



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,**

**INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE IMPERFECCIONES  
GEOMÉTRICAS EN EL COMPORTAMIENTO DE PERFILES  
TIPO I (ARMADOS)”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: FRANCISCO ALCIVIADES BUÑAY REINOSO**

**DIRECTOR: ING. RÓMULO RICARDO ROMERO GONZÁLEZ**

**CUENCA-ECUADOR**

**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE IMPERFECCIONES  
GEOMÉTRICAS EN EL COMPORTAMIENTO DE PERFILES TIPO I  
(ARMADOS)”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: FRANCISCO ALCIVIADES BUÑAY REINOSO**

**DIRECTOR: ING. RÓMULO RICARDO ROMERO GONZÁLEZ**

**CUENCA - ECUADOR**

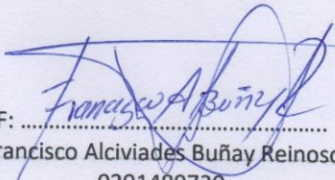
**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

### DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

Francisco Alciviades Buñay Reinoso portador de la cédula de ciudadanía N° 0301489720. Declaro ser el autor de la obra: "Estudio de la Influencia de imperfecciones geométricas en el comportamiento de perfiles tipo I (armados)", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 10 de septiembre de 2024

  
F: .....  
Francisco Alciviades Buñay Reinoso  
0301489720

Cuenca, 10 de septiembre de 2024

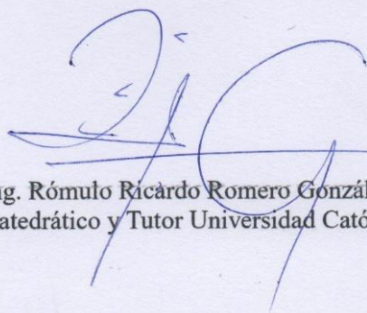
Yo, Ing. ROMULO RICARDO ROMERO GONZALEZ Msc.

## **CERTIFICO QUE:**

Conjuntamente con el Sr. Francisco Alciviades Buñay Reinoso, portador de la cédula de ciudadanía Nro. 0301489720, se desarrolló el trabajo de titulación cuyo enunciado es el “Estudio de la Influencia de imperfecciones geométricas en el comportamiento de perfiles tipo I (armados)”;

desempeñándome como su tutor.  
Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Ing. Rómulo Ricardo Romero González Msc.  
Catedrático y Tutor Universidad Católica de Cuenca.

## Dedicatoria

*Quiero dedicar este trabajo a mis hijos Paquito y Danna; a mi nieto Leito, que está en camino y que han estado a mi lado en este proceso, para que cuando yo no esté; recuerden que: “cuando llueve no necesitan un paraguas sino aprender a danzar bajo la lluvia”.*

*Dedícarles a personitas grandes, como lo fueron mis tíos Econ. Juan Reinoso B.(+) y Econ. Octavio Reinoso B. (+) que compartieron su experiencia, su fortaleza y su apoyo incondicional; a dos seres humanos maravillosos don Aníbal (+) y doña Gladys (+); que con su sencillez fueron apoyo incondicional detrás del telón.*

*Francisco Buñay Reinoso.*

## **Agradecimiento.**

*Gracias a Dios, por permitirme llegar a este momento, gracias Señor, gracias.*

*Tal vez resulte poco el espacio para agradecer a todos quienes estuvieron a mi lado en este asunto, pero hay personitas que hicieron la diferencia, como la Ing. Graciela Pesantez, mi esposa; que siempre estuvo ahí para darme ánimo y cuidar mi espalda; a mi madre, Martha Reinoso Bravo, que fue mi soporte a pesar de sus años y de los años; a mis hermanos Arq. Andrés Buñay Reinoso y Dr. Alvaro Buñay Reinoso; a mis sobrinas, que con su inocencia fueron testigos mudos de un proceso de cambio. Me habría encantado que todos estén aquí conmigo en este momento, pero el Gran Creador sabrá por qué no... Gracias.*

*Francisco Buñay Reinoso.*

## Resumen

Esta investigación examinó el impacto a flexión de las imperfecciones geométricas en vigas tipo I reforzadas, dado que durante el proceso de fabricación pueden surgir defectos constructivos debido a que en nuestro contexto la producción sigue siendo artesanal.

En este sentido, el estudio busca evaluar el comportamiento de las vigas tipo I sometidas a flexión, con este fin se construyeron “probetas” de vigas con y sin imperfecciones geométricas; las cuales tras un proceso empírico de laboratorio y con la ayuda de cálculo adecuado para el diseño LRFD (Load and Resistance Factor Design) del miembro estructural sometido a esfuerzos de flexión previo; se sometieron a la carga puntual de estudio en una prensa hidráulica, de donde se obtuvieron valores que demuestran una pérdida de hasta el 24.94% de resistencia en la viga armada y en el proceso expuesta a un incremento de temperatura; provocando una sinuosidad en el alma del miembro estructural.

Con la evaluación de los resultados, se concluye que las vigas tipo I reforzadas, que presentan imperfecciones geométricas, experimentan una disminución significativa en su capacidad de carga; comprometiendo así su resistencia estructural con valores que van desde un 20.46% hasta llegar incluso a un alarmante 24.94%; valores que comprometerían seriamente una estructura.

*Palabras clave:* estructura, probeta, imperfecciones, esfuerzos, flexión

## **Abstract**

As production is still handmade in our context, construction defects may arise during the fabrication process. Thus, this research examines the flexural impact of geometric imperfections in reinforced type I beams.

In this context, the study evaluates the behavior of type I beams subjected to flexural stresses. Therefore, “specimens” of beams with and without geometric imperfections were built. They were subjected to the point loads using a hydraulic press after an empirical laboratory process and using appropriate calculations for the Load and Resistance Factor Design (LRFD) of the concrete beam subjected to previous flexural stresses. The values obtained show a loss of up to 24.94% of resistance in the reinforced beam and the process exposed to increased temperature, causing a sinuosity in the core of the structural member.

Based on the evaluation of the results, it is concluded that the reinforced type I beams with geometric imperfections experience a significant reduction in their load capacity, thus compromising their structural resistance with values ranging from 20.46% to an alarming 24.94%, values that would seriously jeopardize a structure.

Keywords: structure, specimen, imperfections, stresses, flexural.

## Índice de contenidos

Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Índice de contenidos .....	ix
Índice de ilustraciones.....	xi
Índice de tablas .....	xiii
Introducción .....	1
Capítulo 1.....	2
Antecedentes.....	2
1.1  Formulación del problema.....	2
1.2  Justificación.....	2
1.3  Objetivos.....	3
1.3.1  General.....	3
1.3.2  Específicos.....	4
2  Capítulo.....	5
Marco teórico .....	5
2.1  Acero estructural.....	5
2.1.1  Propiedades Físicas del Acero Estructural.....	6
2.2  Vigas metálicas.....	7
2.2.1  Flexión .....	8
2.2.2  Deflexión.....	8
2.2.3  Atiesadores de apoyo.....	10
2.2.4  Uniones Soldadas.....	11
2.2.5  Diseño de Soldadura .....	12
2.2.6  Pandeo Lateral Torsional .....	12
2.3  Patología.....	14
2.4  Imperfecciones geométricas.....	14
3  Capítulo.....	15
Marco metodológico .....	15
3.1  Viga diseñada .....	15
4  Capítulo.....	35
Análisis de resultados .....	35

4.1	Viga sometida a carga puntual, sin imperfecciones geométricas.....	36
4.2	Vigas cargadas de forma puntual, con imperfecciones geométricas.....	39
4.3	Comparativa de resultados, Viga normal vs. Vigas con imperfecciones geométricas 49	
4.4	Interpretación de Resultados .....	51
4.4.1	Gráfico de Pandeo Lateral Torsional .....	52
5	Capítulo.....	54
	Conclusiones y recomendaciones. ....	54
5.1	Conclusiones .....	54
5.2	Recomendaciones.....	55
6	Bibliografía .....	57

## Índice de ilustraciones.

<b>Ilustración 1</b>	Grafica Esfuerzo - Deformación, para varias clases de acero.....	5
<b>Ilustración 2</b>	IPE Armada en taller.....	8
<b>Ilustración 3</b>	Flexión uniforme en el eje X de una sección W. ....	9
<b>Ilustración 4</b>	Desplazamiento de las alas superior e inferior al aplicar una fuerza. ....	9
<b>Ilustración 5</b>	Sección 1-1.....	9
<b>Ilustración 6</b>	Viga sometida a pandeo lateral torsional. ....	13
<b>Ilustración 7</b>	Viga en diseño.....	15
<b>Ilustración 8</b>	Diagrama de cuerpo libre.....	16
<b>Ilustración 9</b>	Diagrama de Cortante.....	16
<b>Ilustración 10</b>	Diagrama de Momento máximo flector. ....	17
<b>Ilustración 11</b>	Longitud L de la viga. ....	18
<b>Ilustración 12</b>	Descripción IPE.....	18
<b>Ilustración 13</b>	Viga diseñada en Sap 2000 .....	28
<b>Ilustración 14</b>	Viga ensayada en programa computacional Sap 2000.....	28
<b>Ilustración 15</b>	Unión alma-patín inferior, perpendiculares. ....	29
<b>Ilustración 16</b>	Perpendicularidad entre alma-patín viga de 10 Tn.....	30
<b>Ilustración 17</b>	Soldadura ER70S6 equivalente a E7018.....	30
<b>Ilustración 18</b>	Soldadura proceso MIG/MAG - ER70S6 .....	31
<b>Ilustración 19</b>	Escuadraría de las alas.....	33
<b>Ilustración 20</b>	Medición de la flecha y curvatura .....	33
<b>Ilustración 21</b>	Identificación de viga VI-01. ....	34
<b>Ilustración 22</b>	Viga VI-01, ensayada en laboratorio.....	37
<b>Ilustración 23</b>	Viga VI-01, ensayada.....	37
<b>Ilustración 24</b>	Sección de viga con mayor impacto.....	38
<b>Ilustración 25</b>	Vista posterior de la viga VI-01 .....	38
<b>Ilustración 26</b>	Gráfico Fuerza-Desplazamiento VI-01.....	39
<b>Ilustración 27</b>	Viga VI-02.....	40
<b>Ilustración 28</b>	Viga VI-02 previo ensayo. ....	40
<b>Ilustración 29</b>	Viga VI-02 luego del ensayo.....	41
<b>Ilustración 30</b>	Vista posterior viga VI-02.....	41
<b>Ilustración 31</b>	Gráfico Fuerza-Deformación Viga VI-02.....	42
<b>Ilustración 32</b>	Viga VI-03.....	42

<b>Ilustración 33</b> Viga VI-03 previo al ensayo. ....	43
<b>Ilustración 34</b> .....	44
<b>Ilustración 35</b> Vista posterior viga VI-03.....	44
<b>Ilustración 36</b> Gráfico Fuerza-Deformación viga VI-03.....	45
<b>Ilustración 37</b> Viga VI-04.....	46
<b>Ilustración 38</b> Sección transversal de viga VI-04.....	46
<b>Ilustración 39</b> Falla en el centro de la viga con rigidizador. ....	47
<b>Ilustración 40</b> Perspectiva de Viga VI-04 .....	48
<b>Ilustración 41</b> Gráfica Fuerza-Desplazamiento VI-04. ....	49
<b>Ilustración 42</b> Comparación de esfuerzos y deformaciones producidas por las probetas. ....	51
<b>Ilustración 43</b> Pandeo Lateral Torsional .....	53

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Valores para la gráfica de momento. ....	17
<b>Tabla 2</b> Tabla B4.1b. Razones Ancho - Espesor: Elementos en Compresión. Miembros sometidos a Flexión. ....	19
<b>Tabla 3.</b> Razones Ancho-Espesor de elementos en Compresión. Miembros sometidos a flexión. ....	22
<b>Tabla 4</b> Resumen de cálculos y comprobaciones.....	22
<b>Tabla 5</b> Resumen de cálculos y comprobaciones.....	23
<b>Tabla 6</b> Resumen de cálculos y comprobaciones.....	23
<b>Tabla 7</b> Resumen de cálculos y comprobaciones.....	24
<b>Tabla 8</b> Resumen de cálculos y comprobaciones.....	25
<b>Tabla 9:</b> Resumen de cálculos y comprobaciones. ....	26
<b>Tabla 10:</b> Resumen de cálculos y comprobaciones. ....	27
<b>Tabla 11</b> Garganta efectiva de soldadura a tope. Con Junta de Penetración parcial.....	32
<b>Tabla 12</b> Escuadraría de las alas. ....	33
<b>Tabla 13</b> Cuadro comparativo de Imperfecciones Geométricas. ....	35
<b>Tabla 14</b> Datos comparativos de resistencias. ....	35
<b>Tabla 15</b> Valores para grafico de PLT. ....	52

## **Introducción**

Las vigas son unidades que soportan cargas transversales cuyo uso generalmente es en posición horizontal, sujetas a cargas por gravedad o vertical. (McCormac J. C., 2013).

Las imperfecciones geométricas pueden ser de verticalidad, alineación, rectitud, planitud, ajuste o excentricidad en uniones, pueden asociarse a fenómenos de inestabilidad lateral, por lo cual es de importancia la estimación de las imperfecciones y la evaluación del comportamiento estructural (C.P.E.A, 2012).

Los procesos destructivos a los que se someterán las probetas permitirán apreciar el comportamiento de los miembros estructurales, al ser sometidas a las diferentes cargas con la prensa hidráulica del laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca.

Finalmente, se buscará probar la existencia -o no- de disminución en la resistencia a la flexión de la estructura prediseñada, lo que podría comprometer su comportamiento estructural aumentando la inseguridad en el edificio.

## **Capítulo 1.**

### **Antecedentes.**

#### **1.1 Formulación del problema.**

En la época actual, la preferencia por la construcción de edificaciones en acero es justificada por su eficiencia para abordar con destreza desafíos arquitectónicos, como el salvado de grandes luces y voladizos desafiantes. No obstante, al considerar la importancia de las vigas como elementos estructurales fundamentales en estos escenarios, se destaca la necesidad apremiante de abordar con la máxima precisión el proceso constructivo de ensamblaje, pues al ser ejecutado de manera “incorrecta” podría desencadenar problemas futuros, especialmente ante eventos sísmicos que intensifican las cargas y someten tanto el cálculo estructural como el método constructivo empleado a pruebas complejas.

Es crucial subrayar que todas estas consideraciones se encuentran dentro del ámbito de las imperfecciones geométricas, manifestaciones patológicas que surgen durante el proceso de ensamblaje y que demandan una atención meticulosa para preservar la integridad y la seguridad estructural a largo plazo. Este nivel de detalle y cuidado resulta esencial para conservar la robustez intrínseca de las estructuras asegurando un rendimiento altamente sostenible.

#### **1.2 Justificación.**

En el panorama contemporáneo, la implementación de estructuras de acero ha experimentado una significativa popularización, no obstante, el deficiente control efectivo durante los procedimientos de ensamblaje permite que cualquier ciudadano provisto de equipo de soldadura se considere en la capacidad de ejecutar estas responsabilidades, generando impactos negativos directos tanto en los propietarios de viviendas o edificaciones como en los profesionales encargados de la construcción de estas estructuras.

La carencia de supervisión apropiada en los procesos de ensamblaje se erige como una preocupación de envergadura, ya que puede resultar en la manifestación de imperfecciones

geométricas, encontrar en obra estas imperfecciones podría insinuar un incumplimiento normativo y, por ende, la aparición de elementos estructurales (vigas) con notables deficiencias y consecuentemente altos riesgos estructurales.

La confianza de la población, en que los procedimientos constructivos de sus edificaciones son adecuados suele experimentar desilusiones; pues desafortunadamente, se sopesan aspectos económicos sobre las prácticas constructivas de alta calidad. Este enfoque tiene ramificaciones directas en los propietarios de las viviendas, quienes podrían enfrentar altos peligros debido a la falta de calidad en la ejecución de los trabajos.

Al momento de redactar el presente documento hay un claro incremento de los proveedores de servicios de soldadura, quienes con un escaso conocimiento y en ocasiones nula experiencia; se aventuran a realizar procesos de soldadura; poniendo en serio riesgo a los propietarios de las obras civiles ejecutadas y sin duda alguna el prestigio de los profesionales a cargo de estas edificaciones.

Actualmente se ha puesto de moda el armado de estructuras de acero, sin embargo, la inexistencia o el casi nulo control sobre los procesos de armado hace que cualquier persona que posea un equipo de soldar piense que puede hacerlo, afectando directamente a los propietarios de viviendas o edificaciones y sin duda alguna a los profesionales que se hacen cargo de la construcción de estas edificaciones.

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1 General.**

- Evaluar el estudio de la influencia de imperfecciones geométricas en el comportamiento de perfiles tipo I (armados), en taller, para determinar su capacidad de resistencia a esfuerzos de flexión.

### ***1.3.2 Específicos.***

- Diseñar y modelar una viga armada de sección I en base a normativas nacionales e internacionales y artículos relacionados, para analizar el comportamiento de esta a efectos de su imperfección geométrica.
- Construir probetas con imperfecciones inducidas y comparar con una probeta en perfectas condiciones geométricas sometida a carga puntual en laboratorio.
- Interpretar resultados y emitir conclusiones en base a los datos obtenidos a través del análisis de ilustraciones y pruebas de carga monótonas.

## 2 Capítulo

### Marco teórico

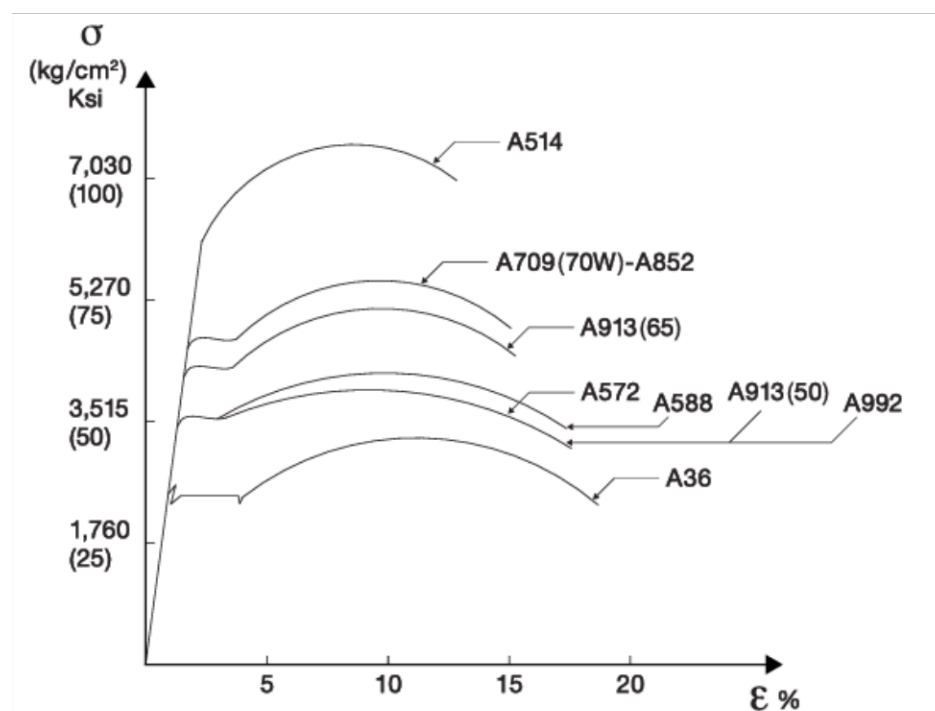
#### 2.1 Acero estructural.

En el Diseño Estructural en Acero, se define como “acero estructural” a aquel material que se utiliza en la elaboración de estructuras de puentes, edificios, vehículos, poliductos, entre otros. (Smith, 1996).

En el mundo existen una gran variedad de aceros, entre los más comunes están el A-36, A-588, A-709, etc.; que son frecuentemente utilizados, ya sea en puentes o en edificaciones. Cada uno de ellos presenta una resistencia diferente y sobre todo están compuestos por “aleaciones diferentes” con “usos” diferentes, es decir que según su “aleación” pueden estar preparados para enfrentar de mejor manera determinadas condiciones (climáticas, mecánicas, etc.), como, por ejemplo, en la *Ilustración 1* se aprecia el diagrama Esfuerzo-Deformación de las aleaciones de acero comercialmente más conocidas. (Cevallos, 2022).

#### Ilustración 1

*Grafica Esfuerzo - Deformación, para varias clases de acero.*



*Nota:* (AHMSA, 1996)

En el Ecuador el acero “comercialmente más conocido” es el A-36, utilizado principalmente en la fabricación de edificaciones, es de importante recalcar que este tipo de acero tiene -a su vez- varias clasificaciones como, por ejemplo: el A-36 GR50; muy utilizado en obras civiles (Cevallos, 2022), entre otros.

### ***2.1.1 Propiedades Físicas del Acero Estructural***

Las propiedades mecánicas del acero se constituyen en propiedades definitorias del material, en este sentido el acero, es una aleación metálica compuesta principalmente por hierro y carbono, de esta forma emerge como un aliado preeminente en la construcción de edificaciones. La plasticidad que el acero exhibe es una notable combinación de dureza y resistencia, al tiempo que presenta una alta maleabilidad, esta característica implica que el acero puede ser conformado y moldeado en infinidad de formas sin experimentar fracturas, siendo precisamente esta propiedad excepcional la que lo convierte en un material ideal para la manufactura de una variedad extensa de objetos, entre ellos los elementos estructurales.

La plasticidad es una de las propiedades mecánicas sobresalientes del material, no solo le confiere versatilidad en la producción de objetos diversos, sino que también lo posiciona como una opción para la construcción de edificios y estructuras. De igual forma la resistencia que presenta el acero ostenta una alta resistencia y una notable dureza, características que sumadas lo convierten en un material con capacidad para resistir esfuerzos extremos sin propensión a la fractura.

La maleabilidad que es una propiedad fundamental del acero resalta la capacidad intrínseca del material para experimentar deformaciones sin llegar a fracturarse, una propiedad que es adoptada por la significativa presencia de carbono en su composición química, cabe destacar que la relación entre maleabilidad / dureza es inversamente proporcional, es decir, a medida que la dureza de un metal se incrementa, su maleabilidad tiende a disminuir.

Este fenómeno ilustra la compleja interrelación entre las propiedades mecánicas propias del acero, aspecto crucial para entender su versatilidad y diversidad para usos diversos, la construcción estructural entre uno de ellos. La firmeza inherente del acero, caracterizada por una significativa resistencia a impactos y arañazos, se traduce en su destacada capacidad para soportar fuerzas externas, esta propiedad cuantificada mediante la “Escala Brinell”, una medida que varía según la composición específica de la aleación, generalmente situándose entre 120 y 180 Rocwells. Este rango en la escala Brinell refleja la diversidad de aleaciones de acero y subraya la versatilidad de este material en términos de resistencia a la deformación y la abrasión.

Desde una perspectiva mecánica, el acero se distingue por su excepcional resistencia, su destacada capacidad para resistir fuerzas de tensión le confiere una notable tenacidad, entendida como la habilidad intrínseca de resistir de manera eficaz a posibles fracturas, este atributo resalta la robustez del acero como material, subrayando su capacidad para mantener su integridad estructural frente a “esfuerzos tensiles” considerables (AZERO, 2013)

## **2.2 Vigas metálicas.**

Hace referencia a elementos estructurales concebidos específicamente para resistir fuerzas transversales, predominantemente dispuestos en orientaciones horizontales. Estos componentes no solo tienen la capacidad de soportar las cargas gravitacionales inherentes a su propio peso, sino que además, constituyen cualquier miembro estructural susceptible a fuerzas que generan flexión y/o torsión debido a la naturaleza de los esfuerzos aplicados, sin inducir fuerzas axiales internas en el mencionado componente, dicho de otra forma, ninguna de las superficies de la viga exhibe componentes alineados en paralelo con su extensión. (Smith, 1996), tal como se muestra en la *Ilustración 2*.

## **Ilustración 2**

*IPE Armada en taller.*



*Nota:* (Acocil, 2023).

### **2.2.1 Flexión**

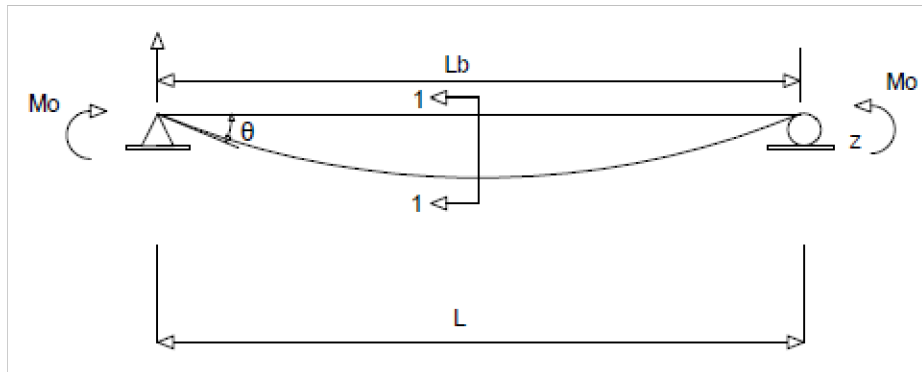
Para flexión simple, el miembro es cargado en un plano paralelo al eje principal que pasa a través del centro de corte o es restringido al giro en los puntos de carga y los apoyos. (AISC, 2016)

### **2.2.2 Deflexión**

Según Smith (1996), la deflexión o pandeo se entiende como un fenómeno intrínseco en elementos estructurales de naturaleza esbelta cuando se encuentran sometidos a fuerzas compresivas. Este comportamiento se caracteriza por una deformación, ya sea elástica o plástica, conlleva un desplazamiento en dirección perpendicular al eje de aplicación de la compresión.

### Ilustración 3

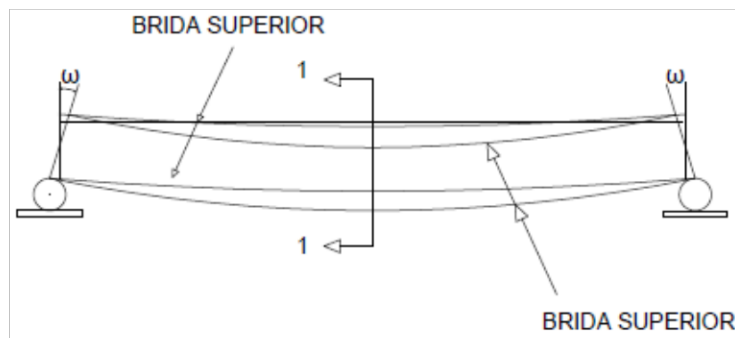
*Flexión uniforme en el eje X de una sección W.*



*Nota:* 1 (Smith, 1996)

### Ilustración 4

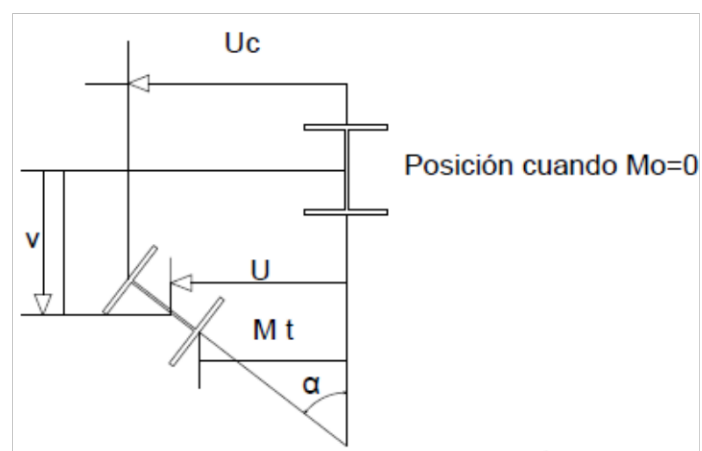
*Desplazamiento de las alas superior e inferior al aplicar una fuerza.*



*Nota:* (Smith, 1996)

### Ilustración 5

*Sección 1-1*



*Nota:* (Smith, 1996).

Las *Ilustración 3*, *Ilustración 4* e *Ilustración 5* representan el pandeo lateral torsional de una viga de sección W, la sección preponderante de acero laminado en caliente, consagrada como viga de elección, adopta la forma distintiva de la sección W, tal como se muestra en la Ilustración 3, desplegando una simetría dual y configurándose como una estructura en forma de I. La ingeniería detrás de la sección W se orienta hacia una “economía estructural”, priorizando una resistencia significativamente superior a la flexión en el eje principal en comparación con el eje principal menor en este contexto, la exposición subsiguiente se inicia con un análisis del comportamiento estructural de una viga de sección W, sometida a un momento que induce flexión en torno al eje principal mayor de su sección transversal. (Troglia, 2010).

La Ilustración 4, muestra una viga de sección W de longitud infinitesimal sujeta solo a flexión sobre el eje principal mayor  $x$  de la sección transversal, una sección transversal en el que se supone que el plano  $xy$  antes de la flexión sigue siendo una sección plana en el giro, posición después de que ocurra la flexión, como se muestra en la Ilustración 5, la tensión el diagrama es lineal; la tensión de compresión máxima se denota como  $\xi_c$ , y la máxima tensión de tracción se denota como  $\xi_t$ . Como se muestra en la Ilustración 5 para la teoría de pendientes pequeñas. (Smith, 1996).

### ***2.2.3 Atiesadores de apoyo.***

Los atiesadores de apoyo, meticulosamente emplazados en configuraciones duales, se sitúan sobre las almas de las traveses armadas, particularmente en los extremos no enmarcados y en aquellos puntos donde la presencia de cargas concentradas requiere atención especial, se impone la condición de que estos atiesadores mantengan un contacto íntimo con los patines cargados, extendiéndose hacia los bordes de estos o de los ángulos en la medida máxima factible, sobre todo en instancias donde la carga normal al patín se manifiesta como tensión, se

prescribe la aplicación de soldadura para fijar los atiesadores al patín cargado. (Silva de Carvalho, Rossi, & Martins, 2022).

Sin embargo, en el caso de las cargas compresivas, se requiere un ajuste o contacto preciso entre el patín y los atiesadores, con miras a alcanzar este cometido, se sugiere la opción de soldar los atiesadores al patín o realizar el cepillado de sus lados proyectantes. (McCormac J. C., 2013).

El atiesador de apoyo, clasificado como una entidad singular dentro del espectro columnar, se revela con un objeto de estudio analítico de gran complejidad, debido a su función compartida en la absorción de carga en concomitancia con el alma estructural, la evaluación precisa de la contribución individual de cada componente para contrarrestar la carga que presenta como un ejercicio intrincado y de difícil cuantificación. En concordancia con los rigurosos estándares establecidos por la Especificación (J10.8) del (AISC, 2016), se estipula de manera inequívoca que la carga o reacción factorizada no deberá exceder la resistencia de diseño de una viga que no solo se compone de área efectiva del atiesador, sino que también involucra una porción estratégicamente determinada del alma estructural. (Rossi, Vendramell Ferreira, Martins, & Masacasa, 2020).

#### **2.2.4 Uniones Soldadas.**

De acuerdo con la (AWS, 2020), la soldadura es un proceso en el que se unen partes metálicas mediante el calentamiento de sus superficies a un estado plástico o fluido, permitiendo que las partes fluyan y se unan (con o sin la adición de otro metal fundido).

Concordantemente la normativa ecuatoriana (NEC-SE-AC, 2014), construida en función del cumplimiento de:

- (AISC, 2016) Sección J2
- (AWS, 2020)

De esta forma precisan la ejecución del proceso de soldadura, señalando que debe llevarse a cabo conforme a las disposiciones detalladas en la Sección 11 de la AWS. Así también, es imperativo que dicho proceso se realice de acuerdo con una especificación de procedimiento de soldadura, atendiendo la normativa (AWS, 2020) D1.1. y sus suplementos y que, debería ser oportunamente aprobada por el inspector de soldadura, como se indica en la sección 11.3 de la misma norma. Vale la pena señalar que es “esencial” que las variables involucradas se mantengan dentro de los parámetros establecidos por el fabricante del metal de aporte. (NEC-SE-AC, 2014)

### ***2.2.5 Diseño de Soldadura***

Los proyectistas poseen la prerrogativa de ejercer una selección meticulosa en cuanto al calibre de la soldadura, realizar el cálculo riguroso de la longitud total requerida para la soldadura, y aplicar de manera estratégica los cordones de soldadura alrededor de los extremos de los miembros estructurales, conforme a su criterio y discernimiento técnico. Esta capacidad de toma de decisiones otorga una adaptabilidad refinada a las necesidades específicas del proyecto, asegurando la integridad estructural y el cumplimiento riguroso de los estándares de calidad establecidos. De esta forma la soldadura con “hilo continuo” es un proceso en el que el calor necesario para la ejecución de la soldadura es suministrado por un arco eléctrico que se mantiene entre la pieza a soldar y el hilo-electrodo. De esta forma, la soldadura por pasos -que son segmentos de cordón- debidamente calculados brindan la resistencia necesaria al momento de receptor las cargas. Se debe indicar además que los traslapes son utilizados en este tipo de ejecuciones (AWS, 2020).

### ***2.2.6 Pandeo Lateral Torsional***

Las vigas, viguetas y fundentes exhiben de manera habitual una robustez y rigidez sobresalientes en el plano donde se ejercen las cargas, particularmente en el plano asociado a

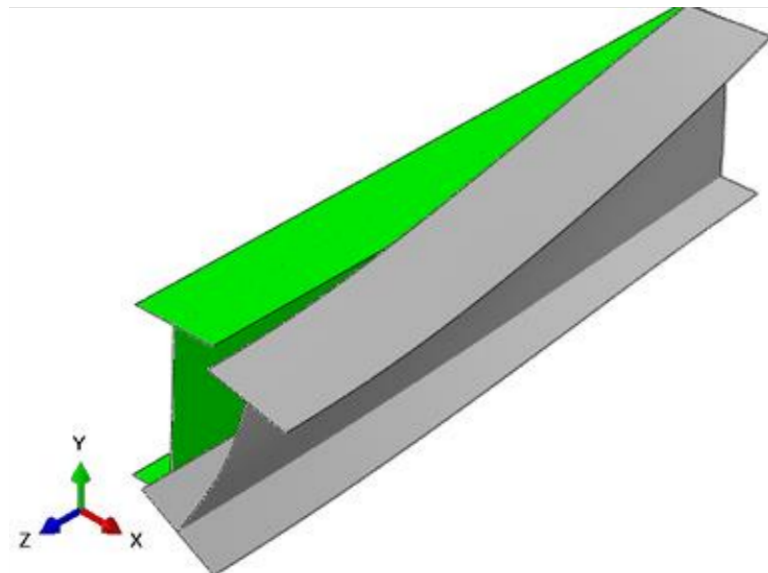
la flexión en torno a su eje principal mayor, en contraste con el plano ligado a la flexión en torno a su eje principal menor. (Yu & LaBoube, 2010).

A menos que estos elementos estén adecuadamente apuntalados contra la deflexión lateral y la torsión; se encuentran propensos a experimentar fallos por pandeo lateral antes de alcanzar su máxima capacidad en dicho plano, el pandeo lateral -motivado por la torsión- se manifiesta por deformaciones laterales y torsión en la región comprimida de la sección transversal, según la

**Ilustración 6.** (Ibrahim, 2019).

### Ilustración 6

*Viga sometida a pandeo lateral torsional.*



*Nota:* (Rossi, Vendramell Ferreira, Martins, & Masacasa, 2020).

La consideración de fenómenos como el pandeo local y el pandeo lateral por torsión se vuelve superflua una vez que el revestimiento de concreto ha culminado su proceso de endurecimiento, dado que este recubrimiento actúa como un efectivo mecanismo de impedimento a la instigación de tales modalidades de fallos, en consecuencia, la resistencia de diseño a la flexión se define como  $\phi M_n$ , donde el factor  $\phi=0.9$  y  $M_n$  puede llevarse a cabo mediante la aplicación de diversos métodos previamente establecidos con fines evaluativo (Yu & LaBoube, 2010).

### **2.3 Patología**

La patología que se presenta en las estructuras metálicas puede deberse a la degradación de los materiales por procesos de origen químico como la corrosión, o a causas de tipo mecánico que pueden afectar al propio material o a los elementos estructurales (Basset Salom, 2021).

### **2.4 Imperfecciones geométricas**

Las imperfecciones inherentes a los procesos de fabricación y ensamblaje, que abarcan tanto tensiones residuales como defectos geométricos, tales como desviaciones respecto a la verticalidad, rectitud, planitud y ajuste, así como las potenciales excentricidades que puedan sugerir en las uniones durante el proceso de montaje, serán cuidadosamente tomadas en consideración al llevar a cabo la verificación ante fenómenos de inestabilidad. La meticulosa atención a estas variabilidades se torna esencial para garantizar la integridad y seguridad estructural, dado que estas imperfecciones pueden influir significativamente en el comportamiento del componente o sistema en cuestión. (C.P.E.A, 2012).

En el proceso de concepción de la soldadura, se torna imperativo considerar minuciosamente los diversos esfuerzos a los cuales la soldadura estará expuesta, los esfuerzos calculados, que en etapas posteriores se cotejaron con los esfuerzos permisibles deben ser, de manera preferencial, esfuerzos nominales que surjan a partir de un análisis meticuloso o aquellos determinados con base en los requisitos de resistencia mínima de la junta, estos últimos pueden detallarse con precisión en las especificaciones de diseño que invoquen la aplicación de este código para la configuración de conexiones soldadas, este enfoque detallado garantiza no solo la conformidad con las normativas pertinentes, sino también la robustez y la fiabilidad estructural de la soldadura en cuestión. (Trogia, 2010).

### 3 Capítulo

#### Marco metodológico

##### 3.1 Viga diseñada

El método de cálculo utilizado en este estudio se basa en las especificaciones que brinda el AISC, para la evaluación de la capacidad resistente de los miembros a flexión; es así como las revisiones que se le deben realizar a los diferentes miembros estructurales se someterán a estas demandas. (AISC, 2016).

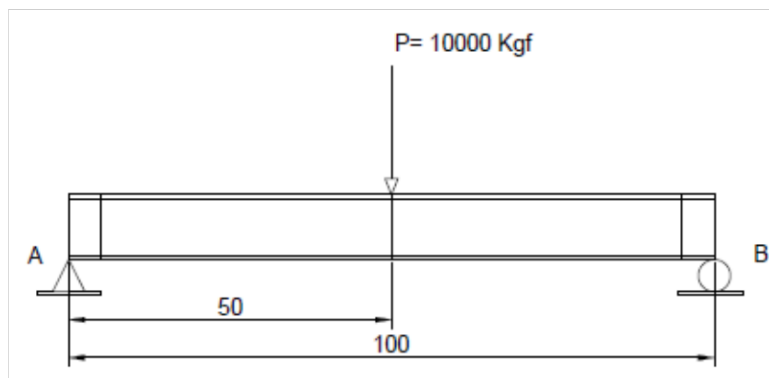
Como datos iniciales tenemos (*Ilustración 7*):

$L = 100$  cm o 1 m

$P = 10000$  kgf

##### Ilustración 7

*Viga en diseño.*



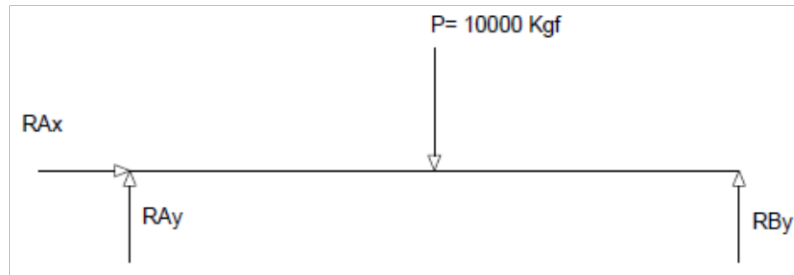
*Nota:* Elaborado por el autor.

En la *Ilustración 8* se aprecia el Diagrama de Cuerpo Libre, del elemento estructural en estudio.

D.C.L.

**Ilustración 8**

Diagrama de cuerpo libre.



Nota: Elaborado por el autor.

$$L = 100 \text{ cm}$$

$$R_A = P/2$$

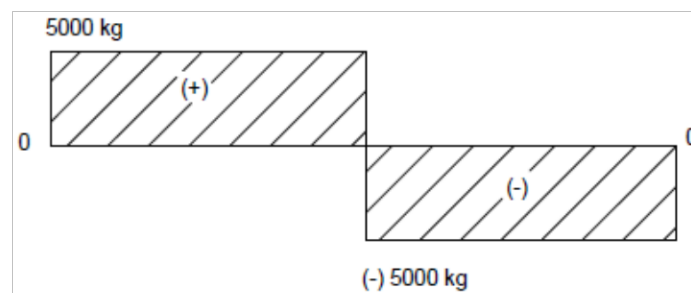
$$R_A = 5000 \text{ kg}$$

$$R_B = R_A = 5000 \text{ kg}$$

Una vez determinadas las reacciones en los apoyos se procede a determinar el cortante y a realizar el diagrama, como se aprecia en la **Ilustración 9**.

**Ilustración 9**

Diagrama de Cortante



Nota: Elaborado por el autor.

La ecuación para el momento es:

$$M_x = R_A \cdot x$$

En la **Tabla 1** se obtienen los valores para realizar la gráfica de momentos.

**Tabla 1**

Valores para la gráfica de momento.

Longitud	Ecuación momento	Momento
X0= 0 cm	$M1=RA * X0$	$M1= 0 \text{ kg}^*\text{cm}$
X1= 50 cm	$M2=m1+RA * X1$	$M2= 250.000 \text{ kg}^*\text{cm}$
X2 = 50 cm	$M3= m1+m2-RB * X2$	$M3= 0 \text{ kg}^*\text{cm}$

Nota: Elaborado por el autor.

Se procede a calcular el Momento Máximo Flector de la viga en análisis.

$$M \text{ máx.}=(P*L)/4$$

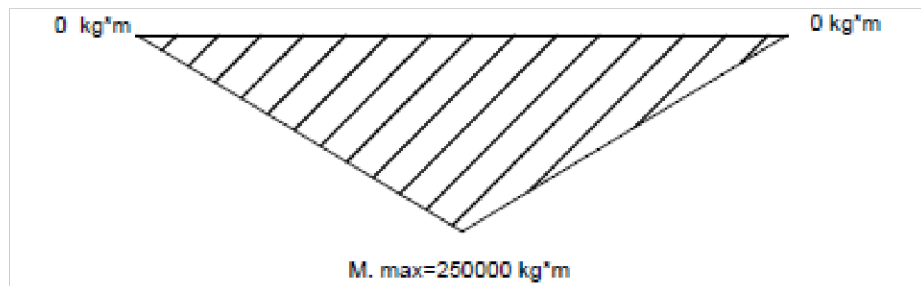
Por lo tanto,

$$M_x= 250.000 \text{ kg}^*\text{cm}$$

En la **Ilustración 10** se distingue la gráfica del momento flector máximo.

**Ilustración 10**

Diagrama de Momento máximo flector.



Nota: Elaborado por el autor.

Se inicia el diseño con un pre-dimensionamiento, para lo cual se debe considerar el análisis plástico, de esta forma tanto los patines como en el alma mismos que tienen que ser compactas, para ello se debe cumplir con los valores límites de esbeltez del alma y del ala. Cabe recalcar que todas las ecuaciones son extraídas del (AISC, 2016).

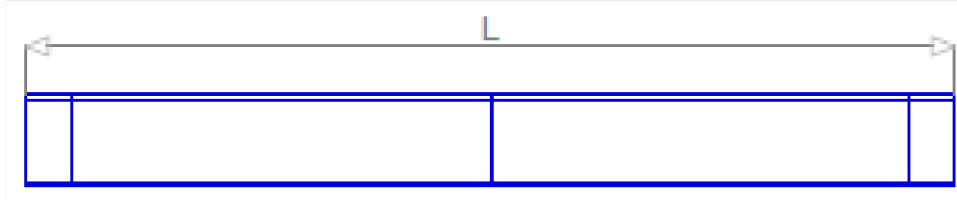
Para determinar el peralte de la sección  $d$ , se recomienda tomar un valor arbitrario entre un sexto y un quinceavo multiplicarlo por  $L$ , donde  $L$  es la luz entre apoyos como se aprecia en la

**Ilustración 11** y la **Ilustración 12**; así:

$$d = \left( \frac{1}{6} - \frac{1}{15} \right) * L \quad (1)$$

### Ilustración 11

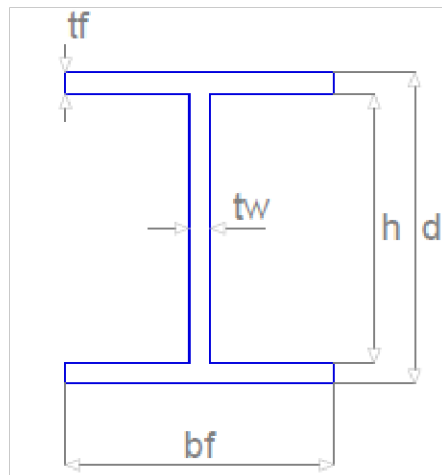
Longitud  $L$  de la viga.



Nota: Elaborado por el autor.

### Ilustración 12

Descripción IPE



Nota: Elaborado por el autor.

Posterior a esto se supone un valor de espesor del patín  $b_t$ . Una vez con estos valores se determina el peralte del alma.

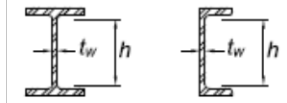
$$h = d - 2t_p \quad (2)$$

Una vez obtenido el peralte se calcula el espesor del alma  $t_w$ , garantizando que el alma sea compacta; mediante la expresión expuesta en la **Tabla 2** del AISC :

$$\frac{h}{t_w} \leq 3.76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3)$$

**Tabla 2**

Tabla B4.1b. Razones Ancho - Espesor: Elementos en Compresión. Miembros sometidos a Flexión.

Casos	Descripción del Elemento	Razón Ancho Espesor	Razón Ancho - Espesor Limite		Ejemplo
			$\lambda$ (Compacta / No Compacta)	$\lambda$ (esbelto / no esbelto)	
15	Almas de doble T simétricas y canales.	$h/t_w$	$3,76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,7 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Nota: (AISC, 2016)

Posteriormente, se precisa calcular el módulo de sección plástico mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 Z_{xreq} &= \frac{M_u}{\phi_b * F_y} = 2 * \left[ t_w * \left(\frac{h}{2}\right) * \left(\frac{h}{4}\right) + A_p * \left(\frac{h}{2} + \frac{t_p}{2}\right) \right] \\
 &= t_w * \frac{h^2}{4} + A_p * (h + t_p)
 \end{aligned} \tag{4}$$

De la expresión anterior se obtiene:

$$A_p \geq \frac{M_u}{\phi_b * F_y * (h + t_f)} - \frac{t_w * h^2}{4 * (h + t_f)} \tag{5}$$

Con esta ecuación se obtiene el área del patín, de donde se puede extraer el ancho de este, ya que:

$$A_p = b_p * t_p \tag{6}$$

Por lo tanto,

$$b_p = \frac{A_p}{t_p} \tag{7}$$

Seguido de este cálculo, se comprueba si el patín es compacto o no, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{b_p}{2t_p} \leq 0.38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{8}$$

Una vez que se ha dimensionado el elemento estructural, se procede a calcular el  $Z_x$ .

Despejando de la ecuación:

$$\Phi_b * M_n = \Phi_b * Z_x * F_y \quad (9)$$

Se tiene que cumplir que:

$$\Phi_b * M_n \geq M_u \quad (10)$$

A continuación, se realiza la revisión por cortante del miembro estructural. Es preciso recalcar que se muestran dos métodos para el cálculo de la resistencia a cortante, el primero expuesto en la sección G2, que no utiliza la resistencia post-pandeo (acción del campo de tensión) y el método presentado en la sección G3 del (AISC, 2016), que utiliza la acción del campo de tensión. La resistencia de diseño a corte,  $\phi_v * V_n$ ; debe ser determinada como sigue, se tiene que considerar además que en la sección G2 del AISC,  $\phi=0.9$ .

G2 del AISC, para miembros con almas no rigidizadas o rigidizadas.

$$V_n = 0.6 * F_y * A_w * C_v \quad (11)$$

Para almas de secciones I laminadas:

$$\frac{h}{t_w} \leq 2.24 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (12)$$

$\Phi_v=1.0$  y

$C_v=1.0$  (G2-2)

$C_b$ , es el factor de modificación debido al pandeo lateral - torsional para diagramas de momento flector no uniformes.

$$C_b = \frac{12.5 * M_{max}}{2.5 * M_{max} + 3 * M_A + 4 * M_B + 3 * M_C} \quad (13)$$

Posterior a esto, es preciso revisar la fluencia, es decir la resistencia nominal por flexión  $M_n$ , la que tiene que ser menor que los valores obtenidos de acuerdo con los estados límites de fluencia (momento plástico) o pandeo lateral torsional. La fluencia viene dada por:

$$M_n = M_p = F_y * Z_x \quad (14)$$

Para realizar el análisis por el pandeo lateral torsional se aplica:

Cuando:

$$L_b < L_p \leq L_r$$

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0.7 * F_y * S_x) * \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (15)$$

Cuando  $L_b \leq L_r$

$$M_n = F_{cr} * S_x \leq M_p \quad (16)$$

Donde  $S_x$  es la tensión crítica y  $L_b$  es la longitud entre los puntos que esta arriostrado el miembro estructural ya sea contra desplazamientos laterales del ala en compresión o arriostrado contra el giro de la sección transversal.

Entonces se precisa determinar  $F_{cr}$ , que es el factor de tensión crítica para lo cual se utiliza la ecuación recomendada por el (AISC, 2016), como se indica a continuación:

$$F_{cr} = \frac{C_b * \pi^2 * E}{\left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 * \frac{J_c}{S_x * h_o} \left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (17)$$

$L_p$  es la longitud libre para el estado límite de fluencia.

$$L_p = 1.76 * r_y * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (18)$$

$L_r$  es definida como la longitud no arriostrada para el estado límite del pandeo lateral torsional inelástico, obtenida mediante la ecuación recomendada por la (AISC, 2016).

$$L_r = 1.95 * r_{ts} * \frac{E}{0.7 * F_y} * \sqrt{\frac{J_c}{S_x * h_o} + \sqrt{\left( \frac{J_c}{S_x * h_o} \right)^2 + 6.76 * \left( \frac{0.7 * F_y}{E} \right)^2}} \quad (19)$$

$r_y$  es radio de giro sobre el eje y.

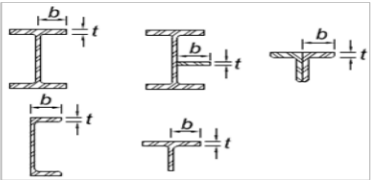
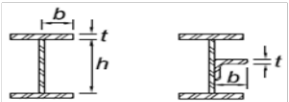
$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y * C_w}}{S_x} \quad (20)$$

Donde  $c=1$  cuando las secciones tienen simetría doble.

Es preciso recalcar que se procede según la norma (AISC, 2016), tomando en consideración para el diseño, como se indica en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.**

*Razones Ancho-Espesor de elementos en Compresión. Miembros sometidos a flexión.*

Casos	Descripción del elemento	Razon Ancho-Espesor	Razon Ancho-Espesor Límite $\lambda$ (Compacta/no compacta)(esbelto/no esbelto)	Ejemplo
1	A las de perfiles laminados, planchas conectadas a perfiles laminados, alas de pares de angulos conectados continuamente, a las alas de secciones T.	$b/t$	$0,56 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
2	A las de perfiles I soldados y planchas o angulos onectados a secciones soldadas.	$b/t$	$0,64 * \sqrt{\frac{k_c * E}{F_y}}$	

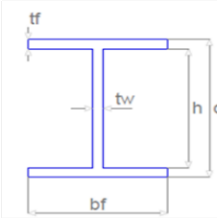
*Nota:* (AISC, 2016)

Posterior a los cálculos, se han obtenido los siguientes resultados con sus respectivas comprobaciones, como se indica en la **Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y**

**Tabla 10.**

**Tabla 4**

*Resumen de cálculos y comprobaciones.*

VIGA TIPO I 100X3X100X3							
MATERIAL: ACERO A-36							
	Nudos		Longitud (cm)	Características mecánicas.			
	Inicial	Final		Area (cm <sup>2</sup> )	Ix(1) (cm <sup>4</sup> )	Iy(1)(cm <sup>4</sup> )	It(2) (cm <sup>4</sup> )
	N1	N2	100	8.82	161.94	50.02	0.26
	Notas: (1) Inercia con respecto al eje indicado. (2) Momento de inercia a torsion uniforme.						
				Plano ZX		Pandeo lateral	
				Plano ZX	Plano ZY	Ala sup.	Ala inf.
	$\beta$			1.00	1.00	0.00	0.00
	Lk			1.000	1.000	0.000	0.000
	Cb			**			1
Notacion:							
$\beta$ : Coeficiente de pandeo.							
Lk: Longitud de pandeo (cm)							
Cb: Factor de modificacion para el momento critico.							

*Nota:* Elaborado por el autor.

**Tabla 5**

Resumen de cálculos y comprobaciones.

BARRA	COMPROBACIONES (ANSI/AISC 360-22 (LRFD))								Estado
	Pt	$\lambda_c$	Pc	Mx	My	Vx	Vy	PMxMyVxVyT	
N1/N2	N.P.	N.P.(2)	N.P. (2)	$x=50\text{cm}$ $\eta=57,5$	N.P.(3)	N.P.(4)	$x:0\text{cm}$ $\eta=17,9$	N.P.(5)	<b>CUMPLE</b> <b><math>\eta=57,5</math></b>

Notacion:  
 Pt: Resistencia a traccion.  
 $\lambda_c$ =Limitacion de esbeltez para compresion.  
 Pc= Resistencia a compresion.  
 Mx= Resistencia a flexión eje X.  
 My= Resistencia a flexión eje Y.  
 Vx=Resistencia a corte eje X.  
 Vy= Resistencia a corte eje Y.  
 PM, MY,Vx,Vy,T= Esfuerzos combinados y torsion.  
 x= distancia al origen de la barra.  
 $\eta$ = Coeficiente de aprovechamiento (%)  
 N.P. No procede

---

Comprobaciones que no proceden (N.P.)  
 La comprobacion no procede, ya que no hay axil de traccion.  
 La comprobacion no procede ya que no hay un axil en compresion.  
 La comprobacion no procede ya que no hay momento flector.  
 La comprobacion no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.  
 No hay torsion u otros esfuerzos combinados, por lo que la comprobacion no procede.

Nota: Elaborado por el autor.

**Tabla 6**

Resumen de cálculos y comprobaciones.

<b>Resistencia a traccion.</b> La comprobacion no procede, ya que no hay axil de traccion.			
<b>Limitacion de esbeltez para compresion.</b> La compr			
<b>Resistencia a compresion.</b> la comprobacion no procede, ya que no hay axil de compresion.			
<b>Resistencia a flexión eje X.</b> Todas las secciones deben cumplir con las especificaciones LRFD desarrolladas en el Cap. F de ANSI/AISC 360-22 Se debe satisfacer el siguiente criterio:			
	$\eta_M = \frac{M_r}{M_c} \leq 1$	$\eta_M =$	<b>0.575</b>
El momento flector solicitante de calculo pesimo, Mr, se produce en un punto situado a una distancia de 0,5 m del nudo N1, para la combinacion de acciones 1,2*PP+1,*Q1 Donde: <b>Mr</b> = Resistencia a flexión requerida para las combinaciones de carga LRFD.		<b>Mr</b> =	4.01 kN*m
<b>Mc</b> = Resistencia de diseño a flexión $M_c = \phi_b * M_n$ La resistencia de diseño a flexión para secciones sometidas a momento flector es el menor valor de los obtenidos según los estados limite descritos en el Capitulo F: Donde:			
	$\phi_b$ = Factor de resistencia a flexión.	<b><math>\phi_b</math></b> =	0.9
	<b>Mn</b> = La resistencia nominal a flexión calculada según Artículo 3, Seccion 2, Division a	<b>Mn</b> =	7.75 kN*m

Nota: Elaborado por el autor.

**Tabla 7***Resumen de cálculos y comprobaciones.***1. Pandeo Lateral - torsional**

a) Si  $L_b \leq L_p$ , el estado limite de pandeo lateral - torsional no es de aplicación.

Donde:

**L<sub>b</sub>**= Distancia entre puntos de arriostramiento al desplazamiento lateral del ala comprimida o de la torsion de la seccion transversal.

**L<sub>b</sub>**= 0 m

$$L_p = 1,76 * r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

**L<sub>p</sub>**= 1185.5 mm

Donde:

**E**= Modulo de Elasticidad del acero.

**E**= 200000 Mpa

**F<sub>y</sub>**= Limite elastico minimo especificado.

**F<sub>y</sub>**= 250 Mpa

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

**r<sub>y</sub>**= 2.38 cm

Donde:

**I<sub>y</sub>**= Momento de inercia respecto al eje Y

**I<sub>y</sub>**= 50.02 cm<sup>4</sup>

**A**= Area total de la seccion transversal de la barra.

**A**= 8.82 cm<sup>2</sup>

*Nota:* Elaborado por el autor.

Tabla 8

Resumen de cálculos y comprobaciones.

**2. Pandeo local del alma comprimida:**

a) Para secciones con alas no compactas

$$M_n = \left[ M_p - (M_p - 0.7 * F_y * S_x) * \left( \frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] \quad \mathbf{Mn=} \quad 7.75 \quad \text{kN*m}$$

Donde:

**Fy**= Limite elastico minimo especificado

**Fy**= 250 Mpa

**Mp**=  $F_y * Z_x$ 

**Mp**= 8.93 kN\*m

Donde:

**Zx**: Modulo resistente plastico respecto al eje X.

**Zx**= 35.73 cm<sup>3</sup>

$$S_x = \frac{I_x}{Y}$$

**Sx**= 32.39 cm<sup>3</sup>

Donde:

**Ix**= Momento de inercia respecto al eje X.

**Ix**= 11.94 cm<sup>4</sup>

**Y**= Distancia a la fibra extrema en flexión.

**Y**= 50 mm

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

**λ**= 16.67

Donde:

**bf**= Anchura total del ala.

**bf**= 100 mm

**tf**= Espesor del ala.

**tf**= 3 mm

$$\lambda_{pf} = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

**λpf**= 10.75

$$\lambda_{rf} = 0,95 * \sqrt{\frac{k_c * E}{F * L}}$$

**λrf**= 27.15

Donde:

**E**= Modulo de elasticidad del acero.

**E**= 200000.00 Mpa

$$0,35 \leq K_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{b_f}{t_f}}} \leq 0,76$$

**Kc**= 0.71

FL= se calcula de la siguiente forma:

i) Para:

$$\frac{S_{xt}}{S_x} \geq 0,7$$

**FL**= 0,7 **Fy**

**FL**= 175.00 Mpa

Donde:

**Fy**= Limite elastico minimo especificado.

**Fy**= 250.00 Mpa

**Sxt**= Modulo resistente elastico correspondiente al ala traccionada.

$$S_{xt} = \frac{I_x}{Y_t}$$

**Sxt**= 32.39 cm<sup>3</sup>

**Ix**= Momento de inercia respecto al eje X.

**Ix**= 11.94 cm<sup>4</sup>

**Yt**= Distancia entre la fibra extrema del ala traccionada en flexión y el baricentro.

**Yt**= 50.00 mm

**Sxc**= Modulo resistente elastico correspondiente al ala comprimida.

**Sxc**= 32.39 cm<sup>3</sup>

Nota: Elaborado por el autor.

**Tabla 9: Resumen de cálculos y comprobaciones.**

<b>Resistencia a flexión eje Y</b>			
La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.			
<b>Resistencia a corte X.</b>			
La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.			
<b>Resistencia a corte Y</b>			
Todas las secciones deben cumplir con las especificaciones LRFD desarrolladas en el capítulo G de ANSI/AISC 30-22 (LRFD)			
Se debe satisfacer el siguiente criterio:			
$\eta_v = \frac{V_r}{V_c} \leq 1$	$\eta_v =$	<b>0.179</b>	
El esfuerzo cortante solicitante de cálculo pesimo $V_r$ se produce en el nudo N1, para la combinación de hipótesis 1,2 * PP+ 1,6 * Q1			
Donde:			
$V_r$ =Resistencia a cortante requerida para las combinaciones de carga LRFD.	$V_r =$	8.040	kN
$V_c$ = Resistencia de diseño a cortante.	$V_c =$	45.000	kN
La resistencia de diseño a cortante viene dada por:			
$V_c = \phi_v * V_n$			
Donde:			
En la sección G2.1 a:			
$\phi_v$ = Factor de resistencia a cortante.	$\phi_v =$	1.000	
$V_n$ = se define según lo detallado en el Capítulo G, de la siguiente forma:			
Para almas de secciones con simetría simple o doble y en U sometidas a cortante en el plano del alma (ANSI/AISC 360-22 (LRFD), Capítulo G-G2,1).			
$V_n = 0,6 * F_y * A_w * C_v$	$V_n =$	45.000	kN
Donde:			
$F_y$ = Limite elástico mínimo especificado.	$F_y =$	250.000	Mpa.
$A_w = d * t_w$	$A_w =$	3.000	cm <sup>2</sup>
Donde:			
$d$ = ancho total	$d =$	100.000	mm
$t_w$ = espesor del alma.	$t_w =$	3.000	mm

*Nota:* Elaborado por el autor.

**Tabla 10:** Resumen de cálculos y comprobaciones.**1. Resistencia nominal a cortante.**

a) para almas de perfiles laminados de seccion en doble T cuando se cumple:

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,24 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Cv= Coeficiente de cortante del alma.

Cv= 1.000

Donde:

h= Distancia libre entre alas, menos el radio de acuerdo.

h= 94.000 mm

E= Modulo de elasticidad del acero.

E= 200000.000 Mpa

**2. Comprobacion de rigidizadores transversales.**

(a) si  $\frac{h}{t_w} \leq 2,54 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

No son necesarios rigidizadores transversales.

Donde:

h= Distancias libre entre las alas, menos el radio de acuerdo.

h= 94.000 mm

tw= Espesor del alma.

tw= 3.000 mm

E= Modulo de elasticidad del acero.

E= 200000.000 Mpa

Fy= Limite elastico minimo especificado.

Fy= 250.000 Mpa

**Esfuerzos combinados y torsion:**

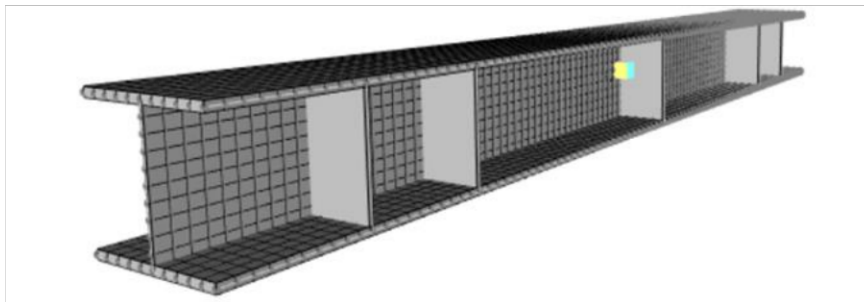
No hay torsion u otros esfuerzos combinados, por lo que la comprobacion no procede.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Según el diseño en el programa computacional SAP 2000, nos proyecta una viga tipo I con patines de 100 x 3 x 1000 y alma de 95 x 3 x 1000, como se muestra en la **Ilustración 13**.

### Ilustración 13

*Viga diseñada en Sap 2000*



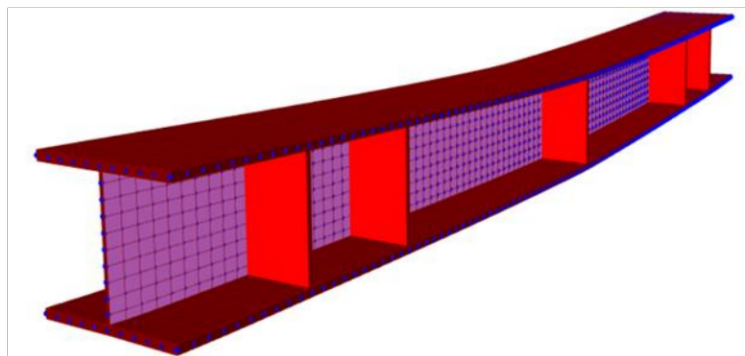
*Nota:* Elaborado por el autor.

Se debe recalcar que la viga ha sido diseñada sin tomar en consideración el efecto de aplastamiento del alma, puesto que no es un objetivo de la presente investigación, lo que si pudiera ser considerado en investigaciones de mayor análisis.

En la **Ilustración 14**, se puede apreciar la falla que debería tener al momento de ser aplicada la carga de 10.000 kgf.

### Ilustración 14

*Viga ensayada en programa computacional Sap 2000.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

Ahora que ya se ha determinado la sección transversal de la viga, se procede a la elaboración de las probetas.

Se fabrican un total de 8 vigas tipo I, una de ellas de estructura optima sin imperfecciones, 3 con diferentes imperfecciones geométricas con soldadura continua y 4 con soldadura por pasos.

El acero con el que se calculó la viga es el A-36; por ende, se ha procedido a la preparación de los flejes de acero de acuerdo con la necesidad del proyecto de investigación, en este sentido tenemos:

- FL 100 x 3 x 1000 (2 unidades por viga, patines.)
- FL 94 x 3 x 1000 (1 por viga, alma)

Con la materia prima lista, se procede a ensamblar los flejes, objetivados a la construcción de la primera viga, cuya capacidad de resistencia teórica de resistencia es de 10.000 kgf, Esta viga se la construye con el respeto riguroso de la norma, es decir, tomando especial cuidado en el centrado del alma con respecto a los patines; así como también verificando la perpendicularidad entre alma y patines. Como se puede apreciar en la *Ilustración 15 e Ilustración 16*.

#### **Ilustración 15**

*Unión alma-patín inferior, perpendiculares.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

**Ilustración 16**

*Perpendicularidad entre alma-patín viga de 10 Tn.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

El proceso de soldadura elegido es SMAW (Shielded Metal Arc Welding) electrodo E 6011, para realizar el punteado entre alma y patines, mientras que, para el soldeo completo y parcial de las piezas se decidió utilizar el proceso MIG/MAG (Metal Inert Gas) con un alambre sólido ER-70S6 y CO<sub>2</sub> al 30%; equivalente al electrodo E7018, como se aprecia en la **Ilustración 17** y la **Ilustración 18**.

**Ilustración 17**

*Soldadura ER70S6 equivalente a E7018*



*Nota:* Elaborado por el autor.

**Ilustración 18**

*Soldadura proceso MIG/MAG - ER70S6*



*Nota:* Elaborado por el autor.

Tomando en consideración la norma ecuatoriana de la construcción, (NEC-SE-AC, 2014) que deriva la responsabilidad a (AWS, 2020) y que en la Parte B Requerimientos Específicos para Diseño de Conexiones No Tubulares (Cargadas Estática o Cíclicamente), hace referencia entre otros particulares a los esfuerzos y, específicamente en la sección dedicada a los cálculos, se establece la premisa de que los esfuerzos evaluados, al someterse a la comparación con los esfuerzos permisibles, deben constituir esfuerzos nominales, estos deben ser derivados a través de un análisis apropiados o determinarlos a partir de los requisitos de resistencia mínima de la junta. estos requerimientos de resistencia mínima pueden encontrarse especificados en las normativas de diseño pertinentes que hagan referencia a este código específico para la planificación y ejecución de conexiones soldadas. La consideración cuidadosa de estos aspectos asegura la integridad estructural y la conformidad con las directrices normativas aplicables, garantizando así un diseño robusto y seguro en el ámbito de las conexiones soldadas. (AWS, 2020)

El espesor de garganta efectivo de una soldadura de tope con junta de penetración parcial (PJP) debe ser el que se muestra (AISC, 2016) en la **Tabla 11** de este documento.

**Tabla 11**

*Garganta efectiva de soldadura a tope. Con Junta de Penetración parcial.*

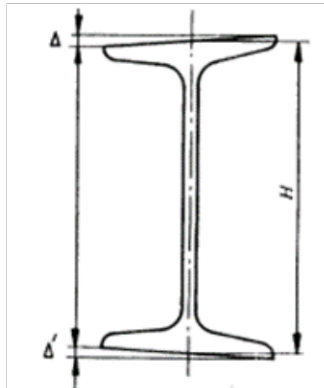
<b>Proceso de Soldado</b>	<b>Posicion de soldado F (Plano), H (horizontal), V (vertical), OH (sobre cabeza)</b>	<b>Tipo de surco (Figura 3.3, AWS D1.1)</b>	<b>Garganta Efectiva.</b>
Arco de electrodo revestido (SMAW) Arco metlico y gas (GMAW), Arco con nucleo de fundente (FCAW)	Todos	Bisel J o U 60° V	Profundidad del bisel.
Arco Sumergido (SAW)	F	Bisel J o U Bisel 60 ° V	
Arco metalico y gas (GMAW) Arco con nucleo de fundente (FCAW)	F.H.	Bisel 45°	Profundidad del bisel.
Arco de electrodo revestido (SMAW). Arco metalico y gas (GMAW) Arco con nucleo de fundente (FCAW)	Todos V. OH	Bisel 45° Bisel 45°	Profundidad del bisel menos 3mm.

*Nota:* (AWS, 2020)

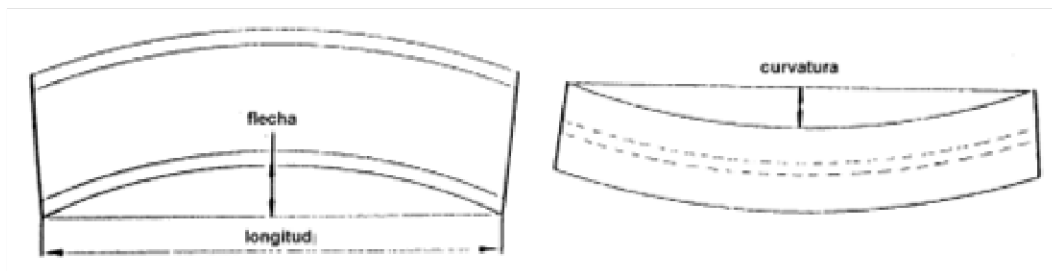
NOTA: El tamaño de la garganta efectiva de una soldadura de tope con junta de penetración parcial depende del proceso utilizado y de la posición de soldadura. Los documentos contractuales deben indicar la garganta efectiva o la resistencia de la soldadura requerida, y el fabricante debe detallar la junta basándose en el proceso de soldadura y en la posición a utilizar para soldar la junta. (AISC, 2016)

Para realizar las comparaciones respectivas, se ha considerado la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTN (INEN-2231, 2013) y de ahí se han extraído las tolerancias máximas en la fabricación de perfiles estructurales I de acero laminados en caliente serie IPN. Así los requisitos a los que hace referencia en la parte pertinente de la presente norma son:

La escuadría que permite la normativa ecuatoriana se establece en la **Tabla 12** y debe ser medido como se indica (INEN-2231, 2013) en la **Ilustración 19**.

**Ilustración 19***Escuadraría de las alas.**Nota:* (INEN-2231, 2013)**Tabla 12***Escuadraría de las alas.*

Ancho de ala	Escuadría ( $\Delta+\Delta'$ )
$B \leq 100$	3
$100 < B \leq 250$	3%B

*Nota:* (INEN-2231, 2013)**Ilustración 20***Medición de la flecha y curvatura**Nota:* (INEN-2231, 2013)

Dada la considerable versatilidad de estos perfiles a lo largo del eje Y-Y, las tolerancias en cuanto a deformaciones y curvaturas deben ser acordadas entre el fabricante y el consumidor. Estas deberían ser evaluadas conforme a las especificaciones acordadas.

(INEN-2231, 2013), *Ilustración 20*.

Se debe mencionar que por efectos de aplastamiento en la viga se decide cambiar el espesor del alma de 2 mm a 3 mm y colocar rigidizadores o atiesadores, con el alma de la viga.

Las vigas construidas, se marcan previo al ensayo; como se muestra en la ***Ilustración 21***.

### **Ilustración 21**

*Identificación de viga VI-01.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

## 4 Capítulo

### Análisis de resultados

En la **Tabla 13** se aprecia una comparativa de las diferentes imperfecciones geométricas fabricadas.

**Tabla 13**

*Cuadro comparativo de Imperfecciones Geométricas.*

Vigas IPE					
		Imperfección geométrica.	optima	descentramiento	sinuosidad
# Probeta	Resistencia (kgf)	11.600,00	9.230,00	8.710,00	8.750,00
		11.450,00	9.150,00	8.712,00	8.740,00

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la **Tabla 14** se puede apreciar una comparativa de las resistencias obtenidas durante los ensayos.

**Tabla 14**

*Datos comparativos de resistencias.*

Ítem	Carga	Pér. Res.	% Pérdida	Resistencia	Imperfección
VI-01	11.604	0	0%	100%	Ninguna.
VI-02	9.23	2.374	20.46%	79.54%	Descentramiento alma.
VI-03	8.71	2.894	24.94%	75.06%	Exceso de calor alma.
V1-04	8.75	2.854	24.59%	75.41%	Falta de perpendicularidad alma-patín.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Los resultados obtenidos a través de los rigurosos ensayos realizados presentan evidencia empírica contundente sobre la notable pérdida de integridad estructural en las vigas, lo cual se torna especialmente relevante al contrastarlas meticulosamente con la viga VI-01, cuidadosamente fabricada sin ningún tipo de imperfecciones geométricas detectables. Se

observa que la viga VI-02 presenta una reducción en su capacidad de carga del 20.46 % respecto a la VI-01, con lo que implica que, si la viga originalmente diseñada poseía una robustez nominal de 11.604 kilogramos-fuerza (kgf), la VI-02 presenta una resistencia meramente residual de apenas 9.230 kgf.; esta disminución drástica en la capacidad de resistencia estructural constituye un indicador inequívoco de una “deficiencia constructiva crítica”, la cual podría inducir a un grado sustancial de inestabilidad estructural, sobre todo cuando la viga sea sometida a cargas adicionales, similares a los de uso cotidiano.

Al adentrarnos en el análisis del escenario más adverso, que sería la disminución de resistencia, salen a la luz resultados aún más alarmantes, con una disminución del 24.94 % en la capacidad de carga de la viga, este declive en la integridad estructural se manifiesta de manera más pronunciada cuando se produce un sobrecalentamiento excesivo en la región de la unión soldada, fenómeno que se hace palpable en la viga VI-03.

La carencia de perpendicularidad entre el alma y los patines en la disposición estructural de la viga VI-04 muestran un factor adicional a considerar, dado que finalmente resulta mostrar una disminución notable en la capacidad de resistencia, estimada en un porcentaje del 24.59 % en comparación con la viga VI-01.

#### **4.1 Viga sometida a carga puntual, sin imperfecciones geométricas**

En la *Ilustración 22*, se puede apreciar el momento en el que la prensa inicia la aplicación de la carga.

### Ilustración 22

*Viga VI-01, ensayada en laboratorio.*



*Nota:* Autor, Laboratorio de Suelos Universidad Católica de Cuenca prensa Shimadzu Concreto 2000x

En la **Ilustración 23**, se observa que la aplicación de carga puntual se ha ejecutado y el lugar de mayor afección es el centro de la viga; siendo los atiesadores que juntamente con los patines los más afectados debido al aplastamiento originado.

### Ilustración 23

*Viga VI-01, ensayada.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

El patín superior presenta una distorsión en su forma, producto de la aplicación de la carga, como se puede apreciar en la **Ilustración 24**.

**Ilustración 24**

*Sección de viga con mayor impacto.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

En el área posterior de la viga, se puede advertir claramente la deformación manifestada tanto en el rigidizador como en el alma estructural; En cuanto al patín inferior, se observa de forma notable como las fibras han experimentado un fenómeno de tracción, lo cual es visualmente perceptible en la *Ilustración 25* .

**Ilustración 25**

*Vista posterior de la viga VI-01*

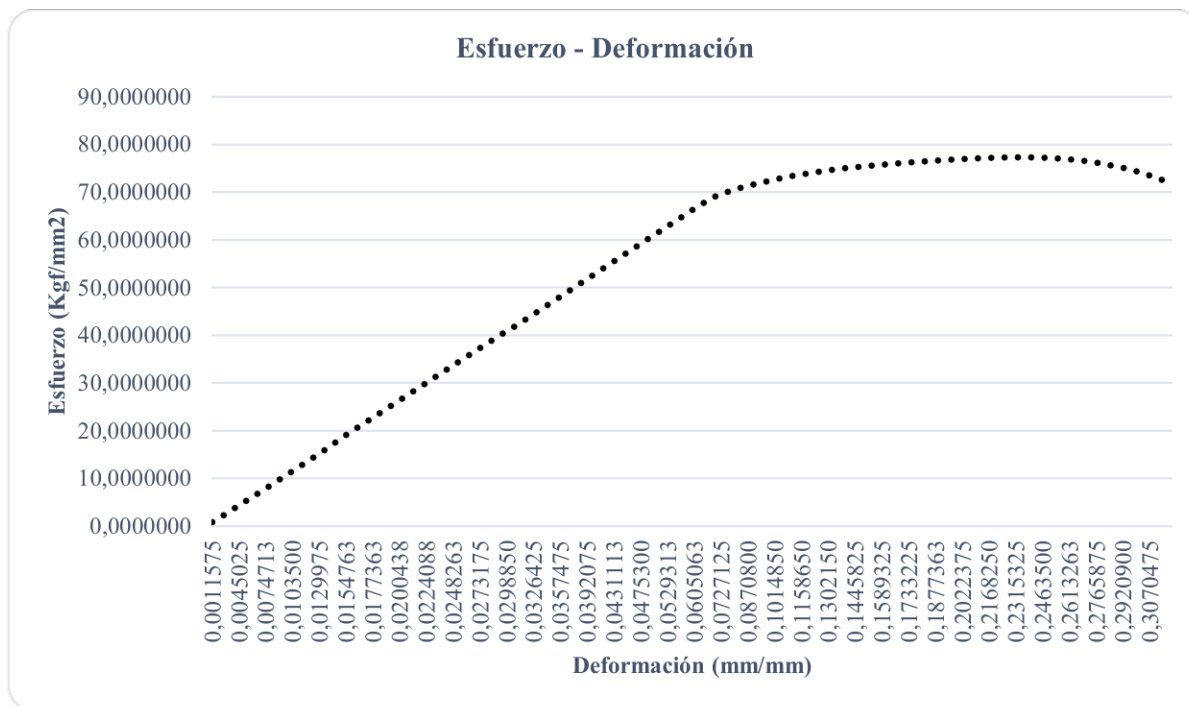


*Nota:* Elaborado por el autor.

Los datos recopilados durante las pruebas en la prensa hidráulica proporcionan la información necesaria para representar gráficamente tanto los esfuerzos como las deformaciones presentes durante el ensayo de la viga. Esta relación entre datos se visualiza de manera explícita en la *Ilustración 26*.

## Ilustración 26

Gráfico Fuerza-Desplazamiento VI-01.



Nota: Autor Laboratorio de Suelos, Universidad Católica de Cuenca.

En el contexto de la representación gráfica proporcionada en la **Ilustración 26**, se evidencia claramente que la viga VI-01 es sometida a cargas hasta alcanzar su límite máximo, registrando en 11598.25 kilogramos fuerza, lo que equivale a unas 11.6 toneladas. Este fenómeno ocurre con un desplazamiento de 23 milímetros, según los datos obtenidos durante el ensayo realizado en la prensa hidráulica.

En la **Ilustración 26**, se puede apreciar que la viga VI-01, llega a soportar un máximo de 11.598.25 kgf. (11,6 ton.) con un desplazamiento de 23 mm.

Los valores de la **Ilustración 26**, fueron obtenidos en el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca.

### 4.2 Vigas cargadas de forma puntual, con imperfecciones geométricas

En el examen cuidadoso de la viga VI-02, se detecta una discrepancia geométrica importante, concretamente el descentramiento del alma en relación con los patines superior e inferior. Esta

irregularidad se manifiesta mediante un desplazamiento de 10 milímetros respecto al centro del patín, implicando que en un extremo el alma este alineada con el centro del patín, mientras que en el otro extremo carece de esta alineación.

Esta falta de alineación provoca una notoria disminución en la capacidad de resistencia estructural de la viga, como resultado de este análisis, se establece una capacidad de resistencia de 9.230 kilogramos fuerza (equivalentes a 9.23 Toneladas), como se detalla en la ***Ilustración 27***.

#### **Ilustración 27**

*Viga VI-02*



*Nota:* Elaborado por el autor.

#### **Ilustración 28**

*Viga VI-02 previo ensayo.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

En la **Ilustración 28** se puede apreciar la Viga VI-02 instantes antes de ser ensayada juntamente con el un apoyo.

### **Ilustración 29**

*Viga VI-02 luego del ensayo.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

En la **Ilustración 29** se puede apreciar la viga VI-02 posterior al ensayo, en el frente y en la **Ilustración 30** la parte posterior de la misma probeta.

### **Ilustración 30**

*Vista posterior viga VI-02.*

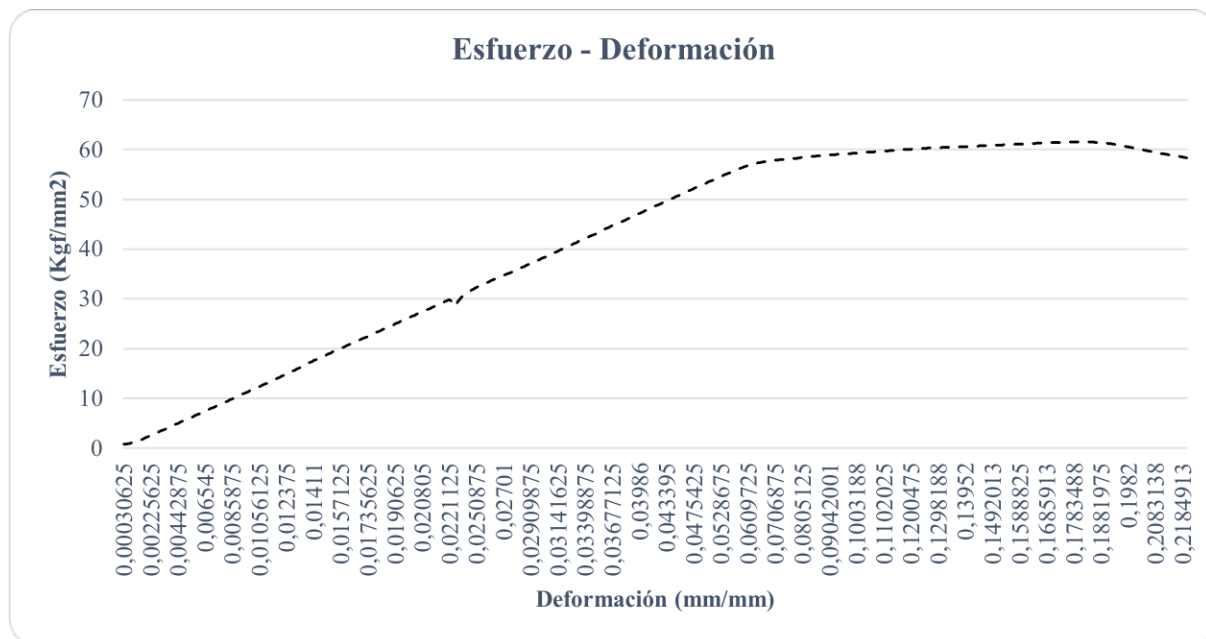


*Nota:* Elaborado por el autor.

En ambos casos se aprecia un aplastamiento ejercido en el alma de la viga, pudiendo apreciarse que este fenómeno se da entre los rigidizadores de uno de los lados, a pesar de ello la soldadura permanece intacta.

### Ilustración 31

Gráfico Fuerza-Deformación Viga VI-02.



Nota: Autor, Laboratorio de Suelos Universidad Católica de Cuenca.

En el caso de la viga VI-03 se obtienen una resistencia de 8.710 kgf (8.71 ton.).

### Ilustración 32

Viga VI-03.



Nota: Elaborado por el autor.

La imperfección geométrica en el caso de la viga VI-03, es producida por un incremento excesivo de calor al momento de soldar el alma con los patines, este incremento de temperatura en ciertas zonas produce una *sinuosidad* entre el alma y el patín.

En la **Ilustración 32** se observa la identificación de VI-03, así como también, en la **Ilustración 33** se muestra el momento previo al ensayo.

### **Ilustración 33**

*Viga VI-03 previo al ensayo.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

Una vez concluido el ensayo, se procede a efectuar una cuidadosa inspección de la probeta VI-03, y se aprecia claramente la presencia del fenómeno de *aplastamiento*, específicamente entre el rigidizador central y el tercer elemento -al contar desde el borde derecho de la probeta-. Es importante subrayar que los puntos de apoyo de la probeta son de naturaleza simple y no exhiben ningún tipo de empotramiento en ninguno de los casos evaluados, este aspecto reviste una importancia trascendental en el análisis de resultados obtenidos, ya que puede tener implicaciones considerables en cuanto a la integridad estructural de la probeta y su capacidad de resistencia ante las cargas aplicadas; como se puede observar en la **Ilustración 34** e **Ilustración 35**.

**Ilustración 34**

*Viga VI-03, posterior al ensayo de laboratorio.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

**Ilustración 35**

*Vista posterior viga VI-03.*

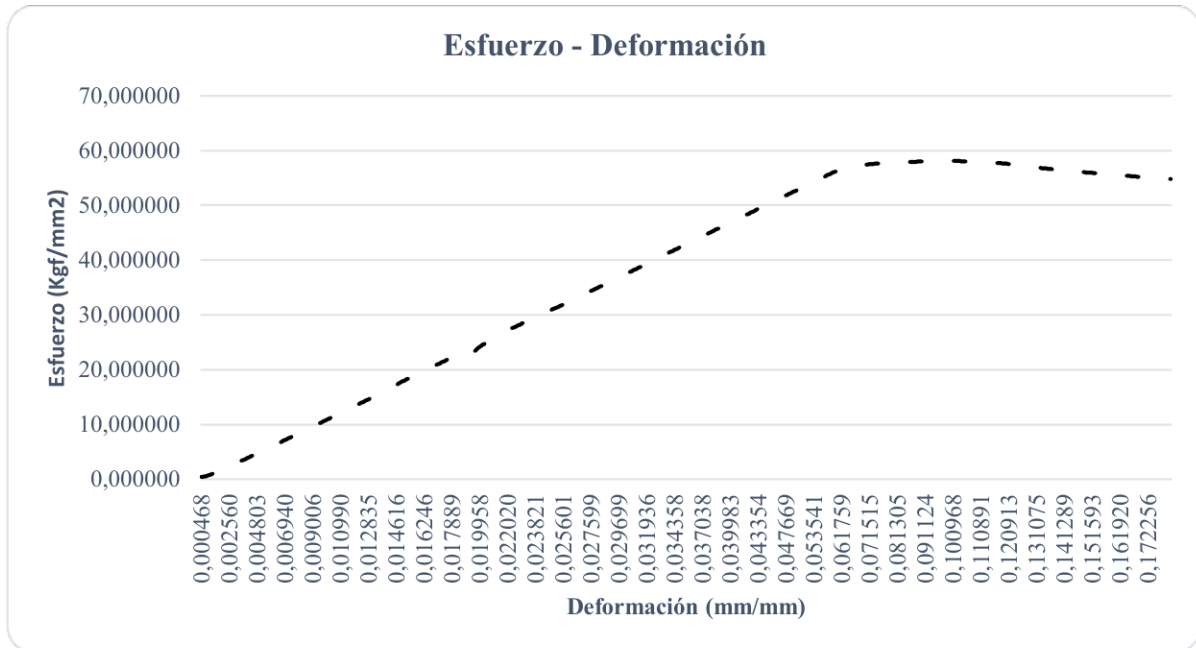


*Nota:* Elaborado por el autor.

En la **Ilustración 36** se comprueba el fracaso de la viga VI-03 por la parte posterior. También se puede distinguir el diagrama Esfuerzo – Deformación.

**Ilustración 36**

Gráfico Fuerza-Deformación viga VI-03.



Nota: Shimadzu Concreto 2000X, Laboratorio de Suelos Universidad Católica de Cuenca.

En el caso de la viga VI-04, la imperfección geométrica es el descuadre o falta de perpendicularidad entre las alas y el alma de la viga, se ha exagerado las dimensiones de falla; es decir, la norma (INEN-2231, 2013) indica claramente que el máximo valor de descuadre es del 3% del ancho del alma “3mm” -dimensión insignificante para nuestro caso de estudio-, razón por la cual -considerando la misma imperfección- se decide incrementar a 10 mm el valor del descuadre. En la **Ilustración 37** e **Ilustración 38** se puede observar lo señalado.

**Ilustración 37**

*Viga VI-04.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

**Ilustración 38**

*Sección transversal de viga VI-04*



*Nota:* Elaborado por el autor.

**Ilustración 39**

*Falla en el centro de la viga con rigidizador.*



*Nota:* Elaborado por el autor.

En la **Ilustración 39**, se apreciamos con claridad cómo la viga -incluyendo el rigidizador- ha experimentado una falla estructural notable, lo que refleja un fallo significativo en términos de resistencia y durabilidad. Es importante destacar que, una vez más, se aprecia la presencia del fenómeno aplastamiento tanto en el alma como en el rigidizador de la probeta, lo cual subraya la importancia crucial de estos elementos en la integridad estructural del componente. Por otro lado, en la **Ilustración 40**, se aprecia una minuciosa y exhaustiva revisión de la condición de la viga después de haber sido sometida al ensayo, lo que permite una evaluación detallada de los efectos de las cargas aplicadas durante el proceso de prueba, proporcionando información valiosa para el análisis y la mejora de futuros diseños estructurales.

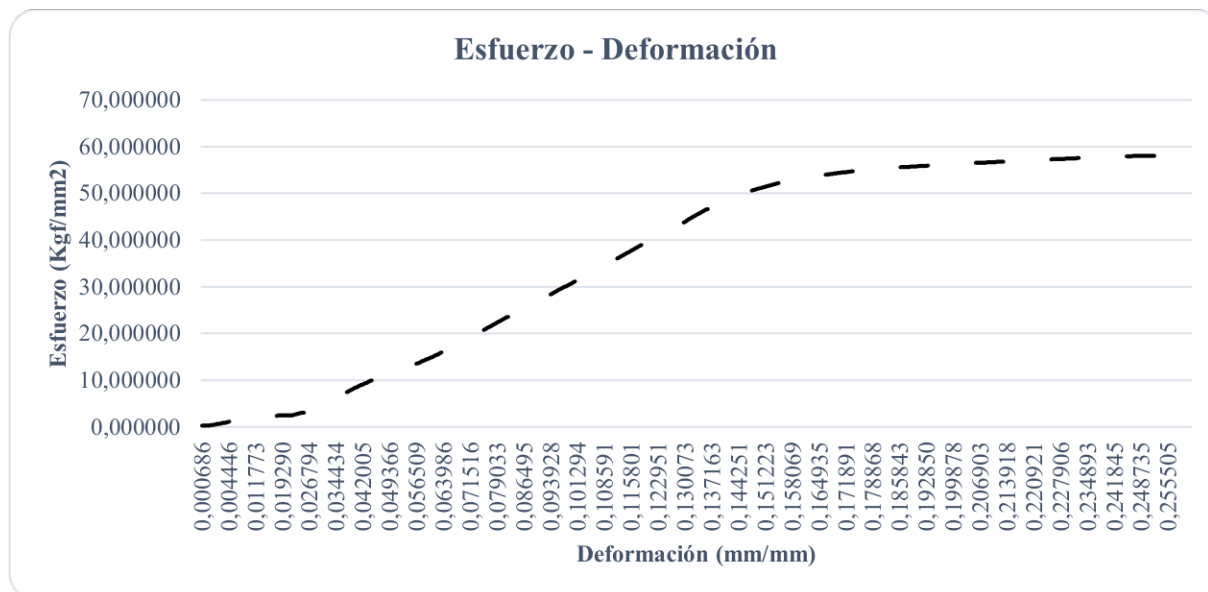
**Ilustración 40***Perspectiva de Viga VI-04*

*Nota:* Elaborado por el autor.

Durante la ejecución del ensayo de viga VI-04, se logra determinar con precisión una resistencia estructural de 8.750 kilogramos fuerza (equivalentes a 8.75 toneladas), lo cual sirve como un indicador de la capacidad de la probeta para resistir cargas externas. En el diagrama Esfuerzo-Deformación, presentado en la **Ilustración 41**, se ofrece una representación gráfica detallada del comportamiento mecánico de la viga durante el ensayo, este diagrama muestra claramente como varían los esfuerzos aplicados en relación con las deformaciones experimentadas por el material a medida que se incrementa la carga, así este riguroso análisis se entiende esencial para comprender a fondo la respuesta estructural de la viga ante diferentes condiciones de carga, proporcionándonos valiosa información que podría ser útil para diseños de estructura futuros.

## Ilustración 41

Gráfica Fuerza-Desplazamiento VI-04.



Nota: Elaborado por el autor.

### 4.3 Comparativa de resultados, Viga normal vs. Vigas con imperfecciones geométricas

Con el objeto de valorar las probetas descritas anteriormente, se presenta una valoración cuantitativa de los ejemplares construidos; tomando en consideración que para el muestreo se ha considerado un número reducido de ejemplares, como lo hace (Hernandez, 2022) en su artículo científico que tiene como título “RESPUESTA SISMICA DE CONEXIONES DE ACERO HACIA EL EJE MENOR DE LA COLUMNA”, entre otros.

Es importante destacar que, durante el proceso de fabricación de la viga, se obtuvieron resultados importantes respecto a la precisión para el dimensionamiento de la viga -probeta- que desprendía un dimensionamiento de 2mm para el alma, y 3mm para los patines, a pesar de esto, se obtuvo un -considerable- desplazamiento lateral en los extremos de los patines de la viga, luego se decidió colocar rigidizadores en el alma, uno en el centro de la viga y otros en los extremos, específicamente a 5 cm del borde, cuando se hizo el ensayo de esta viga, se pudo apreciar que en el centro del alma se presentó una importante deformación por aplastamiento entonces, se decidió incrementar el espesor del alma a 3 mm y adicionar rigidizadores

verticales, con espaciamentos equivalentes a 1 peralte del alma, a dos peraltes del alma y en el centro del elemento, el espesor de estos rigidizadores fue de 3 mm. Siendo esta la viga con la que finalmente se ensayaría identificándola como VI-0, viga que se ajustó al diseño deseado.

Tras una revisión exhaustiva de varias imperfecciones, se ha evidenciado que la resistencia del material propende a mostrar disminución en función del tipo de imperfección ensayada, llegando incluso a experimentar pérdidas de resistencia considerablemente significativa en determinados casos; Por otro parte, se ha corroborado que la soldadura por pasos -o continua- no presenta inconvenientes, siempre y cuando se observen cuidadosamente las normativas y estándares establecidos por la AWS (American Welding Society).

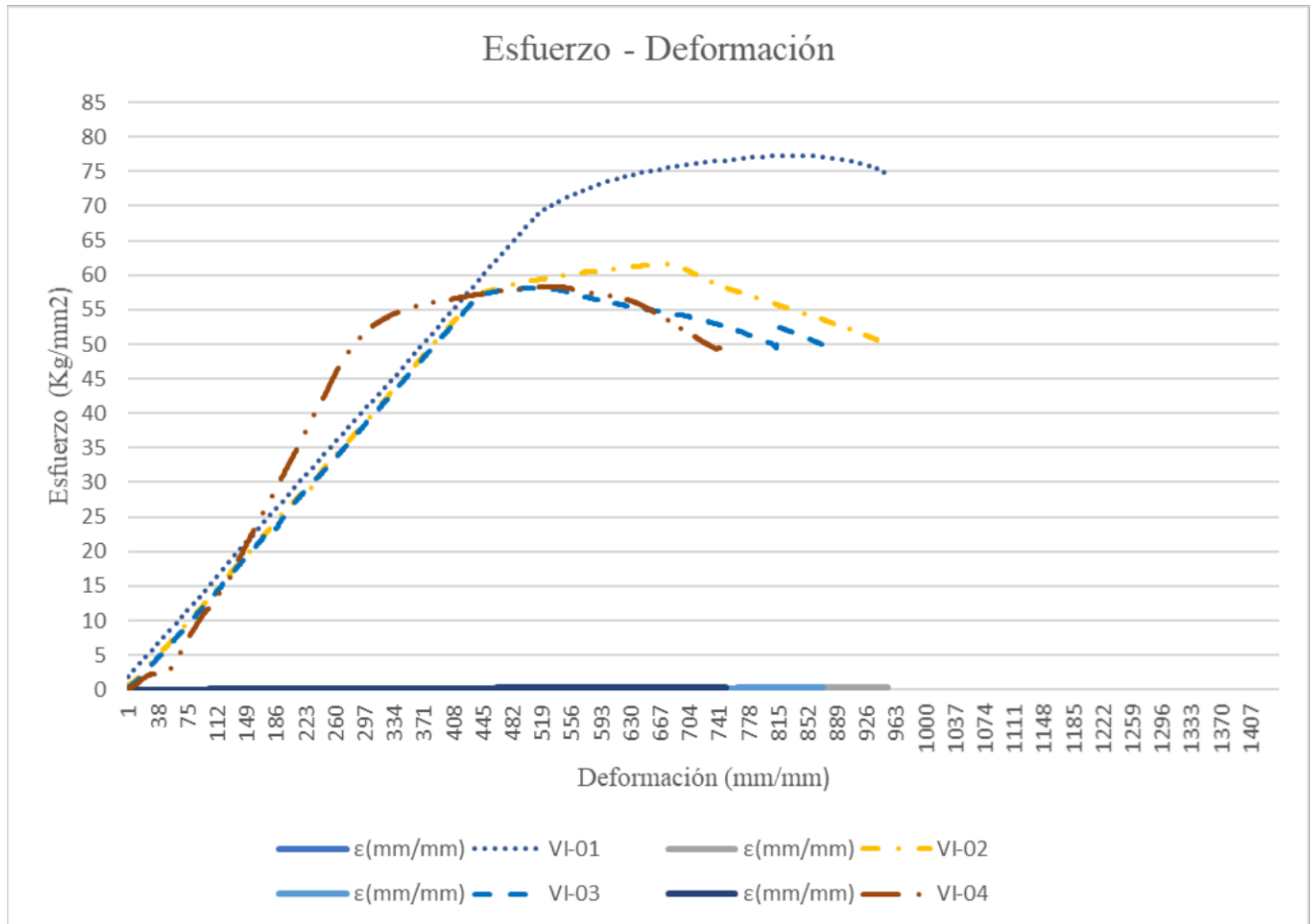
En el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca, las probetas han sido sometidas a una carga puntual controlada, y se ha observado como las diferentes imperfecciones producen variados tipos de falla y, sobre todo, como a causa de éstos los elementos estructurales van perdiendo su capacidad de resistencia.

La primera viga, identificada como VI-01, exhibe una resistencia nominal de 11.00 kgf, mientras que en el caso de la viga VI-03 se registra una resistencia de 8.710 kgf.

En relación con la viga VI-03, es importante destacar que esta fue expuesta a un calentamiento excesivo, lo que resultó en una deformación sinuosa notable en el alma de la viga. Esta deformación estructural significativa, provocada por el calor, contribuyó directamente a una reducción sustancial en la resistencia de la viga durante los ensayos de laboratorio. En la *Ilustración 42* se aprecia una comparación de los diferentes esfuerzos y deformaciones producidas por las probetas durante el ensayo.

### Ilustración 42

Comparación de esfuerzos y deformaciones producidas por las probetas.



Nota: Elaborado por el autor.

#### 4.4 Interpretación de Resultados

El trabajo de diseño y construcción de un elemento estructural (probeta), el ejercicio de una investigación fundada en el empirismo y respaldada con el análisis cuantitativo de los elementos estructurales expuestos, han demostrado que las imperfecciones geométricas en la fabricación de estructuras decremantan notablemente la capacidad estructural de las probetas ensayadas, en definitiva, las fallas geométricas incrementan la posibilidad de fracaso estructural.

#### 4.4.1 Gráfico de Pandeo Lateral Torsional

Para efectos de la ejecución de la *Ilustración 43* es preciso obtener los valores correspondientes al  $L_p$ ,  $L_r$  y  $L_b$ ; donde:

$L_p$  es la longitud de la meseta, que muestra la máxima resistencia que posee la viga en estudio, donde no hay inestabilidad.

$L_r$ , es la longitud donde se indica una pérdida de resistencia, estando limitada entre  $L_p$  y  $L_r$ ; formando la zona inelástica.

$L_b$ , es la longitud máxima no soportada, convirtiéndose en la zona elástica.

En el contexto de este estudio, se encuentra que la viga en consideración se sitúa dentro de la región elástica, lo cual indica que aún no ha alcanzado su límite de resistencia. Para abordar esta situación, se contempla la aplicación de rigidizadores en la zona central de la viga. Esta medida tiene como objetivo reducir la longitud no arriostrada del elemento estructural, lo que potencialmente mejora de manera significativa su capacidad resistente.

Como consecuencia de esta intervención, la viga transita hacia la región inelástica, donde se espera una mayor capacidad de carga antes de alcanzar el punto de falla.

Para la obtención de los valores, se extraído las ecuaciones recomendadas por la (AISC, 2016).

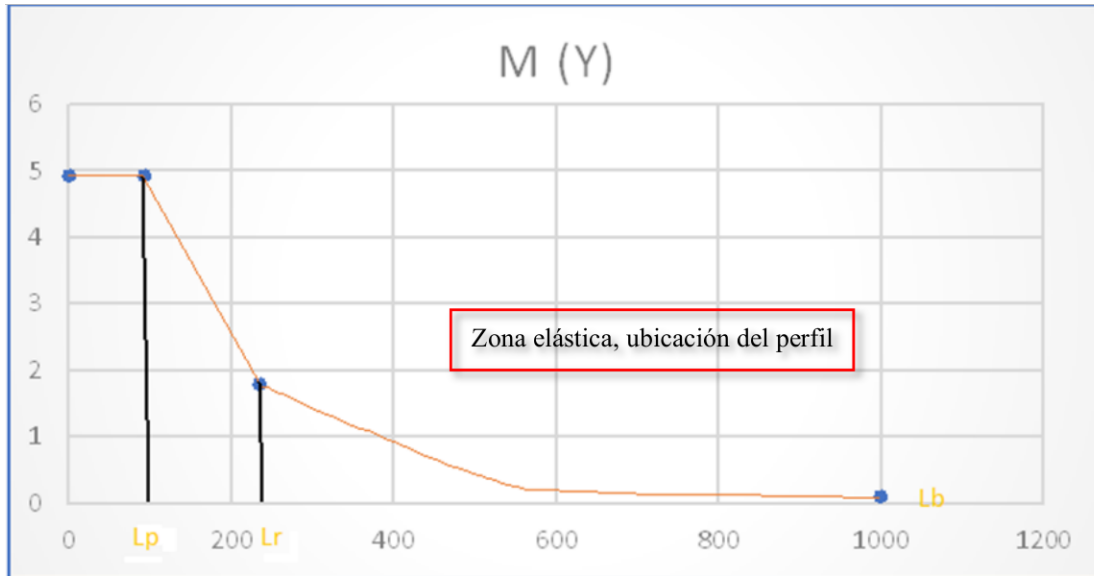
En la *Tabla 15*, se aprecia los puntos determinados para trazar la gráfica.

**Tabla 15**

*Valores para grafico de PLT.*

<b>L(X)</b>	<b>M(Y)</b>
0,000	4,915
92,764	4,915
234,837	1,799
1000,000	0,100

*Nota:* Elaborado por el autor.

**Ilustración 43***Pandeo Lateral Torsional*

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 5 Capítulo

### Conclusiones y recomendaciones.

#### 5.1 Conclusiones

Para el diseño de los especímenes se ha considerado secciones tipo I armadas en taller mediante el empalme con flejes a una carga de diseño (10 toneladas métricas). El cálculo arrojó elementos para patines de 100x6mm y alma de 100x3mm, las uniones se ejecutaron mediante el proceso MIG/MAG, con electrodo ER70S6; para el cálculo de la compacidad, se realizó de acuerdo con AISC 2022 y a la sección 11 de la NEC-2015, concluyendo que la sección es compacta y no presenta pandeo lateral torsional.

El proceso de construcción de la primera probeta se llevó a cabo conforme a las directrices del American Welding Society (AWS) y el American Institute of Steel Construction (AISC), siguiendo normativas internacionales, así como la NEC-SE-AC 2014 a nivel nacional. Este enfoque riguroso ha resultado en un producto de alta calidad, caracterizado por su tenacidad y resistencia. Para fines de análisis, este producto se ha designado como VI-01. Es crucial destacar que las imperfecciones geométricas consideradas incluyen el descentramiento alma-patín (VI-02), el exceso de calor en el alma (VI-03) y la falta de perpendicularidad alma-patín (VI-04).

Como resultado de los ensayos realizados en las diferentes probetas, se ha identificado una notable degradación en la capacidad resistente de cada uno de los elementos estructurales afectados por imperfecciones geométricas. La probeta más severamente afectada es la VI-03, con una reducción del 24.94% debido a la sobrecarga térmica durante el proceso de ensamblaje, ocasionando una deformación ondulatoria del alma con respecto a los patines. En segundo lugar, se encuentra la falta de perpendicularidad entre el alma y los patines, con una merma del

24.59% en su resistencia nominal. Finalmente, el descentramiento del alma muestra una disminución del 20.46%. Es crucial subrayar que todas las pérdidas son significativas y no serían aceptables en aplicaciones estructurales en obras civiles, dado que comprometerían el diseño original y afectarían de manera sustancial tanto la resistencia local como la integridad estructural global.

En las ilustraciones se puede observar claramente el comportamiento distintivo de cada una de las probetas, destacando de manera evidente las pérdidas de resistencia asociadas a las imperfecciones geométricas presentes en cada una de ellas.

## **5.2 Recomendaciones**

El ámbito de las estructuras de acero ofrece una amplia gama de posibilidades para la realización de diversos tipos de ensayos, que van desde la evaluación de la resistencia hasta el análisis del comportamiento estructural en condiciones adversas. Durante esta investigación, surgen interrogantes de gran relevancia técnica como, por ejemplo: ¿por qué, en el caso de una viga con falta de perpendicularidad, el alma no se despega de los patines?

La soldadura, como única responsable de absorber toda la carga actuante en estas circunstancias, plantea desafíos significativos en el ámbito de la ingeniería estructural, la comprensión de estos fenómenos requiere un análisis meticuloso de los mecanismos de unión, la distribución de esfuerzos y la capacidad de carga de los elementos estructurales.

La exploración de estos temas en el laboratorio proporciona una invaluable oportunidad para mejorar la comprensión de los fenómenos físicos involucrados en el comportamiento de las estructuras de acero y contribuye al avance continuo en el diseño y la ingeniería de infraestructuras fundamentales.

Es bien sabido que todo está investigado y analizado; sin embargo, de aquello mi principal recomendación, sería la de profundizar la investigación empírica para el entendimiento de fenómenos físicos en el campo estructural, tomando en consideración que es la academia la llamada nacionalizar la investigación extranjera aterrizándola en nuestra realidad nacional.

## 6 Bibliografía

*Acocil*. (18 de Octubre de 2023). Obtenido de Vigas soldadas Acocil: <http://acocil.com.br/>

AHMSA. (1996). *MANUAL DE DISEÑO PARA LA FABRICACION CON ACERO*. Mexico: ahmsa.

AISC. (2016). *Especificaciones para Construcciones de Acero*. 2010: American Institute of Steel Construction.

AWS. (2020). *Structural Welding Code-Steel*. Miami: LeJeune Road.

AZERO, G. (2013). *Manual de Diseño para la Construcción con Acero*. MEXICO: N/A.

Basset Salom, L. (. (n/a de n/a de 2021). *Patología de las Estructuras*. Valencia: Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Blanco, J. C. (n/a). *Estructuras de Acero*. La Mancha: Universidad de Castilla.

C.P.E.A. (2012). *INSTRUCCIÓN DE ACERO ESTRUCTURAL*. MADRID: CENTRO DE PUBLICACIONES SECRETARIA GENERAL TÉCNICA DEL MINISTERIO DE FOMENTO.

CADCAMCAE. (n/a de n/a de 2020). *3DCadPortal*. Obtenido de N/A: <https://www.3dcadportal.com/abaqus-simulia.html>

Cevallos, D. P. (N/A de N/A de 2022). *DISEÑO SISMORESISTENTE DE UNA ESTRUCTURA METALICA PARA UNA VIVIENDA DE DOS PLANTAS CON UN AREA DE CONSTRUCCION DE 125 M<sup>2</sup> UBICADA EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA SEGUN NORMA NEC-15. TESIS DISEÑO SISMORESISTENTE DE UNA ESTRUCTURA METALICA PARA UNA VIVIENDA DE DOS PLANTAS CON UN AREA DE CONSTRUCCION DE 125 M<sup>2</sup> UBICADA EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA SEGUN NORMA NEC-15*. QUITO, PICHINCHA, ECUADOR: Universidad Politecnica Salesiana Sede Quito- Carrera de Ingenieria Mecanica.

- Clement, G. V. (2004). *ESTRUCTURAS DE ACERO*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Cook, R. D. (1995). *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. New York: JHON WILEY & SONS, INC.
- Hernandez, A. S. (2022). RESPUESTA SISMICA DE CONEXIONES DE ACERO HACIA EL EJE MENOR DE LA COLUMNA. *Revista de Ingenieria Sismica Nro. 109*, 92-109, 18.
- Ibrahim, D. S. (2019). Lateral Torsional Buckling of Web-Tapered Steel Beams. *ResearchGate*, 93.
- INEN-2231. (2013). *PERFILES ESTRUCTURALES I DE ACERO LAMINADOS EN CALIENTE (SERIE IPN). REQUISITOS*. Quito: INEN.
- McCormac, J. C. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero*. Mexico: Alfaomega.
- McCormac, J. C. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. Mexico: Alfaomega.
- Miserere, M. A. (N/A de N/A de 2017). PANDEO DE PERFILES DE PARED DELGADA. *PANDEO DE PERFILES DE PARED DELGADA*. Córdoba, Andalucía, España: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRICISTA.
- NEC-SE-AC. (2014). *Estructuras de Acero*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Rossi, A., Vendramell Ferreira, F. P., Martins, C. H., & Masacasa, E. (Marzo de 2020). Assessment of lateral distortional buckling resistance in welded I - beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 33.
- Silva de Carvalho, A., Rossi, A., & Martins, C. H. (2022). Assessment of lateral-torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. *Thin-Walled Structures*, 41.

Smith, J. C. (1996). *Structural Steel Design*. North Carolina State University: John Wiley & Sons, Inc.


Troglia, G. (2010). *ESTRUCTURAS METALICAS PROYECTO POR ESTADOS LIMITES*. Cordova : Brujas.

Yu, W.-W., & LaBoube, R. (2010). *Cold Formed Steel Design*. New Jersey: WILEY John Wiley and Sons, Inc.

**AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Yo, Francisco Alciviades Buñay Reinoso portador de la cédula de ciudadanía N.º 0301489720. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio de la Influencia de imperfecciones geométricas en el comportamiento de perfiles tipo I (armados)" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de septiembre de 2024

F:   
Francisco Alciviades Buñay Reinoso  
0301489720