de resistir dichas fuerzas. Para cuantificar esta resistencia requerida del elemento, es necesario emplear las ecuaciones descritas en la Sección 2.2, y verificar el cumplimiento de los 3 casos, la fluencia de la sección total, la resistencia de fractura a la tensión y la relación de esbeltez.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo que se sigue para la aplicación de la función para analizar miembros que solo trabajan a tensión. El proceso se inicia cuando el software verifica que solo se tienen fuerzas axiales de tensión, y luego, de acuerdo a las condiciones dadas, determina la validez de la norma.

En el Código 7.1, que se encuentra en la Sección de Anexos, se muestra el código desarrollado para validar el cumplimiento de la norma para Fuerzas Axiales de Tensión de acuerdo al criterio de la LRFD. Con el propósito de emplear este código tantas veces como sea necesario a futuro, se lo ha escrito en forma de función la cual se alimenta de variables como los resultados obtenidos del método de la rigidez que son las cargas y momentos internos, además de áreas de los perfiles, propiedades de los materiales y factores de resistencia.

La función  `analisis_solo_tension`  ingresa a los resultados obtenidos del método de la rigidez y por medio de un ciclo "for", se itera entre cada elemento. Además, mediante una indexación de las variables se puede acceder de forma precisa a la información de cada tipo de perfil del catálogo. Empleando las Ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.5) se determina la resistencia nominal del miembro para la fluencia de la sección total, fractura a la tensión y relación de esbeltez respectivamente. Para verificar el cumplimiento de la norma en todos los casos se debe cumplir el la resistencia nominal sea mayor a la carga factorada que, dicho de otra



**Figura 3.1:** Función para analizar miembros solo a tensión (Fuente: propia).

forma, la diferencia entre la carga aplicada y la resistencia nominal debe ser menor o igual a 0. Los valores de estas diferencia son almacenados en las listas para luego imprimir los resultados.

Un aspecto importante a recalcar es que ha sido necesario incluir una variable de tolerancia en el cálculo para que permita desprestigiar los casos en los que los resultados de fuerza axial o de momento flector sea menor al 0.01 % de la carga aplicada en el miembro, sin embargo, este valor puede ser posteriormente modificado directamente en el código para que se ajuste de mejor manera a las condiciones del problema en estudio. Esto ocurre porque, debido a ciertas operaciones de cómputo, los valores de carga pueden ser numéricamente muy pequeños, cercanos a cero. Sin una tolerancia adecuada, estos valores insignificantes podrían ser considerados erróneamente como cargas axiales combinadas con flexión,

incluso cuando en realidad se encuentran sólo bajo tensión o compresión.

### 3.3.2 Función para fuerzas axiales de compresión

Para el caso de los miembros que trabajan es crucial verificar la esbeltez de los elementos que constituyen al miembro que, en el caso de los perfiles IPE e IPN, son los patines y el alma. Luego, se debe determinar la resistencia nominal del miembro para soportar cargas de compresión. Para esto es necesario emplear las ecuaciones de la Sección 2.3.

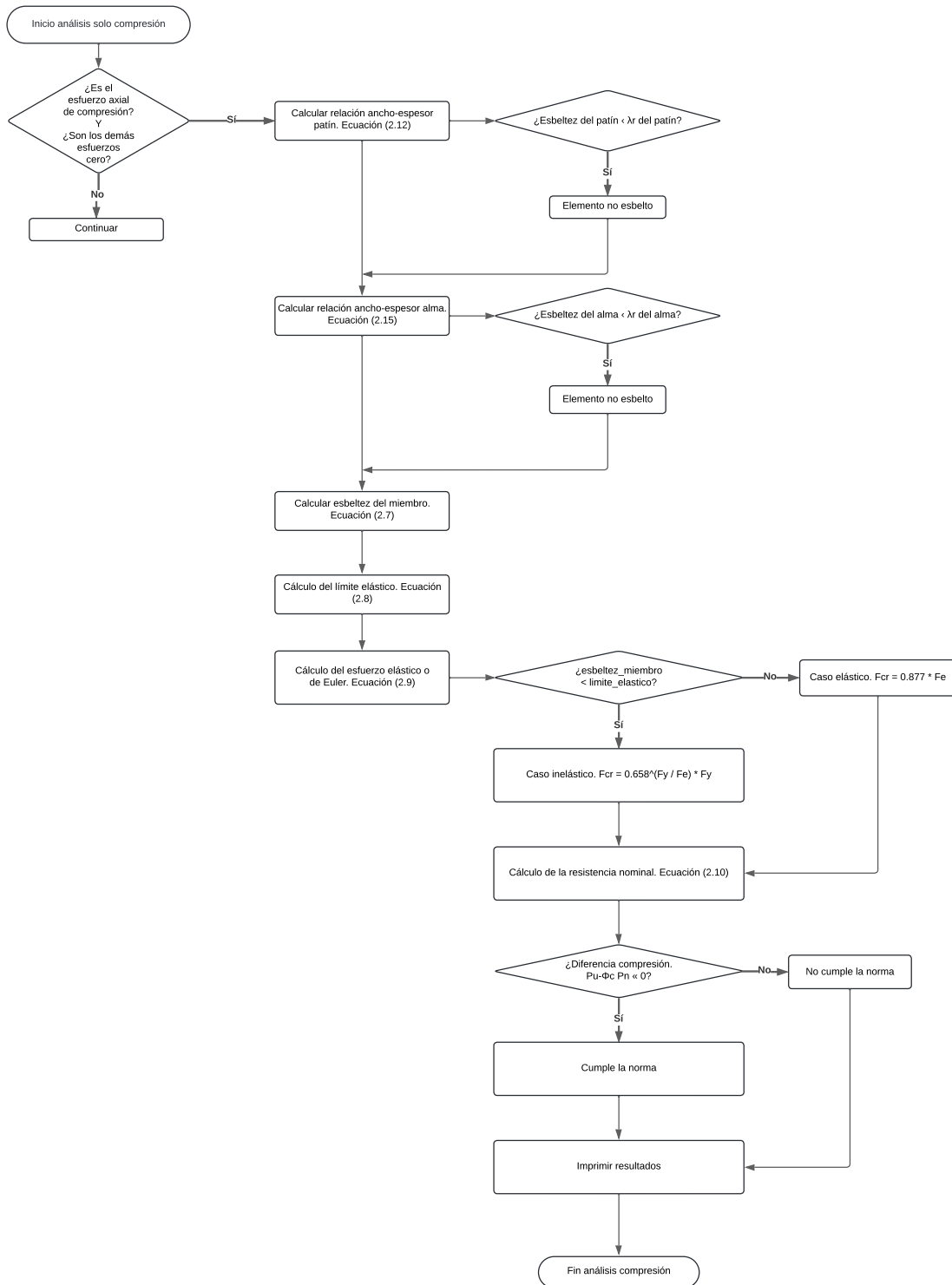
En el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.2, se muestra la lógica y pasos que sigue la función `analisis_solo_compresion` para validar el cumplimiento de la norma en los perfiles que solo trabajan a compresión.

En el Código 7.2 que se muestra en la Sección de Anexos al final del documento, se muestra la primera parte del código para la validación de la norma. Como aspecto inicial, se recomienda que para este código se reciban los resultados del método de la rigidez proporcionado por el módulo I del TIC, y la generación de varias listas de almacenamiento, mismas que permitirán guardar temporalmente los resultados obtenidos y determinar el cumplimiento de la norma. De manera similar que el código para análisis de miembros a tensión se incluye una tolerancia igual al 0.01 % de la carga aplicada en el miembro.

Para determinar si el alma es un elemento no-esbelto se sigue el mismo procedimiento que con el patín. Debe tomarse en cuenta que hasta el momento se ha verificado únicamente que los elementos de perfil sean no-esbeltos. Una vez corroborado que los elementos son no-esbeltos, podemos aplicar la sección de la norma para miembros cargados a compresión bajo pandeo a flexión.

Para determinar la ecuación con la que se debe trabajar para calcular el esfuerzo crítico, la AISC considera en gráfico mostrado en la Figura 2.1, en la que se divide la zona del pandeo elástico e inelástico en el punto igual a la relación de esbeltez ( $KL/r$ ). El cálculo del esfuerzo crítico para ambas zonas está determinado matemáticamente como se muestra en la Ecuación (2.9), por lo que para el caso del código se evalúa empleando el condicional `if` y se selecciona la ecuación respectiva según sea el tipo de pandeo.

Para la validación de la norma se debe cumplir de forma expresa con la Ecuación (2.11) y, que en términos sencillos, menciona que la resistencia del perfil para los esfuerzos de compresión sea mayor a la carga aplicada. Esto se consigue en el programa una vez más por



**Figura 3.2:** Función para analizar miembros solo a compresión (Fuente: propia).

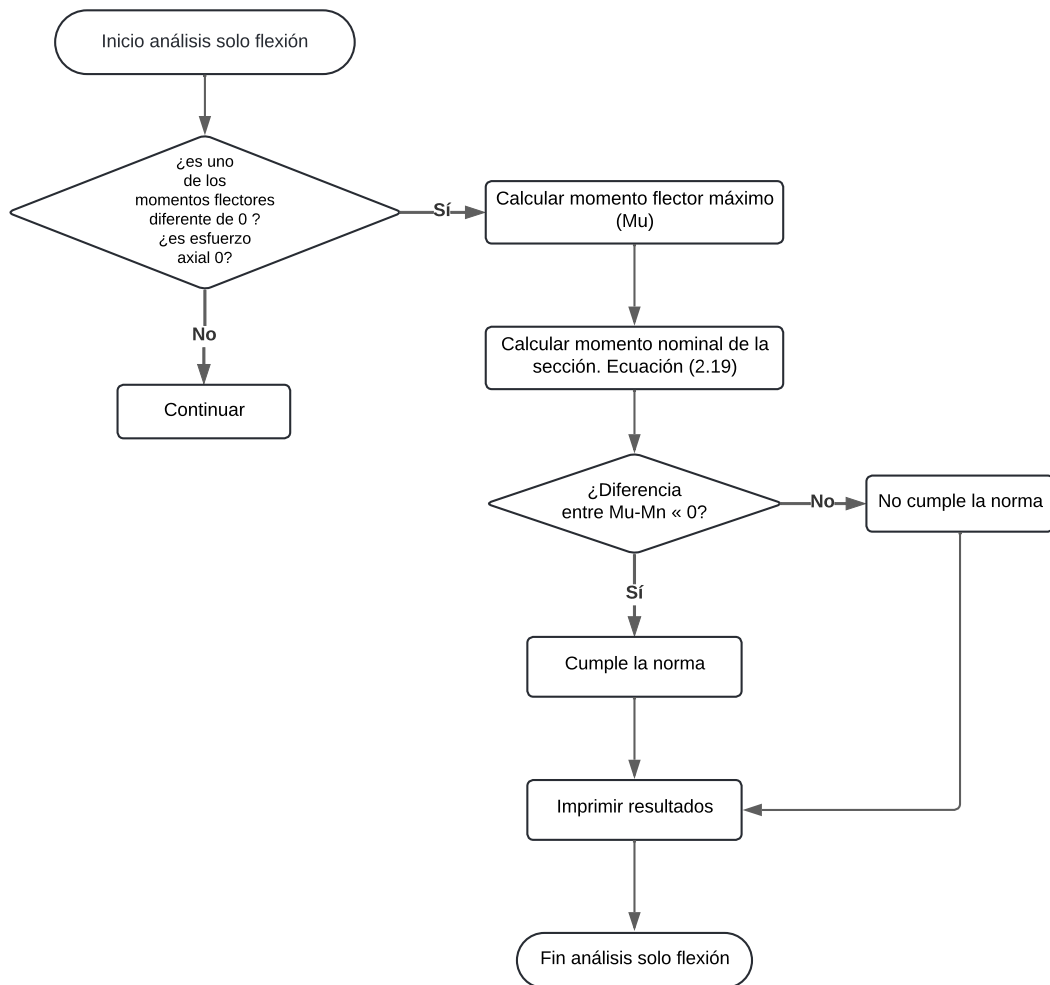
medio del condicional *if* y *else* desde la línea 64 del Código 7.2 mostrado en la sección de Anexos. En esta parte del código se valúan los valores de  $P_n$ \_compresion y  $P_u$ \_val que corresponden a la resistencia nominal de los miembros a compresión y carga de compresión, respectivamente.

### **3.3.3 Función para Análisis de miembros sometidos solo a flexión**

Los miembros que trabajan a flexión son aquellos que presentan una deformación en el eje perpendicular a su eje longitudinal como consecuencia de una carga aplicada, lo cual ocurre frecuentemente en vigas estructurales. En este caso, para validar la norma en perfiles que trabajan a flexión, se utilizan las ecuaciones presentadas en la Sección 2.4. Así mismo, el método de la rigidez proporciona tres valores numéricos para los momentos en los puntos inicial y final, y el momento máximo en la zona intermedia del perfil. Es por esta razón, que no es necesario aplicar la Ecuación (2.18) y, solo es necesario determinar el momento máximo de estos tres momentos mencionados para hacer el resto de los cálculos numéricos con este valor.

De esta forma, solo es necesario determinar el momento nominal de la sección, que depende del módulo de fluencia ( $F_y$ ) y del módulo plástico de la sección ( $Z$ ). Ambos módulos son conocidos, por lo que la validación de la norma se realiza utilizando un ciclo *for* para acceder a los resultados proporcionados por el método de la rigidez para cada elemento, y un condicional *if* para verificar que la diferencia entre el momento de la carga aplicada y el momento nominal de la sección sea menor a cero, y así pasa la norma. Caso contrario, el perfil no cumple y fallaría por flexión pura.

En la Figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo que explica el funcionamiento del código para determinar la validez de la norma en miembros que trabajan solo a flexión. En el Código 7.3, presente en la Sección de Anexos, se presenta la programación de la función para el análisis de miembros estructurales sometidos solo a flexión.



**Figura 3.3:** Función para analizar miembros solo a flexión (Fuente: propia).

### 3.3.4 Función para análisis de miembros sometidos solo a cortante

La validación de la norma para perfiles que trabajan bajo cargas de corte se realiza siguiendo las ecuaciones descritas en la Sección 2.5, las cuales no requieren de operaciones matemáticas complejas, más allá de un producto entre constantes y propiedades del material.

El código para verificar que los perfiles resisten cargas cortantes cumpliendo la norma de la AISC, se realiza mediante un ciclo *for*, que accede a los resultados obtenidos por el método de la rigidez para cada elemento. Utilizando un condicional *if*, se comprueba que el valor de

la fuerza cortante en el miembro sea diferente de cero, ya que, de lo contrario, el cálculo no sería relevante. Dentro del bucle *for*, se extrae el valor de la carga cortante aplicada al perfil analizado, y se determina el área del alma utilizando las propiedades geométricas del perfil del catálogo y se calcula la resistencia nominal al corte, como se indica en la Sección 2.5.

La validación de la norma se realiza comparando la fuerza cortante aplicada con la resistencia al corte del perfil. Si la diferencia es menor a cero, el perfil cumple con la norma; de lo contrario, fallaría. La Figura 3.4 muestra el diagrama de flujo que explica el funcionamiento del código para validar el cumplimiento de la norma en perfiles que trabajan a cortante. El Código 7.4, que se muestra en la sección de Anexos, presenta esta parte del programa utilizado para validar el cumplimiento de la norma en perfiles sometidos a cargas cortantes.

En el Código 7.4 se muestra el código de programación para validar el cumplimiento de la norma para perfiles que trabajan bajo cargas cortantes.

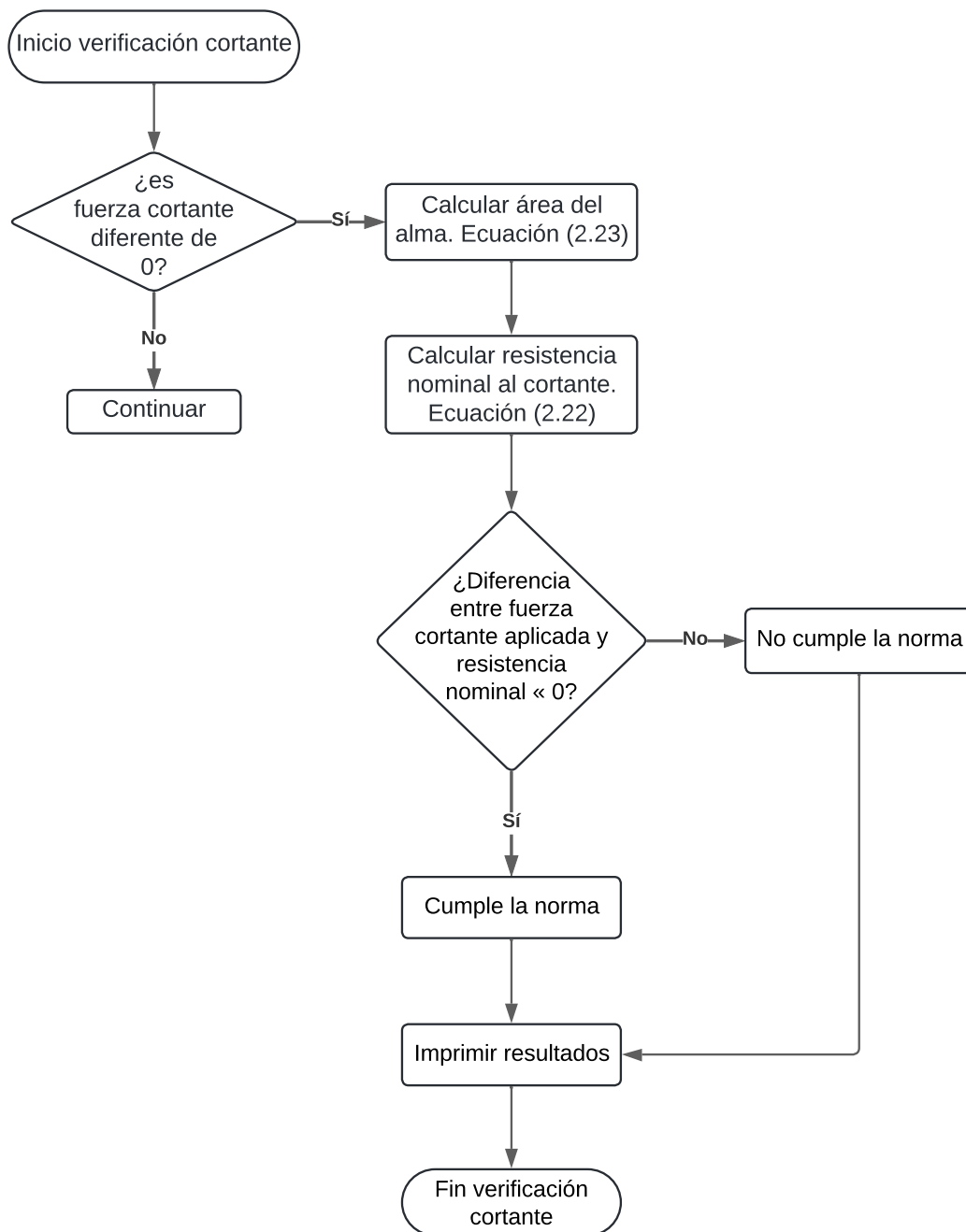
### **3.3.5 Función para análisis de miembros sometidos a flexión y fuerza axial**

El tercer caso estudiado para las posibles combinaciones de cargas en los miembros estructurales corresponde a la combinación de flexión y fuerza axial, que puede ser tanto de tensión como de compresión. La validación de la norma para este caso se realiza siguiendo lo indicado en la Sección 2.6, utilizando las Ecuaciones (2.26) y (2.27).

En el desarrollo de la programación para validar la norma en perfiles que trabajan bajo flexión y fuerza axial, es crucial trabajar nuevamente con los resultados proporcionados por el método de la rigidez. De esta manera, se pueden conocer las fuerzas en los ejes longitudinal y transversal del miembro y aplicar las ecuaciones respectivas detalladas anteriormente. Mediante un ciclo *for*, se accede a la información almacenada en los para cada elemento obtenidos del módulo I del TIC, y se determinan la esbeltez del miembro, el esfuerzo crítico y la resistencia nominal.

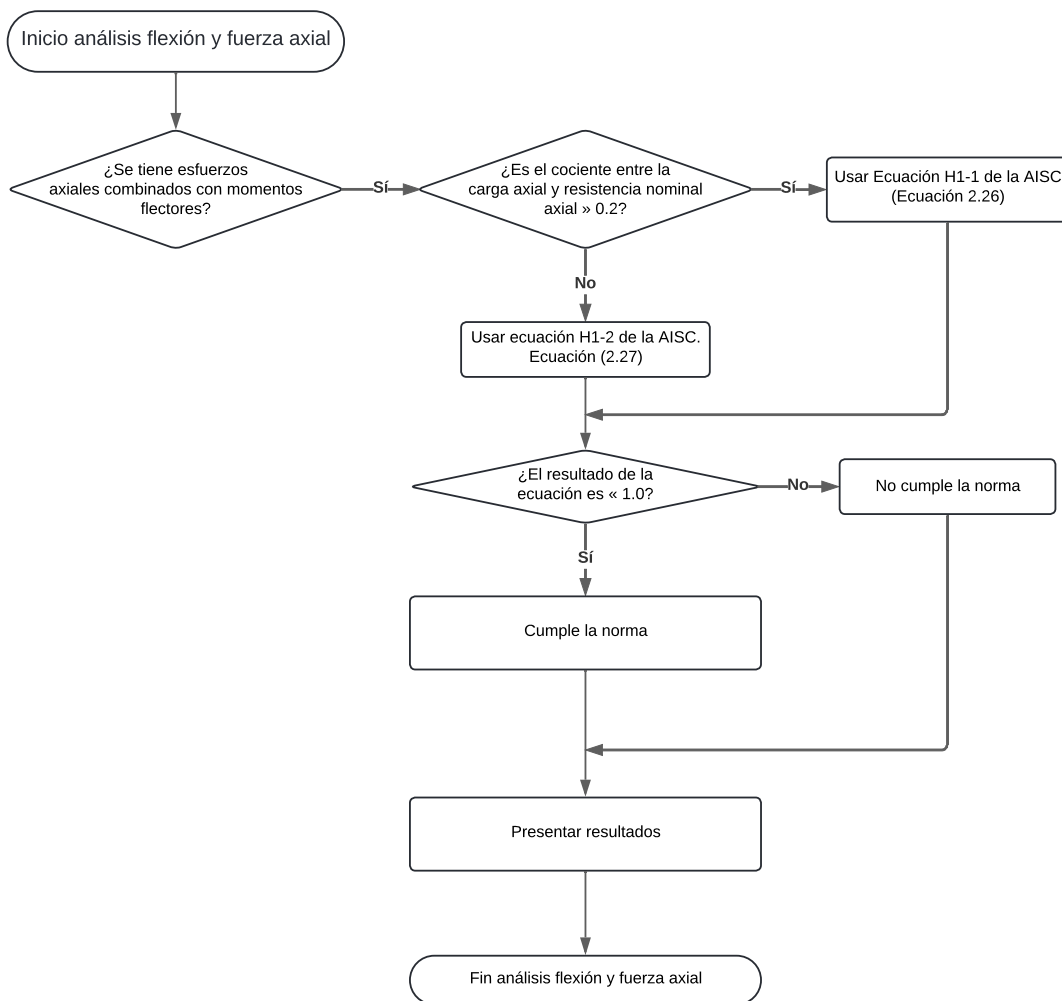
Para la validación de la norma en el caso de perfiles que trabajan a flexión y fuerza axial se debe calcular las expresiones matemáticas que relacionan la fuerza axial de tensión y compresión con los momentos aplicados en la sección y, en caso de que la relación adimensional sea menor a 1.0, entonces se dice que el perfil cumple satisfactoriamente la norma, caso contrario el perfil no cumple con la norma.





**Figura 3.4:** Función para analizar miembros a cortante (Fuente: propia).

Para entender de mejor manera el funcionamiento de la función de análisis de flexión combinada con carga axial se presenta en la Figura 3.5 el diagrama de flujo que explica cómo trabaja dicha función para analizar la validez de la norma en el caso de los perfiles que tienen cargas axiales y de flexión simultáneamente. La programación usada para la validación de la norma se muestra en el Código 7.5, mostrado en la Sección de Anexos.



**Figura 3.5:** Función para analizar miembros a flexión y fuerza axial (Fuente: propia).

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

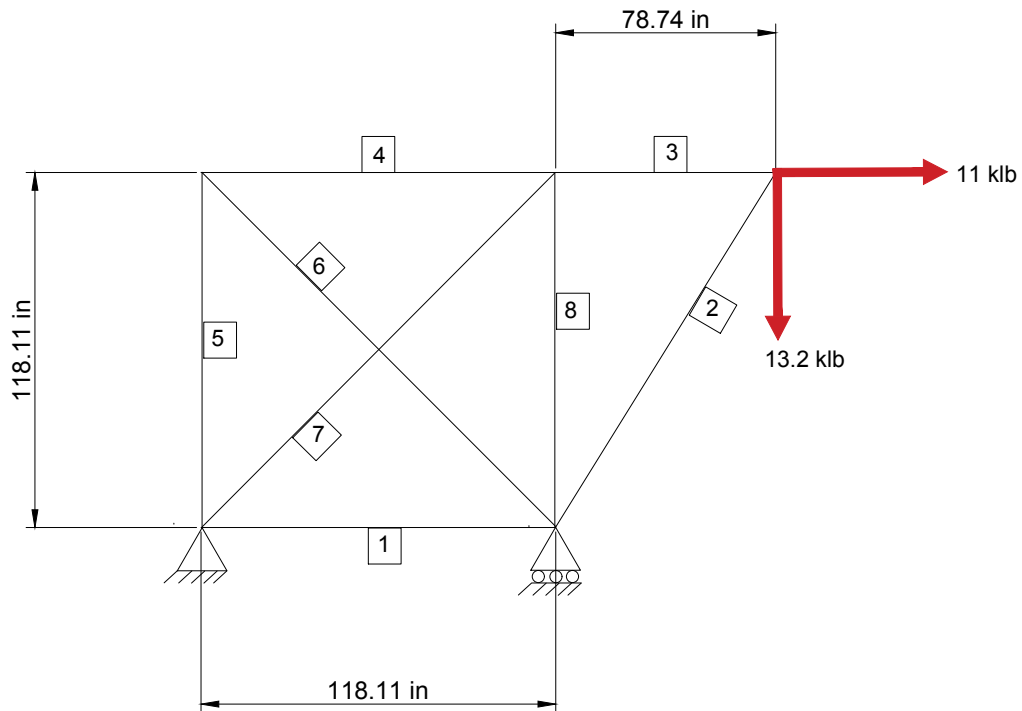
Se realizaron tres ejemplos prácticos para verificar y demostrar el funcionamiento del código desarrollado en Python. En cada ejercicio se incrementó gradualmente la dificultad al aumentar el número de miembros y las cargas aplicadas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada ejercicio.

### 4.1 EJEMPLO 1

El primer ejemplo que se ha desarrollado consiste en una estructura de 8 barras en las que se han aplicado las condiciones de carga y disposición geométrica está dada como se muestra en la Figura 4.1. Esta estructura presenta 8 barras que se encuentran conectadas entre sí por medio de 5 nodos, lo que implica 15 grados de libertad, 3 grados de libertad por nodo. En nuestro análisis estructural, modelamos que los nodos tienen dos grados de desplazamiento en el plano, i.e.,  $U_x$  y  $U_y$ , y además un grado de libertad adicional que representa la rotación, i.e.,  $\theta_z$ . Adicionalmente, al ejercicio se le aplican 2 fuerzas externas de 11 klb y 13.2 klb de forma horizontal y verticalmente.

Para resolver este ejemplo, el primer paso es determinar las reacciones y las fuerzas internas mediante el método de la rigidez. Se recomienda utilizar como punto de partida los resultados del módulo I del TIC, 'Análisis de Estructuras Metálicas con el Método de la Rigidez Usando Python'. Una vez obtenidos estos resultados, se verificará si cada miembro de la estructura cumple con la norma AISC para asegurar que la estructura es segura y confiable, utilizando el código en Python previamente descrito.

Realizamos dos experimentos en este ejemplo. En el primero, consideramos un mismo perfil para todos los miembros de la estructura. Ejecutamos el código usando valores uniformes de área, inercia y rigidez:  $1.18 \text{ in}^2$ ,  $1.93 \text{ in}^4$  y  $29,000 \text{ ksi}$ , respectivamente, y obtenemos los resultados mediante el método de la rigidez. En el segundo experimento, seleccionamos



**Figura 4.1:** Configuración de la armadura de 8 elementos con fuerzas puntuales con sus dimensiones, fuerzas externas, y restricciones (Fuente: propia).

perfiles diferentes para cada elemento de la estructura, eligiendo aleatoriamente entre los perfiles IPE e IPN disponibles en el catálogo del mercado actual del país. Luego, volvimos a ejecutar el código utilizando los valores específicos de áreas e inercias de cada miembro, tomados de la base de datos. Con esto se ha obtenido los resultados de las fuerzas internas usando el método de la rigidez, pero es necesario redefinir nuevamente los valores de las áreas e inercias de cada miembro tomando valores de la base de datos de los perfiles IPE e IPN del catálogo de perfiles actualmente disponibles en el país.

Para este propósito, se almacena en una estructura de datos el perfil que se asigna del catálogo a cada elemento de la estructura. Podemos repetir un mismo tipo de perfil para diversos miembros de la estructura si queremos. En este caso, tenemos un arreglo de 8 elementos cuyos índices indican el perfil correspondiente del catálogo. Este índice facilita el acceso rápido a todas las propiedades del perfil almacenadas en el catálogo.

Para apreciar los diferentes resultados usando diferentes valores de las áreas, se muestra en la Tabla 7.3 que se encuentra en los Anexos, los resultados para respuestas máximas usando los valores de las áreas e inercias preliminares y las propias del catálogo. Para

este caso, es evidente que los valores de las cargas axial, cortante y momentos varían significativamente con la implementación de las nuevas áreas del catálogo. Estos resultados resultan ser lógicos, pues al tener una mayor o menor sección transversal de los perfiles el comportamiento bajo las cargas aplicadas será diferente y en ciertos casos los esfuerzos generados podrán ser mayores o menores.

Por otro lado y más importante, queremos determinar si los perfiles cumplen o no con la norma de la AISC, para esto se debe correr la siguiente parte del código que busca validar si los perfiles cumplen la norma tomando como punto de partida los valores de las cargas y momentos internos que se obtienen del método de la rigidez. Para este primer ejemplo se observa que en todos los miembros existe combinación de cargas axiales y momentos flectores además de esfuerzos cortantes, por esta razón, en todos los casos se espera que se analice la resistencia al cortante y flexión y fuerza axial. Los resultados de la validación de la norma se han resumido en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Validación de la Norma AISC para una armadura de 8 elementos con perfiles aleatorios y fuerzas puntuales (Fuente: propia).

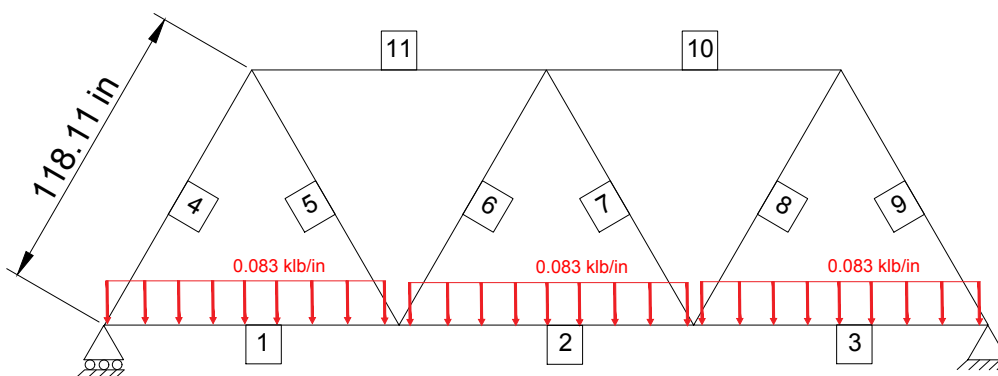
MIEMBRO	ÁREA	PERFIL	Validación de la Norma			
			Cortante		Flexión y fuerza axial	
			Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
1	15.05	IPN 360	X		X	
2	24.03	IPE 600	X		X	
3	10.71	IPN 300	X		X	
4	2.20	IPN 120	X			X
5	13.45	IPN 340	X		X	
6	7.15	IPN 240	X			X
7	6.14	IPN 220	X			X
8	1.17	IPN 80	X			X

Como se puede observar, los 8 miembros cumplen con la norma para la validación del cortante, pero en el caso de flexión y fuerza axial existen 4 miembros (4, 6, 7 y 8) que no cumplen con la norma de la AISC, por lo que para estos miembros sería necesario buscar un perfil más robusto que resista las cargas de flexión y fuerza axial dadas.

Este primer ejemplo muestra resultados rápidos y satisfactorios con el código desarrollado. Utilizando el método de la rigidez, hemos determinado los esfuerzos internos en los miembros empleando áreas de perfiles disponibles localmente. Además, hemos validado el cumplimiento de la norma AISC, identificando de manera eficiente los miembros que cumplen y los que no cumplen con la normativa vigente.

## 4.2 EJEMPLO 2

Para el segundo ejemplo desarrollado se tiene ahora una estructura con 11 miembros y 7 nodos en el que se ha aplicado una carga distribuida de 0.083 klb/in en todos los miembros inferiores como se muestra en la Figura 4.2. Este problema tiene un total de 21 grados de libertad. Todos los miembros tienen una longitud de 118.11 pulgadas y forman entre sí triángulos equiláteros. Para todos los miembros se ha considerado inicialmente un área igual a  $1.18 \text{ in}^2$ , una inercia de  $1.93 \text{ in}^4$  y una rigidez de  $29\,000 \text{ ksi}$ .



**Figura 4.2:** Configuración de la armadura de 11 elementos con una fuerza distribuida con sus dimensiones, fuerzas externas, y restricciones (Fuente: propia).

De manera similar que con el ejemplo anterior, es necesario asignar nuevos valores de las áreas tomando las del catálogo. Con los nuevos resultados de las fuerzas internas de los miembros obtenidos del método de la rigidez luego de actualizar las áreas con las del catálogo, se debe verificar la validez de la norma en todos los miembros, y éstos se muestran en la Tabla 7.4, en la cual se puede observar cómo varían los resultados de las fuerzas en los miembros al usar diferentes áreas en los miembros de la estructura.

Se observa que los esfuerzos internos de los perfiles para este ejemplo no presentan una

variación representativa respecto al análisis inicial cuando se supuso un área inicial igual a  $1.18 \text{ in}^2$  que se muestran en la Tabla 4.2. El miembro que mayor incremento presentó fue el número 9 en el momento generado al inicio de la viga, pasando de  $0.5974 \text{ klb in}$  a  $0.2236 \text{ klb in}$  lo cual representa una reducción del 62.57%. Sin embargo esto resulta favorable puesto que se observa que incrementando el área del miembro a  $15.3140 \text{ in}^2$  los esfuerzos presentaron una reducción.

De forma general el promedio del incremento observado en todos los miembros fue del 0.98% y, se presume que no se obtuvo una variación representativa en los miembros puesto que la carga distribuida aplicada en la estructura no es muy grande, además de que por la disposición geométrica de los perfiles es posible que los esfuerzos se repartan de forma más uniforme en todos los miembros, permitiendo así, una reducción de los esfuerzos que debe resistir cada miembro.

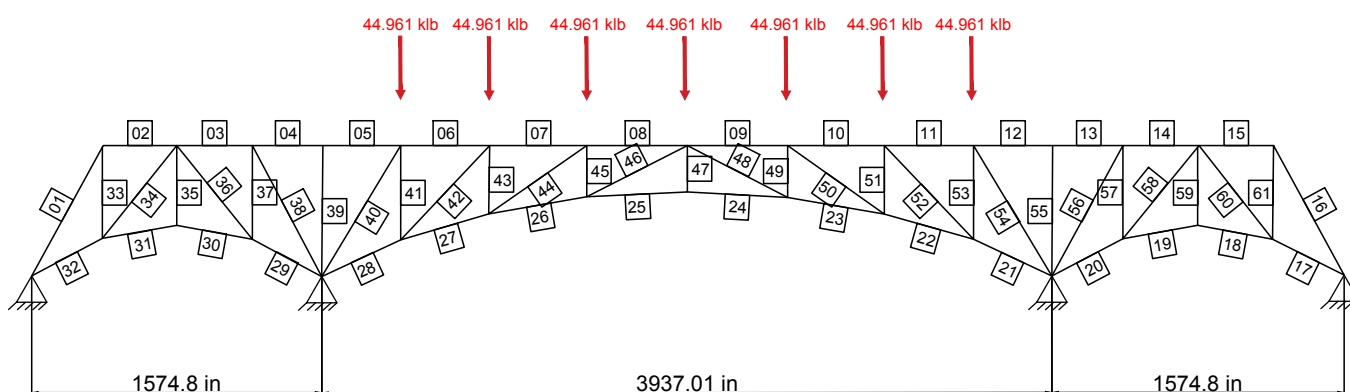
Se observa que todos los miembros de la estructura en cuestión trabajan tanto a corte como a flexión y fuerza axial, por lo que se espera que el programa en Python analice únicamente estos 2 casos. En este caso, luego de realizar la validación de la norma se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4.2 y, como se puede observar, todos los miembros satisfacen la norma para las fuerzas de corte, pero para la flexión y fuerza axial los miembros 1, 3, 7 y 8 no cumplen por lo que para dichos miembros sería necesario emplear perfiles más robustos o hacer una combinación de los perfiles más apropiada con áreas más semejantes entre sí.

**Tabla 4.2:** Resultados de validación de la norma para el segundo ejercicio

MIEMBRO	ÁREA	PERFIL	Validación de la Norma			
			Cortante		Flexión y fuerza axial	
			Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
1	22.79	IPN 450	X		X	
2	1.64	IPN 100	X			X
3	24.03	IPE 600	X		X	
4	3.70	IPE 180	X			X
5	9.70	IPE 330	X		X	
6	2.05	IPE 120	X		X	
7	6.06	IPE 240	X		X	
8	3.12	IPE 160	X			X
9	5.19	IPN 200	X			X
10	20.77	IPE 550	X		X	
11	15.05	IPN 360	X		X	

### 4.3 EJEMPLO 3

Para el tercer ejemplo se ha realizado el análisis de la estructura mostrada en la Figura 4.3, misma que se compone de un total de 61 miembros y 32 nodos. A la estructura se le han aplicado cargas puntuales directamente en los nodos 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 iguales todas a 44.961 klb. El procedimiento de resolución ha sido igual que para los dos anteriores ejemplos.



**Figura 4.3:** Configuración de la armadura de 61 elementos con fuerzas puntuales con sus dimensiones, fuerzas externas, y restricciones (Fuente: propia).

En la Tabla 7.5 se muestran los resultados del método de la rigidez usando un área igual a  $1.18 \text{ in}^2$  y luego empleando diferentes perfiles del catálogo. De igual manera se observa que en casi todos los miembros existe una variación bastante significativa en los esfuerzos de cada miembro, lo cual tiene sentido, pues al incrementarse el área en los miembros y, al tener una estructura con tantos miembros el efecto del incremento del área en los perfiles provoca que, consecuentemente se tengan variaciones en los esfuerzos internos de todos los perfiles.

Se ha realizado también el análisis de la validez de la norma y se ha podido encontrar que, de los 61 miembros, 59 trabajan a corte más flexión y fuerza axial, mientras que los miembros 38 y 55 trabajan solamente a flexión. Adicionalmente, como se puede mostrar en la tabla a continuación, la mayoría de los miembros no satisfacen la norma para los esfuerzos de flexión y fuerza axial mientras que todos sí cumplen sin problema las cargas de corte. Para los miembros 38 y 55 que trabajan únicamente a flexión se tiene que sí



satisfacen la norma y se han empleado perfiles IPN 550 e IPE 140, respectivamente.

**Tabla 4.3:** Resultados de la validación de la norma para el tercer ejercicio

MIEMBRO	ÁREA	PERFIL	Validación de la Norma					
			Cortante		Flexión y fuerza axial		Solo flexión	
			Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
1	18.0	IPN 380	X			X		
2	32.9	IPN 550	X		X			
3	3.1	IPE 160	X			X		
4	22.8	IPN 400	X			X		
5	2.5	IPE 140	X			X		
6	1.6	IPE 80	X			X		
7	13.1	IPE 360	X			X		
8	8.3	IPE 300	X			X		
9	27.9	IPN 500	X			X		
10	6.1	IPE 220	X			X		
11	9.7	IPE 330	X			X		
12	12.1	IPE 360	X			X		
13	6.1	IPE 220	X			X		
14	1.6	IPE 100	X			X		
15	3.5	IPE 160	X			X		
16	1.2	IPE 80	X			X		
17	9.5	IPE 300	X			X		
18	2.8	IPE 140	X			X		
19	5.2	IPE 200	X			X		
20	15.1	IPE 400	X			X		
21	6.1	IPE 240	X			X		
22	4.3	IPE 180	X			X		
23	2.2	IPE 120	X			X		
24	1.2	IPN 80	X			X		
25	5.2	IPE 220	X			X		
26	24.0	IPN 450	X			X		
27	1.2	IPE 80	X			X		
28	2.0	IPE 100	X			X		

29	6.1	IPE 240	X			X		
30	1.6	IPE 80	X			X		
31	18.3	IPN 380	X		X			
32	3.7	IPE 180	X			X		
33	4.4	IPE 200	X			X		
34	24.0	IPN 450	X		X			
35	8.3	IPE 270	X		X			
36	3.1	IPE 160	X			X		
37	15.1	IPE 400	X			X		
38	15.3	IPE 400	X			X		
39	32.9	IPN 550					X	
40	2.2	IPE 120	X			X		
41	22.8	IPN 400	X			X		
42	11.3	IPE 330	X			X		
43	7.1	IPE 270	X			X		
44	9.5	IPE 300	X			X		
45	11.3	IPE 330	X			X		
46	4.3	IPE 180	X			X		
47	39.4	IPN 600	X		X			
48	27.9	IPN 500	X			X		
49	12.1	IPE 360	X			X		
50	7.1	IPE 240	X			X		
51	8.3	IPE 300	X			X		
52	20.8	IPN 400	X			X		
53	7.1	IPE 240	X			X		
54	18.3	IPN 380	X			X		
55	2.5	IPE 140					X	
56	16.6	IPE 450	X			X		
57	9.7	IPE 330	X			X		
58	39.4	IPN 600	X			X		
59	4.4	IPE 200	X			X		
60	5.2	IPE 200	X			X		
61	13.5	IPE 400	X			X		

## 5 CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado una herramienta computacional en Python que permite el análisis de estructuras metálicas en 2 dimensiones y bajo consideraciones no sísmicas. Por medio de los criterios de la AISC bajo la filosofía de la LRFD, esta herramienta determina la validez de la norma para todos los miembros de una estructura considerando efectos de cargas axiales, de flexión y corte.
2. Se ha recopilado una lista completa de los perfiles IPE e IPN disponibles en el país para construir una base de datos actualizada que detalla sus propiedades físicas y geométricas. Esta base de datos facilita la selección de perfiles de acero durante el diseño de estructuras. Los ejemplos prácticos han demostrado que la elección de diferentes perfiles para los elementos estructurales se realiza de manera sencilla y eficiente.
3. El programa desarrollado en Python permite al usuario verificar de manera rápida y eficiente si la estructura cumple con la norma. Además, proporciona información detallada sobre el grado de cumplimiento o deficiencia respecto a la normativa. Esto facilita el proceso iterativo al permitir identificar rápidamente el perfil más adecuado para la aplicación deseada, simplificando así la selección manual de perfiles.
4. La herramienta computacional desarrollada ofrece resultados precisos y rápidos, simplificando significativamente el análisis y la validación de estructuras de acero según la normativa AISC. A diferencia del proceso manual, que es largo, tedioso y propenso a errores, esta herramienta reduce el tiempo, proporcionando una solución eficiente y precisa para la evaluación de estructuras.
5. Al ser una herramienta de código abierto desarrollado en Python, permite que la herramienta sea accesible y pueda ser modificada por otros profesionales del área, promoviendo de esta manera el desarrollo y mejora continua del programa.

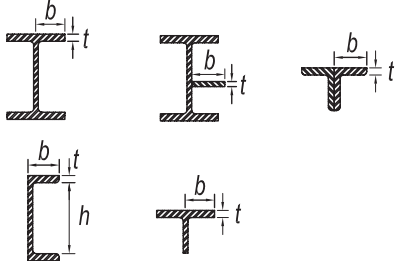
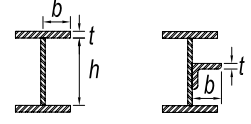
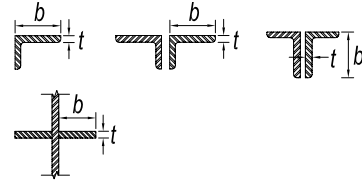
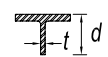
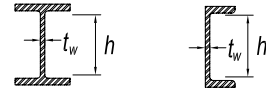
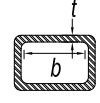
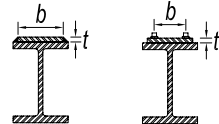
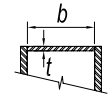
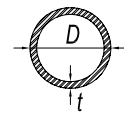
6. La capacidad de evaluar rápidamente, en un intervalo de tiempo reducido, si una configuración de perfiles de acero cumple con la normativa representa un ahorro considerable tanto en tiempo como en costos. Esta agilidad permite la evaluación de diversas combinaciones de perfiles de manera eficiente, sin los extensos tiempos de recálculo asociados con métodos manuales. Como resultado, se minimizan los costos de diseño y validación, optimizando el proceso y reduciendo el riesgo de errores costosos.

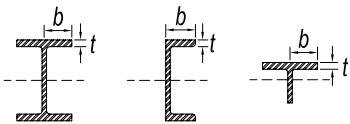
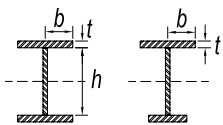
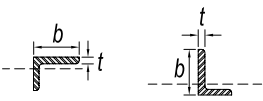
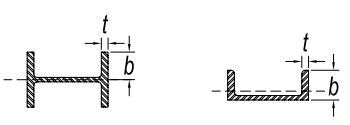
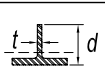
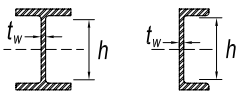
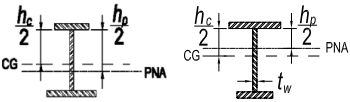
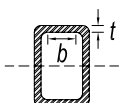
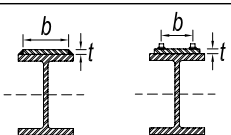
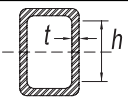
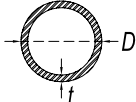
## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. McCormac, *Diseño de estructuras de acero*. Marcombo, 2012, pág. 736, ISBN: 9786077075592.
- [2] S. Parra, *Estructuras Históricas: El Puente de Brooklyn*, feb. de 2018. dirección: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/estructuras-hist%C3%B3ricas-el-puente-de-brooklyn>.
- [3] F. P. Molina, *Un poco de historia sobre el cálculo de estructuras*, jun. de 2015. dirección: <https://www.tecnicaindustrial.es/un-poco-de-historia-sobre-el-calculo-de-estru/>.
- [4] A. I. O. S. CONSTRUCTIONS, *Early History WHERE DID AISC COME FROM?* Dirección: <https://www.aisc.org/legacy/early-aisc-history/>.

## **7 ANEXOS**

**TABLE B4.1a**  
**Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements**  
**Members Subject to Axial Compression**

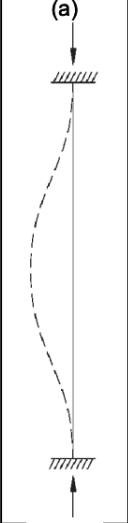
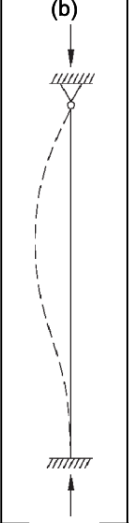
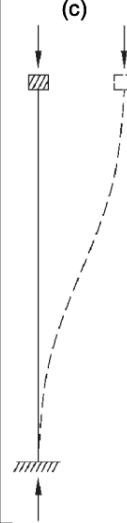
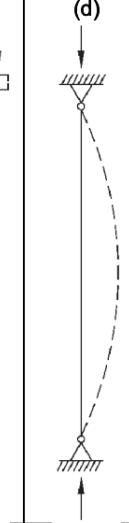
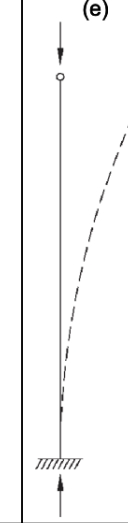






Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio $\lambda_r$ (nonslender/slender)	Examples	
<b>Unstiffened Elements</b>	<b>1</b>	Flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections; outstanding legs of pairs of angles connected with continuous contact, flanges of channels, and flanges of tees	$b/t$	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	<b>2</b>	Flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	$b/t$	$0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a]	
	<b>3</b>	Legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	$b/t$	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	<b>4</b>	Stems of tees	$d/t$	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
<b>Stiffened Elements</b>	<b>5</b>	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	$h/t_w$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	<b>6</b>	Walls of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	$b/t$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	<b>7</b>	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	$b/t$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	<b>8</b>	All other stiffened elements	$b/t$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	<b>9</b>	Round HSS	$D/t$	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

<b>TABLE B4.1b</b>						
<b>Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements</b>						
<b>Members Subject to Flexure</b>						
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples	
			$\lambda_p$ (compact/ noncompact)	$\lambda_r$ (noncompact/ slender)		
Unstiffened Elements	10	Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and tees	$b/t$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	$b/t$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$ [a] [b]	
	12	Legs of single angles	$b/t$	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the weak axis	$b/t$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Stems of tees	$d/t$	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	15	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	$h/t_w$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Webs of singly-symmetric I-shaped sections	$h_c/t_w$	$\frac{h_c \sqrt{E}}{h_b \sqrt{F_y}} \leq \lambda_r$ [c] $\left(0.54 \frac{M_p}{M_y} - 0.09\right)^2 \leq \lambda_r$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Flanges of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	$b/t$	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	$b/t$	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Webs of rectangular HSS and boxes	$h/t$	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
20	Round HSS	$D/t$	$0.07 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$		

[a]  $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$  but shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.  
[b]  $F_L = 0.7F_y$  for major axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with  $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$ ;  
 $F_L = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5F_y$  for major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with  $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$ .  
[c]  $M_y$  is the moment at yielding of the extreme fiber.  $M_p$  = plastic bending moment, kip-in. (N-mm)  
 $E$  = modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi (200 000 MPa)  
 $F_y$  = specified minimum yield stress, ksi (MPa)



**TABLE C-A-7.1**  
**Approximate Values of Effective**  
**Length Factor,  $K$**

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
						
Theoretical $K$ value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code	 <ul style="list-style-type: none"> <li> Rotation fixed and translation fixed</li> <li> Rotation free and translation fixed</li> <li> Rotation fixed and translation free</li> <li> Rotation free and translation free</li> </ul>					

**Figura 7.1:** Tabla de Valores de Factor de Longitud Efectiva  $K$

**Tabla 7.1:** Catálogo de perfiles estructurales laminados en caliente IPE e IPN disponibles en el país

PERFIL	d (in)	bf (in)	tw (in)	tf (in)	r (in)	T (in)	u (mm) Perimetro	A (in2)	Sx (in3)	Ix (in4)	Wx (in3)	ix (in)	Iy (in4)
IPE 80	3.1496	1.8110	0.1496	0.2047	0.1969	2.3622	12.9134	1.1842	0.7079	1.9244	1.2205	1.2756	0.2040
IPE 100	3.9370	2.1654	0.1614	0.2244	0.2756	2.9528	15.7480	1.5965	1.2022	4.1083	2.0870	1.6024	0.3820
IPE 120	4.7244	2.5197	0.1732	0.2480	0.2756	3.6614	18.7008	2.0460	1.8551	7.6400	3.2343	1.9291	0.6655
IPE 140	5.5118	2.8740	0.1850	0.2717	0.2756	4.4094	21.6929	2.5420	2.6972	12.9976	4.7171	2.2598	1.0787
IPE 160	6.2992	3.2283	0.1969	0.2913	0.3543	5.0000	24.5276	3.1155	3.7774	20.8778	6.6516	2.5906	1.6409
IPE 180	7.0866	3.5827	0.2087	0.3150	0.3543	5.7480	27.4803	3.7045	5.0772	31.7131	8.9095	2.9213	2.4265
IPE 200	7.8740	3.9370	0.2205	0.3346	0.4724	6.2598	31.0236	4.4175	6.7126	46.6087	11.8386	3.2520	3.4116
IPE 220	8.6614	4.3307	0.2323	0.3622	0.4724	7.0079	33.3858	5.1770	8.7264	66.5495	15.3780	3.5866	4.9251
IPE 240	9.4488	4.7244	0.2441	0.3858	0.5906	7.4803	36.2992	6.0605	11.1673	93.4576	19.7717	3.9252	6.8231
IPE 270	10.6299	5.3150	0.2598	0.4016	0.5906	8.6614	40.9449	7.1145	14.7677	139.1053	26.1792	4.4094	10.0905
IPE 300	11.8110	5.9055	0.2795	0.4213	0.5906	9.8031	45.6693	8.3390	19.1615	200.8498	33.9902	4.9213	14.5112
IPE 330	12.9921	6.2992	0.2953	0.4528	0.7087	10.6693	49.2126	9.7030	24.5315	282.7754	43.5099	5.3937	18.9318
IPE 360	14.1732	6.6929	0.3150	0.5000	0.7087	11.7717	53.1496	11.2685	31.1221	390.8883	55.1655	5.9055	24.9861
IPE 400	15.7480	7.0866	0.3386	0.5315	0.8268	13.0315	57.8740	13.0975	40.0926	555.7005	70.7875	6.4961	31.7131
IPE 450	17.7165	7.4803	0.3701	0.5748	0.8268	14.9213	63.3858	15.3140	51.9312	810.6067	91.5356	7.2835	40.3622
IPE 500	19.6850	7.8740	0.4016	0.6299	0.8268	16.7717	68.5039	17.9800	67.1261	1158.0096	117.7758	8.0315	51.4137
IPE 550	21.6535	8.2677	0.4370	0.6772	0.9449	18.4252	74.0157	20.7700	84.8230	1612.5645	148.8979	8.7795	63.4263
IPE 600	23.6220	8.6614	0.4724	0.7480	0.9449	20.2362	79.1339	24.0250	107.4018	2212.2308	187.3429	9.5669	81.4451
IPN 80	3.1496	1.6535	0.1535	0.2323	0.0906	2.3228	11.9685	1.1749	0.6957	1.8692	1.1900	1.2598	0.1511
IPN 100	3.9370	1.9685	0.1772	0.2677	0.1063	2.9528	14.5669	1.6430	1.2144	4.1083	2.0870	1.5787	0.2931

<

**Tabla 7.1:** Catálogo de perfiles estructurales laminados en caliente IPE e IPN disponibles en el país

PERFIL	d (in)	bf (in)	tw (in)	tf (in)	r (in)	T (in)	u (mm) Perimetro	A (in2)	Sx (in3)	Ix (in4)	Wx (in3)	ix (in)	Iy (in4)
IPN 120	4.7244	2.2835	0.2008	0.3031	0.1220	3.6220	17.2835	2.2010	1.9406	7.8802	3.3380	1.8937	0.5165
IPN 140	5.5118	2.5984	0.2244	0.3386	0.1339	4.2913	19.7638	2.8365	2.9108	13.7664	4.9978	2.2087	0.8457
IPN 160	6.2992	2.9134	0.2480	0.3740	0.1496	4.9213	22.6378	3.5340	4.1496	22.4635	7.1398	2.5197	1.3142
IPN 180	7.0866	3.2283	0.2717	0.4094	0.1614	5.5906	25.1969	4.3245	5.6996	34.8364	9.8248	2.8346	1.9532
IPN 200	7.8740	3.5433	0.2953	0.4449	0.1772	6.2598	27.9134	5.1925	7.6280	51.4137	13.0591	3.1496	2.8109
IPN 220	8.6614	3.8583	0.3189	0.4803	0.1929	6.8898	30.5118	6.1380	9.8858	73.5168	16.9646	3.4646	3.8921
IPN 240	9.4488	4.1732	0.3425	0.5157	0.2047	42.9921	33.2283	7.1455	12.5709	102.1067	21.6024	3.7756	5.3095
IPN 260	10.2362	4.4488	0.3701	0.5551	0.2205	8.1890	35.6693	8.2770	15.6831	137.9041	26.9725	4.0945	6.9192
IPN 280	11.0236	4.6850	0.3976	0.5984	0.2402	8.8583	38.0315	9.4705	19.2835	182.3505	33.0749	4.3701	8.7451
IPN 300	11.8110	4.9213	0.4252	0.6378	0.2559	9.4882	40.5512	10.7105	23.2500	235.4459	39.8485	4.6850	10.8353
IPN 320	12.5984	5.1575	0.4528	0.6811	0.2717	10.1181	42.9134	12.0590	27.8879	300.5540	47.7206	5.0000	13.3339
IPN 340	13.3858	5.3937	0.4803	0.7205	0.2874	10.7874	45.2756	13.4540	32.9528	377.1940	56.3249	5.3150	16.1929
IPN 360	14.1732	5.6299	0.5118	0.7677	0.3071	11.4173	47.6378	15.0505	38.9331	471.1321	66.5159	5.5906	19.6525
IPN 380	14.9606	5.8661	0.5394	0.8071	0.3228	12.0472	50.0000	16.5850	45.2186	576.8426	76.8899	5.9055	23.4245
IPN 400	15.7480	6.1024	0.5669	0.8504	0.3386	12.7165	52.3622	18.2900	52.2973	701.7731	89.0947	6.1811	27.8691
IPN 450	17.7165	6.6929	0.6378	0.9567	0.3819	14.2913	58.1890	22.7850	73.2285	1101.5507	124.4884	6.9685	41.5634
IPN 500	19.6850	7.2835	0.7087	1.0630	0.4252	15.9055	64.0157	27.9001	98.8585	1651.4851	167.8153	7.7165	59.5822
IPN 550	21.6535	7.8740	0.7480	1.1811	0.4685	17.5197	70.3543	32.8601	129.3703	2382.8090	220.2957	8.5039	83.8476
IPN 600	23.6220	8.4646	0.8504	1.2756	0.5118	19.0945	75.7480	39.3701	166.5948	3339.4884	282.5399	9.2126	112.1972

**Tabla 7.2:** Catálogo de perfiles estructurales laminados en caliente IPE e IPN disponibles en el país (continuación)

<b>PERFIL</b>	<b>Wy (<math>in^3</math>)</b>	<b>iy (<math>in</math>)</b>	<b>Iz (<math>in^4</math>)</b>	<b>Ia (<math>cm^6</math>)</b>	<b>Peso (<math>lb/in</math>)</b>	<b>y_cent (<math>in</math>)</b>	<b>Z (<math>in^3</math>)</b>
IPE 80	0.2252	0.4134	0.0173	0.4394	0.3353	1.1921	1.4117
IPE 100	0.3533	0.4882	0.0274	1.3071	0.4526	1.4952	2.3872
IPE 120	0.5279	0.5709	0.0425	3.3143	0.5812	1.8018	3.6865
IPE 140	0.7506	0.6496	0.0632	7.3770	0.7209	2.1094	5.3622
IPE 160	1.0191	0.7244	0.0875	14.7429	0.8829	2.4145	7.5223
IPE 180	1.3547	0.8071	0.1216	27.6723	1.0505	2.7236	10.0894
IPE 200	1.7392	0.8819	0.1602	48.3734	1.2517	3.0293	13.3821
IPE 220	2.2762	0.9764	0.2198	84.4208	1.4641	3.3481	17.3332
IPE 240	2.8864	1.0591	0.2883	139.2365	1.7155	3.6634	22.2022
IPE 270	3.7957	1.1890	0.3700	262.8327	2.0173	4.1195	29.3084
IPE 300	4.9124	1.3189	0.4829	468.8387	2.3581	4.5691	38.1016
IPE 330	6.0108	1.3976	0.6367	741.4280	2.7437	5.0196	48.7053
IPE 360	7.5059	1.4921	0.8961	1167.8142	3.1907	5.4806	61.7588
IPE 400	8.9095	1.5551	1.1604	1824.7097	3.7048	6.0429	79.1469
IPE 450	10.7402	1.6220	1.5833	2945.6028	4.3363	6.7274	103.0234
IPE 500	13.0591	1.6969	2.2055	4651.1478	5.0683	7.4251	133.5034
IPE 550	15.5000	1.7520	2.9311	7015.8226	5.9233	8.0953	168.1388
IPE 600	18.7953	1.8346	4.1323	10600.4462	6.8174	8.8002	211.4246
IPN 80	0.1831	0.3583	0.0223	0.3258	0.3325	1.1837	1.3907
IPN 100	0.2978	0.6772	0.0413	0.9980	0.4649	1.4766	2.4261

**Tabla 7.2:** Catálogo de perfiles estructurales laminados en caliente IPE e IPN disponibles en el país (continuación)

<b>PERFIL</b>	<b>Wy (<math>in^3</math>)</b>	<b>iy (<math>in</math>)</b>	<b>Iz (<math>in^4</math>)</b>	<b>Ia (<math>cm^6</math>)</b>	<b>Peso (<math>lb/in</math>)</b>	<b>y_cent (<math>in</math>)</b>	<b>Z (<math>in^3</math>)</b>
IPN 120	0.4522	1.1496	0.0702	2.5509	0.6259	1.7690	3.8936
IPN 140	0.6530	1.8346	0.1120	5.7348	0.8047	2.0610	5.8462
IPN 160	0.9032	2.7874	0.1701	11.6856	1.0003	2.3529	8.3151
IPN 180	1.2083	4.0551	0.2475	22.0604	1.2238	2.6445	11.4364
IPN 200	1.5866	5.7480	0.3508	39.1754	1.4696	2.9361	15.2458
IPN 220	2.0199	7.9134	0.4829	66.1364	1.7379	3.2276	19.8111
IPN 240	2.5447	10.6299	0.6487	106.9876	2.0229	3.5190	25.1453
IPN 260	3.1122	14.2126	0.8673	164.1122	2.3414	3.8013	31.4636
IPN 280	3.7347	18.8189	1.1484	240.4893	2.6822	4.0808	38.6474
IPN 300	4.4059	24.0945	1.4703	342.0400	3.0287	4.3570	46.6656
IPN 320	5.1687	30.7874	1.8788	479.6380	3.4143	4.6359	55.9039
IPN 340	6.0047	38.3858	2.3424	656.5231	3.8054	4.9115	66.0790
IPN 360	6.9567	1.1417	2.9551	894.1078	4.2581	5.1862	78.0554
IPN 380	7.9941	1.1890	3.6038	1186.8061	4.6939	5.4614	90.5778
IPN 400	9.0925	1.2323	4.3966	1562.5473	5.1745	5.7395	104.9755
IPN 450	12.3878	1.3504	6.9192	2945.9752	6.4262	6.4292	146.4904
IPN 500	16.3544	1.4646	10.7873	5224.6280	7.8791	7.1183	198.6019
IPN 550	21.2973	1.5827	14.8475	8896.3908	9.3320	7.8712	258.6481
IPN 600	27.0335	1.6929	21.0220	14266.2507	11.1201	8.4952	334.4560

```

1 def analisis_solo_tension(Respuestas_maximas, A, Fy, Fu, Longitudes,
2   radios_de_giro, phi_t=0.9, phi_t_fractura=0.75, tolerancia=0.01):
3     Pu = []
4     validacion_fluencia = []
5     validacion_fractura = []
6     validacion_esbeltez = []
7
8     for idx, matriz_fi in enumerate(Respuestas_maximas):
9         if matriz_fi[0, 1] == 0 and all(abs(matriz_fi[i, 0]) <
10            tolerancia for i in range(1, 5)):
11             Pu_val = matriz_fi[0, 0]
12             Pu.append(Pu_val)
13
14             # Evaluación de la resistencia a la fluencia
15             Pn_flu = phi_t * Fy * A[idx]
16             diferencia_fluencia = Pu_val - Pn_flu
17             validacion_fluencia.append(diferencia_fluencia)
18
19             # Evaluación de la resistencia a la fractura
20             Pn_fractura = phi_t_fractura * Fu * A[idx]
21             diferencia_fractura = Pu_val - Pn_fractura
22             validacion_fractura.append(diferencia_fractura)
23
24             # Evaluación de la relación de esbeltez
25             L = Longitudes[idx]
26             r = radios_de_giro[idx]
27             relacion_esbeltez = L / r
28             validacion_esbeltez.append(relacion_esbeltez)
29
30             # Redondeo los decimales por facilidad al momento de
31             # presentar los resultados
32             Pu_val = round(Pu_val, 4)
33             Pn_flu = round(Pn_flu, 4)
34             diferencia_fluencia = round(diferencia_fluencia, 4)
35             Pn_fractura = round(Pn_fractura, 4)
36             diferencia_fractura = round(diferencia_fractura, 4)
37             relacion_esbeltez = round(relacion_esbeltez, 4)

```

```

35
36     # Validacion de la norma
37     if diferencia_fluencia <= 0:
38         print(f"Pu: {Pu_val}, Pn_flu: {Pn_flu}, Cumple la
39             norma por fluencia por {-diferencia_fluencia}
40             klb")
41     else:
42         print(f"Pu: {Pu_val}, Pn_flu: {Pn_flu}, No cumple la
43             norma por fluencia por {diferencia_fluencia} klb")
44
45     if diferencia_fractura <= 0:
46         print(f"Pu: {Pu_val}, Pn_fractura: {Pn_fractura},
47             Cumple la norma por fractura por
48             {-diferencia_fractura} klb")
49     else:
50         print(f"Pu: {Pu_val}, Pn_fractura: {Pn_fractura}, No
51             cumple la norma por fractura por
52             {diferencia_fractura} klb")
53
54     if relacion_esbeltez <= 300:
55         print(f"Relación de esbeltez: {relacion_esbeltez},
56             Cumple la norma de esbeltez")
57     else:
58         print(f"Relación de esbeltez: {relacion_esbeltez}, No
59             cumple la norma de esbeltez")
60
61     print("\nResumen de cumplimiento de la norma por fluencia:")
62     for idx, dif in enumerate(validacion_fluencia):
63         dif = round(dif, 4)
64         if dif <= 0:
65             print(f"Cumple la norma por fluencia por {-dif} klb")
66         else:
67             print(f"No cumple la norma por fluencia por {dif} klb")
68
69     print("\nResumen de cumplimiento de la norma por fractura:")
70     for idx, dif in enumerate(validacion_fractura):
71         dif = round(dif, 4)
72         if dif <= 0:

```

```

64         print(f"Cumple la norma por fractura por {-dif} klb")
65     else:
66         print(f"No cumple la norma por fractura por {dif} klb")
67
68     print("\nResumen de cumplimiento de la norma de esbeltez:")
69     for idx, esb in enumerate(validacion_esbeltez):
70         esb = round(esb, 4)
71         if esb <= 300:
72             print(f"Cumple la norma de esbeltez con relación de
73                   {esb}")
74         else:
75             print(f"No cumple la norma de esbeltez con relación de
76                   {esb}")
77
78     print('PU:', Pu)
79
80     return Pu, validacion_fluencia, validacion_fractura,
81           validacion_esbeltez

```

**Código 7.1:** Función análisis solo a tensión. (Fuente: propia)

```

1  def analisis_solo_compresion(Respuestas_maximas, A, Fy, Longitudes,
2  radios_de_giro, bf, tf, tw, E, d, phi_c=0.9, tolerancia=0.01):
3      Pu = []
4      esbeltez_patin_valores = []
5      lambda_r_valores_patin = []
6      esbeltez_alma_valores = []
7      lambda_r_valores_alma = []
8      esbeltez_miembro_valores = []
9      Fe_valores = []
10     Fcr_valores = []
11     Pn_valores = []
12     validacion_norma = []
13
14     limite_elastico = 4.71 * math.sqrt(E / Fy)
15     k = 1
16
17     for idx, matriz_fi in enumerate(Respuestas_maximas):
18         if matriz_fi[0, 1] == 1 and all(abs(matriz_fi[i, 0]) <

```



```

18     tolerancia for i in range(1, 5)):
19         Pu_val = round(matriz_fi[0, 0], 4)
20         Pu.append(Pu_val)
21
22         # Esbeltez del patín
23         esbeltez_patin = round(0.5 * bf[idx] / tf[idx], 4)
24         lambda_r_patin = round(0.56 * math.sqrt(E / Fy), 4)
25         esbeltez_patin_valores.append(esbeltez_patin)
26         lambda_r_valores_patin.append(lambda_r_patin)
27
28         if esbeltez_patin < lambda_r_patin:
29             print(f"Esbeltez del patín: {esbeltez_patin},
30                   lambda_r: {lambda_r_patin}, Cumple la norma de
31                   esbeltez del patín")
32         else:
33             print(f"Esbeltez del patín: {esbeltez_patin},
34                   lambda_r: {lambda_r_patin}, No cumple la norma de
35                   esbeltez del patín")
36
37         # Esbeltez del alma
38         esbeltez_alma = round((d[idx] - 2 * tf[idx]) / tw[idx], 4)
39         lambda_r_alma = round(1.49 * math.sqrt(E / Fy), 4)
40         esbeltez_alma_valores.append(esbeltez_alma)
41         lambda_r_valores_alma.append(lambda_r_alma)
42
43         if esbeltez_alma < lambda_r_alma:
44             print(f"Esbeltez del alma: {esbeltez_alma}, lambda_r:
45                   {lambda_r_alma}, Cumple la norma de esbeltez del
46                   alma")
47         else:
48             print(f"Esbeltez del alma: {esbeltez_alma}, lambda_r:
49                   {lambda_r_alma}, No cumple la norma de esbeltez
50                   del alma")
51
52         # Esbeltez del miembro
53         L = Longitudes[idx]
54         r = radios_de_giro[idx]
55         esbeltez_miembro = round(k * L / r, 4)

```

```

47     esbeltez_miembro_valores.append(esbeltez_miembro)
48
49     # Esfuerzo crítico
50     Fe = round((math.pi**2 * E) / esbeltez_miembro**2, 4)
51     Fe_valores.append(Fe)
52
53     if esbeltez_miembro < limite_elastico:
54         Fcr = round(0.658**(Fy / Fe) * Fy, 4)
55     else:
56         Fcr = round(0.877 * Fe, 4)
57     Fcr_valores.append(Fcr)
58
59     # Resistencia nominal
60     Pn_compresion = round(phi_c * Fcr * A[idx], 4)
61     Pn_valores.append(Pn_compresion)
62
63     # Validación de la norma
64     if Pn_compresion >= Pu_val:
65         print(f"Pu: {Pu_val}, Pn: {Pn_compresion}, Cumple la
66             norma por compresión por {round(Pn_compresion -
67             Pu_val, 4)} klb")
68         validacion_norma.append(f"Indice: {idx}, Cumple")
69     else:
70         print(f"Pu: {Pu_val}, Pn: {Pn_compresion}, No cumple
71             la norma por compresión por {round(Pu_val -
72             Pn_compresion, 4)} klb")
73         validacion_norma.append(f"Indice: {idx}, No cumple")
74
75     print("\nResumen de esbeltez del patín:")
76     for idx, esb in enumerate(esbeltez_patin_valores):
77         lambda_r_patin = lambda_r_valores_patin[idx]
78         if esb < lambda_r_patin:
79             print(f"Cumple la norma de esbeltez del patín con
80                 relación de {esb}")
81         else:
82             print(f"No cumple la norma de esbeltez del patín con
83                 relación de {esb}")

```

```

79 print("\nResumen de esbeltez del alma:")
80 for idx, esb in enumerate(esbeltez_alma_valores):
81     lambda_r_alma = lambda_r_valores_alma[idx]
82     if esb < lambda_r_alma:
83         print(f"Cumple la norma de esbeltez del alma con relación
84             de {esb}")
85     else:
86         print(f"No cumple la norma de esbeltez del alma con
87             relación de {esb}")
88
89 print("\nResumen de cumplimiento de la norma por compresión:")
90 for idx, val in enumerate(validacion_norma):
91     print(val)
92
93 return Pu, esbeltez_patin_valores, lambda_r_valores_patin,
94     esbeltez_alma_valores, lambda_r_valores_alma,
95     esbeltez_miembro_valores, Fe_valores, Fcr_valores,
96     Pn_valores, validacion_norma

```

**Código 7.2:** Función análisis solo a compresión. (Fuente: propia)

```

1 def analisis_solo_flexion(Respuestas_maximas, A, Fy, Z, phi_b=0.9,
2   tolerancia = 0.01):
3     Mu = []
4     validacion_flexion = []
5
6     for idx, matriz_fi in enumerate(Respuestas_maximas):
7         if all(abs(matriz_fi[i, 0]) < tolerancia for i in range(2))
8             and any(matriz_fi[i, 0] != 0 for i in range(2, 5)):
9
10             Mu_val = max(abs(matriz_fi[2, 0]), abs(matriz_fi[3, 0]),
11                 abs(matriz_fi[4, 0]))
12             Mn = phi_b * Fy * Z[idx]
13
14             # Redondear valores a 4 decimales antes de usar
15             Mu_val = round(Mu_val, 4)
16             Mn = round(Mn, 4)
17             diferencia_flexion = round(Mu_val - Mn, 4)

```

```

16     Mu.append(Mu_val)
17     validacion_flexion.append(diferencia_flexion)
18
19     # Validacion de la norma
20     if diferencia_flexion <= 0:
21         print(f"Mu: {Mu_val}, Mn: {Mn}, Cumple la norma por
22             fluencia por {-diferencia_flexion} klb*in")
23     else:
24         print(f"Mu: {Mu_val}, Mn: {Mn}, No cumple la norma
25             por fluencia por {diferencia_flexion} klb*in")
26
27     print("\nResumen de cumplimiento de la norma por flexión:")
28     for idx, dif in enumerate(validacion_flexion):
29         dif = round(dif, 4)
30         if dif <= 0:
31             print(f"Cumple la norma por flexión por {-dif} klb*in")
32         else:
33             print(f"No cumple la norma por flexión por {dif} klb*in")
34
35     return Mu, validacion_flexion

```

**Código 7.3:** Función análisis solo a flexión. (Fuente: propia)

```

1 def analisis_cortante(Respuestas_maximas, Fy, d, tw, Cv=1.0,
2     phi_v=1.0):
3     Vu = []
4     validacion_cortante = []
5
6     for idx, matriz_fi in enumerate(Respuestas_maximas):
7         if matriz_fi[1,0] != 0:
8             Vu_val = matriz_fi[1,0]
9             Aw = d * tw # d y tw son escalares, no listas
10            Vn = phi_v * 0.6 * Fy * Aw * Cv
11
12            Vu_val = round(Vu_val, 4)
13            Vn = round(Vn, 4)
14            diferencia_cortante = round(Vu_val - Vn, 4)
15
16            Vu.append(Vu_val)

```

```

16     validacion_cortante.append(diferencia_cortante)
17
18     # Validación de la norma
19     if diferencia_cortante <= 0:
20         print(f"Vu: {Vu_val}, Vn: {Vn}, Cumple la norma por
21             cortante por {-diferencia_cortante} klb")
22     else:
23         print(f"Vu: {Vu_val}, Vn: {Vn}, No cumple la norma
24             por cortante por {diferencia_cortante} klb")
25
26     # print("\nResumen de cumplimiento de la norma por cortante:")
27     # for idx, dif in enumerate(validacion_cortante):
28     #     dif = round(dif, 4)
29     #     if dif <= 0:
30     #         print(f"Cumple la norma por cortante por {-dif} klb")
31     #     else:
32     #         print(f"No cumple la norma por cortante por {dif} klb")
33
34     return Vu, validacion_cortante

```

**Código 7.4:** Función análisis a cortante. (Fuente: propia)

```

1 def analisis_flexion_y_fuerza_axial(Respuestas_maximas, A,
2     Longitudes, radios_de_giro, E, Fy, Z, k=1, phi_c=0.9, phi_b=0.9):
3     limite_elastico = 4.71 * math.sqrt(29000 / 30)
4     Pu = []
5     Mu = []
6     esbeltez_miembro_valores = []
7     Fe_valores = []
8     Fcr_valores = []
9     Pn_valores = []
10
11     for idx, matriz_fi in enumerate(Respuestas_maximas):
12         Pu_val = matriz_fi[0, 0]
13         Pu.append(Pu_val)
14
15
16     print('Pu:', Pu)

```

```

17
18 # Esbeltez del miembro
19 L = Longitudes
20 print('Longitud: ', Longitudes)
21 r = radios_de_giro
22 esbeltez_miembro = round(k * L / r, 4)
23 esbeltez_miembro_valores.append(esbeltez_miembro)
24
25 # Esfuerzo crítico
26 Fe = (math.pi**2 * E) / esbeltez_miembro**2
27 Fe_valores.append(Fe)
28
29 if esbeltez_miembro < limite_elastico:
30     Fcr = 0.658**((Fy / Fe) * Fy)
31 else:
32     Fcr = 0.877 * Fe
33 Fcr_valores.append(Fcr)
34
35 # Resistencia nominal
36 Pn_compresion = phi_c * Fcr * A
37 Pn_valores.append(Pn_compresion)
38
39 Mu_val = max(abs(matriz_fi[2, 0]), abs(matriz_fi[3, 0]),
40             abs(matriz_fi[4, 0]))
41 Mu.append(Mu_val)
42 Mn = phi_b * Fy * Z
43
44 # Verifico en qué caso estoy
45 for Pu_val, Pn_compresion_val in zip(Pu, Pn_compresion):
46     if Pu_val / Pn_compresion_val >= 0.2:
47         # Validación de la norma
48         diferencia_flexion_y_fuerza_axial = Pu_val /
49         Pn_compresion_val + 8 / 9 * (Mu_val / Mn)
50         if diferencia_flexion_y_fuerza_axial <= 1.0:
51             print(f"Cumple la norma por flexión y fuerza
                    axial")
52         else:
53             print(f"No cumple la norma por flexión y fuerza

```

```

52         axial")
53     elif Pu_val / Pn_compresion_val < 0.2:
54         # Validación de la norma
55         diferencia_flexion_y_fuerza_axial = Pu_val /
56             (2*Pn_compresion_val) + (Mu_val / Mn)
57         if diferencia_flexion_y_fuerza_axial <= 1.0:
58             print(f"Cumple la norma por flexión y fuerza
59                 axial")
60         else:
61             print(f"No cumple la norma por flexión y fuerza
62                 axial")

```

**Código 7.5:** Función análisis a flexión y fuerza axial. (Fuente: propia)

**Tabla 7.3:** Resultados del método de la rigidez para el primer ejemplo

		Resultados para respuestas máximas				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
<b>Miembro 1</b>	Carga axial	0.16	Compresión (0) / Tensión (1)	0	Carga axial	2.01	Compresión (0) / Tensión (1)	1	
	Carga cortante	0.03	Ubicación de carga	0	Carga cortante	1.78	Ubicación de carga	0	
	Momento inicio viga	1.51	Ubicación	0	Momento inicio viga	71.35	Ubicación	0	
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0	
	Momento final viga	-1.87	Ubicación	118.11	Momento final viga	-138.85	Ubicación	118.11	
<b>Miembro 2</b>	Carga axial	16.31	Compresión (0) / Tensión (1)	0	Carga axial	16.75	Compresión (0) / Tensión (1)	0	
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0	Carga cortante	1.66	Ubicación de carga	0	
	Momento inicio viga	1.35	Ubicación	0	Momento inicio viga	156.99	Ubicación	0	
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0	
	Momento final viga	-0.06	Ubicación	141.95	Momento final viga	78.85	Ubicación	141.95	
<b>Miembro 3</b>	Carga axial	20.04	Compresión (0) / Tensión (1)	1	Carga axial	18.91	Compresión (0) / Tensión (1)	1	
	Carga cortante	0.02	Ubicación de carga	0	Carga cortante	1.26	Ubicación de carga	0	
	Momento inicio viga	1.80	Ubicación	0	Momento inicio viga	20.01	Ubicación	0	
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0	
	Momento final viga	0.06	Ubicación	78.74	Momento final viga	-78.85	Ubicación	78.74	
<b>Miembro 4</b>	Carga axial	8.89	Compresión (0) / Tensión (1)	1	Carga axial	10.48	Compresión (0) / Tensión (1)	1	
	Carga cortante	0.02	Ubicación de carga	0	Carga cortante	0.02	Ubicación de carga	0	
	Momento inicio viga	0.92	Ubicación	0	Momento inicio viga	0.84	Ubicación	0	
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0	
	Momento final viga	-1.54	Ubicación	118.11	Momento final viga	1.48	Ubicación	118.11	
	Carga axial	8.89	Compresión (0) / Tensión (1)	1	Carga axial	10.18	Compresión (0) / Tensión (1)	1	

**Miembro 5**



**Tabla 7.3:** Resultados del método de la rigidez para el primer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Carga cortante	0.0211	Ubicación de carga	0	Carga cortante	0.57	Ubicación de carga	0
	Momento inicio viga	1.38	Ubicación	0	Momento inicio viga	52.37	Ubicación	0
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0
	Momento final viga	1.11	Ubicación	118.11	Momento final viga	14.52	Ubicación	118.11
<b>Miembro 6</b>	Carga axial	12.54	Compresión (0) / Tensión (1)	0	Carga axial	14.21	Compresión (0) / Tensión (1)	0
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0	Carga cortante	0.20	Ubicación de carga	0
	Momento inicio viga	0.19	Ubicación	0	Momento inicio viga	15.35	Ubicación	0
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0
	Momento final viga	-0.26	Ubicación	167.03	Momento final viga	-18.45	Ubicación	167.03
<b>Miembro 7</b>	Carga axial	15.76	Compresión (0) / Tensión (1)	1	Carga axial	11.69	Compresión (0) / Tensión (1)	1
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0	Carga cortante	0.22	Ubicación de carga	0
	Momento inicio viga	0.13	Ubicación	0	Momento inicio viga	18.98	Ubicación	0
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0
	Momento final viga	-0.51	Ubicación	167.33	Momento final viga	17.98	Ubicación	167.04
<b>Miembro 8</b>	Carga axial	11.19	Compresión (0) / Tensión (1)	0	Carga axial	6.84	Compresión (0) / Tensión (1)	0
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0
	Momento inicio viga	0.78	Ubicación	0	Momento inicio viga	0.32	Ubicación	0
	Momento centro viga	0	Ubicación	0	Momento centro viga	0	Ubicación	0
	Momento final viga	0.25	Ubicación	118.11	Momento final viga	0.55	Ubicación	118.11

**Tabla 7.4:** Resultados del método de la rigidez para el segundo ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	<b>Miembro 1</b>	Carga axial	6.34	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	6.34	Compresión (0) / Tensión (1)
Carga cortante		5.48	Ubicación de carga	118.11	Carga cortante	5.50	Ubicación de carga	1.00
Momento inicio viga		47.22	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	46.61	Ubicación	0.00
Momento centro viga		65.07	Ubicación	52.02	Momento centro viga	64.88	Ubicación	51.82
Momento final viga		-116.02	Ubicación	118.11	Momento final viga	-117.24	Ubicación	118.11
<b>Miembro 2</b>	Carga axial	11.31	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	11.32	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	5.03	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	5.03	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	103.59	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	104.15	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	48.88	Ubicación	60.61	Momento centro viga	48.44	Ubicación	60.63
	Momento final viga	-88.12	Ubicación	118.11	Momento final viga	-88.45	Ubicación	118.11
<b>Miembro 3</b>	Carga axial	5.00	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	5.00	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	5.51	Ubicación de carga	118.11	Carga cortante	5.50	Ubicación de carga	118.11
	Momento inicio viga	74.49	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	75.50	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	36.49	Ubicación	51.71	Momento centro viga	36.14	Ubicación	51.91
	Momento final viga	-146.27	Ubicación	118.11	Momento final viga	-145.78	Ubicación	118.11
<b>Miembro 4</b>	Carga axial	11.68	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	11.70	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.57	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.56	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	49.22	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	48.61	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-18.13	Ubicación	118.10	Momento final viga	-17.93	Ubicación	118.10
	Carga axial	11.16	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	11.19	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00

**Miembro 5**

**Tabla 7.4:** Resultados del método de la rigidez para el segundo ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
		Carga cortante	0.17	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.17	Ubicación de carga
	Momento inicio viga	10.96	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	11.04	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	9.59	Ubicación	118.10	Momento final viga	9.48	Ubicación	118.10
<b>Miembro 6</b>	Carga axial	0.89	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	0.88	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.02	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.03	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	2.84	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	3.61	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.84	Ubicación	118.10	Momento final viga	-0.51	Ubicación	118.10
<b>Miembro 7</b>	Carga axial	0.86	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	0.87	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.03	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.03	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.67	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.91	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	4.26	Ubicación	118.10	Momento final viga	3.57	Ubicación	118.10
<b>Miembro 8</b>	Carga axial	11.40	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	11.43	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.17	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.17	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	9.37	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	9.39	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	11.10	Ubicación	118.10	Momento final viga	10.98	Ubicación	118.10
<b>Miembro 9</b>	Carga axial	10.94	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	10.95	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.54	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.55	Ubicación de carga	0.00

**Tabla 7.4:** Resultados del método de la rigidez para el segundo ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
		Momento inicio viga	17.16	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	17.28	Ubicación
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-46.69	Ubicación	118.10	Momento final viga	-47.18	Ubicación	118.10
<b>Miembro 10</b>	Carga axial	10.85	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	10.87	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.05	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.06	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.60	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.22	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	6.06	Ubicación	118.11	Momento final viga	6.30	Ubicación	118.11
<b>Miembro 11</b>	Carga axial	11.77	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	11.78	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.08	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.07	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	7.17	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	6.88	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	2.11	Ubicación	118.11	Momento final viga	1.20	Ubicación	118.11

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	<b>Miembro 1</b>	Carga axial	24.07	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	8.78	Compresión (0) / Tensión (1)
Carga cortante		0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
Momento inicio viga		0.34	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.03	Ubicación	0.00
Momento centro viga		0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
Momento final viga		0.23	Ubicación	806.96	Momento final viga	0.02	Ubicación	806.96
<b>Miembro 2</b>	Carga axial	11.51	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	4.20	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.83	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.04	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.76	Ubicación	401.42	Momento final viga	-0.01	Ubicación	401.42
<b>Miembro 3</b>	Carga axial	45.17	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	16.48	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.94	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.10	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.98	Ubicación	401.38	Momento final viga	-0.04	Ubicación	401.38
<b>Miembro 4</b>	Carga axial	53.20	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	19.22	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.62	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.22	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-1.76	Ubicación	386.02	Momento final viga	-0.79	Ubicación	386.02
	Carga axial	53.20	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	19.22	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00

**Miembro 5**

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
		Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga
	Momento inicio viga	2.15	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	1.38	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.49	Ubicación	421.85	Momento final viga	1.16	Ubicación	421.85
<b>Miembro 6</b>	Carga axial	13.14	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	28.93	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	2.23	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.55	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.48	Ubicación	481.26	Momento final viga	-0.67	Ubicación	481.26
<b>Miembro 7</b>	Carga axial	56.71	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	106.35	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.89	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.68	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	2.58	Ubicación	522.24	Momento final viga	0.56	Ubicación	522.24
<b>Miembro 8</b>	Carga axial	142.25	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	193.41	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.63	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.13	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.60	Ubicación	543.15	Momento final viga	0.62	Ubicación	543.15
<b>Miembro 9</b>	Carga axial	142.26	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	159.62	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento inicio viga	0.60	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	1.03	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.63	Ubicación	542.91	Momento final viga	-0.26	Ubicación	542.91
<b>Miembro 10</b>	Carga axial	56.67	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	55.95	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	2.58	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.50	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-1.89	Ubicación	522.44	Momento final viga	-0.53	Ubicación	522.44
<b>Miembro 11</b>	Carga axial	13.14	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	23.63	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.48	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.17	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-2.23	Ubicación	481.11	Momento final viga	-0.17	Ubicación	481.11
<b>Miembro 12</b>	Carga axial	53.24	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	67.81	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.49	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.15	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-2.14	Ubicación	422.05	Momento final viga	-0.12	Ubicación	422.05
<b>Miembro 13</b>	Carga axial	53.24	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	67.81	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.73	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.16	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.54	Ubicación	385.83	Momento final viga	0.00	Ubicación	385.83
<b>Miembro 14</b>	Carga axial	45.17	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	53.38	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.07	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.39	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.99	Ubicación	401.58	Momento final viga	0.21	Ubicación	401.58
<b>Miembro 15</b>	Carga axial	7.05	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	4.84	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.78	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.10	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.88	Ubicación	401.17	Momento final viga	0.18	Ubicación	401.17
<b>Miembro 16</b>	Carga axial	14.71	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	10.10	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.29	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.03	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.26	Ubicación	807.08	Momento final viga	-0.12	Ubicación	807.08
<b>Miembro 17</b>	Carga axial	23.65	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	46.36	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.26	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.12	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00



**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	0.23	Ubicación	438.06	Momento final viga	0.24	Ubicación	438.06
<b>Miembro 18</b>	Carga axial	2.19	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	19.69	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.57	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.03	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.48	Ubicación	405.91	Momento final viga	0.01	Ubicación	405.91
<b>Miembro 19</b>	Carga axial	2.19	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	19.69	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.73	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.18	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.86	Ubicación	407.47	Momento final viga	0.29	Ubicación	407.47
<b>Miembro 20</b>	Carga axial	19.49	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	8.55	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.47	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.04	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.07	Ubicación	436.67	Momento final viga	0.08	Ubicación	436.67
<b>Miembro 21</b>	Carga axial	212.88	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	217.40	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.37	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.02	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	0.26	Ubicación	464.69	Momento final viga	0.25	Ubicación	464.69
<b>Miembro 22</b>	Carga axial	129.00	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	123.07	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.72	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.04	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.78	Ubicación	502.34	Momento final viga	0.37	Ubicación	502.34
<b>Miembro 23</b>	Carga axial	38.50	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	14.41	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.88	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.40	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-3.00	Ubicación	529.96	Momento final viga	-0.38	Ubicación	529.96
<b>Miembro 24</b>	Carga axial	5.92	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	51.49	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.95	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.33	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.87	Ubicación	543.74	Momento final viga	-1.18	Ubicación	543.74
<b>Miembro 25</b>	Carga axial	5.92	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	51.49	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.87	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.57	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	-0.95	Ubicación	543.98	Momento final viga	-0.04	Ubicación	543.98
<b>Miembro 26</b>	Carga axial	38.51	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	19.87	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	3.00	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.54	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.88	Ubicación	529.76	Momento final viga	0.48	Ubicación	529.76
<b>Miembro 27</b>	Carga axial	128.96	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	70.44	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.78	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.99	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.72	Ubicación	502.49	Momento final viga	-0.55	Ubicación	502.49
<b>Miembro 28</b>	Carga axial	212.91	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	159.55	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.26	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.88	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.40	Ubicación	464.51	Momento final viga	1.03	Ubicación	464.51
<b>Miembro 29</b>	Carga axial	13.65	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	5.72	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.13	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.33	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	-0.57	Ubicación	436.84	Momento final viga	-0.08	Ubicación	436.84
<b>Miembro 30</b>	Carga axial	5.60	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	1.27	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.81	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.12	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.80	Ubicación	407.27	Momento final viga	-0.14	Ubicación	407.27
<b>Miembro 31</b>	Carga axial	5.61	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	1.27	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.26	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.05	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.29	Ubicación	407.31	Momento final viga	0.02	Ubicación	407.31
<b>Miembro 32</b>	Carga axial	15.98	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	5.34	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.58	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.05	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.34	Ubicación	436.81	Momento final viga	-0.03	Ubicación	436.81
<b>Miembro 33</b>	Carga axial	21.13	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	7.71	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.56	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.01	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	0.60	Ubicación	504.17	Momento final viga	0.02	Ubicación	504.17
<b>Miembro 34</b>	Carga axial	25.80	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	9.58	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.31	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.02	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.39	Ubicación	644.56	Momento final viga	0.04	Ubicación	644.56
<b>Miembro 35</b>	Carga axial	1.90	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	0.43	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.05	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.09	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.13	Ubicación	435.12	Momento final viga	0.09	Ubicación	435.12
<b>Miembro 36</b>	Carga axial	28.22	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	10.13	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.12	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.19	Ubicación	644.43	Momento final viga	-0.01	Ubicación	644.43
<b>Miembro 37</b>	Carga axial	14.74	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	5.03	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.26	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.20	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	1.32	Ubicación	504.17	Momento final viga	0.24	Ubicación	504.17
<b>Miembro 38</b>	Carga axial	16.78	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	5.73	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.06	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.15	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.28	Ubicación	806.98	Momento final viga	0.02	Ubicación	806.98
<b>Miembro 39</b>	Carga axial	0.01	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	0.01	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.16	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.46	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.39	Ubicación	708.66	Momento final viga	-0.59	Ubicación	708.66
<b>Miembro 40</b>	Carga axial	78.30	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	94.12	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.06	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.09	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-1.11	Ubicación	824.72	Momento final viga	-0.31	Ubicación	824.72
<b>Miembro 41</b>	Carga axial	22.59	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	36.19	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.42	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.08	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	<b>Resultados para respuestas máximas con áreas igual a <math>1.18 \text{ in}^2</math></b>				<b>Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo</b>			
	Momento final viga	-1.61	Ubicación	514.21	Momento final viga	-0.30	Ubicación	514.21
<b>Miembro 42</b>	Carga axial	102.20	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	113.31	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.05	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.26	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.70	Ubicación	704.29	Momento final viga	-0.50	Ubicación	704.29
<b>Miembro 43</b>	Carga axial	29.93	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	38.03	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	2.70	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.34	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-2.66	Ubicación	369.69	Momento final viga	0.49	Ubicación	369.69
<b>Miembro 44</b>	Carga axial	104.79	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	106.66	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.04	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.17	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.63	Ubicación	639.85	Momento final viga	0.15	Ubicación	639.85
<b>Miembro 45</b>	Carga axial	15.87	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	16.94	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.79	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.43	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	-1.58	Ubicación	280.71	Momento final viga	-0.58	Ubicación	280.71
<b>Miembro 46</b>	Carga axial	49.38	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	35.82	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.26	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.07	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.35	Ubicación	611.40	Momento final viga	0.52	Ubicación	611.40
<b>Miembro 47</b>	Carga axial	0.65	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	5.68	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.61	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.00	Ubicación	250.67	Momento final viga	0.75	Ubicación	250.67
<b>Miembro 48</b>	Carga axial	49.38	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	73.86	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.26	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.17	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.35	Ubicación	611.19	Momento final viga	-0.86	Ubicación	611.19
<b>Miembro 49</b>	Carga axial	15.88	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	28.66	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.79	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.88	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

XXXX



**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	1.58	Ubicación	280.71	Momento final viga	0.86	Ubicación	280.71
<b>Miembro 50</b>	Carga axial	104.83	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	126.99	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.04	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.11	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.63	Ubicación	640.01	Momento final viga	-0.10	Ubicación	640.01
<b>Miembro 51</b>	Carga axial	29.91	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	40.36	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	2.70	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.14	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	2.66	Ubicación	369.69	Momento final viga	0.11	Ubicación	369.69
<b>Miembro 52</b>	Carga axial	102.16	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	116.48	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.05	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.02	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.70	Ubicación	704.18	Momento final viga	0.25	Ubicación	704.18
<b>Miembro 53</b>	Carga axial	22.64	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	29.50	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.41	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.19	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	1.60	Ubicación	514.21	Momento final viga	-0.13	Ubicación	514.21
<b>Miembro 54</b>	Carga axial	78.36	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	86.35	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.07	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.01	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	1.11	Ubicación	824.82	Momento final viga	0.16	Ubicación	824.82
<b>Miembro 55</b>	Carga axial	0.01	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	0.00	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.18	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.06	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	0.41	Ubicación	708.66	Momento final viga	-0.03	Ubicación	708.66
<b>Miembro 56</b>	Carga axial	16.87	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	30.18	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.05	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.03	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.32	Ubicación	806.89	Momento final viga	-0.08	Ubicación	806.89
<b>Miembro 57</b>	Carga axial	14.82	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	26.50	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.23	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.35	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	Resultados para respuestas máximas con áreas igual a $1.18 \text{ in}^2$				Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo			
	Momento final viga	-1.30	Ubicación	504.17	Momento final viga	-0.31	Ubicación	504.17
<b>Miembro 58</b>	Carga axial	31.09	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	43.26	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.10	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.10	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.20	Ubicación	644.56	Momento final viga	0.02	Ubicación	644.56
<b>Miembro 59</b>	Carga axial	0.74	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	6.68	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.01	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	1.21	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.19	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-1.25	Ubicación	435.12	Momento final viga	-0.21	Ubicación	435.12
<b>Miembro 60</b>	Carga axial	30.12	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00	Carga axial	34.69	Compresión (0) / Tensión (1)	1.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.23	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.10	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00
	Momento final viga	-0.31	Ubicación	644.07	Momento final viga	-0.12	Ubicación	644.07
<b>Miembro 61</b>	Carga axial	12.91	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00	Carga axial	8.86	Compresión (0) / Tensión (1)	0.00
	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00	Carga cortante	0.00	Ubicación de carga	0.00
	Momento inicio viga	0.57	Ubicación	0.00	Momento inicio viga	0.17	Ubicación	0.00
	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00	Momento centro viga	0.00	Ubicación	0.00

**Tabla 7.5:** Resultados del método de la rigidez para el tercer ejemplo

	<b>Resultados para respuestas máximas con áreas igual a <math>1.18 \text{ in}^2</math></b>				<b>Resultados para respuestas máximas con perfiles del catálogo</b>			
	Momento final viga	-0.59	Ubicación	504.17	Momento final viga	-0.14	Ubicación	504.17

