



**UNIVERSIDAD LATINA  
DE COSTA RICA**

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingeniería y Tecnologías de Información

Escuela de Ingeniería Civil

Licenciatura en Ingeniería Civil

Trabajo final de graduación para optar al grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil,  
modalidad tesis.

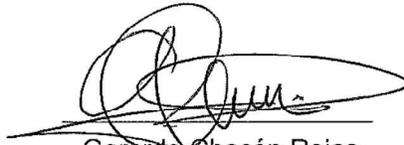
**Evaluación de las condiciones de estabilidad de estructuras de marcos de naves  
industriales en diferentes etapas constructivas.**

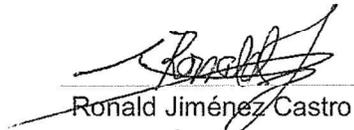
Autor: Fabricio Madrigal Cabezas

**Heredia, 18 de agosto del 2023**

## TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Evaluación de las condiciones de estabilidad de estructuras de marcos de naves industriales en diferentes etapas constructivas, por el (la) estudiante: Fabricio Madrigal Cabezas, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

  
Gerardo Chacón Rojas  
Tutor

  
Ronald Jiménez Castro  
Lector

  
Luis Alejandro Carvajal Soto  
Representante de la Escuela

## **DECLARACION JURADA**

Yo, Fabricio Madrigal Cabezas estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual de la Tesis titulado: Evaluación de las condiciones de estabilidad de estructuras de marcos de naves industriales en diferentes etapas constructivas.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Heredia, Costa Rica, 12 de setiembre de 2023

Fabricio Madrigal Cabezas

**Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)**  
**Universidad Latina de Costa Rica**

<b>Yo (Nosotros):</b>	Fabricio Madrigal Cabezas
<b>De la Carrera / Programa:</b>	Licenciatura en ingeniería civil
<b>Modalidad de TFG:</b>	Tesis
<b>Titulado:</b>	Evaluación de las condiciones de estabilidad de estructuras de marcos de naves industriales en diferentes etapas constructivas.

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “**AUTOR**”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “**OBRA**”). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “**UNIVERSIDAD**”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD** **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD.**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD.** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 9 de 12 de 2023 a las 23:00

Firma del estudiante(s):

## CARTA DE FILÓLOGA

Heredia, 28 de agosto de 2023

Señores (as)

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería y Tecnologías de Información

Universidad Latina de Costa Rica

Estimado Señor (as)

Por este medio, la suscrita Edith Raissa Pizarro Alfaro, cédula 401780133 miembro activo del Colypro bajo el número 35554, doy fe de haber corregido exhaustivamente el proyecto titulado: **“Evaluación de las condiciones de estabilidad de estructuras de marcos de naves industriales en diferentes etapas constructivas.”**, que estuvo a cargo del estudiante **Fabricio Madrigal Cabezas**, con respecto a los siguientes aspectos:

1. Lexicografía, morfología, fondo y forma en su totalidad.
2. Uso correcto de las preposiciones.
3. Usos lingüísticos de los signos de puntuación, interrogación y exclamación.
4. Los solecismos, barbarismos, cacofonías, anfibologías, monotonía del lenguaje, redundancia, pleonasmos y la ortografía.

Por tanto, doy fe que este proyecto contiene un fondo claro y preciso de la propuesta expresada en el mismo, con ideas correctas, que mantienen el hilo conductor a lo largo del documento.

Atentamente,

Firmado por EDITH RAISSA PIZARRO ALFARO (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-04-0178-0133. Fecha declarada: 28/08/2023 04:45 PM  
Esta representación visual no es una fuente de confianza, valide siempre la firma.

---

Lcda. Edith Raissa Pizarro Alfaro

Código 35554

## AGRADECIMIENTOS

Primero y, ante todo, deseo expresar mi más profunda gratitud a Dios, fuente de toda sabiduría y entendimiento, por darme la fortaleza y la perseverancia necesarias para concluir este desafío académico.

A mi querida familia, pilar fundamental en cada etapa de mi vida, gracias por su amor incondicional, su apoyo y paciencia durante todo este tiempo. Han sido la inspiración y motivación detrás de cada página de este trabajo. Cada conversación, cada palabra de aliento, ha sido el combustible que alimentó mis días más difíciles y celebró mis triunfos más grandes.

Mi sincero agradecimiento al Ing. Gerardo Chacón, mi tutor, por su guía, paciencia y experticia. Su apoyo y dirección han sido cruciales para la culminación de esta tesis. A través de sus enseñanzas y consejos, he crecido no solo como profesional, sino también como individuo. Es una fortuna haber contado con un mentor de su calibre.

A la Escuela de Ingeniería, agradezco por proporcionarme las herramientas, conocimientos y oportunidades que han sido esenciales en mi formación profesional. Esta institución ha sido mi hogar académico, un lugar donde he forjado amistades, enfrentado desafíos y consolidado mi pasión por la ingeniería.

Finalmente, a todos mis amigos y compañeros que compartieron este viaje conmigo: gracias por cada momento de estudio, por cada risa, por cada consejo y por cada debate constructivo. Juntos, hemos enfrentado desafíos, superado obstáculos y aprendido el uno del otro, fortaleciendo no solo nuestra formación académica sino también nuestra hermandad.

Cada uno de ustedes ha dejado una huella indeleble en mi vida y en este proyecto. Que este trabajo no solo refleje mi esfuerzo, sino también el amor, el apoyo y la dedicación de cada uno de ustedes que estuvo a mi lado en este camino.

## Resumen

En esta investigación se evaluó las condiciones de estabilidad a la que se ven sometidos los marcos de las naves industriales en la primera etapa de montaje, específicamente se valoró cómo actúa el pandeo lateral torsional al que se ven sometidas las vigas en los marcos de la nave industrial en esta etapa.

Para lo cual se modeló una réplica de un caso real en el que se identificó el problema del pandeo su geometría se basa en una nave industrial con 4 marcos de acero, separados a cada 10 metros de centro a centro con una geometría de 40 m de ancho, una longitud total de 30 m y una altura al codo de 8.5 m, con una cubierta a 2 aguas con una pendiente del 7%.

En, los marcos se utilizaron secciones W compactas laminadas a partir de acero ASTM A 992 (Gr 50), para las riostras y vigas de amarre tubos laminados en frío Gr 33, y tensoras de techo con barras lisas Gr 60.

Posteriormente se realizó el análisis y diseño estructural de una nave industrial en el que, en primera instancia, se diseñó un marco en dos dimensiones, seguidamente de un modelo en tres dimensiones donde se evaluó el diseño sísmico y diseño por viento según las normativas nacionales; para posteriormente analizar el pandeo lateral torsional en el marco de la nave industrial en su etapa de ensamblaje, mediante el programa de análisis de elemento finito SAP 2000.

En la investigación, se determinó que al realizar el diseño de una nave industrial se debe elaborar un análisis previo a los primeros marcos a ensamblar o marcos internos, ya que estos carecen del aporte de resistencia considerado por los demás elementos de la estructura en conjunto. Lo anterior para evitar deformaciones plásticas o inelásticas que puedan ocurrir en las vigas de estos marcos.

Además, se determinó que mediante este análisis se debe considerar cómo dar soporte a la estructura provisionalmente ya sea mediante apuntalamientos o con sujetadores en sus patines inferiores y superiores.

## **Abstract**

The stability conditions to which the frames of industrial warehouses are subjected during the first stage of assembly were evaluated. In this research specifically, the effect of lateral-torsional buckling on the beams of the warehouse frames during this phase was assessed.

For this purpose, an industrial warehouse with four steel frames was modeled, spaced every 10 meters from center to center with a width of 40 m, a total length of 30 m, and a height to the eave of 8.5 m. The roof was designed with a double slope with a 7% gradient. These dimensions were selected to approach a real case building in which this case of failure was observed

For the frames, compact W sections were used, made of ASTM A 992 steel (Gr 50). Cold-formed tubes Gr 33 were used for the braces and tie beams, and Gr 60 smooth bars were used for the roof tensioners.

Subsequently, the structural analysis and design of an industrial warehouse were carried out. Initially, a two-dimensional frame was designed, followed by a three-dimensional model in which the seismic and wind designs were evaluated according to national regulations. The lateral-torsional buckling in the warehouse frame during its assembly stage was then analyzed using the SAP 2000 finite element analysis program.

The research found that when designing an industrial warehouse, a preliminary analysis of the first frames to be assembled or internal frames should be carried out. This is because they lack the resistance contribution considered by the other elements of the structure as a whole. This is crucial to prevent plastic or inelastic deformations that may occur in the beams of these frames.

Furthermore, it was determined that this analysis should consider how to provisionally support the structure, either through temporary struts or by using fasteners on their lower and upper flanges.

## Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. Introducción .....	15
1.1 Antecedentes .....	15
1.1.1 Antecedentes internacionales .....	15
1.1.2 Antecedentes nacionales.....	17
1.1.2.1 Investigaciones académicas. ....	18
1.2 Planteamiento del problema.....	20
1.3 Objetivo general .....	21
1.4 Objetivos específicos.....	21
1.5 Justificación.....	21
1.6 Alcances y limitaciones.....	22
1.6.1 Alcances.....	22
1.6.2 Limitaciones .....	22
1.7 Impacto.....	22
1.8 Hipótesis.....	23
CAPÍTULO 2. Marco teórico .....	23
2.1 Estructuras.....	23
2.2 Naves industriales .....	24
2.3 El acero como material estructural.....	25
2.3.1 Ventajas y desventajas del acero .....	25
2.3.1.1 Ventajas y propiedades mecánicas del acero. ....	25
2.3.1.2 Desventajas del acero.....	26
2.3.2 Clases y tipos de aceros estructurales.....	27
2.3.2.1 Denominación de productos de acero .....	28
2.3.3 Acciones que afectan a las estructuras de acero .....	29
2.3.3.1 Acciones Permanentes. ....	30
2.3.3.2 Acciones variables. ....	30
2.3.3.3 Acciones ambientales.....	30
2.4 Marcos de naves industriales.....	30
2.4.1 Marcos arriostrados y no arriostrados .....	30
2.5 Miembros cargados axialmente a compresión .....	31

2.5.1	Consideraciones para el diseño y comportamiento de miembros cargados axialmente a compresión en relación al pandeo lateral torsional.....	32
2.6	Miembros sujetos a fuerzas de tensión.....	32
2.7	Miembros sometidos a fuerzas de flexión.....	33
2.8	Elementos sometidos a fuerzas de flexión y compresión combinadas.....	35
2.9	Métodos de diseño para elementos de acero .....	35
2.9.1	Diseño Con Factores De Carga y Resistencia (LRFD) - Load and Resistance Factor Desing	36
2.10	Elementos a tracción.....	36
2.10.1	Modos de falla. ....	38
2.10.1.1	Área neta ( $A_n$ ).....	39
2.10.1.2	Área Neta Efectiva ( $A_e$ ).....	40
2.10.1.3	Resistencia a la tracción.....	41
2.10.1.4	Estado límite de fluencia en la sección bruta.....	42
2.10.1.5	Fractura a tracción en la sección neta en la que se encuentran los agujeros de tornillo.	42
2.10.1.6	Bloque de cortante. ....	42
2.11	Elementos a compresión.....	43
2.11.1	Esfuerzos residuales .....	44
2.11.2	Formas de pandeo .....	44
2.11.3	Ecuación de Euler.....	44
2.11.4	Restricción de los extremos y longitud efectiva.....	45
2.11.5	Propiedades de los elementos a compresión.....	46
2.11.6	Resistencia a compresión.....	47
2.11.7	Diseño por flexión .....	48
2.12	Pandeo lateral torsional .....	50
2.12.1	Pandeo lateral torsional en vigas y columnas.....	53
2.12.2	Diseño para esfuerzos combinados y su impacto en el pandeo lateral torsional .....	54
2.13	Análisis Sísmico .....	55
2.13.1	Método Estático .....	55
2.13.1.1	Desplazamiento y Derivas .....	57
2.13.1.2	Zonificación Sísmica .....	57
2.13.2	Sitios de Cimentaciones.....	57

2.13.3	Aceleración Pico Efectiva y Coeficiente Sísmico .....	57
2.13.4	Cargas Sísmicas .....	57
2.14	Cargas de Viento .....	58
2.14.1	Código Nacional de Vientos de Costa Rica.....	58
2.15	Método de Elementos Finitos (MEF) .....	58
2.16	Aplicación del Método de Elementos Finitos y Valores Propios en SAP2000.....	59
CAPÍTULO 3. Marco Metodológico.....		60
3.1	Paradigma, enfoque metodológico y métodos de investigación. ....	61
3.1.1	Paradigma positivista.....	61
3.2	Enfoque metodológico cuantitativo. ....	61
3.3	Método de investigación. ....	61
3.4	Identificación de variables. ....	61
3.4.1	Geometría de la Estructura. ....	62
3.4.2	Materiales Utilizados.....	62
3.4.3	Cargas Aplicadas. ....	62
3.4.4	Condiciones de Apoyo y Restricciones.....	62
3.4.5	Cargas de Viento. ....	62
3.4.6	Efectos de Temperatura. ....	62
3.4.7	Cambios en la Configuración. ....	62
3.4.8	Evaluación de Torsión. ....	62
3.4.9	Capacidad de Diseño. ....	63
3.4.10	Análisis Numérico y Modelado.....	63
3.4.11	Normativas y Códigos. ....	63
3.5	Categorías de análisis de la investigación. ....	64
3.6	Población y muestra. ....	65
3.7	Técnicas de muestreo. ....	66
3.8	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	66
3.9	Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos. ....	66
3.10	Modelos de ecuaciones simultáneas (SIM). ....	67
3.11	Análisis de datos longitudinales. ....	67
CAPÍTULO 4. Análisis y resultados .....		68
4.12	Geometría y Ubicación de la Nave Industrial .....	68

4.13	Descripción de los Materiales Utilizados .....	69
4.14	Consideraciones del código sísmico de Costa Rica CSCR-10 .....	70
4.14.1	Zonificación Sísmica .....	70
4.14.2	Sitio de Cimentación .....	70
4.14.3	Aceleración Pico Efectiva de Diseño .....	70
4.14.4	Coeficiente Sísmico .....	70
4.14.4.1	Clasificación de Edificación Según Importancia .....	70
4.14.4.2	Factor Espectral Dinámico (FED) y Ductilidad .....	71
4.14.4.3	Estimación del periodo de los primeros modos de vibración .....	71
4.14.5	Cálculo del peso sísmico .....	71
4.14.5.1	Cálculo del coeficiente sísmico .....	73
4.14.6	Cálculo del cortante basal <b>V<sub>b</sub></b> .....	74
4.14.7	Cálculo de fuerzas sísmicas .....	75
4.14.8	Análisis de Derivas Estructurales .....	76
4.14.9	Cálculo del Periodo Fundamental de Vibración utilizando el Método Estático .....	79
4.15	Presión básica del viento .....	81
4.15.1	Cálculo de cargas de viento de resistencia. ....	81
4.15.2	Lineamiento técnico para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica. ....	82
4.15.3	Presión de viento: .....	84
4.15.3.1	Presión básica del viento: .....	84
4.15.3.2	Coeficiente de exposición: .....	85
4.15.3.3	Coeficiente de exposición: .....	86
4.15.3.4	Coeficiente de direccionalidad: .....	88
4.15.3.5	Coeficiente de direccionalidad: .....	89
4.15.3.6	Coeficiente de presión interna. ....	89
4.15.3.7	Factor de forma (presión externa) .....	90
4.15.3.7.1	Coeficiente de Presión Externa. ....	90
4.15.4	Combinaciones para obtener la carga última de diseño o resistencia requerida: .....	94
4.15.5	Cálculo de cargas viento de servicio. ....	95
4.15.6	Coeficiente de recurrencia Heredia, Centro (Servicio) .....	96
4.15.7	Límites de desplazamientos y derivas: .....	98
4.16	Diseño de Marco de Acero usando el Método LRFD .....	99

4.16.1	Consideraciones de Carga en el Diseño del Marco de Acero.....	101
4.16.2	Diseño de columna .....	102
4.16.2.1	Especificaciones del Diseño: .....	102
4.16.3	Diseño de vigas.....	107
4.16.3.1	Especificaciones del Diseño: .....	107
4.16.3.2	Soporte lateral .....	109
4.16.3.3	Caso I. Comportamiento de plastificación Fluencia.....	109
4.16.3.4	Caso II. Pandeo lateral torsional inelástico.....	110
4.16.3.5	Valores de momento nominal para caso II - Zona II Pandeo lateral inelástico ....	110
4.16.3.6	Caso III. Pandeo lateral torsional elástico.....	111
4.16.4	Análisis de pandeo en el marco mediante elementos finitos en sap2000.....	122
4.16.4.1	Factor de Carga Crítica de Pandeo en SAP2000: .....	123
4.16.4.1.1	Refuerzo y Mejora de la Estabilidad Lateral.....	124
5.	Conclusiones.....	130
6.	Recomendaciones .....	131
	Bibliografía .....	132
	Glosario.....	133

### Índice de figuras

<b>Figura 1</b> .....	28
<b>Figura 2</b> .....	29
<b>Figura 3</b> .....	37
<b>Figura 4</b> .....	39
<b>Figura 5</b> .....	39
<b>Figura 6</b> .....	40
<b>Figura 7</b> .....	43
<b>Figura 8</b> .....	46
<b>Figura 9</b> .....	69
<b>Figura 10</b> .....	76
<b>Figura 11</b> .....	77
<b>Figura 12</b> .....	78
<b>Figura 13</b> .....	78
<b>Figura 14</b> .....	84
<b>Figura 15</b> .....	100
<b>Figura 16</b> .....	101

<b>Figura 17</b> .....	105
<b>Figura 18</b> .....	117
<b>Figura 19</b> .....	119
<b>Figura 20</b> .....	120
<b>Figura 21</b> .....	121
<b>Figura 22</b> .....	123
<b>Figura 23</b> .....	125
<b>Figura 24</b> .....	126
<b>Figura 25</b> .....	127
<b>Figura 26</b> .....	128

### Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> .....	36
<b>Ecuación 2</b> .....	37
<b>Ecuación 3</b> .....	40
<b>Ecuación 4</b> .....	40
<b>Ecuación 5</b> .....	40
<b>Ecuación 6</b> .....	41
<b>Ecuación 7</b> .....	42
<b>Ecuación 8</b> .....	42
<b>Ecuación 9</b> .....	42
<b>Ecuación 10</b> .....	44
<b>Ecuación 11</b> .....	45
<b>Ecuación 12</b> .....	49
<b>Ecuación 13</b> .....	49
<b>Ecuación 14</b> .....	51
<b>Ecuación 15</b> .....	51
<b>Ecuación 16</b> .....	55
<b>Ecuación 17</b> .....	56
<b>Ecuación 18</b> .....	56
<b>Ecuación 19</b> .....	73
<b>Ecuación 20</b> .....	74
<b>Ecuación 21</b> .....	75
<b>Ecuación 22</b> .....	76
<b>Ecuación 23</b> .....	79
<b>Ecuación 24</b> .....	80
<b>Ecuación 25</b> .....	85
<b>Ecuación 26</b> .....	86
<b>Ecuación 27</b> .....	87
<b>Ecuación 28</b> .....	89
<b>Ecuación 29</b> .....	98
<b>Ecuación 30</b> .....	109

<b>Ecuación 31</b> .....	109
<b>Ecuación 32</b> .....	110
<b>Ecuación 33</b> .....	110
<b>Ecuación 34</b> .....	112

### Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> .....	64
<b>Tabla 2</b> .....	71
<b>Tabla 3</b> .....	82
<b>Tabla 4</b> .....	82
<b>Tabla 5</b> .....	87
<b>Tabla 6</b> .....	88
<b>Tabla 7</b> .....	90
<b>Tabla 8</b> .....	91
<b>Tabla 9</b> .....	91
<b>Tabla 10</b> .....	92
<b>Tabla 11</b> .....	92
<b>Tabla 12</b> .....	93
<b>Tabla 13</b> .....	94
<b>Tabla 14</b> .....	94
<b>Tabla 15</b> .....	96
<b>Tabla 16</b> .....	97
<b>Tabla 17</b> .....	98
<b>Tabla 18</b> .....	98
<b>Tabla 19</b> .....	102
<b>Tabla 20</b> .....	103
<b>Tabla 21</b> .....	103
<b>Tabla 22</b> .....	103
<b>Tabla 23</b> .....	104
<b>Tabla 24</b> .....	107
<b>Tabla 25</b> .....	108
<b>Tabla 26</b> .....	108
<b>Tabla 27</b> .....	109
<b>Tabla 28</b> .....	110
<b>Tabla 29</b> .....	110
<b>Tabla 30</b> .....	110
<b>Tabla 31</b> .....	112
<b>Tabla 32</b> .....	113
<b>Tabla 33</b> .....	116
<b>Tabla 34</b> .....	118

<b>Tabla 35</b> .....	118
<b>Tabla 36</b> .....	118

## CAPÍTULO 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

#### 1.1.1 Antecedentes internacionales

El estudio de los métodos de diseño estructural ha evolucionado a lo largo de los años, y la evaluación de la estabilidad de las estructuras ha sido un aspecto central en el diseño de marcos y naves industriales, así los enfoques clásicos de análisis de estructuras y la aplicación de la teoría de pandeo, han sentado las bases para las metodologías actuales.

La formulación elástica de la rigidez de los elementos de sección variable fue evolucionando con el tiempo, así por ejemplo en la publicación de las tablas de la PCA, merecen mención los siguientes trabajos que se basan en la teoría de vigas:

- Just (1977): fue el primero en proponer una formulación rigurosa para elementos de sección variable de secciones transversales cajón e I, basado en la teoría clásica de vigas Bernoulli-Euler para elementos bidimensionales, sin incluir deformaciones axiales.
- Schreyer (1978): propuso una teoría más rigurosa de vigas para elementos de variación lineal, en la cual se introducen las hipótesis generalizadas de Kirchhoff para tomar en cuenta las deformaciones por cortante.
- Medwadowski (1984): resolvió el problema de flexión en vigas de cortante no prismática utilizando la teoría de cálculo variacional.
- Brow (1984); presentó un procedimiento donde se utilizan funciones de interpolación consistentes con la teoría clásica de vigas y el principio de trabajo virtual para definir matrices de rigidez de elementos de sección variable.

Estos trabajos han contribuido al avance de la teoría elástica y la comprensión de los efectos de la sección variable en las estructuras, lo que mejora la evaluación de la estabilidad.

Específicamente con respecto al pandeo lateral torsional, actualmente existen libros especializados como "Introduction to the Mechanics of Structures and Structural Stability" de Boreasi y Schmidt, y documentos relacionados con el tema publicados por asociaciones y organizaciones como la American Institute of Steel Construction (AISC) los cuales ofrecen

información extensa acerca del pandeo lateral torsional (LTB), desde sus teorías fundamentales hasta su aplicación práctica.

El American Institute of Steel Construction (AISC), es una organización estadounidense sin fines de lucro que se dedica a la investigación y desarrollo de tecnologías relacionadas con la construcción de estructuras de acero, esta publica documentos y trabajos de investigación relacionados con el pandeo lateral torsional (LTB), como; "General Overview of Lateral Torsional Buckling, que proporciona información detallada sobre el cálculo y diseño de estructuras de acero para resistir este tipo de fallas.

Además, para evaluar y diseñar efectivamente las estructuras de acero en relación al pandeo lateral torsional, es fundamental considerar la normativa aplicable y la literatura relevante. En ese sentido la norma AISC 360-16 es especialmente relevante, debido a que proporciona pautas detalladas para el diseño de estructuras de acero, incluyendo ecuaciones y criterios para evaluar la resistencia al pandeo lateral torsional. (AISC 2016)

En particular, la Sección B4.1 de la AISC 360-16 proporciona ecuaciones para calcular la resistencia a la flexión nominal, mientras que la Sección B4.2 proporciona ecuaciones para calcular la resistencia a la flexión de diseño. Además, la Sección H1 de la AISC 360-16 proporciona pautas para el cálculo de la resistencia al pandeo lateral torsional, incluyendo el factor de reducción  $C_b$  y el momento de pandeo lateral torsional ( $L_b$ ) (American Institute of Steel Construction, 2016).

Además de la AISC 360-16, el libro de McCormac & Csernak (2017) sobre diseño de estructuras de acero también proporciona información relevante sobre el pandeo lateral torsional. Este libro ofrece una explicación detallada del fenómeno, así como ejemplos de cómo aplicar las ecuaciones de la AISC 360-16 en el diseño de estructuras de acero.

Por último, la Norma ASCE 7-16 proporciona información valiosa sobre las cargas que deben ser consideradas en el diseño de estructuras de acero, incluyendo cargas muertas, cargas vivas, cargas de viento, y cargas de sismo (American Society of Civil Engineers, 2016).

La norma AISC 360-16, oficialmente titulada "Especificación para Construcciones de Acero", es una norma emitida por el American Institute of Steel Construction (AISC). Esta norma proporciona un conjunto completo de pautas para el diseño de estructuras de acero y es ampliamente utilizada por ingenieros estructurales en todo el mundo, dicha norma está organizada

en varias partes y capítulos, cada uno de los cuales se centra en diferentes aspectos del diseño de estructuras de acero.

En el contexto de esta investigación los siguientes capítulos y secciones son de particular interés

- **Capítulo B: Requisitos generales de diseño y filosofía de diseño:**

Este capítulo presenta las bases de la norma AISC 360-16, incluyendo el enfoque de factores de carga y resistencia (LRFD) y el enfoque de esfuerzo admisible (ASD).

- **Capítulo C: Requisitos para miembros en flexión:**

Este capítulo proporciona información sobre el diseño de miembros sometidos a flexión, que es relevante para el pandeo lateral torsional.

- **Capítulo F: Requisitos de diseño para miembros en flexión y/o compresión axial:** Este capítulo aborda los miembros sometidos a flexión y compresión axial, que también son relevantes para el pandeo lateral torsional.

- **Capítulo H: Requisitos de diseño para miembros en flexión y/o compresión axial**

Este capítulo presenta las ecuaciones y procedimientos de diseño para miembros sometidos a esfuerzos combinados.

### 1.1.2 Antecedentes nacionales

El pandeo lateral torsional en estructuras de acero es una preocupación significativa durante la etapa de montaje, especialmente en naves industriales con luces considerables en sus marcos. En Costa Rica, donde la construcción industrial ha mostrado un crecimiento notable en las últimas décadas, esta problemática no es ajena.

El Código Sísmico de Costa Rica (CSCR, 2010) establece parámetros de diseño para garantizar la integridad estructural en condiciones sísmicas. Si bien su enfoque principal es la respuesta de las estructuras a las cargas sísmicas, sus pautas también pueden tener implicaciones en el comportamiento de las estructuras durante la etapa de montaje. La importancia de estas directrices radica en que la falta de estabilidad durante la construcción puede llevar a fallos

catastróficos, poniendo en riesgo no solo la inversión, sino también la seguridad de los trabajadores en el sitio.

Sin embargo, una laguna en la normativa es la falta de directrices específicas para la fase de montaje. El diseño se basa comúnmente en el análisis de una estructura completamente terminada, donde todos los elementos trabajan en conjunto. Esto, desafortunadamente, no representa la realidad de la etapa constructiva, donde ciertos elementos, como las vigas, deben soportar cargas sin el refuerzo adicional de la estructura completa.

Estudios realizados en la Universidad de Costa Rica (UCR) han resaltado la necesidad de una consideración más detallada de las etapas constructivas en la normativa. García y Fernández (2018) en su estudio sobre la estabilidad estructural durante la construcción en zonas sísmicas, señalaron que el pandeo lateral torsional es uno de los modos de fallo más críticos en la fase de montaje y que las directrices actuales pueden no ser suficientes para garantizar la seguridad.

#### **1.1.2.1 Investigaciones académicas.**

Geiner Alonso Oviedo Paniagua, en el año 2010, realiza una tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, con el Título: “Desarrollo de una herramienta para el diseño de elementos estructurales de acero laminado en frío basado en la norma AISI 2007 y por el método LRFD”

El objetivo de Oviedo (2010) fue desarrollar una herramienta para el diseño de elementos de acero laminado en frío, basada en perfiles tipo C y tubos estructurales cuadrados presentes en el mercado costarricense.

Para lo cual el autor realizó una compilación de los aceros laminados en frío que se producen o se venden en el país (tipo C y tubo cuadrado) mediante gráficos y tablas de diseño para dichos perfiles basados en su resistencia a la flexión, tensión, cortante y compresión.

Además, basado en la normativa AISI del 2007 realizó una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se programó las propiedades geométricas de los perfiles necesarias para el diseño; además de las propiedades efectivas de los perfiles C y tubos estructurales, tanto en flexión como en compresión.

También programó los miembros estructurales, para los cuales se incluyó los modos de fallas: pandeo lateral- torsional, flexo-torsional, distorsional; así como las condiciones donde la perfilería trabaja a toda su capacidad.

José Luis Barzuna Peinador en el año 2017, realizó una tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad de Costa Rica con el título:” Validación experimental de un método de diseño para vigas de acero de alma expandida basado en la filosofía de factores de carga y resistencia”.

En su tesis Barzuna se planteó realizar la continuación del proyecto de diseño de vigas de alma expandida de Obando (2013), con el objetivo de realizar el soporte experimental que este proyecto requería.

El diseño de estas vigas según la investigación Failure modes for castellated beams publicada por Kerdal y Nethercot (1982), citados en el trabajo de Obando (2013) se rige por seis estados límites diferentes que se definen como: falla de la unión soldada, formación de un mecanismo de flexión, pandeo del poste del alma por cortante longitudinal, pandeo del poste del alma por compresión, formación de un mecanismo de Vierendeel, y pandeo lateral torsional general de la viga.

Barzuna (2017) evaluó a la luz de los ensayos realizados por Obando (2013), el estado límite de falla de pandeo lateral torsional de la viga, ya que este fue el estado límite observado durante la falla de ambos especímenes utilizados por Obando. Para el logro de su objetivo Barzuna siguió la siguiente metodología:

- Investigación previa a la comparación: revisión bibliográfica exhaustiva para entender el comportamiento de las vigas de alma expandida con énfasis en el pandeo lateral torsional presentado por esta.
- Verificación analítica para cada una de las vigas ensayadas: utilizó el procedimiento establecido en el documento de Ronny Obando (2013) para calcular las características geométricas y mecánicas de cada sección y obtener así la capacidad de los especímenes ensayados según dicha metodología.
- Análisis de resultados mediante la comparación de la verificación analítica realizada utilizando la metodología planteada por Obando

(2013) y comparándola con los resultados experimentales suministrados: se realizó la comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y las memorias de cálculo obtenidas como parte de la segunda etapa. De esta forma, comparó todos los estados límite con sus distintas variaciones para poder exponer las diferencias entre los ensayos y los datos calculados mediante el método planteado por Obando (2013).

Barzuna, ( 2017) concluye que:

Para ambas vigas el estado límite que rige la falla es el pandeo lateral torsional, y que, ninguna de las dos vigas falla por pandeo lateral torsional puro, ya que los valores de las cargas de falla para el caso específico de pandeo lateral torsional puro (LTB caso 1) son mucho menores que las cargas aplicadas durante el ensayo.

El estado límite evaluado, pandeo lateral torsional, requiere una prueba más en la que los especímenes califiquen para presentar interacción entre las aberturas, según lo indica la metodología planteada por Obando (2013), de forma que se exploren todas las aristas del problema.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En la construcción de naves industriales cuyos marcos son de grandes luces, es común que las vigas de los marcos sean incapaces de soportar su propio peso, lo que genera el fenómeno de inestabilidad denominado pandeo lateral torsional el cual se presenta cuando el patín superior e inferior se ven sometidos a flexión y compresión por no contar con soportes adecuados en la etapa de construcción de los primeros dos marcos.

La falla por pandeo lateral torsional en estructuras con estas características (marcos de grandes luces y pesados), trae como consecuencia la inestabilidad en las mismas, lo que puede afectar su seguridad, pudiendo causar el colapso de la misma. Esto pone en riesgo la vida de las personas que se encuentran en la estructura y a la vez puede causar daños a la propiedad.

Por lo que en esta investigación se planteó la necesidad de analizar:

¿Cuáles son las causas que producen el pandeo lateral torsional en las naves industriales de grandes luces en su etapa constructiva?

### **1.3 Objetivo general**

Evaluar las condiciones de estabilidad tanto de pandeo global como local en estructuras marcos, naves industriales en su etapa constructiva.

### **1.4 Objetivos específicos**

- Determinar las diferentes condiciones de carga a la que la estructura se ve sometida durante las etapas de construcción.
- Modelar las condiciones de pandeo lateral torsional en la nave industrial, en elemento finito mediante métodos matriciales, vectores y valores propios, para diferentes condiciones de carga.
- Comparar la estabilidad estructural relacionada con el pandeo en la etapa constructiva de la nave industrial versus su estabilidad en la etapa final.
- Proponer soluciones para restringir el pandeo lateral torsional de las vigas en su etapa constructiva.

### **1.5 Justificación**

La industria de la construcción en Costa Rica ha experimentado un auge significativo en las últimas décadas, particularmente en la edificación de naves industriales. Estas estructuras, dada su envergadura y características constructivas, pueden ser susceptibles al pandeo lateral torsional durante las etapas de montaje. Un caso real reciente evidenció que, durante el proceso constructivo de una nave industrial de geometría similar a la analizada en este estudio, la estructura mostró signos de pandeo lateral torsional, lo que no solo comprometió su integridad estructural.

Este incidente real pone de manifiesto una problemática crítica en el ámbito constructivo la falta de una evaluación adecuada y protocolos específicos para prevenir y abordar el pandeo lateral torsional en las fases constructivas. A pesar de su importancia, se observa una carencia en la normativa costarricense que aborde específicamente las consideraciones y precauciones necesarias durante las etapas de montaje de estas estructuras.

Esta investigación surge precisamente de la necesidad de entender y prevenir futuras incidencias similares. Busca llenar ese vacío, proporcionando una evaluación de las condiciones que propician el pandeo lateral torsional en estructuras similares durante su etapa constructiva y

ofreciendo soluciones viables. Con su implementación, este estudio tiene el potencial de influir positivamente en la seguridad y eficiencia de las construcciones industriales en Costa Rica, evitando problemas costosos y peligrosos en el futuro.

## **1.6 Alcances y limitaciones**

### **1.6.1 Alcances**

- Se diseñó una nave industrial con 4 marcos de acero, separados a cada 10 metros de centro a centro con una geometría de 40 m de ancho, una longitud total de 30 m y una altura al codo de 8.5 m, con una cubierta a 2 aguas con una pendiente del 7%.
- En, los marcos se utilizaron secciones W compactas con láminas ASTM A 992 (Gr 50), para las riostras y vigas de amarre tubos laminados en frío Gr 33, y tensoras de techo con barras lisas Gr 60.
- El diseño se basó en las normativas del CSCR 2010, el Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica y la norma AISC 360-16.

### **1.6.2 Limitaciones**

- No se tiene un estudio de suelo real, la ubicación de la nave es ficticia.
- Se evalúa el impacto del pandeo lateral torsional únicamente en naves industriales de acero.
- Para los materiales se utilizarán las especificaciones técnicas proporcionadas por el código de diseño AISC
- El modelo a diseñar no contará con mezanine o puentes grúas.
- No se realizará diseño de planos ni presupuesto.

## **1.7 Impacto**

Con esta investigación se espera aportar a los profesionales en ingeniería una perspectiva clara de cómo puede verse afectadas las estructuras por el fenómeno de inestabilidad por pandeo lateral torsional durante diferentes etapas de la construcción.

Además de visibilizar el impacto de la evaluación de las condiciones de estabilidad en naves industriales de grandes luces, y de cómo este puede llegar a ser significativo en términos de seguridad y costos a largo plazo al garantizar la seguridad y la integridad estructural de las construcciones. De igual manera, la evaluación de las condiciones de estabilidad contribuye a la reducción de los costos de mantenimiento y reparación a largo plazo.

Concretamente esta investigación puede contribuir al conocimiento existente en el área de la evaluación de las condiciones de estabilidad, lo que puede ser valioso para futuras investigaciones y avances en el campo.

## **1.8 Hipótesis**

Las condiciones de estabilidad se modifican de manera importante durante el proceso de construcción y eso puede llevar a que la estructura tenga reducciones en su capacidad tan altas que incluso podría ser incapaz de poder sobrellevar su peso propio sin pandearse. ¿Es posible prever y mitigar estas alteraciones para asegurar la integridad estructural de la nave industrial durante su construcción?

## **CAPÍTULO 2. Marco teórico**

### **2.1 Estructuras**

Una estructura, es un conjunto de elementos resistentes convenientemente vinculados entre sí que accionan y reaccionan a los efectos de las cargas a que se someten, se construye con el objetivo de resistir y transmitir las cargas del edificio a los apoyos manteniendo la forma sin sufrir deformaciones incompatibles con esta. Las cargas a las que se puede ver sometida pueden ser: peso propio, cargas de funcionamiento, acciones varias. (Vizuete 2013).

- Las cargas de peso propio o cargas estáticas, son las generadas por los propios elementos constructivos de la estructura, ya que su peso actúa de forma permanente y constante sobre esta.
- Las cargas de funcionamiento o cargas móviles son las que actúan sobre la estructura debido a las actividades usos o eventos específicos que ocurren en esta, por ejemplo, pueden ser producidas por el mobiliario, máquinas, y personas que actúan dentro de la estructura.

- Las cargas de acciones varias se pueden definir como situaciones específicas que pueden impactar la estructura, estas son: temperatura (dilatación- contracción), viento, sismos, incendios y otros eventos que puedan presentarse y repercutir sobre la estructura. (Vizuete, 2013)

La estructura debe estar diseñada de manera que pueda soportar una combinación desfavorable de todas ellas, por lo que al momento de su diseño se deben establecer las verificaciones de estabilidad y resistencia (capacidad portante) y aptitud al servicio que incluye deformación limitada, vibraciones y deterioro.

Específicamente, la estabilidad de la estructura se refiere a la capacidad de esta para resistir las fuerzas y momentos externos sin sufrir deformaciones excesivas o colapsar, es decir puede mantener su equilibrio y seguridad bajo diversas condiciones de carga y eventos externos. La resistencia por su parte es la capacidad de un material para resistir la deformación o ruptura bajo la acción de cargas aplicadas y esfuerzos internos como la tracción, la compresión, corte, flexión o torsión sin exceder sus límites de resistencia. (Vizuete, 2013)

## **2.2 Naves industriales**

Una nave industrial es una estructura destinada a albergar actividades industriales como producción, almacenamiento y distribución de materiales o bienes, son de grandes dimensiones y se diseñan para cumplir criterios específicos de la industria a la cual son consignadas. Están diseñadas para soportar cargas y resistir fuerzas laterales, como el viento y los sismos, con el objetivo de proporcionar espacios seguros y funcionales para las actividades industriales" (McCormac y Csernak 2012).

Estas se caracterizan por cubrir grandes luces, generalmente con pequeñas cargas de origen gravitatorio, lo que origina particularidades que solo se dan en esta estructura y en las que las cargas horizontales y los fenómenos de inestabilidad tienen gran importancia debido a la esbeltez de esta estructura.

Vizuete, (2013), enlista los principales factores a tener en cuenta cuando se diseña una nave industrial:

- Uso de la nave: debe tener la capacidad para contener las instalaciones y equipos y siempre se debe tener en cuenta una posible ampliación.

- Elementos constructivos internos de la nave: se debe garantizar que las condiciones de trabajo se puedan desarrollar en condiciones de salud adecuada, por lo que se debe contemplar el confort climático y lumínico, espacio diáfano, accesibilidad.
- Resistencia estructural: deben diseñarse para soportar cargas pesadas y condiciones climáticas adversas.

## **2.3 El acero como material estructural**

El acero es ampliamente utilizado en la construcción de naves industriales debido a sus propiedades mecánicas y ventajas estructurales, es un material alotrópico obtenido como aleación del hierro con el carbono y otros elementos como silicio, manganeso, fósforo y azufre, estos componentes químicos aportan al acero ciertas propiedades específicas que pueden afectar su comportamiento, cabe destacar algunas como la ductilidad, la resistencia a la corrosión, la resistencia a la fatiga, la soldabilidad y su dureza.

Este material tiene una alta resistencia, lo que permite la construcción de estructuras más ligeras y eficientes en comparación con otros materiales, también la ductilidad le confiere la capacidad de absorber grandes deformaciones antes de fallar, lo que aumenta la resistencia ante cargas sísmicas o de viento. Además, el acero es un material duradero, resistente al fuego y reciclable, lo que lo convierte en una opción sostenible para la construcción. (McCormac & Csernak 2012).

### **2.3.1 Ventajas y desventajas del acero**

Dentro de las propiedades mecánicas que posee el acero se pueden mencionar algunas de las ventajas por las cuales este material tiene una alta demanda en la construcción de edificaciones.

#### **2.3.1.1 Ventajas y propiedades mecánicas del acero.**

- Elasticidad: Es la capacidad de un material de volver su forma original luego de sucesivos ciclos de carga y descarga. El acero presenta la singularidad de deformarse y recobrar su forma original bajo cargas aplicadas o esfuerzos bastante altos, con la singularidad de que los momentos de inercia de una estructura de acero se pueden calcular exactamente lo que permite calcular de forma más precisa su comportamiento en la hipótesis de diseño.

- **Plasticidad:** Es la formación permanente provocada por una tensión igual o superior al límite de fluencia. El acero presenta la capacidad de sobrepasar su límite elástico bajo carga deformándose de manera permanente sin romperse.
- **Ductilidad:** Es la capacidad de los materiales de deformarse plásticamente sin fallar. Esta una característica más común en aceros dulces ya que generalmente en un acero dulce sometido a alta tensión ocurre una reducción importante de la sección transversal y un gran alargamiento en el punto de falla antes de que se presente la fractura.
- **Tenacidad:** Es la capacidad del acero de absorber energía cuando está sometido a una carga impactante, esta es una característica muy importante ya que los miembros de acero se pueden someter a grandes deformaciones sin fracturarse, lo que los hace muy trabajable en su proceso de fabricación y montaje sin riesgo de ser dañado.
- **Alta resistencia:** Los perfiles de acero aportan una disminución de peso en las estructuras, esto significa que las cargas muertas serán menores, es decir, poco peso en la estructura. Este hecho es de gran importancia cuando se presentan luces de gran tamaño como en puentes, edificios elevados, edificios industriales tipo nave y en estructuras cimentadas en suelos de baja capacidad.
- **Tenacidad:** Es la capacidad que poseen los elementos de acero para absorber grandes cantidades de energía. (McCormac & Csernak 2012).

### **2.3.1.2 Desventajas del acero.**

- **Corrosión:** El acero expuesto a intemperie sufre corrosión por lo que deben recubrirse siempre con esmaltes anticorrosivos, por lo que su mantenimiento es vital para alargar su vida útil ya que su descuido puede llegar a afectar su comportamiento, exceptuando a los aceros especiales como el inoxidable.
- **Fatiga:** Su resistencia puede reducirse si se somete a un gran número de inversiones del sentido del esfuerzo, o bien, a un número mayor de ciclos de esfuerzo variable.

- **Fractura frágil:** Cuando el acero pierde ductilidad ya sea por altas concentraciones de cargas capaces de producir fatiga en el material o bajas temperaturas, estos pueden llegar a presentar la denominada fractura frágil.
- **Susceptibilidad al pandeo:** El pandeo puede ocasionarse en perfiles con secciones largas y esbeltas. Este fenómeno puede alterar lo económico de las estructuras por lo que, en forma ocasional, puede llegar a necesitar de acero adicional para rigidizarlas y evitar el pandeo por lo que su economía puede llegar a reducirse. (McCormac & Csernak 2012).

### **2.3.2 Clases y tipos de aceros estructurales**

Dentro del mercado de acero se encuentran una gran variedad de perfiles y secciones de uso estructural los cuales son clasificados por la American Society for Testing and Materials (ASTM,) la cual es una organización de normas americanas que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios, los aceros son clasificados en estas normativas como:

- **Aceros al carbono:** estos aceros tienen como principales elementos de resistencias al carbono y al magnesio en cantidades cuantiosamente dosificadas.
- **Aceros de alta resistencia y baja aleación:** estos aceros obtienen sus altas resistencias y otras propiedades por la adición, aparte del carbono y el magnesio, de uno a más agentes de aleación como el columbio, vanadio, cromo, silicio, cobre y níquel. Se incluyen aceros con esfuerzos de fluencia comprendidos entre 275 MPa y 480 MPa. Estos aceros generalmente tienen mucha mayor resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono.
- **Aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistencia a la corrosión:** cuando los aceros se alean con pequeños porcentajes de cobre, se vuelven más resistentes a la corrosión, además cuando se exponen a la atmosfera, la superficie de estos aceros se oxida y se les forma una película adhesiva muy comprimida, que impide una mayor oxidación y se elimina así la necesidad de pintarlos. Estos aceros tienen gran aplicación, particularmente, en estructuras con miembros expuestos y

difíciles de pintar como puentes, torres de transmisión eléctrica, etc., sin embargo, no son apropiados para usarse en lugares.

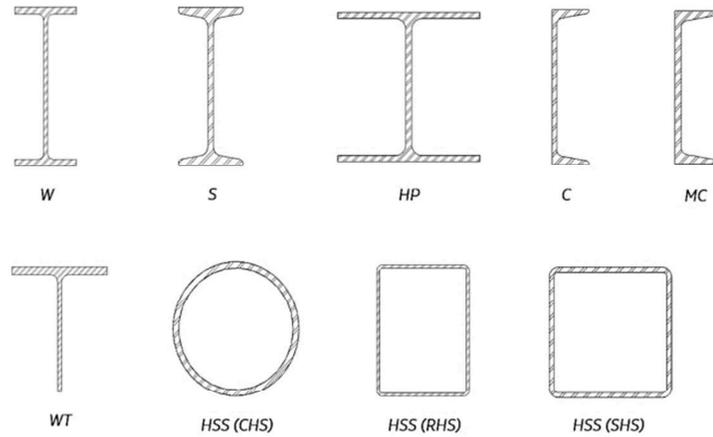
### **2.3.2.1 Denominación de productos de acero**

Nomenclatura de perfiles americanos según la normativa emitida por el American Institute of Steel Construction (AISC 2016)

- Secciones W: son un conjunto de perfiles que poseen una alta gama y su designación es W altura x peso, se representan cm perfiles doble T.
- Secciones HP: su designación es HP altura nominal x peso.
- Secciones WT: se representan cm perfiles, se designan como WT altura nominal x peso.
- Secciones C: representan los perfiles de canal laminados, de espesor de ala variable y su designación es C altura x peso.
- Secciones L: representan perfiles angulares laminados, de alas iguales o desiguales.
- Secciones estructurales huecas; estas pueden ser cuadradas, rectangulares o circulares.
- Secciones de lámina delgada doblada en frío: representan una gran variedad de perfiles donde se suelen utilizar los tipos canal, canal atiesado, zeta, zeta atiesada. (AISC 2016)

### **Figura 1**

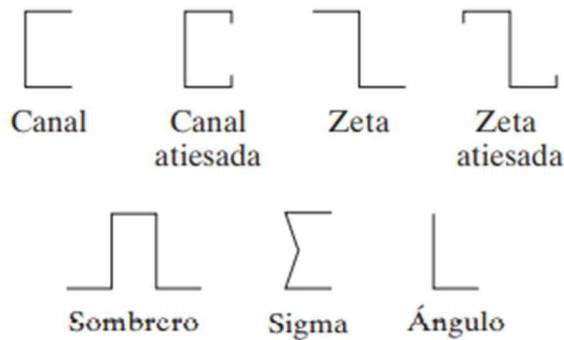
*Perfiles laminados de acero*



*De Specification for Structural Steel Buildings, de Instituto Americano de Construcción en Acero, 2016, AISC.*

**Figura 2**

*Perfiles doblados en frío*



*De Diseño de estructuras de acero, por McCormac & Csernak, 2012, Alfaomega Grupo Editorial.*

### 2.3.3 Acciones que afectan a las estructuras de acero

La Sección B2 de la Especificación AISC establece que las cargas nominales que van a usarse para el diseño estructural deberán ser las estipuladas por el reglamento aplicable bajo el cual se esté diseñando la estructura o como lo determinen las condiciones involucradas.

### **2.3.3.1 Acciones Permanentes.**

Las acciones permanentes o también conocidas como cargas muertas son cargas de magnitud constante que permanecen fijas en un mismo lugar, por lo general estas cargas están dadas por el peso propio de los elementos que componen la edificación. En las Tablas C3-1 y C3-2 de ASCE 7-16 se proporciona información aún más detallada sobre las cargas muertas.

### **2.3.3.2 Acciones variables.**

Las acciones variables o las cargas vivas son aquellas que pueden cambiar de lugar y magnitud, estas se presentan cuando una estructura se ocupa, se usa y se mantiene. Las cargas vivas mínimas por gravedad que deben estimarse en el diseño de los pisos de las estructuras se especifican en los códigos o normativas de construcción. En ASCE 7-16 donde se presenta una gran cantidad de información sobre la magnitud de estas diversas cargas, junto con los valores mínimos especificados.

### **2.3.3.3 Acciones ambientales.**

Las acciones o cargas ambientales son causadas por el medio ambiente en donde se ubica una estructura en particular, estas son causadas por la lluvia, nieve (en las regiones donde ocurre este fenómeno), el viento, los cambios de temperatura y los sismos.

## **2.4 Marcos de naves industriales**

Los Marcos de naves industriales son sistemas estructurales metálicos que funcionan como los principales sistemas de resistencia en las naves industriales, debido a que sobre estos actúan las diferentes cargas tales como cargas gravitacionales (peso propio y cargas vivas), cargas de viento, cargas sísmicas. Las cargas se aplican en los lugares y direcciones apropiadas según los códigos de diseño y las normativas locales.

### **2.4.1 Marcos arriostrados y no arriostrados**

Los marcos de naves industriales pueden ser clasificados en marcos arriostrados y no arriostrados.

Los marcos arriostrados consisten en una red de elementos estructurales interconectados, como columnas y vigas, que están rigidizados mediante el uso de elementos de arriostamiento, como diagonales o contravientos, estos son muy utilizados por su capacidad para proporcionar una alta rigidez y resistencia estructural. ya que los elementos de arriostamiento proporcionan

resistencia adicional a la estructura, ayudando a resistir las cargas laterales, como el viento o los sismos. (Vinnakota 2016)

Por otro lado, los marcos no arriostrados son aquellos que carecen de elementos de arriostramiento; en estos sistemas, la resistencia a las cargas laterales se logra mediante la rigidez inherente de los elementos estructurales y su conexión. Aunque los marcos no arriostrados pueden ser más económicos y más fáciles de construir en comparación con los arriostrados, su diseño requiere un cuidado adicional para garantizar la estabilidad estructural y prevenir el pandeo lateral torsional. (Vinnakota 2016)

El uso de marcos arriostrados o no arriostrados en naves industriales depende de varios factores, como las cargas laterales esperadas, los requisitos de rigidez y la economía del proyecto. Es importante considerar las regulaciones y normativas locales que pueden establecer requisitos específicos para la elección del sistema estructural en función de la ubicación y las condiciones climáticas.

## **2.5 Miembros cargados axialmente a compresión**

Los miembros sometidos a fuerzas de compresión están sujetos a cargas que tienden a reducir su longitud y provocar deformaciones compresivas en el material. En el diseño adecuado de estos miembros, se deben tener en cuenta tanto la resistencia a la compresión como la estabilidad frente al pandeo lateral torsional.

El análisis de miembros comprimidos axialmente se basa en criterios de resistencia y rigidez para evitar el pandeo lateral torsional y garantizar la seguridad y la capacidad de carga de la estructura ya que en situaciones en las que los miembros comprimidos tienen una longitud significativa y son delgados en relación con su longitud, puede ocurrir este fenómeno.

También se debe tener en cuenta que los miembros sometidos a compresión pueden ser vulnerables a la inestabilidad local, como el pandeo local o el pandeo local en placas; fenómenos que ocurren cuando la carga compresiva excede la capacidad de carga del material en un área específica del miembro. Por lo tanto, se deben aplicar criterios de diseño adecuados para garantizar que los miembros comprimidos cumplan con los requisitos de estabilidad global y local. (Vinnakota 2006)

La especificación ANSI/AISC 360-16 del American Institute of Steel Construction (AISC 2016) establece límites y criterios para el diseño de miembros comprimidos axialmente, incluyendo restricciones sobre la esbeltez y la capacidad de carga de estos miembros.

Además, el análisis y diseño de miembros comprimidos axialmente deben considerar los efectos de la carga axial combinada con momentos de flexión, ya que esta combinación de cargas puede resultar en esfuerzos combinados y deformaciones más complejas, por lo que se deben seguir métodos de diseño adecuados para garantizar la resistencia y estabilidad del miembro. (Vinnakota 2006)

### **2.5.1 Consideraciones para el diseño y comportamiento de miembros cargados axialmente a compresión en relación al pandeo lateral torsional**

Los miembros estructurales de acero sometidos a cargas axiales de compresión son elementos fundamentales en la construcción de naves industriales, por lo que el diseño de estos miembros implica consideraciones de estabilidad frente al pandeo lateral torsional, el cual puede ocurrir cuando la longitud sin soporte lateral de un miembro es lo suficientemente grande como para que la combinación de flexión lateral y torsión se vuelva crítica.

Para prevenir esto, se pueden aplicar refuerzos laterales y restricciones en los extremos de los miembros, lo que mejora su capacidad de resistir a las cargas compresivas y minimiza el riesgo de inestabilidad. (Vinnakota 2006)

Entonces los miembros sometidos a compresión en las naves industriales requieren un diseño cuidadoso que considere tanto la resistencia a la compresión como la estabilidad frente al pandeo lateral torsional. Al seguir las especificaciones y códigos de diseño relevantes, y teniendo en cuenta los efectos combinados de la carga axial y la flexión, se puede garantizar la seguridad y el rendimiento adecuado de estos miembros en las estructuras de acero.

### **2.6 Miembros sujetos a fuerzas de tensión**

En el diseño de los miembros estructurales de acero sujetos a fuerzas de tensión en naves industriales, es esencial considerar tanto la resistencia a la tensión como la estabilidad frente al pandeo lateral torsional, puesto que estos desempeñan un papel crucial en la resistencia y estabilidad de las naves industriales, y están diseñados para resistir las cargas de tensión y transmitir eficientemente las fuerzas a lo largo de la estructura.

Durante la etapa de diseño, se deben considerar varios aspectos para garantizar la seguridad y la capacidad de carga adecuada de estos miembros:

En primer lugar, es fundamental tener en cuenta la resistencia a la tensión del acero utilizado en la construcción de los miembros, al respecto es importante mencionar que el acero estructural está diseñado para tener una alta resistencia a la tracción, lo que permite que los miembros soporten las cargas de tensión aplicadas. También es necesario considerar las propiedades mecánicas del acero, como su límite elástico y su resistencia a la tracción, de manera que se pueda garantizar que los miembros seleccionados cumplan con los requisitos de diseño.

En segundo lugar, se debe contemplar la resistencia a la tensión, debido a que la estabilidad frente al pandeo lateral torsional es un aspecto crítico a tener en cuenta ya que este puede ocurrir cuando la longitud sin soporte lateral de un miembro es lo suficientemente grande como para que la combinación de flexión lateral y torsión se vuelva crítica. Para prevenir el pandeo lateral torsional, se utilizan diferentes métodos, como el uso de secciones transversales adecuadas, refuerzos laterales y restricciones en los extremos de los miembros.

Las especificaciones y códigos de diseño, como la especificación ANSI/AISC 360-16 del American Institute of Steel Construction (AISC) proporcionan pautas detalladas para el diseño de los miembros sujetos a fuerzas de tensión en estructuras de acero. Estas especificaciones incluyen criterios de diseño, métodos de cálculo y requisitos de seguridad para garantizar que los miembros cumplan con los estándares establecidos; al seguir estas especificaciones, se garantiza que los miembros sujetos a fuerzas de tensión cumplan con los requisitos de capacidad de carga y resistencia estructural.

En resumen, los miembros sujetos a fuerzas de tensión en las naves industriales requieren un diseño cuidadoso que tome en cuenta tanto la resistencia a la tensión como la estabilidad frente al pandeo lateral torsional. Considerar las propiedades del acero, aplicar métodos adecuados de diseño y seguir las especificaciones y códigos pertinentes son pasos fundamentales para garantizar la seguridad y el rendimiento adecuado de estos miembros en las estructuras de acero. (AISC 2016)

## **2.7 Miembros sometidos a fuerzas de flexión**

Los miembros estructurales de acero en las naves industriales también están sujetos a fuerzas de flexión, lo que resulta en momentos de flexión en el material. El diseño adecuado de

estos miembros debe considerar tanto la resistencia a la flexión como la estabilidad frente al pandeo lateral torsional.

La resistencia a la flexión del acero es una propiedad fundamental que determina la capacidad del material para resistir momentos de flexión sin experimentar deformaciones excesivas o fallas. La especificación ANSI/AISC 360-16 del American Institute of Steel Construction (AISC) establece los criterios y límites para el diseño de miembros sometidos a fuerzas de flexión, incluyendo la selección de secciones transversales adecuadas y el cálculo de la capacidad de carga requerida.

En el diseño de miembros sometidos a fuerzas de flexión, es esencial tener en cuenta la distribución de tensiones y deformaciones a lo largo de la sección transversal. La resistencia a la flexión de un miembro puede variar según su forma y dimensiones, así como la orientación del eje neutro, por lo que se deben seguir métodos de diseño adecuados, como el método de LRFD (Carga de trabajo y resistencia) o el método ASD (Diseño de resistencia admisible), para determinar la capacidad de carga y la resistencia del miembro.

Además de la resistencia a la flexión, el pandeo lateral torsional también es un factor crítico a considerar en los miembros sometidos a fuerzas de flexión, este puede ocurrir cuando la longitud sin soporte lateral del miembro es lo suficientemente grande como para que la combinación de flexión lateral y torsión se vuelva crítica. Se deben aplicar medidas de diseño adecuadas, como el uso de refuerzos laterales y restricciones en los extremos del miembro, para prevenir el pandeo lateral torsional y garantizar la estabilidad del miembro.

El análisis y diseño de miembros sometidos a fuerzas de flexión también deben considerar las cargas y momentos combinados, así como las posibles combinaciones de carga. Esto es especialmente importante en situaciones donde el miembro está sujeto a diferentes cargas y momentos en diferentes puntos a lo largo de su longitud.

En conclusión, los miembros sometidos a fuerzas de flexión en las naves industriales requieren un diseño cuidadoso que considere tanto la resistencia a la flexión como la estabilidad frente al pandeo lateral torsional. Al seguir las especificaciones y códigos de diseño pertinentes, y teniendo en cuenta la distribución de tensiones y deformaciones, se puede garantizar la seguridad y el rendimiento adecuado de estos miembros en las estructuras de acero.

## **2.8 Elementos sometidos a fuerzas de flexión y compresión combinadas**

En el diseño de estructuras de naves industriales, es común encontrar elementos que están sometidos a fuerzas de flexión y compresión combinadas. Estas fuerzas actúan simultáneamente y generan un comportamiento complejo en los elementos estructurales.

Cuando un elemento está sujeto a fuerzas de flexión y compresión combinadas, es esencial considerar la interacción entre ambos tipos de cargas. La resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión del material son factores críticos a tener en cuenta en el diseño de estos elementos, además la estabilidad frente al pandeo lateral torsional también debe considerarse para garantizar un comportamiento estructural seguro.

El análisis de elementos sometidos a fuerzas de flexión y compresión combinadas implica la determinación de las tensiones y deformaciones resultantes de ambas cargas. En el diseño de estas estructuras utilizan métodos de diseño adecuados, como el método de resistencia admisible o el método de carga y resistencia, para evaluar la capacidad de carga y garantizar la seguridad estructural.

Es importante destacar que el diseño de elementos sometidos a fuerzas de flexión y compresión combinadas puede requerir la consideración de diferentes combinaciones de carga. Dependiendo de las condiciones de carga específicas, es posible que se deban tener en cuenta diferentes casos de carga y momentos combinados.

## **2.9 Métodos de diseño para elementos de acero**

La Especificación AISC proporciona dos métodos aceptables para diseñar miembros de acero estructural y sus conectores. Éstos son el Diseño con Factores de Carga y Resistencia - Load and Resistance Factor Design (LRFD) y el Diseño por esfuerzos permisibles, ambos procedimientos se basan en los principios del diseño de estados límite.

El término estado límite se usa para describir una condición en la que una estructura o parte de ella deja de cumplir su función prescrita. Existen dos tipos de estados límite: los de resistencia y los de servicio (McCormac et al., 2012)

Si se hacen diseños con ambos métodos LRFD y ASD, los resultados serán bastante parecidos entre sí, en algunas ocasiones, los diseños con el método LRFD serán ligeramente más económicos. El factor de carga más pequeño que se usa para las cargas muertas en los diseños con

el método LRFD, en comparación con los factores de carga que se usan para las cargas vivas, dan una ligera ventaja al método LRFD, por otra parte, con el diseño del método ASD, el factor de seguridad que se usa tanto para las cargas muertas como para las vivas es constante para un problema específico (McCormac et al., 2012).

### **2.9.1 Diseño Con Factores De Carga y Resistencia (LRFD) - Load and Resistance Factor Desing**

En este método de diseño se mayoran las cargas de diseño y las resistencias de diseño se minoran multiplicando por factores mayores y menores, cuando la resistencia de diseño de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga LRFD mediante la ecuación (1):

#### **Ecuación 1**

$$R_u \leq \phi R_n$$

$R_u$  = resistencia requerida por las combinaciones LRFD

$R_n$  = resistencia nominal

$\Phi$  = factor de resistencia

$\phi R_n$  = resistencia de diseño

### **2.10 Elementos a tracción**

Los miembros a tracción son elementos estructurales que están sujetos a fuerzas axiales directas que tienden a alargar el miembro, en estos la carga de tensión axial produce esfuerzos normales uniformes en todas las secciones transversales a lo largo de su longitud.

Un miembro de acero dúctil sin agujeros y sometido a carga de tensión puede resistir una carga mayor que la correspondiente al producto del área de su sección transversal y del esfuerzo de fluencia del acero debido al endurecimiento por deformación. (Vinnakota, 2006).

Para el diseño de miembros a tracción, ANSI/AISC 360-16 establece recomendaciones basadas en el capítulo D (*Design of Members for Tension*), que incluyen límites de esbeltez, resistencia en tracción, área neta efectiva, miembros armados, miembros conectados con pasadores y bielas.

Es importante que la carga axial por tensión esté posicionada en el centroide de la sección transversal del elemento para producir esfuerzos paralelos a la fuerza y normales a la sección transversal de manera uniforme, no obstante, en la práctica, no siempre es posible que la carga axial esté exactamente en el centroide de la sección transversal de un miembro en tensión. En algunos casos, la carga puede aplicarse excéntricamente, lo que resulta en esfuerzos de flexión además de los esfuerzos de tensión axial, esto puede ocurrir, por ejemplo, en vigas o columnas que están sujetas a cargas asimétricas o en miembros que están conectados a otros elementos estructurales.

En tales casos, se deben tener en cuenta los efectos de la excentricidad en el diseño del miembro en tensión, este diseño debe asegurarse de que los esfuerzos de flexión no excedan los límites permisibles para evitar la falla por pandeo o la fractura del miembro en tensión.

Para esto, se pueden utilizar diferentes técnicas de diseño, como el diseño por resistencia o el diseño por factores de carga, en ambos casos, se consideran los efectos de la excentricidad para garantizar que el miembro en tensión tenga suficiente resistencia para soportar las cargas aplicadas sin fallar. Los elementos a tensión no sufren efectos de flexión durante la aplicación de la carga y, por lo tanto, tampoco sufren efectos de pandeo.

El esfuerzo de un miembro axialmente cargado en tensión está dado por la ecuación:

### **Ecuación 2**

$$f_t = \frac{T}{A}$$

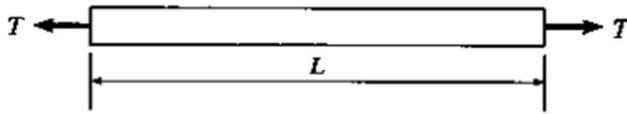
A: Es el área de la sección transversal normal a la carga.

T: Es la magnitud de la carga de la tensión axial.

$f_t$ : Esfuerzo de tensión axial.

### **Figura 3**

*Miembro en tensión axial*



*De Estructuras de acero: comportamiento y LRFD, por Vinnakota, 2006, Mc Graw Hill.*

### 2.10.1 Modos de falla.

"Cuando se evalúan elementos de acero sometidos a tracción, es importante conocer su resistencia para garantizar que la estructura sea segura y cumpla con los requisitos de las normas y códigos aplicables" (González, 2015).

"Los modos de falla son estados límite en los que la capacidad resistente del miembro se ve comprometida y puede ocurrir una falla" (González, 2015).

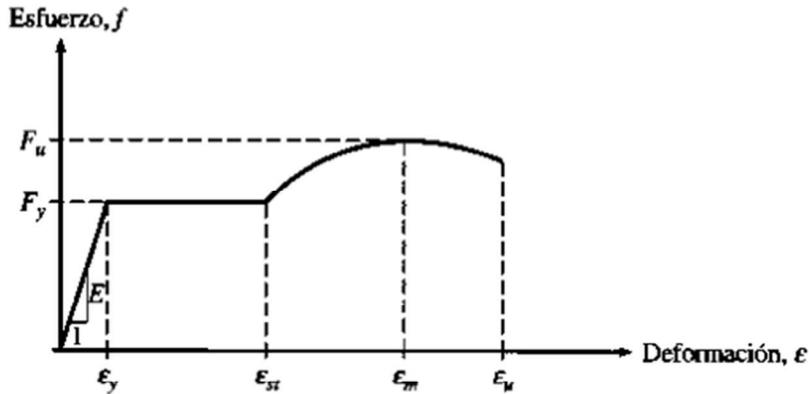
Los modos de falla son estados límite en los que la capacidad resistente del miembro se ve comprometida y puede ocurrir una falla. Algunos de los modos de falla que se deben considerar al evaluar la capacidad resistente a tracción de un miembro estructural son los siguientes:

- **Ruptura por tracción del área neta:** Es un modo de falla en el que el miembro se rompe debido a la tracción en la sección transversal neta más pequeña.
- **Ruptura por tracción del área bruta:** Es un modo de falla en el que el miembro se rompe debido a la tracción en la sección transversal bruta más pequeña, sin considerar la presencia de agujeros o perforaciones.
- **Ruptura por bloqueo de perno:** Es un modo de falla en el que el miembro se rompe debido a la tracción en la sección transversal bruta más pequeña, teniendo en cuenta la presencia de agujeros o perforaciones que pueden bloquear los pernos o los anclajes.
- **Deformación excesiva o pandeo:** Es un modo de falla en el que el miembro se deforma excesivamente o patea debido a la tracción, lo que puede provocar la inestabilidad de la estructura.

"Es importante evaluar cada uno de estos modos de falla y seleccionar el valor más bajo como capacidad resistente a tracción del miembro" (González, 2015).

**Figura 4**

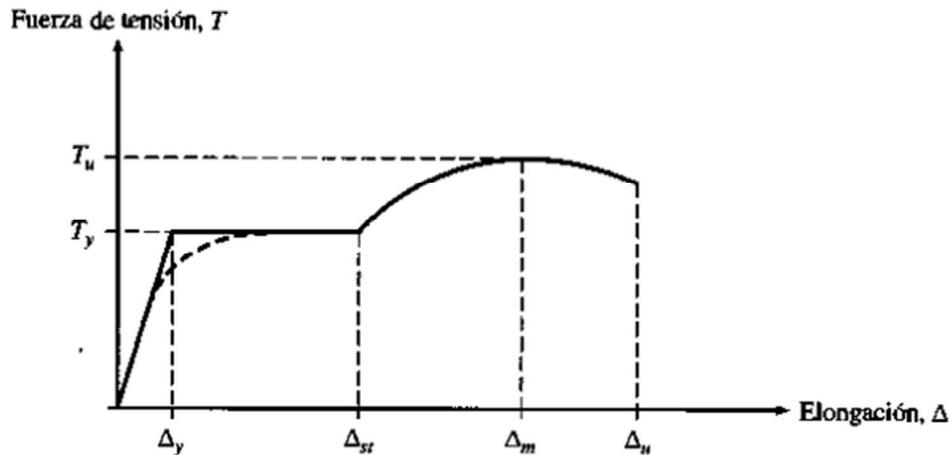
*Diagrama esfuerzo deformación del material*



*De Estructuras de acero: comportamiento y LRFD, por Vinnakota, 2006, Mc Graw Hill.*

**Figura 5**

*Diagrama carga elongación del miembro*



*De Estructuras de acero: comportamiento y LRFD, por Vinnakota, 2006, Mc Graw Hill.*

#### 2.10.1.1 Área neta ( $A_n$ ).

El término “área neta de la sección transversal”, o simplemente, “área neta”, se refiere al área bruta de la sección transversal menos la de agujeros, ranuras u otras muescas. Al considerar el área de éstos, por lo general es necesario restar un área un poco mayor que la nominal del agujero de una sección donde exista una unión o conexión sujeta a través de tornillos, donde se presenta

un conjunto de agujeros y por lo tanto un debilitamiento de la sección reducida debido al daño provocado por la fabricación del agujero o la soldadura. La determinación de su área se define como:

### **Ecuación 3**

$$A_n = A_g - \sum d_a t + \sum \frac{s^2}{4g} t$$

$A_n$  = área neta de la sección crítica.

$A_g$  = área total del miembro.

#### **2.10.1.2 Área Neta Efectiva ( $A_e$ )**

El área neta efectiva de un miembro es la parte del área neta del miembro en tensión que participa de manera efectiva en la transferencia de la fuerza. Esta puede darse cuando la carga es transmitida a la placa por medio de tornillos o soldadura por la ecuación:

### **Ecuación 4**

$$A_e = A_n U$$

### **Ecuación 5**

$$A_e = A_g U$$

$A_e$  = área neta efectiva de un miembro en tensión.

$U$  = Coeficiente de reducción.

$A_n$  = área neta.

$A_g$  = área total del miembro.

Donde  $U$  es el coeficiente de reducción del área o factor de corte directo de la tabla D3.1 del AISC 360-16.

### **Figura 6**

*Factores de retraso de cortante para los conectores de los miembros a tensión.*

TABLA D3.1 Factor de Corte Diferido para Conexiones de Miembros en Tracción			
Caso	Descripción del Elemento	Factor de Corte Diferido, U	Ejemplo
1	Todos los miembros en tracción donde la carga es transmitida directamente a cada uno de los elementos de la sección por conectores o soldaduras (excepto en los Casos 3, 4, 5 y 6)	$U = 1.0$	—
2	Todos los miembros en tracción, excepto tubos, donde la carga es transmitida por sólo algunos de los elementos de la sección por conectores o soldaduras. Alternativamente, el Caso 7 es permitido para perfiles W, M, S y HP (Para ángulos, se permite el uso del Caso 8).	$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$	
3	Todos los miembros en tracción donde la carga es transmitida por soldaduras transversales a sólo algunos elementos de la sección.	$U = 1.0$ y $A_n = \text{área de los elementos conectados directamente}$	—
4 <sup>a)</sup>	Planchas, ángulos, canales con soldaduras en bordes extremos, secciones te y doble te con elementos adosados, donde la tensión es transmitida solo por soldaduras longitudinales. Ver Caso 2 para la definición de x.	$U = \frac{3l^2}{3l^2 + w^2} \left(1 - \frac{\bar{x}}{l}\right)$	
5	Tubos redondos con sólo una placa gusset concéntrica, con soldaduras de ranura al tubo.	$l \geq 1.3D, U = 1.0$ $D \leq l < 1.3D, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	
6	Tubo Rectangular con sólo una placa gusset concéntrica	$l \geq H, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B+H)}$	
	con dos placas gusset concéntricas	$l \geq H, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^2}{4(B+H)}$	
7	Perfiles W, M, S o HP o T cortadas a partir de estos perfiles (Si U es calculado según Caso 2, se permite utilizar el mayor valor)	$b_f \geq \frac{2}{3}d, U = 0.90$ $b_f < \frac{2}{3}d, U = 0.85$	—
	con alma conectada con 4 o más conectores en la dirección de carga	$U = 0.70$	—
8	Ángulos simples (Si U es calculado según Caso 2, se permite utilizar el mayor valor)	con 4 o más conectores por línea en la dirección de carga $U = 0.80$	—
	con 2 o 3 conectores por línea en la dirección de carga (con menos de tres conectores por línea en la dirección de la carga, usar Caso 2)	$U = 0.60$	—

B = ancho total del tubo rectangular, medido 90° respecto al plano de conexión, cm (mm); D = diámetro exterior de la sección cilíndrica, cm (mm); H = altura total del tubo rectangular, medido en el plano de conexión, cm (mm); d = altura de la sección, cm (mm); para secciones T, d = altura de la sección desde la cual la T fue cortada, cm (mm); l = longitud de conexión, cm (mm); w = ancho plancha, cm (mm); x̄ = excentricidad de conexión, cm (mm).

Nota:  $l = \frac{l_1 + l_2}{2}$ , donde  $l_1, l_2$  no deben ser menor a 4 veces la dimensión de la soldadura.

De Especificaciones AISC 360-16, Tabla D3.1, 2016, American Institute of Steel Construction.

### 2.10.1.3 Resistencia a la tracción.

La resistencia nominal de un miembro a tensión,  $T_n$ , será el menor de los valores obtenidos sustituyendo en las dos expresiones siguientes:

#### Ecuación 6

$$T_u \leq \phi_t T_n$$

#### 2.10.1.4 Estado límite de fluencia en la sección bruta.

Si se trata del análisis de miembros a tensión donde la falla se produce por la fluencia de la sección bruta, se utilizará la siguiente ecuación:

##### Ecuación 7

$$T_n = A_g F_y$$

$$\phi_t = 0,9.$$

$F_y$  = Esfuerzos mínimos de fluencia.

$A_g$  = Área gruesa o bruta de la sección.

#### 2.10.1.5 Fractura a tracción en la sección neta en la que se encuentran los agujeros de tornillo.

Si se trata del análisis de miembros a tensión por fractura de la sección neta, conocida como sección neta el área de la sección considerando la resta del espacio comprendido por los agujeros destinados a los tornillos, el análisis se logra usando la siguiente expresión:

##### Ecuación 8

$$T_n = A_e F_u$$

$$\phi_t = 0,75.$$

$F_u$  = Límite de resistencia.

$A_e$  = Área neta efectiva.

#### 2.10.1.6 Bloque de cortante.

La falla de un miembro puede ocurrir a lo largo de una trayectoria que implique tensión en un plano y cortante en otro plano perpendicular, es decir, es posible que un bloque de acero se desgarre en esta situación.

La Especificación (J4.3) del AISC establece que la resistencia disponible  $R_n$  para la resistencia de diseño a la fractura por bloque de cortante es la siguiente:

##### Ecuación 9

$$T_n = 0.6 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0.6 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt}$$

$$\phi_t = 0.75$$

$A_{gv}$  = Área bruta solicitada a corte.

$A_{nv}$  = Área neta solicitada a corte.

$A_{nt}$  = Área neta solicitada a tensión.

$F_y$  = Esfuerzos mínimos de fluencia.

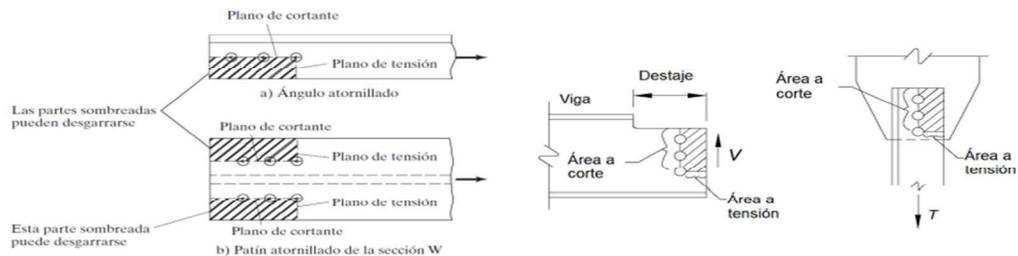
$F_u$  = Límite de resistencia.

$U_{bs} = 1$ , cuando la tensión es uniforme

$U_{bs} = 0.5$ , cuando la tensión es no uniforme

### Figura 7

*Bloque de cortante*



De

*Diseño de estructuras de acero, por McCormac & Csernak, 2012, Alfaomega Grupo Editorial.*

### 2.11 Elementos a compresión

El elemento estructural más recurrente sujeto a este tipo de fuerzas son las columnas o pilares aislados, y su principal función es transmitir la carga de compresión de un punto de la estructura a otro punto, sobre todo a las cimentaciones. Entre los otros tipos se encuentran las cuerdas superiores de armaduras y diversos miembros de arrostramiento. Además, muchos otros miembros tienen compresión en alguna de sus partes, estos incluyen las alas a compresión de vigas

laminadas y armadas y los miembros sujetos simultáneamente a cargas de flexión y compresión. (McCormac, 2012).

### 2.11.1 Esfuerzos residuales

Estos son los esfuerzos generados por la fabricación de los materiales, son cargas internas que se producen como resultado de los procesos de manufacturación, por lo tanto una sección sin uso ya está predispuesta a resistir un 30% menos de su capacidad total debido a estos esfuerzos, al mismo tiempo se produce una reducción en la rigidez por lo que estos esfuerzos deben de considerarse ya que afectan la capacidad de resistencia ante cargas, este efecto está asociado al rápido calentamiento y a su posterior fase de enfriamiento, por lo que también es un efecto que puede ocurrir en el proceso de soldadura de elementos y en la fabricación de laminación en caliente.

### 2.11.2 Formas de pandeo

A diferencia a los elementos en tensión, un pilar o columna sometida a compresión axial, el modo de falla, así como su resistencia si dependen de la longitud entre soportes laterales o longitud efectiva del elemento, existen tres modos generales según los cuales las columnas cargadas axialmente pueden fallar, estos son: pandeo flexionante, pandeo local y pandeo torsionante.

### 2.11.3 Ecuación de Euler

Para que una columna se pandee elásticamente, deberá ser larga y esbelta. Su carga de pandeo  $P$  se puede calcular con la fórmula de Euler

#### Ecuación 10

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

$P$  = Carga crítica de Euler

$E$  = Módulo de elasticidad

$I$  = Inercia de la sección

$L$  = Longitud

Lo anterior quiere decir que cuanto mayor es la longitud de la barra menor será la carga crítica que podrá soportar, por lo que es más fácil que suceda el pandeo; sin embargo, para determinar el esfuerzo de pandeo de Euler se debe relacionar la esbeltez de la columna y esta se puede expresar de la siguiente forma por la siguiente ecuación:

**Ecuación 11**

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} = F_e$$

**2.11.4 Restricción de los extremos y longitud efectiva**

Las columnas con resistencia apreciable de rotación y desplazamiento pueden soportar cargas mucho mayores que aquellas con poca restricción de los extremos, como es el caso de columnas con extremos articulados.

La longitud efectiva de una columna es la distancia entre puntos de momento nulo en la columna, es decir, la distancia entre sus puntos de inflexión. En las especificaciones de acero la longitud efectiva de una columna se denomina  $KL$ , en donde  $K$  es el factor de longitud efectiva.

$K$  es el valor por el que se debe de multiplicar la longitud de la columna para obtener su longitud efectiva, su magnitud depende de la restricción rotacional en los extremos de la columna y de la resistencia al movimiento lateral de esta. El concepto de longitud efectiva es simplemente un método matemático para reemplazar una columna con cualquier condición en los extremos, por una columna equivalente con extremos articulados.

**Figura 8**

*Factores de K*

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

De *Diseño de estructuras de acero*, por McCormac & Csernak, 2012, Alfaomega Grupo Editorial.

Sin embargo, si las columnas forman parte de un pórtico continuo sometido a desplazamiento lateral es conveniente realizar un análisis más detallado, conviene mencionar que el desplazamiento lateral se refiere a un tipo de pandeo. En estructuras estáticamente indeterminadas el desplazamiento lateral ocurre donde los pórticos se curvan lateralmente debido a la presencia de cargas laterales, o cargas verticales asimétricas, o donde los pórticos son asimétricos.

Asimismo, el desplazamiento lateral ocurre en columnas cuyos extremos se pueden mover transversalmente cuando son cargadas hasta que ocurre el pandeo. El método más común para obtener las longitudes efectivas es emplear los monogramas, los cuales fueron desarrolladas por O.G. Julian y L.S. Lawrence, y frecuentemente se les conoce como los monogramas de Jackson y Moreland.

### 2.11.5 Propiedades de los elementos a compresión

La tabla B4.1b del AISC 360 proporciona las relaciones de ancho / espesor límite recomendadas para elementos a compresión de acero estructural. Estas relaciones son importantes

porque los elementos a compresión pueden fallar debido a pandeo lateral o local, lo que puede provocar la pérdida de estabilidad de la estructura.

Para elementos estructurales con una sección no esbelta, la relación ancha / espesor de sus elementos comprimidos no debe exceder los valores límite  $\lambda_r$  recomendados por la tabla B4.1b. Si la relación ancha / espesor de cualquier elemento sujeto a compresión excede el valor  $\lambda_r$ , entonces la sección se considera esbelta y está sujeta a pandeo lateral.

Además, la tabla B4.1b proporciona valores de relaciones de ancho / espesor para diferentes tipos de secciones, como secciones cuadradas, rectangulares, circulares, tubulares, esto en función del tipo de carga y del tipo de material utilizado.

Es importante tener en cuenta que las relaciones de ancho / espesor son solo una guía y deben ser utilizadas en conjunto con otras consideraciones de diseño y análisis. También es importante distinguir entre elementos rigidizados y no rigidizados. Los elementos no rigidizados son aquellos que tienen un borde libre paralelo a la dirección de la fuerza de compresión, mientras que los elementos rigidizados están soportados a lo largo de los bordes en esa dirección.

Por lo tanto, debemos considerar que:

- Para elementos estructurales con una sección no esbelta, la relación, ancho / espesor de sus elementos comprimidos no debe de exceder los valores  $\lambda_r$
- Si la relación, ancho / espesor de cualquier elemento sujeto a compresión excede el valor  $\lambda_r$ , entonces la sección se considera esbelta.
- Elementos no rigidizados: elemento o pieza proyectada con un borde libre paralelo a la dirección de la fuerza de compresión.
- Elementos rigidizados: elementos o piezas que están soportadas a lo largo de los bordes en esa dirección.

### **2.11.6 Resistencia a compresión**

La resistencia a la compresión del acero depende de varios factores como el tipo, grado, forma y dimensiones de la sección transversal, así como la longitud efectiva del elemento sometido

a compresión; en general, el acero es un material altamente resistente a la compresión y su capacidad de carga se puede mejorar con técnicas de diseño y fabricación adecuadas.

Sin embargo, la resistencia a la compresión puede verse afectada por factores como la temperatura, presencia de defectos y calidad del material, por lo que se deben realizar pruebas y análisis cuidadosos para garantizar la seguridad y confiabilidad del elemento de acero en servicio. En el caso de una columna de alma abierta, la resistencia a la compresión puede verse afectada por el pandeo local o pandeo lateral.

Para prevenir la falla por pandeo, se deben cumplir ciertas relaciones de ancho a espesor y otras consideraciones de diseño, además se deben considerar los componentes involucrados como: las placas de extremo utilizadas para fijar la columna a la estructura circundante y las conexiones entre la columna y las vigas o elementos adyacentes. El material utilizado en la columna, incluyendo la resistencia a la tracción y la compresión, la ductilidad y la capacidad de deformarse sin fallar, también debe ser considerado.

En resumen, la resistencia a la compresión de una columna de alma abierta depende de varios factores y componentes, y debe diseñarse cuidadosamente para prevenir la falla por pandeo local o lateral y garantizar la seguridad y confiabilidad en servicio. Las ecuaciones que controlan la resistencia de diseño para pandeo por flexión de una columna pueden determinarse con el capítulo E de las especificaciones LRFD del AISC 360-16, donde se debe cumplir la relación entre la resistencia de diseño y las cargas factorizadas.

### **2.11.7 Diseño por flexión**

El diseño a flexión de las vigas de acero según la norma AISC 360-16 se realiza en el Capítulo H, específicamente en la Sección H1, titulada "Design of Members for Flexure" (Diseño de miembros para flexión).

La resistencia a la flexión de una viga,  $M_n$ , se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones generales para vigas prismáticas y no prismáticas de la Sección H1.1, donde  $F_y$  es el límite de fluencia del acero y  $Z_x$  es el módulo de sección plástico respecto al eje x-x.

### Ecuación 12

$$M_n = F_Y * Z_X$$

Donde:

$M_n$  = Resistencia a la flexión.

$F_Y$  = Límite de fluencia del acero.

$Z_X$  = Módulo de sección plástico.

### Ecuación 13

$$M_n = C_b \left( M_p - (M_p - M_y) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right) \text{ (para secciones no compactas)}$$

Donde:

$C_b$ : factor de modificación del momento que se utiliza para vigas en voladizo o con varios tramos.

$M_p$ : es el momento plástico de la sección

$M_y$ : es el momento en que se inicia el rendimiento.

$\lambda$ ,  $\lambda_p$ , y  $\lambda_r$ : son parámetros que describen la esbeltez de la sección, (donde  $\lambda$  es el radio de esbeltez real y  $\lambda_p$ , y  $\lambda_r$ : son los radios de esbeltez límite para el pandeo local y el pandeo lateral torsional, respectivamente).

Es importante tener en cuenta que la Sección H1.1 proporciona directrices para el diseño de vigas prismáticas y no prismáticas sometidas a flexión sobre el eje fuerte. Para el diseño de vigas sometidas a flexión sobre el eje débil o torsión, se deben seguir las Secciones H1.2 y H1.3, respectivamente.

La norma también incluye directrices para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional en la Sección B4.1. Al diseñar a flexión, se deben seguir las directrices para las categorías de esbeltez de las secciones, estas secciones se clasifican como compactas, no compactas o esbeltas,

las secciones esbeltas no se pueden utilizar en el diseño a menos que se realice un análisis de segundo orden.

Todas estas normas y ecuaciones se pueden aplicar a las vigas tipo W que se utilizan en la construcción de naves industriales para garantizar que sean capaces de resistir las cargas aplicadas durante la construcción y después de la finalización de la construcción.

## **2.12 Pandeo lateral torsional**

El pandeo lateral torsional es un fenómeno que se presenta cuando una viga se somete a una carga de flexión que resulta en una deformación en la viga, causando que se tuerza y se desplace lateralmente, este fenómeno es especialmente relevante en etapas constructivas donde los miembros de acero pueden estar sometidos a cargas significativas antes de que el sistema de soporte lateral esté completamente instalado (Vinnakota, 2002).

Es importante mencionar que el pandeo lateral torsional es diferente al pandeo local y al pandeo global, ya que el pandeo local se refiere a la deformación en una parte de la sección transversal del miembro de acero, y el pandeo global se refiere a la deformación del miembro completo, por otra parte, el pandeo lateral torsional implica la deformación y la torsión del miembro a lo largo de su eje longitudinal (Vinnakota, 2002).

La resistencia al pandeo lateral torsional está influenciada por varios factores, incluyendo la forma de la sección transversal del miembro, el tipo de soporte lateral proporcionado, y la distribución de las cargas de flexión. En la norma AISC 360-16, la resistencia al pandeo lateral torsional se calcula en base a la capacidad plástica de momento,  $M_p$ , la resistencia de fluencia del acero  $F_y$ , y un factor de modificación del momento  $C_b$ , que se utiliza para tener en cuenta la distribución no uniforme del momento a lo largo de la longitud no soportada de la viga (AISC, 360-16, Sección F1).

El AISC 360-16 también divide la longitud de la viga entre puntos de soporte lateral y en tres zonas: zona plástica, zona de transición y zona elástica; estas ayudan a determinar la capacidad de resistencia de la viga al pandeo lateral torsional (McCormac, 2017).

La carga aplicada a la estructura se debe calcular según las guías proporcionadas por la norma ASCE 7-16, que especifica cómo determinar las cargas muertas, vivas, de viento y sísmicas

(ASCE, 2016). Los códigos de construcción también pueden requerir que se consideren otros tipos de cargas, como las cargas de nieve o las cargas de sismo.

Así bien, el pandeo lateral torsional es un fenómeno de fallo estructural importante que debe ser considerado en el diseño y la construcción de naves industriales. Las normas AISC 360-16 y ASCE 7-16 proporcionan las guías y los procedimientos necesarios para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional y las cargas aplicadas a la estructura, respectivamente.

Para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional, es necesario seguir los procedimientos especificados en las secciones B3 y F2 del AISC 360-16. En particular, se requiere la determinación del factor de modificación del momento,  $C_b$ , que representa la distribución de momento no uniforme a lo largo de la longitud no soportada de la viga (AISC, 360-16, Sección F1).

#### **Ecuación 14**

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} = \quad \text{(F1-1)}$$

Donde:

$M_{max}$  : es el momento máximo en la longitud no soportada-

$M_A$ ,  $M_B$  y  $M_C$ : son los momentos absolutos en los cuartos de punto, en la mitad y en los tres cuartos de punto, respectivamente, a lo largo de la longitud no soportada.

El AISC 360-16 también proporciona ecuaciones específicas para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional en la zona plástica, la zona elástica y la zona de transición (AISC, 360-16, Secciones F2.2, F2.4, y F2.3, respectivamente). Estas zonas están determinadas por la longitud entre puntos de soporte lateral ( $L_b$ ) y se comparan con dos longitudes de referencia  $L_p$  y  $L_r$  (McCormac, 2017).

Las ecuaciones para calcular estas longitudes de referencia son:

#### **Ecuación 15**

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Donde:

$L_p$  = Longitud plástica.

$r_y$  = Radio de giro en Y.

$E$  = Módulo de elasticidad del acero.

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero.

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

Donde:

$L_r$  = Longitud límite sin soporte lateral.

$r_{ts}$  = Radio de giro efectivo.

$E$  = Módulo de elasticidad del acero.

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero.

$Jc$  = Módulo de torsión.

$S_x$  = Módulo elástico.

$h_o$  = Distancia entre centros de patín.

Las cargas aplicadas a la estructura se deben determinar de acuerdo con las normas de la ASCE 7-16 (ASCE, 2016), que proporciona guías para calcular las cargas muertas, vivas, de viento y sísmicas.

En las etapas constructivas de naves industriales, es frecuente la existencia de condiciones de soporte lateral incompletas, por lo que, durante este período, los elementos estructurales, como las vigas y las columnas, pueden estar sujetos a cargas significativas sin la presencia de soportes laterales adecuados. Como resultado, estos elementos pueden ser susceptibles al pandeo lateral torsional (Vinnakota, 2002).

El diseño de naves industriales debe tener en cuenta esta susceptibilidad al pandeo lateral torsional durante las etapas constructivas, por lo que la correcta secuenciación y programación de

la construcción pueden ayudar a mitigar este riesgo, por ejemplo, la instalación temprana de elementos de soporte lateral, como los miembros de celosía o los paneles de revestimiento, puede proporcionar un soporte lateral adicional a las vigas y las columnas durante la construcción (Vinnakota, 2002).

### **2.12.1 Pandeo lateral torsional en vigas y columnas**

El diseño de las vigas y las columnas debe considerar las cargas que se aplicarán durante las etapas constructivas, estas cargas se pueden calcular utilizando las guías proporcionadas por la norma ASCE 7-16 (ASCE, 2016). Es importante notar que estas cargas pueden diferir de las cargas que se aplicarán a la estructura terminada, por lo tanto, el diseño de las vigas y las columnas debe ser adecuado tanto para las cargas de construcción como para las cargas finales.

La norma AISC 360-16 proporciona procedimientos para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional en vigas y columnas durante las etapas constructivas (AISC, 2016). Estos procedimientos tienen en cuenta factores como la forma de la sección transversal del miembro, el tipo de soporte lateral proporcionado y la distribución de las cargas de flexión.

Las vigas tipo W son especialmente susceptibles al pandeo lateral torsional debido a su geometría ya que la gran separación entre las bridas de las vigas tipo W puede hacer que estas vigas sean propensas a la torsión cuando se cargan en flexión, lo que puede llevar al pandeo lateral torsional.

En la etapa constructiva, una viga tipo W puede estar expuesta a cargas de construcción significativas antes de que se instalen los sistemas de soporte lateral, como los miembros de celosía y los paneles de revestimiento por lo que, durante este período, la viga puede ser particularmente vulnerable al pandeo lateral torsional.

Para mitigar este riesgo, se deben seguir las directrices de la norma AISC 360-16 para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional ya que estas proporcionan procedimientos para calcular la resistencia

Durante las etapas constructivas de naves industriales con marcos compuestos por vigas tipo W, se presentan varios desafíos relacionados con el pandeo lateral torsional. Las vigas tipo W, también conocidas como vigas de acero de brida ancha, son susceptibles a este fenómeno

debido a su alta relación de ancho a espesor y a la gran separación entre las bridas (McCormac, 2017).

La falta de soporte lateral en estas etapas aumenta aún más la vulnerabilidad de estas vigas al pandeo lateral torsional, por lo que, durante el diseño y la construcción, es imprescindible considerar estas circunstancias para garantizar la integridad estructural de la nave industrial.

Una estrategia efectiva para mitigar el riesgo de pandeo lateral torsional es proporcionar soportes laterales temporales durante la construcción, hasta que los elementos permanentes de soporte lateral, como los miembros de celosía y los paneles de revestimiento, estén en su lugar, esto puede mejorar la resistencia de las vigas al pandeo lateral torsional (Vinnakota, 2002).

Además, es crucial considerar las cargas que se aplicarán durante las etapas constructivas, puesto que estas pueden diferir de las cargas que se aplicarán a la estructura terminada. Así, el diseño de las vigas tipo W debe ser adecuado para resistir tanto las cargas de construcción como las cargas finales, según lo descrito en la norma ASCE 7-16 (ASCE, 2016).

Para calcular la resistencia al pandeo lateral torsional en vigas tipo W, se deben seguir las directrices de la norma AISC 360-16, mismas que proporcionan procedimientos que tienen en cuenta factores como la forma de la sección transversal del miembro, el tipo de soporte lateral proporcionado, y la distribución de las cargas de flexión. (AISC, 2016)

### **2.12.2 Diseño para esfuerzos combinados y su impacto en el pandeo lateral torsional**

El análisis y diseño de estructuras de acero que están sujetas a esfuerzos combinados constituyen una parte vital de la ingeniería estructural, y estas consideraciones son particularmente relevantes en el contexto del pandeo lateral torsional en la construcción de naves industriales. Los esfuerzos combinados, que incluyen la flexión y la compresión axial, pueden actuar en conjunto para inducir el pandeo lateral torsional, un fenómeno que se manifiesta como una deformación fuera del plano de la viga, combinada con un efecto de torsión (American Institute of Steel Construction, 2016).

Las vigas de acero, que son elementos constructivos comunes en las estructuras de las naves industriales, a menudo experimentan esfuerzos combinados durante las etapas de construcción. La flexión puede ser causada por cargas aplicadas en la parte superior de la viga,

mientras que la compresión axial puede resultar de cargas de compresión transmitidas desde otras partes de la estructura (American Institute of Steel Construction, 2016).

Para diseñar de manera efectiva estas estructuras y prevenir el pandeo lateral torsional, es necesario considerar la interacción de estos esfuerzos, la norma AISC 360-16 presenta una ecuación de interacción que proporciona una herramienta esencial para este propósito:

### **Ecuación 16**

$$\frac{P_n}{\phi P_n} + \frac{M_n}{\phi M_n} \leq 1.0$$

Donde:

$P_n$  = Resistencia de compresión nominal.

$\phi P_n$  = Resistencia de diseño compresión.

$M_n$  = Resistencia de flexión.

$\phi M_n$  = Resistencia de diseño en flexión.

Si el resultado de la ecuación es menor o igual a 1, entonces la viga es segura para las cargas aplicadas. Si el resultado es mayor que 1, la viga está en riesgo de falla y debe ser modificada. (American Institute of Steel Construction, 2016).

Por lo tanto, el diseño para esfuerzos combinados juega un papel crucial en la prevención del pandeo lateral torsional en la construcción de naves industriales. Un análisis y diseño cuidadosos que consideren la interacción de la flexión y la compresión axial pueden garantizar que la estructura sea segura y capaz de soportar todas las cargas previstas durante la construcción y la vida útil de la estructura.

## **2.13 Análisis Sísmico**

Este es un proceso por el cual se calcula la respuesta de una estructura a un terremoto, para el análisis sísmico en esta investigación se utilizó el Código Sísmico de Costa Rica 2010, revisión 2014 (CSC14).

### **2.13.1 Método Estático**

Se utilizará el método estático el cual cuantifica los efectos del sismo sobre la edificación mediante el análisis elástico- lineal del sistema estructural solicitado por un conjunto de fuerzas estáticas horizontales aplicados en cada uno de sus niveles. El valor de estas fuerzas es el resultado

de suponer un primer modo de oscilación cuyos componentes en cada entrepiso son proporcionales a su altura y un cortante en la base igual al producto del coeficiente sísmico por el peso total de la edificación. (CSC 2014 p. 7/4)

Debido al carácter aproximado de este método este tiene la característica de que su uso se limita a estructuras que reúnan las siguientes características: edificios regulares en su planta, edificios regulares en altura y con un número de pisos no superior a cinco, así como una altura máxima sobre el nivel de calle o acceso superior a veinte metros.

Las cargas sísmicas se calculan aplicando una fuerza sísmica horizontal en cada dirección ortogonal cuyo valor es  $V$ , según la ecuación 13.

#### **Ecuación 17**

$$F_i = V \frac{W_i h_i}{\sum_{k=1}^N W_k h_k}$$

Donde:

$F_i$ = Fuerza sísmica aplicada al nivel  $i$

$V$ = Cortante en la base

$h_i$  =altura del nivel  $i$  sobre el nivel de base

Las fuerzas sísmicas  $F_i$  se aplican en el centro de masa de cada nivel  $i$ .

Y para cortante de la base se aplica la ecuación:

#### **Ecuación 18**

$$V = C * W$$

Donde:

$V$ =Cortante en la base o sumatoria de todas las fuerzas sísmicas horizontales en cada dirección ortogonal.

$C$ =Coeficiente sísmico obtenido según indicaciones del capítulo 5 del CSCR-14.

Este enfoque se distingue por su empleo de cargas sísmicas constantes en relación al tiempo, centrándose en la evaluación de un único modo de vibración de la estructura. Sin embargo, esta metodología presenta ciertas limitaciones debido a su análisis determinístico de las cargas

sísmicas. Por lo tanto, se restringe a edificios que poseen regularidad en su planta, así como edificios con uniformidad en su altura. Además, este método se aplica solamente a edificaciones con un número máximo de 5 pisos o una altura máxima sobre el nivel de calle o acceso que no exceda los 20 metros. (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2014, p. 7/4-7/5)

#### **2.13.1.1 Desplazamiento y Derivas**

El método estático es una forma simplificada de análisis sísmico que considera una distribución estática de las fuerzas sísmicas. En cuanto a las derivas, representan las desviaciones laterales máximas que una estructura puede experimentar durante un terremoto. El código sísmico especifica los límites de derivas permisibles para prevenir daños estructurales significativos (Código Sísmico de Costa Rica, 2010).

#### **2.13.1.2 Zonificación Sísmica**

La zonificación sísmica es un proceso que divide una región o país en diferentes zonas según el nivel de amenaza sísmica. Cada zona tiene un nivel de amenaza asociado, que se utiliza para determinar las cargas sísmicas de diseño (Código Sísmico de Costa Rica, 2010).

#### **2.13.2 Sitios de Cimentaciones**

El código sísmico también proporciona directrices sobre los sitios de cimentación. Estas directrices se refieren a los diferentes tipos de suelo y roca que se pueden encontrar en un sitio de construcción y cómo estos pueden afectar la respuesta sísmica de la estructura (Código Sísmico de Costa Rica, 2010).

#### **2.13.3 Aceleración Pico Efectiva y Coeficiente Sísmico**

La aceleración pico efectiva es una medida de la intensidad del terremoto en términos de aceleración. El coeficiente sísmico, por otro lado, es un factor que se utiliza para calcular las cargas sísmicas de diseño. Ambos son fundamentales para determinar la amenaza sísmica a la que está expuesta una estructura (Código Sísmico de Costa Rica, 2010).

#### **2.13.4 Cargas Sísmicas**

Las cargas sísmicas son las fuerzas inducidas por un terremoto que actúan sobre una estructura. El código sísmico proporciona las fórmulas y directrices para calcular estas cargas (Código Sísmico de Costa Rica, 2010).

## **2.14 Cargas de Viento**

Las cargas de viento son fuerzas ejercidas sobre una estructura por el movimiento del viento alrededor de ella, estas pueden variar dependiendo de factores como la velocidad y la dirección del viento, la forma y la altura de edificio, y el tipo de terreno circundante (ASCE 7, 2016)

### **2.14.1 Código Nacional de Vientos de Costa Rica**

Costa Rica tiene su propio código que proporciona recomendaciones y regulaciones para el diseño de estructuras en áreas sujetas a vientos fuertes. Este código define las velocidades básicas del viento y proporciona factores de corrección basados en la altura y el tipo de estructura, así como la topografía y la rugosidad del terreno (Código Nacional de Vientos de Costa Rica, 2023).

Es importante mencionar que el Código Nacional de Vientos de Costa Rica está influenciado por normas internacionales, en particular por el ASCE 7 de los Estados Unidos, el cual proporciona un método integral para calcular las cargas de viento con base en una serie de factores, incluyendo la velocidad básica del viento, la exposición al viento, la importancia de la estructura y la topografía circundante (ASCE 7, 2016).

## **2.15 Método de Elementos Finitos (MEF)**

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica avanzada para la solución aproximada de problemas de contorno derivados de ecuaciones diferenciales parciales, que son típicas en la mecánica estructural. El método puede aplicarse a problemas lineales y no lineales en dominios tanto estáticos como dinámicos.

El MEF divide un dominio continuo, como una estructura, en una serie de subdominios discretos o elementos. Cada elemento está interconectado a través de nodos. La solución para cada elemento se expresa en términos de desplazamientos nodales. Al aplicar condiciones de continuidad y equilibrio en los nodos y sumar las contribuciones de todos los elementos, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que se pueden resolver mediante técnicas matriciales. (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

Uno de los principales beneficios del MEF es su capacidad para modelar geometrías complejas y condiciones de contorno irregulares con precisión. Además, el método es altamente

flexible; los investigadores pueden seleccionar diferentes tipos de elementos (por ejemplo, lineales, cuadráticos, tetraédricos, hexaédricos) según las necesidades específicas del problema en cuestión.

El MEF ha demostrado ser una herramienta invaluable en la ingeniería estructural, especialmente en el análisis de estructuras complejas y sistemas que no pueden ser fácilmente analizados por métodos analíticos tradicionales (Cook, et al., 2002).

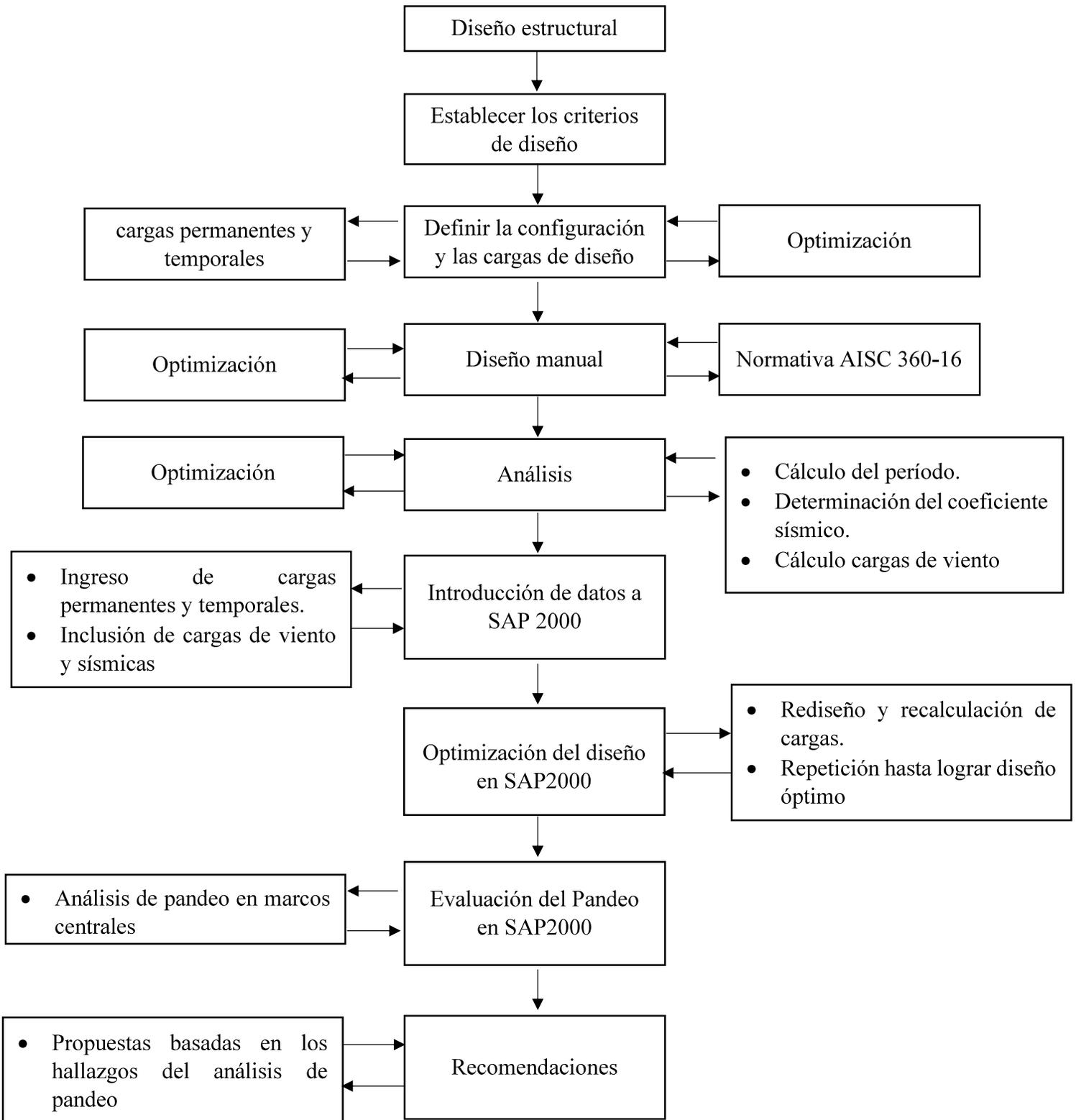
### **2.16 Aplicación del Método de Elementos Finitos y Valores Propios en SAP2000**

El método de elementos finitos (MEF) es una herramienta poderosa que descompone sistemas complejos en componentes más pequeños, llamados elementos, para realizar un análisis detallado. SAP2000, desarrollado por Computers & Structures, Inc., es una aplicación líder en el campo del análisis estructural que aprovecha el MEF para analizar el comportamiento de estructuras bajo diversas cargas (CSI, 2018).

El análisis de valores propios, por otro lado, es esencial para entender y prever los modos de vibración de una estructura. En el contexto del pandeo lateral torsional, permite determinar las cargas críticas que provocan el pandeo y evaluar la capacidad de una estructura para resistir dichas cargas. SAP2000, mediante su función de análisis modal, puede calcular rápidamente estos valores propios y modos asociados, proporcionando una visión clara de la respuesta estructural y las áreas de preocupación potencial (Chopra, 2007).

La combinación de estas dos herramientas en SAP2000 permite modelar y analizar eficazmente el pandeo lateral torsional en naves industriales. El software proporciona una representación gráfica detallada, ayudando a identificar áreas de mayor riesgo y permitiendo a los ingenieros diseñar soluciones adecuadas.

### CAPÍTULO 3. Marco Metodológico.



### **3.1 Paradigma, enfoque metodológico y métodos de investigación.**

#### **3.1.1 Paradigma positivista.**

Las ecuaciones, fundamentos y cálculos utilizados como el método más común para obtener las longitudes efectivas, desarrolladas por O.G. Julian y L.S. Lawrence, las ecuaciones que controlan la resistencia de diseño para pandeo por flexión de una columna en el capítulo E de las especificaciones LRFD del AISC 360-16, entre otras son análisis y medidas explicadas a través de métodos científicos enfocados en la obtención de datos cuantitativos y los métodos más utilizados son análisis estadísticos, para las investigaciones que contiene este proyecto el análisis paradigma positivista podría definir las investigaciones que contiene este proyecto.

Las investigaciones que contiene este proyecto son los principales métodos de análisis estructural para las naves industriales para llevar a cabo los diseños Sismorresistente considerando las directrices del código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2014).

#### **3.2 Enfoque metodológico cuantitativo.**

La recolección de datos numéricos utilizando programas como Microsoft Office Excel y SAP 2000, son programas que pueden brindar la descripción para examinar las variables para la capacidad real de estos elementos y asegurar la seguridad en su uso, brindando una relación para el análisis en la construcción utilizando secciones de alma abierta para elementos estructurales incluidos en grandes luces, como los pórticos de naves industriales de condición pesada.

#### **3.3 Método de investigación.**

En el análisis estructural las encuestas son una herramienta considerable, concretamente cuando se toman en cuenta estudios cuantitativos, comprender la conexión entre variables y como estas influyen en la estructura o patrón de las naves industriales es el análisis estructural. Se pueden recopilar datos a través de las encuestas y realizar un análisis más profundo de la estructura de las naves industriales.

Considerar los siguientes aspectos es importante al utilizar encuestas en el análisis estructural de naves industriales.

#### **3.4 Identificación de variables.**

En el análisis del pandeo torsional para naves industriales, es importante considerar una serie de variables que influyen en la estabilidad y comportamiento de la estructura. Estas variables

permiten evaluar el riesgo de pandeo torsional y tomar medidas preventivas y correctivas. A continuación, se presentan algunas de las variables clave a tener en cuenta.

#### **3.4.1 Geometría de la Estructura.**

- Longitud, ancho y altura de la nave industrial.
- Perfil y forma de las columnas y vigas.
- Configuración y disposición de los elementos estructurales.

#### **3.4.2 Materiales Utilizados.**

- Propiedades mecánicas del acero u otros materiales de construcción.
- Rigidez a la torsión y flexión de los elementos estructurales.

#### **3.4.3 Cargas Aplicadas.**

- Cargas permanentes (peso propio de la estructura, equipos, revestimientos, etc.).
- Cargas variables (cargas vivas, almacenamiento, equipos en movimiento).
- Cargas de viento y sismo.

#### **3.4.4 Condiciones de Apoyo y Restricciones.**

- Tipos de apoyos (articulaciones, empotramientos, apoyos deslizantes).
- Condiciones de apoyo en la base de columnas y pilares.

#### **3.4.5 Cargas de Viento.**

- Velocidad del viento en la ubicación de la nave industrial.
- Coeficientes de presión y carga resultante en la estructura.

#### **3.4.6 Efectos de Temperatura.**

- Dilatación térmica de los elementos estructurales.
- Efectos de temperatura en la rigidez y comportamiento torsional.

#### **3.4.7 Cambios en la Configuración.**

- Modificaciones en la estructura con el tiempo (agregado de equipos, remodelaciones).
- Cambios en las cargas debidos a adaptaciones en la operación de la nave.

#### **3.4.8 Evaluación de Torsión.**

- Consideración de las fuerzas torsionales debidas a desequilibrios de carga.
- Evaluación de la rigidez a la torsión de la estructura.

### **3.4.9 Capacidad de Diseño.**

- Comparación entre las cargas aplicadas y la capacidad resistente de la estructura a la torsión.
- Factor de seguridad y nivel de tolerancia al pandeo torsional.

### **3.4.10 Análisis Numérico y Modelado.**

- Utilización de software de análisis estructural para modelar el comportamiento torsional.
- Validación de los resultados mediante comparaciones con ensayos o métodos analíticos.

### **3.4.11 Normativas y Códigos.**

- Cumplimiento de las normativas de diseño sísmico y de viento correspondientes a la región.

**Tabla 1****3.5 Categorías de análisis de la investigación.***Cuadro de operacionalización de las variables*

Objetivo Específico	Variable	Herramienta
-Determinar las diferentes condiciones de carga a la que la estructura se ve sometida durante las etapas de construcción.	-Independiente: Tipos de materiales Aceleración pico efectiva de diseño. Clasificación del edificio según importancia.	-Entrevistas sobre temas estructurales en el diseño de naves Industriales.  -Para el análisis de contenido y escalas de medición se utilizará el programa Microsoft Office Excel, para los resultados de fórmulas y cálculos adquiridos en libros y estudios de información sobre temas estructurales para el diseño, pre dimensionamiento y modelo final de los elementos requeridos para la construcción de una nave industrial.
Modelar las condiciones de pandeo en la nave, en elemento finito mediante métodos matriciales, vectores y valores propios, para diferentes condiciones de carga, pandeo local y pandeo global	Ductilidad local según el tipo de sistema Sismorresistente. Sobre resistencia. Cargas de viento según código urbano. Pre dimensionamiento de elementos	-SAP 2000 como herramienta para el modelaje del diseño.
Diseño completo de una nave industrial, para condiciones ultimas y de servicio.	-Dependiente: Descripción del edificio (Geometría) Normativas de diseño (CSCR 10, AISC 360-10, Lineamiento técnico para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica.) Metodología de cálculo (LRFD) Análisis (Estático) Modelado en SAP 2000	- Para analizar y sacar conclusiones de los datos recopilados se utilizará las normativas de diseño (CSCR 10, AISC 360-10, Lineamiento técnico para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica).

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

### **3.6 Población y muestra.**

El foco principal de estudio para la búsqueda en el presente proyecto es garantizar el diseño y la construcción de las naves industriales de acero debido a que se ha convertido en una práctica común por sus grandes beneficios tanto en la facilidad de adquirir resistencia y durabilidad, como en las ventajas en la duración total de su construcción.

La siguiente investigación tiene como propósito estar dirigida a grupo de profesionales en ingeniería que pueden verse beneficiados con los aportes donde demuestra cálculos por el fenómeno de inestabilidad por pandeo local y global, y la evaluación de las condiciones de estabilidad en naves industriales, demostrando con cálculos y procedimientos para resolver variables significativas para brindar seguridad en el proceso demostrando la importancia y garantía que realizar correctamente el análisis y diseño estructural como practica indispensable previo a la ejecución de un proyecto puede mejorar la imagen de la industria de la construcción tomando en consideración calidad y costos, reduciendo de los costos de mantenimiento y reparación a largo plazo, entornos más seguros con el aprovechamiento de las cantidades considerables de materiales en la industria de la construcción que se pueden añadir al diseño.

Los elementos considerados tomados en cuenta en la exploración y planificación requerida para el diseño de naves industriales de características que contengan 4 marcos de aceros separados, de 10 metros cada uno para un ancho de 40 metros y una longitud total de 30 metros con una altura al codo externo del marco de 8.5 metros y con una cubierta a 2 aguas y todos los cálculos, procedimientos y materiales que se deben modelar para obtener los resultados para garantizar que cumplen con las limitaciones establecidas por entidades que rigen los procesos constructivos en Costa Rica. Se toma en cuenta los diversos materiales para los marcos de las estructuras formados por viga tipo W fabricadas en acero A-992 de grado 50, las riostras y vigas de amarre se conforman con tubos laminados en frío A-500 de grado 46, adicional, se considera las tensoras del techo conformadas por barras lisas de grado 60.

### **3.7 Técnicas de muestreo.**

Consideras las condiciones de pandeo en el diseño de una nave industrial tomando en cuenta elementos finito mediante métodos matriciales, vectores y valores propios, donde las condiciones de carga, pandeo local y pandeo global son las variables principales del análisis, en el presente proyecto de investigación son seleccionadas a propósito por el investigador se podría designar como muestreo intencional como técnica aplicada.

La justificación de las razones para su elección es debido a brindar aportes para la construcción de edificaciones de naves industriales con elementos estructurales de grandes luces brindando a los lectores procedimientos y análisis para la adecuada recolección de datos y ejecución de los comportamientos por pandeo lateral torsional que afectan directamente estos diseños, y requieren ser tomados considerablemente en los cálculos para el dimensionamientos de los elementos requeridos para uniones y nodos. En el proceso de construcción de edificaciones con elementos estructurales de grandes luces puede presentar gran número de variables en tomar en cuenta, sin embargo, para interpretar de manera adecuada la información en el actual documento es el enfoque principal es el análisis y diseño estructural completo para condiciones últimas de servicio.

### **3.8 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

En el siguiente proyecto de investigación se utilizaron libros de información sobre estudios estructurales para análisis y diseño estructural en condiciones últimas de servicio de una nave industrial. seguidamente de un modelo en tres dimensiones donde se evaluará las condiciones de carga en diferentes etapas constructivas mediante un programa de análisis de elemento finito y no. Para la recolección de datos se utilizó el programa SAP 2000 para revisar las condiciones de pandeo tanto local como global de la estructura. Para la ejecución y revisión de fórmulas recolectadas en los libros de información para llevar a cabo la investigación se utilizó el programa Microsoft office Excel.

### **3.9 Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos.**

Para el procesamiento y análisis de datos estructurales se considera la relación y patrones para la obtención de resultados en el diseño por pandeo torsional utilizando las principales técnicas.

### **3.10 Modelos de ecuaciones simultáneas (SIM).**

Para el estudio de las interrelaciones entre múltiples variables dependientes e independientes se resuelven las ecuaciones aplicando el método de elementos finitos y valores propios en SAP200, las consideraciones siguiendo las directrices del Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2014), estimación del periodo de los primeros modos de vibración, cálculo del periodo Fundamental de Vibración utilizando el Método Estático y diseño por presión básica del viento.

### **3.11 Análisis de datos longitudinales.**

En el ámbito de la ingeniería estructural, cuando se manejan conjuntos de datos recopilados en distintos instantes temporales, se abre la posibilidad de emplear enfoques analíticos que consideran el pandeo torsional. Este fenómeno, que involucra tanto la flexión como la torsión de elementos estructurales, cobra importancia al abordar la estabilidad de sistemas expuestos a cargas y fuerzas. Para estudiar con profundidad los cambios y las tendencias a lo largo del tiempo, es posible aplicar técnicas de análisis longitudinal de datos.

El análisis de pandeo torsional se centra en la interacción entre las fuerzas de flexión y torsión que actúan sobre una estructura. Esta interacción puede resultar en deformaciones y desplazamientos indeseados que comprometen la integridad de la estructura. Al considerar datos recopilados en diferentes instantes temporales, es posible identificar patrones de comportamiento y determinar si se han presentado cambios significativos en las condiciones de carga y funcionamiento.

La aplicación de técnicas de análisis de datos longitudinales, como el análisis de crecimiento, se convierte en una herramienta valiosa en este contexto. Estas técnicas permiten modelar la evolución de los datos a lo largo del tiempo y examinar cómo las variables relevantes se modifican y se relacionan entre sí. En el análisis estructural, esto podría implicar la observación de la relación entre las cargas aplicadas, los desplazamientos resultantes y la respuesta a pandeo torsional en distintos momentos

El análisis de pandeo torsional emerge como un componente esencial para evaluar la estabilidad de las estructuras frente a cargas cambiantes. La aplicación de técnicas de análisis de datos longitudinales, como el análisis de crecimiento, ofrece una perspectiva valiosa para identificar cambios y tendencias significativas en el comportamiento estructural a lo largo del

tiempo, proporcionando información crucial para la toma de decisiones informadas en el diseño y mantenimiento de sistemas estructurales.

## **CAPÍTULO 4. Análisis y resultados**

### **4.12 Geometría y Ubicación de la Nave Industrial**

La nave industrial de este estudio está ubicada en Heredia Centro, Costa Rica. La estructura comprende cuatro marcos de acero, separados por intervalos de 10 metros, lo que da como resultado una longitud total de la nave de 30 metros. Los marcos están compuestos por vigas tipo W, un perfil comúnmente utilizado en estructuras de acero debido a su alta resistencia y eficacia en la distribución de cargas.

La longitud de luz de la nave industrial es de 40 metros. Este espacio amplio, libre de soportes intermedios, proporciona flexibilidad para la disposición y movilización de equipos, máquinas y materiales dentro de la nave.

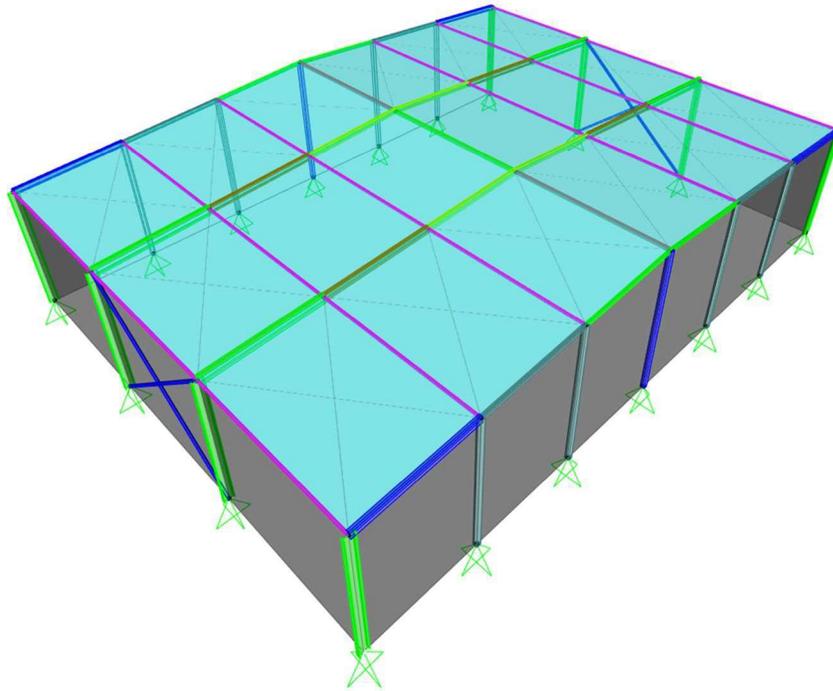
La estructura tiene una altura libre hasta el codo de 8.5 metros, permitiendo la acomodación y manejo eficiente de diversos equipos y materiales industriales de diferentes tamaños.

El diseño del techo es a dos aguas con una pendiente de 4 grados. Esta pendiente asegura un drenaje adecuado del agua de lluvia, previniendo la acumulación de agua en la superficie del techo.

En las secciones siguientes, se abordarán en detalle las características y el comportamiento de la estructura, incluyendo la resistencia de los materiales, la distribución de las cargas y las posibles implicaciones de pandeo lateral torsional.

## Figura 9

### *Geometría de la nave industrial*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

#### **4.13 Descripción de los Materiales Utilizados**

En la construcción de la nave industrial, se emplean diversos materiales con características particulares adecuadas para la función que desempeñarán dentro de la estructura.

Los marcos de la estructura se forman utilizando vigas tipo W fabricadas en acero A-992 de grado 50. Este tipo de acero se destaca por su gran resistencia al estrés y capacidad para soportar cargas pesadas, garantizando la durabilidad y seguridad de las edificaciones.

Las riostras y vigas de amarre se conforman con tubos laminados en frío A-500 de grado 46. Este material es reconocido por su resistencia y durabilidad, lo que lo convierte en una opción ideal para asegurar la estabilidad de la construcción.

Las tensoras del techo están compuestas por barras lisas de grado 60, que proporcionan un soporte adicional a la estructura del techo, contribuyendo a prevenir la aparición de deformaciones y pandeo.

#### **4.14 Consideraciones del código sísmico de Costa Rica CSCR-10**

La nave industrial, ubicada en Heredia Centro, ha sido diseñada considerando su geometría particular y los elementos estructurales propuestos.

Siguiendo las directrices del Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2014), el análisis estructural para la nave se llevó a cabo utilizando el método estático. Esta elección se debe a que el método estático es especialmente adecuado para estructuras que tienen una respuesta predominantemente elástica ante las cargas sísmicas. El método proporciona un análisis simplificado y directo, permitiendo una rápida evaluación de las demandas sísmicas sin la necesidad de realizar un análisis dinámico complejo. Además, para estructuras con una configuración regular y una distribución uniforme de la masa y la rigidez, como es el caso de la nave industrial en cuestión, el método estático tiende a ofrecer resultados precisos y confiables.

##### **4.14.1 Zonificación Sísmica**

Con base en la Tabla 2.1 del Código Sísmico de Costa Rica 2010, el edificio está ubicado en la Zona 3.

##### **4.14.2 Sitio de Cimentación**

Debido a la falta de información detallada sobre el sitio, se considera que el terreno corresponde a un suelo tipo S3, tal como lo estipula el CSCR 2010.

##### **4.14.3 Aceleración Pico Efectiva de Diseño**

Refiriéndose a la Tabla 2.3 del CSCR 2010, se determina que la aceleración pico efectiva es de 0.36g.

##### **4.14.4 Coeficiente Sísmico**

El coeficiente sísmico, según la normativa local, se determina considerando dos componentes clave: la importancia de la estructura y el factor espectral dinámico. Este coeficiente estima la demanda sísmica que una estructura enfrentará durante un terremoto.

###### **4.14.4.1 Clasificación de Edificación Según Importancia**

El edificio, por ocupación, se categoriza dentro del Grupo D (Normal). Esto se traduce en una importancia (I) de 1.0, como se establece en la Tabla 4.1 del CSCR 2010 referente a la clasificación de edificación según importancia.

#### 4.14.4.2 Factor Espectral Dinámico (FED) y Ductilidad

Con base en la Tabla 10.5 del CSCR 2010:

- En el sistema transversal, el edificio se clasifica como un sistema OMF. Esto representa una ductilidad de 1.5 para un edificio regular.
- En el sistema transversal longitudinal, se clasifica como sistema OCBF con una ductilidad también de 1.5 para un edificio regular.
- Ambos sistemas tienen una ductilidad local considerada como moderada y una sobre resistencia (SR) de 2.

#### 4.14.4.3 Estimación del periodo de los primeros modos de vibración

Siguiendo la sección 7.4.5 del Código Sísmico de Costa Rica 2010:

- En el sentido transversal para el marco de acero, el período T se calcula como  $T=0.12$   $T=0.12N$ , donde N es el número de pisos. Dado que la edificación es de un nivel,  $N=1$  por lo tanto, T resulta ser 0.12 segundos.
- En el sentido longitudinal para el marco arriostrado, el período T se calcula como  $T=0.05$   $T=0.05N$ , donde N es el número de pisos. Dado que la edificación es de un nivel,  $N=1$  por lo tanto, T resulta ser 0.05 segundos.

#### 4.14.5 Cálculo del peso sísmico

**Tabla 2**

*Cargas de los elementos*

Descripción	Cantidad	Longitud/Área	Carga (kg/m <sup>2</sup> )	Peso (tn)
Columnas de acero W 21x93	8	8.5 m		9.418
Vigas W 21x93	4	6.683 m		3.702
Vigas W 16x57	4	6.683 m		2.288
Vigas W 12x45	4	6.683 m		1.804
Vigas W 14x48	4	6.683 m		1.906
Vigas W 10x22	4	6.683 m		0.869
Vigas W 8x18	4	6.683 m		0.735
Varillas n° 8 grado 60 lisa	28	12.0276 m		1.34
Riostras 5x5x0.25	4	12.9187 m		1.27

Vigas colectoras HSS 4X4X.375	18	10 m		4.97
Vigas colectoras HSS 6X6X0.5	2	10 m		1.1
Vigas colectoras HSS 7x7x0.625	1	10 m		0.8
Columnas HSS 10X10X.375	4	8.6 m		2.8
Columnas HSS 10X10X.375	4	9.1 m		2.6
Columnas HSS 10X10X.375	2	9.6 m		3.6
Panel + insulación (Techo)		1202.7 m2	8	9.6
Clavadores de techo (Techo)		1202.7 m2	5	6.01
Ductos mecánicos (ASCE7,2002) (Techo)		1202.7 m2	20	24.05
Cielo suspendido acero tipo canal ASCE7,2002 (Techo)		1202.7 m2	10	12.02
Sistema contra incendio (Techo)		1202.7 m2	4	4.82
Equipos de sonido empotrados (Techo)		1202.7 m2	3	3.6
Sistema de iluminación (Techo)		1202.7 m2	4	4.82
Clavadores de pared (Paredes)		1194.98 m2	4	4.8
Cubierta de pared (Paredes)		1194.98 m2	8	9.55
Equipos de sonido empotrados (Paredes)		1194.98 m2	3	3.5
Peso sísmico total de la estructura				122.14

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

Al evaluar la estructura, se compararon los resultados de cargas permanentes obtenidos a través de cálculos manuales en Excel con aquellos producidos por el software especializado SAP2000. Mientras que en Excel se determinó un peso total de 122.14 toneladas, SAP2000 estimó 128 toneladas. Esta discrepancia se traduce en un porcentaje de error del 4.58%.

Dada esta variación, se optó por seguir adelante con los valores derivados de SAP2000. La revisión manual no solo sirvió como herramienta de validación, sino que también garantizó una calibración adecuada de los datos utilizados en el software, asegurando un análisis más fidedigno.

Debido a las características específicas de la edificación en estudio, las cargas temporales de techo no se incluyen en el análisis. En el contexto de este tipo de estructuras, no es habitual la presencia de una carga temporal de 40 kg/m<sup>2</sup>. Esta decisión está motivada no solo por el patrón de uso y la naturaleza inherente de estos techos, sino también por un enfoque de diseño funcional. Las cargas permanentes a las que están sujetas estas estructuras ya imponen una demanda significativa. La adición de una carga temporal, en este caso, conduciría a un diseño excesivamente conservador, lo que sería inapropiado para su función prevista. Además, para el propósito de este estudio, que es el análisis del pandeo en elementos bajo cargas gravitacionales, la inclusión de cargas temporales no es pertinente.

#### 4.14.5.1 Cálculo del coeficiente sísmico

En el diseño sismorresistente, el coeficiente sísmico es crucial, pues define la respuesta dinámica de la estructura frente a un sismo. Para la determinación de dicho coeficiente en la presente investigación, se siguió el Capítulo 5 del Código Sísmico de Costa Rica.

##### **Ecuación 19**

$$C = \frac{A_{ef} * I * FED}{SR}$$

$A_{ef}$  = Aceleración pico efectiva.

$I$  = Importancia.

FED = Factor espectral dinámico

SR = Sobre resistencia

La ecuación anterior se utiliza para evaluar la respuesta sísmica de un sistema estructural. Este coeficiente sísmico define la influencia del movimiento sísmico en el comportamiento de la estructura.

Para el sistema analizado, los valores del coeficiente sísmico en las direcciones X e Y se calcularon de la siguiente manera:

### Primera iteración

- Dirección en X:

$$C_X = \frac{0.36 * 1 * 1.739}{2}$$

$$C_X = 0.31302$$

- Dirección en Y:

$$C_Y = \frac{0.36 * 1 * 1.223}{2}$$

$$C_Y = 0.22014$$

### Segunda iteración

- Dirección en X:

$$C_X = \frac{0.36 * 1 * 1.768}{2}$$

$$C_X = 0.20787$$

- Dirección en Y:

$$C_y = \frac{0.36 * 1 * 1.745}{2}$$

$$C_y = 0.2829$$

#### 4.14.6 Cálculo del cortante basal $V_b$

El cortante basal, comúnmente representado como  $V_b$ , es el cortante sísmico total que actúa en la base de una estructura durante un evento sísmico. Es una medida de la fuerza horizontal total que el terremoto imparte a la edificación.

#### Ecuación 20

$$V_b = W * C$$

W = Peso total de la estructura.

C = Coeficiente sísmico.

#### Primera iteración

$$V_{bx} = 128000 * 0.31302$$

$$V_{bx} = 40066.56$$

$$V_{by} = 128000 * 0.22014$$

$$V_{by} = 28177.92$$

### Segunda iteración

$$V_{bx} = 128000 * 0.20787$$

$$V_{bx} = 26608.52$$

$$V_{by} = 128000 * 0.2829$$

$$V_{by} = 36219.82$$

### 4.14.7 Cálculo de fuerzas sísmicas

La determinación de las fuerzas sísmicas en una estructura es esencial para entender la demanda de carga durante un evento sísmico y diseñar la estructura para resistir esas fuerzas. Estas fuerzas se pueden calcular usando la relación entre las masas de la estructura, sus alturas y el cortante sísmico total. La ecuación general para calcular estas fuerzas es:

#### Primera iteración

#### Ecuación 21

$$F_i = V \frac{W_i * h_i}{\sum_{k=i}^N W_k * h_k}$$

$$F_{ix} = 40066.56 * \frac{128000 * 8.5}{128000 * 8.5}$$

$$F_{ix} = 40066.56 \text{ kg}$$

$$F_{iy} = 28177.92 * \frac{128000 * 8.5}{128000 * 8.5}$$

$$F_{iy} = 28177.92 \text{ kg}$$

#### Segunda iteración

$$F_i = V \frac{W_i * h_i}{\sum_{k=i}^N W_k * h_k}$$

$$F_{ix} = 26608.53 * \frac{128000 * 8.5}{128000 * 8.5}$$

$$F_{ix} = 26608.53 \text{ kg}$$

$$F_{iy} = 36219.83 * \frac{128000 * 8.5}{128000 * 8.5}$$

$$F_{iy} = 36219.83 \text{ kg}$$

#### 4.14.8 Análisis de Derivas Estructurales

La deriva estructural es una medida vital de la deformación lateral o desplazamiento que una estructura experimenta bajo cargas. Es particularmente crucial para eventos sísmicos, ya que proporciona información sobre la capacidad de la estructura para resistir deformaciones sin experimentar daños excesivos o colapso. De acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica, la deriva máxima permitida para este caso es de 0.030 mm.

#### Ecuación 22

$$\text{Deriva inelástica} = \frac{\delta * SR * \mu}{H}$$

#### Primera iteración

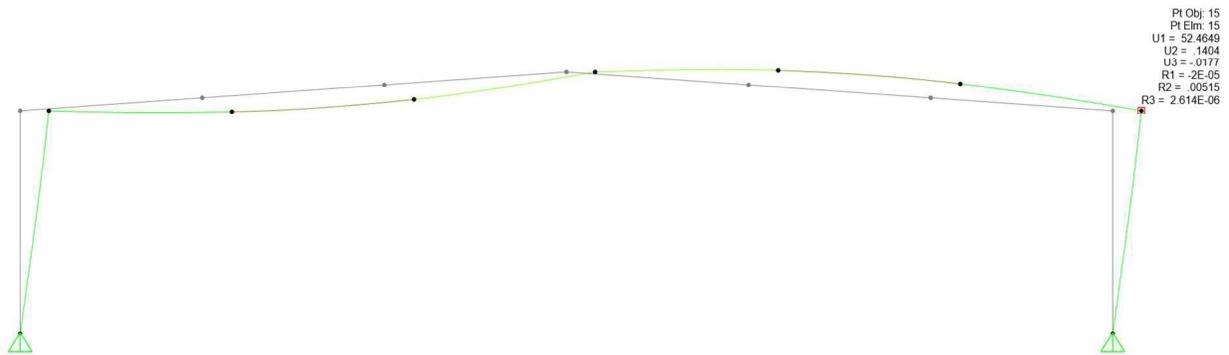
Evaluación de la Deriva Inelástica en el Sentido X:

$$\text{Deriva inelástica} = \frac{52.4649 * 2 * 1.5}{8500} = 0.018517024 \text{ mm}$$

Por lo tanto, la deriva cumple, dado a que es menor a lo permitido por la normativa

#### Figura 10

*Deformación del marco de acero*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

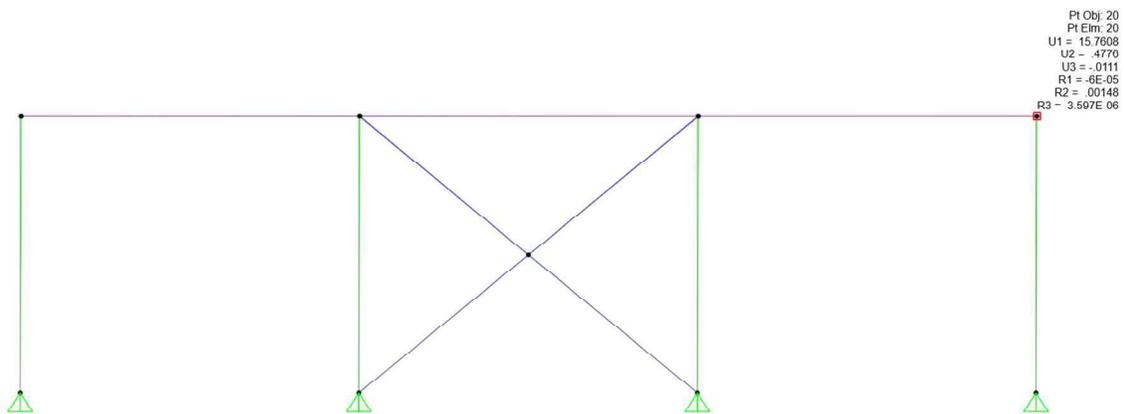
Evaluación de la Deriva Inelástica en el Sentido Y:

$$Deriva\ inelástica = \frac{0.4776 * 2 * 1.5}{8500} = 0.000168565\ mm$$

Por lo tanto, la deriva cumple, dado a que es menor a lo permitido por la normativa

### Figura 11

*Deformación del marco arriostrado*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

### Segunda iteración

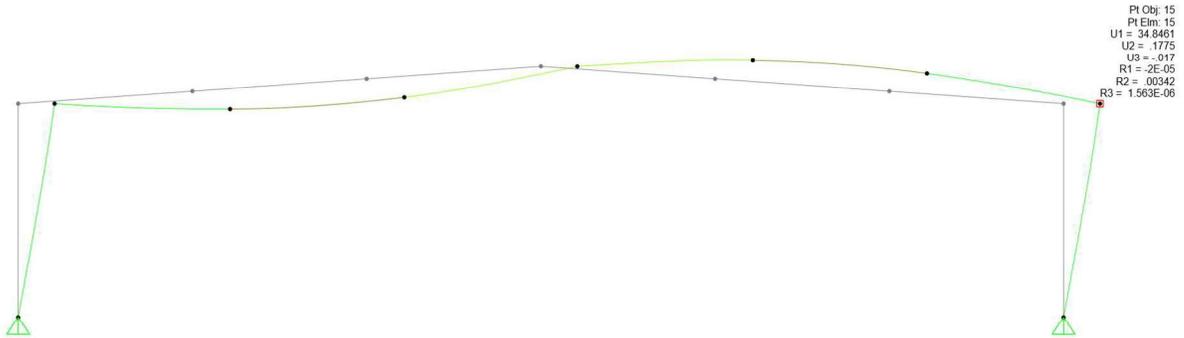
$$Deriva\ inelástica = \frac{\delta * SR * \mu}{H}$$

Evaluación de la Deriva Inelástica en el Sentido X:

$$Deriva\ inelástica = \frac{34.8499 * 2 * 1.5}{8500} = 0.012299965\ mm$$

**Figura 12**

*Deformación del marco de acero*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

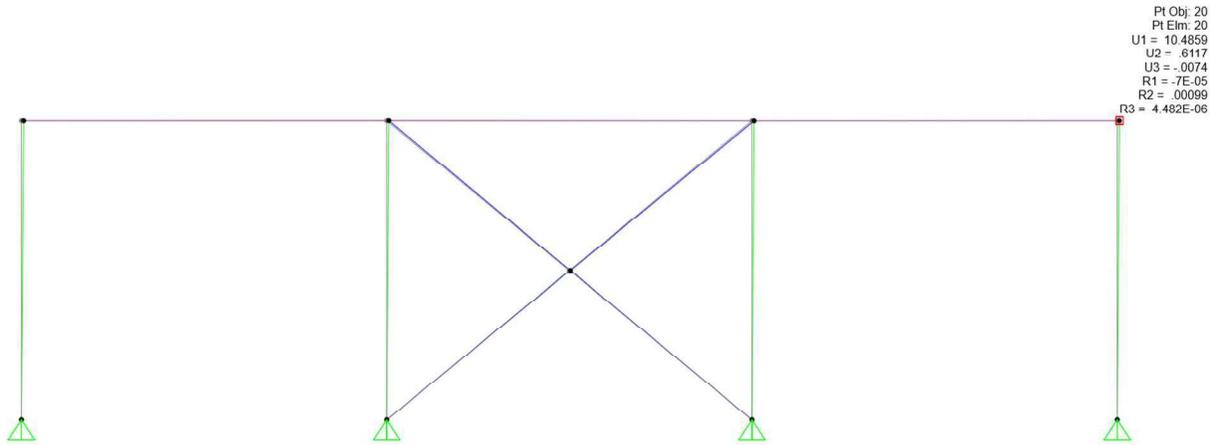
Evaluación de la Deriva Inelástica en el Sentido Y:

$$Deriva\ inelástica = \frac{0.6117 * 2 * 1.5}{8500} = 0.000215894\ mm$$

Por lo tanto, la deriva cumple, dado a que es menor a lo permitido por la normativa

**Figura 13**

*Deformación del marco arriostrado*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

#### 4.14.9 Cálculo del Periodo Fundamental de Vibración utilizando el Método Estático

Uno de los parámetros esenciales al abordar el comportamiento sísmico de una estructura es su periodo fundamental de vibración. Este periodo, comúnmente simbolizado como  $T$ , ofrece una representación del tiempo necesario para que la estructura complete una oscilación completa en condiciones libres. Su significado en el diseño sismorresistente es indiscutible, ya que influye directamente en la magnitud de las fuerzas sísmicas a las que puede estar expuesta la estructura durante un evento telúrico.

En el contexto de esta investigación, el análisis se ha llevado a cabo utilizando el método estático. Este cálculo proporciona información crucial sobre la rigidez de la estructura y su capacidad de respuesta ante cargas sísmicas.

A continuación, se detalla la metodología de cálculo empleada y se presentan los resultados correspondientes al análisis estático.

La determinación del periodo corregido  $T$  para la estructura se realiza a través de la siguiente expresión:

#### Ecuación 23

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1 \sum_{i=1}^N W_i (\delta_i^e)^2}{g \sum_{i=1}^N F_i \delta_i^e}}$$

Donde

$W_i$  = peso de la i-ésima planta.

$\delta_i^e$  = desplazamiento elástico de la i-ésima planta.

$g$  = aceleración debida a la gravedad.

$F_i$  = fuerza sísmica en la i-ésima planta.

### Primera Iteración

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{128000 * (0.0524649)^2}{9.81 * 40066.56 * 0.0524649}}$$

$$T_x = 0.8213 \text{ s}$$

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{128000 * (0.0004776)^2}{9.81 * 28177.92 * 0.0004776}}$$

$$T_y = 0.0934 \text{ s}$$

Tras la determinación precisa del periodo de la estructura utilizando la fórmula previamente mencionada, es esencial comparar este periodo corregido con los periodos iniciales, en particular, con los primeros modos de vibración. Esta comparación es relevante porque ofrece un contraste entre el comportamiento anticipado de la estructura (basado en estimaciones iniciales) y su comportamiento dinámico más realista, reflejado por el periodo corregido.

### Determinación del Porcentaje de Diferencia:

#### Ecuación 24

$$\text{Porcentaje} = \left( \frac{T_{\text{corregido}} - T_{\text{inicial}}}{T_{\text{inicial}}} \right) * 100$$

Porcentaje  $T_x$ :

$$\text{Porcentaje} = \left( \frac{0.8213 - 0.12}{0.12} \right) * 100$$

$$\text{Porcentaje} = 584\%$$

Porcentaje  $T_y$ :

$$\text{Porcentaje} = \left( \frac{0.0934 - 0.05}{0.05} \right) * 100$$

Porcentaje = 87%

### Segunda Iteración

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{128000 * (0.0348499)^2}{9.81 * 26608.53 * 0.0348499}}$$

$$T_x = 0.8214 \text{ s}$$

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{128000 * (0.0006117)^2}{9.81 * 36219.83 * 0.0006117}}$$

$$T_y = 0.0933 \text{ s}$$

### Determinación del Porcentaje de Diferencia:

Porcentaje  $T_x$ :

$$\text{Porcentaje} = \left( \frac{0.8214 - 0.8213}{0.8213} \right) * 100$$

$$\text{Porcentaje} = 0\%$$

Porcentaje  $T_y$ :

$$\text{Porcentaje} = \left( \frac{0.0933 - 0.0934}{0.0934} \right) * 100$$

$$\text{Porcentaje} = 0\%$$

La diferencia de 0% entre el periodo corregido y los periodos de los primeros modos de vibración refleja una exactitud en nuestras estimaciones. Esto valida nuestro método de análisis y refuerza la confiabilidad del diseño estructural propuesto en respuesta a las demandas sísmicas.

## 4.15 Presión básica del viento

### 4.15.1 Cálculo de cargas de viento de resistencia.

En el presente documento se tomarán en cuenta los nuevos lineamientos y el reglamento de construcciones para la importancia de las cargas de viento en las edificaciones en Costa Rica. El cálculo de viento aplicado en naves estructuras, clasificadas según su categoría define su función de uso.

#### 4.15.2 Lineamiento técnico para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica.

Para el sistema estructural tipo nave industrial de acero, las cargas de viento aplicadas se clasifican en la **Tabla 1** como tipo C, clasificando con categoría de diseño por viento “III Normal” nuestra nave industrial.

**Tabla 3**

*Clasificación de las edificaciones según ocupación e importancia.*

Clasificación de edificaciones según importancia acuerdo con el CSCR vigente.	Categoría de diseño por viento
A	<i>I Esencial</i>
B y C	<i>II Especial</i>
D	<i>III Normal</i>
E	<i>IV Miscelánea</i>

*De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, Por Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2021.*

Debe cumplir con el nivel de desempeño de servicio NDS ante un nivel de demandan ( $T_r=10$  años) según CFIA (2021) “Edificaciones de categoría III (Normal) donde también indica que para un nivel de desempeño NDU-1 (completamente operativo) ante un nivel de demanda Alta ( $T_r= 700$  años)” (p.7).

Cuando se busca evaluar posibles desviaciones en el servicio, se emplea un cálculo basado en el nivel de rendimiento del sistema. Por otro lado, si el objetivo es diseñar elementos estructurales y no estructurales, se realiza un cálculo que considera los niveles de resistencia. Estos dos enfoques de cálculo son utilizados de manera específica según el propósito y la naturaleza del análisis a realizar.

El Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) ha publicado en el año 2021 una guía técnica que proporciona lineamientos detallados para calcular y aplicar las fuerzas de viento en el proceso de diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica.

**Tabla 4**

*Niveles de desempeño*

Nivel de desempeño de las edificaciones		Descripción	Nivel de daño tolerable	
			Componentes estructurales	Componentes no estructurales
NDS	Operación de servicio	No hay daño de ningún tipo. La edificación opera normalmente durante el evento sin reducción en el confort de los ocupantes.	No hay daño en la edificación.	No hay daño en envolvente, particiones internas ni sistemas electromecánicos.
NDU-1	Completamente operativo	En general, el daño es mínimo en extensión y costo. La edificación puede ser ocupada y operar normalmente durante y después del evento. Reducción moderada en el confort de los ocupantes, pero sin peligro de lesiones o muerte.	No hay daño estructural y se mantiene la integridad del sistema estructural.	Daño parcial en envolvente, No se presenta daño en particiones internas y Los sistemas electromecánicos continúan completamente operativos.
NDU-2	Funcional	En general, el daño es moderado en extensión y costo. Sin embargo, localmente el daño puede ser significativo. Después del evento, es posible esperar alguna demora en la reocupación de la edificación.	Daño estructural reparable y además se mantiene la integridad del sistema estructural.	Daño parcial en envolvente. Daño parcial en particiones internas y sistemas electromecánicos pueden requerir reparaciones menores para operar nuevamente.
NDU-3	Protección de vidas	En general, el daño es significativo en extensión y costo. Sin embargo, localmente el daño puede ser total. Se protege la vida de los ocupantes evitando el colapso total o parcial, así como la caída de escombros peligrosos. Después del evento, la demora en la reocupación de la edificación puede ser significativa.	Daño estructural importante, sin caída de escombros peligrosos; la reparación de la edificación es posible. Se compromete la integridad del	Daño significativo en envolvente. Daño significativo en particiones internas. Sistemas electromecánicos con daños importantes.

		sistema estructural.		
NDU-4	Prevención del colapso	En general, el daño es grave. Se protege la vida de los ocupantes evitando el colapso total. Después del evento, hay señales visibles de peligro de colapso del sistema estructural (i.e. deformación permanente excesiva) y no es posible reocupar la edificación.	Daño estructural generalizado, pero sin pérdida de capacidad gravitacional en elementos principales; la reparación de la edificación puede no ser técnicamente posible. La integridad del sistema estructural está altamente comprometida	Daño total en envolvente. Daño total en particiones internas. Sistemas electromecánicos con daño total

De *Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica*, por CFIA, 2021.

#### 4.15.3 Presión de viento:

Para determinar la presión de viento, se utiliza la ecuación básica del viento siendo la presión de referencia contra la superficie de la edificación. La velocidad básica del viento ( $V_b$ ) calculamos la presión básica. Luego, con base en la presión obtenida y considerando la distribución de las cargas de viento en la estructura, se establecen los parámetros necesarios para crear el modelo estructural en SAP 2000.

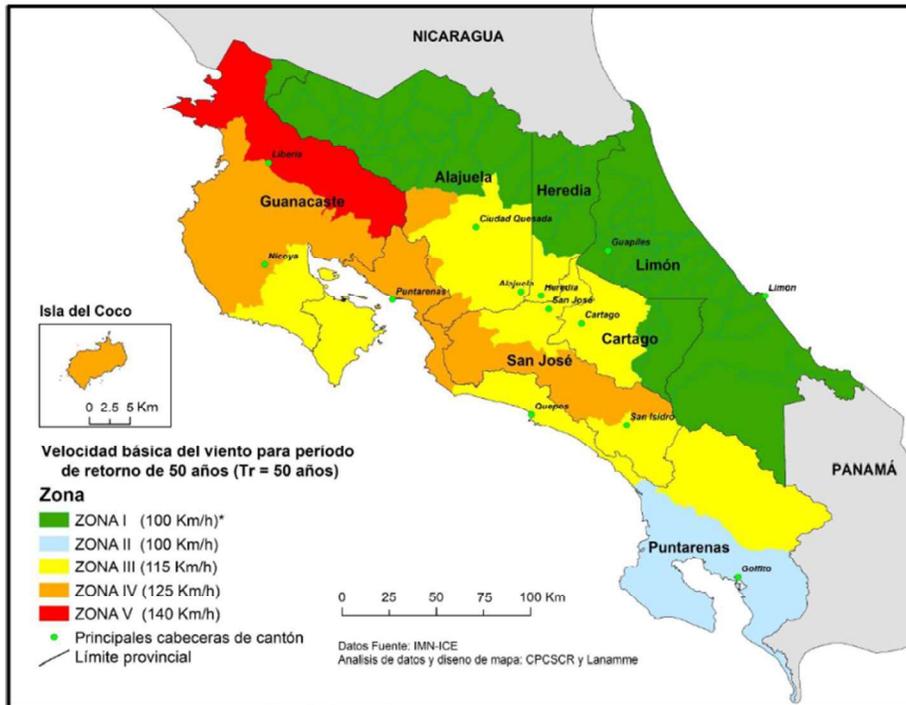
##### 4.15.3.1 Presión básica del viento:

La presión generada por el viento de manera fundamental es aquella que se origina al viento chocar con las estructuras del edificio. Este valor se deriva de la velocidad primordial del viento ( $V_b$ ) por medio de la siguiente ecuación:

Para la cual la presión de vientos se origina de la siguiente figura:

#### Figura 14

Zonificación eólica de Costa Rica.



De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, por CFIA, 2021.

Heredia: 115 Km/h.

**Ecuación 25**

$$q_b = 0.005 * V_b^2 \left( \frac{kg}{m^2} \right)$$

$$q_b = 0.005 * 115^2 = 66.125kg/m^2$$

$$q_b = 66.125kg/m^2$$

Donde:

$q_b$  = Presión

$V_b$  = Velocidad básica del viento

**4.15.3.2 Coeficiente de exposición:**

Dada la ubicación de las estructuras, se clasifican dentro de la categoría de exposición tipo C, que se asigna a estructuras con una altura mayor a 8 metros y que están rodeadas de

terrenos planos abiertos, sabanas o pastizales (CFIA, 2021). Considerando que se ha determinado la categoría de exposición C según la ecuación de coeficiente de exposición:

**Ecuación 26**

$$C_e(z) = 2.01 \left(\frac{z}{z_{ge}}\right)^{\alpha_e} \geq 2.01 \left(\frac{z_{min,e}}{z_{ge}}\right)^{\alpha_e}$$

Donde:

$z$  = Altura a la cual se evalúa la presión de viento medida a partir de la superficie del terreno (m).

$z_{ge}$  = Altura de la capa límite (m).

$\alpha_e$  = Parámetro de rugosidad.

$z_{min,e}$  = Altura mínima de presión constante (m).

**4.15.3.3 Coeficiente de exposición:**

Dada la ubicación de las estructuras, se clasifican dentro de la categoría de exposición tipo C, que se asigna a estructuras con una altura mayor a 8 metros y que están rodeadas de terrenos planos abiertos, sabanas o pastizales (CFIA, 2021). Considerando que se ha determinado la categoría de exposición C según la ecuación de coeficiente de exposición:

Los datos de entrada para la categoría de exposición C son los siguientes:

$$z = 8.5$$

$$\alpha_e = 9.5$$

$$z_{ge} = 274$$

$$z_{min,e} = 4$$

Aplicando ecuación de coeficientes de entrada:

$$C_e(z) = 2.01 \left(\frac{8.5}{274}\right)^{9.5} \geq 2.01 \left(\frac{4}{274}\right)^{9.5}$$

$$C_e(z) = 0.97 \geq 0.83$$

Por lo tanto:

$$C_e(z) = 0.97$$

Para las edificaciones de categoría III (Normal) donde indica que para un nivel de desempeño NDU-1 (completamente operativo) ante un nivel de demanda Alta ( $T_r = 700$  años). Utilizamos la ecuación de coeficiente de recurrencia, el incremento o disminución de la velocidad del viento en relación con períodos de retorno distintos a 50 años es tomado en cuenta por el coeficiente de recurrencia.

**Ecuación 27**

$$C_r = [0.36 + 0.10 \ln(12 * T_r)]^2$$

$$C_r = [0.36 + 0.10 \ln(12 * 700)]^2$$

$$C_r = 1.60$$

Donde:

$T_r$  = Período de retorno de diseño en años según la tabla:

**Tabla 5**

Nivel de demanda según intensidad de ráfaga	Periodo de retorno ( $T_r$ ) en años	Recurrencia	Probabilidad de excedencia (PE) en 50 años (N=50)
Baja	10-50	Frecuente	99.5% a 63.6%
Media	300	Ocasional	15.40%
Alta	700	Rara	6.90%
Muy Alta	1700	Muy Rara	2.90%

*De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica*, Por Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2021

#### 4.15.3.4 Coeficiente de direccionalidad:

En la tabla de clasificación, el sistema estructural de marcos de acero arriostrados utilizado en la nave industrial se identifica como el "sistema principal resistente a la fuerza de viento". Por consiguiente:

**Tabla 6**

Tipo de Edificación	Factor de direccionalidad, $C_d$
<b>Edificaciones</b>	
Sistema Principal Resistente a Fuerza de Viento	0.85
Componentes y Revestimiento	0.85
Techos arqueados	0.85
<b>Chimeneas, Tanques, y Edificaciones Similares</b>	
<b>Cuadradas</b>	
Hexagonales	0.90
Redondas	0.95
Muros y Señales macizas	0.85
Señales abiertas y Armaduras de celosía	0.85
<b>Torres de Armaduras</b>	
Triangulares, cuadradas, rectangulares	0.85
Todas las demás secciones transversales	0.95

Fuente: ASCE 7-10 Tabla 26.6-1.

Por tanto:

$$C_d = 0.85$$

#### 4.15.3.5 Coeficiente de direccionalidad:

Se calcula a una altura  $z$  sobre el terreno, será calculada con la ecuación.

##### Ecuación 28

$$q(z) = q_b C_e(z) C_r C_t C_d \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

Donde:

$q(z)$ =Presión de viento a la altura  $z$ .

$q_b$ =Presión básica del viento

$C_e(z)$ =Coeficiente de exposición a la altura  $z$ .

$C_r$ =Coeficiente de recurrencia.

$C_t$ =Coeficiente topográfico, en el proceso de cálculo, no se designa una ubicación particular para llevar a cabo un examen topográfico del área. En su lugar, se asigna un coeficiente topográfico uniforme de 1.

$C_d$ =Coeficiente de direccionalidad

Al finalizar, empleamos la ecuación (17) para calcular la presión de viento correspondiente a cada estructura, tomando en cuenta todos los coeficientes obtenidos previamente.

Centro (Heredia):

$$q(z) = 66.125 * 0.97 * 1.60 * 1 * 0.85 \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

$$q(z) = 86.8 \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

#### 4.15.3.6 Coeficiente de presión interna.

Es una consideración importante en el diseño estructural para vientos en edificaciones cerradas. Este coeficiente se utiliza para calcular las presiones internas generadas por el viento dentro de las edificaciones.

**Tabla 7**

Coeficientes de Presión Interna para Edificios,  $GC_{pi}$

Clasificación de Encierro	$GC_{pi}$
Edificios abiertos	0,00
Edificios parcialmente cerrados	+0,55
	-0,55
Edificios cerrados	+0,18
	-0,18

De Lineamientos técnicos del "CAPÍTULO 3 CARGAS DE VIENTO" basado en la Sección 6 de ASCE 7-98 (American Society of Civil Engineers 7-98).

Por lo tanto:

$$GC_{pi} = 0.1$$

#### 4.15.3.7 Factor de forma (presión externa).

El **Factor de forma** en el contexto del diseño de vientos se refiere a un coeficiente utilizado para calcular la **presión externa** del viento sobre una estructura. Cuando el viento sopla sobre una superficie o estructura, ejerce una presión sobre ella, y el factor de forma es una medida que considera la forma y geometría específica de la estructura para determinar cómo el viento afecta esa superficie".

##### 4.15.3.7.1 Coeficiente de Presión Externa.

Los coeficientes de presión externa, que comprenden el coeficiente de presión interna ( $C_p$ ) y el coeficiente de forma ( $C_f$ ), deben ser meticulosamente calculados para las paredes de sentido transversal. Estos coeficientes revisten una relevancia fundamental al momento de

establecer las cargas de viento aplicadas en la estructura. Es imperativo considerar de manera precisa y cuidadosa estos coeficientes para garantizar un diseño adecuado y seguro de la nave industrial, tomando en cuenta el impacto directo que ejercen las fuerzas del viento sobre las paredes orientadas en dicha dirección.

**Tabla 8**

Coeficiente de Presión para Pared,  $C_p$

Superficie	L/B	$C_p$	Usar con
Pared Barlovento	Todos los valores	0.8	$q_z$
Pared Sotavento	0-1	-0.5	
	2	-0.3	$q_h$
	$\geq 4$	-0.2	
Pared Lateral	Todos los valores	-0.7	$q_h$

De Lineamientos técnicos del "CAPÍTULO 3 CARGAS DE VIENTO" basado en la Sección 6 de ASCE 7-98 (American Society of Civil Engineers 7-98).

**Tabla 9**

*Paredes sentido transversal*

Sección	Cantidad
Longitud	4000 cm
Base	3000 cm
L/B	1.33

*Nota: El resultado L/B esta dado de la relación entre la longitud y ancho de la sección transversal de la edificación en cm. De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

Por lo tanto:

Barlovento: 0.8

Sotavento: -0.43, En este caso, tenemos dos puntos conocidos; (1,-0.5) y (2,-0.3), como nuestro resultado es 0.8, al realizar la interpolación el valor aproximado es -0.43.

Paredes laterales: -0.7

### **Tabla 10**

*Paredes sentido Longitudinal*

Sección	Cantidad
Longitud	3000 cm
Base	4000 cm
L/B	0.75

*Nota: El resultado L/B esta dado de la relación entre la longitud y ancho de la sección longitudinal de la edificación en cm. De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

Por lo tanto:

Barlovento: 0.8

Sotavento: -0.50

Paredes laterales: -0.7

Y los coeficientes para techo se definen según la

### **Tabla 11**

*Coefficientes de presión externa,  $C_p$ , para techos*

Dirección del viento	$h/l$	Distancia horizontal desde el borde a barlovento	$C_p$
----------------------	-------	--	-------

Normal a la cubriera para $\phi < 10$ grados y paralelo a la cubriera para todos los valores de $\phi$	$\leq 0.5$	0 a h/2	-0.9,-0.18
		h/2 a h	-0.9,-0.18
	$\leq 1.0$	h a 2h	-0.5,-0.18
		> 2h	-0.3,-0.18
		0 a h/2	-1.3,-0.18
		> h/2	-0.7,-0.18

*De lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, por CFIA, 2021,*

Como resultado, se generan distintos casos de carga para las edificaciones, con análisis tanto en sentido longitudinal (L/B) para el caso de carga de presión interna positiva y presión interna, como en sentido transversal (B/L) para revisar las mismas presiones. A continuación, se describen detalladamente cada uno de estos casos de carga:

**Tabla 12**

*Presiones netas sentido transversal (Centro, Heredia)*

Superficie	$q_{(z)}$	G	Cp	-GCpi	+GCpi
<b>Paredes</b>					
Pared Barlovento	86.8	0.85	0.8	74.7	43.4
Pared Sotavento	86.8	0.85	-0.43	-16.4	-47.6
Paredes Laterales	86.8	0.85	-0.7	-36.0	-67.3
<b>Techo</b>					
hasta h	86.8	0.85	-0.9	-50.8	-82.1
0	86.8	0.85	-0.18	2.3	-28.9
de h a 2 h	86.8	0.85	-0.5	-21.3	-52.5
0	86.8	0.85	-0.18	2.3	-28.9
Mayor a 2h	86.8	0.85	-0.3	-6.5	-37.8
	86.8	0.85	-0.18	2.3	-28.98

*Nota. Las presiones GCpi están dadas en kg/m<sup>2</sup>, Las filas donde Cp=-0.18 la presión de techo se distribuye por toda la superficie sin variaciones. De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

**Tabla 13***Presiones netas sentido Longitudinal (Centro, Heredia)*

Superficie	$q_{(z)}$	G	Cp	-GCpi	+GCpi
<b>Paredes</b>					
Pared Barlovento	86.827	0.85	0.8	74.7	43.4
Pared Sotavento	86.827	0.85	-0.5	-21.3	-52.5
Paredes Laterales	86.827	0.85	-0.7	-36.0	-67.3
<b>Techo</b>					
hasta h	86.827	0.85	-0.9	-50.8	-82.1
0	86.827	0.85	-0.18	2.3	-28.9
de h a 2 h	86.827	0.85	-0.5	-21.3	-52.5
0	86.827	0.85	-0.18	2.3	-28.9
Mayor a 2h	86.827	0.85	-0.3	-6.5	-37.8
	86.827	0.85	-0.18	2.3	-28.9

*Nota. Las presiones GCpi están dadas en kg/m<sup>2</sup>, Las filas donde Cp=-0.18 la presión de techo se distribuye por toda la superficie sin variaciones. De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

#### 4.15.4 Combinaciones para obtener la carga última de diseño o resistencia requerida:

Las combinaciones prescritas en el reglamento se detallan de la siguiente manera:

**Tabla 14***Combinaciones de resistencia requerida*

Combinación	Descripción	Combinación	Descripción
COM 1	1.4 CM	COM 18	1.2CM + 1.6CT +0.5(Wey+Wis)
COM 2	1.2 CM + 1.6 CT	COM 19	1.2CM + (Wex+Wib+Wc) + 0.5CT
COM 3	1.05CM + CT + Sex	COM 20	1.2CM + (Wex+Wis+Wc) + 0.5CT
COM 4	1.05CM + CT - Sex	COM 21	1.2CM + (Wey+Wib+Wc) + 0.5CT
COM 5	1.05CM + CT + Sey	COM 22	1.2CM + (Wey+Wis+Wc) + 0.5CT
COM 6	1.05CM + CT - Sey	COM 23	1.2CM + (Wex+Wib) + 0.5CT
COM 7	0.95CM + Sex	COM 24	1.2CM + (Wex+Wis) + 0.5CT
COM 8	0.95CM - Sex	COM 25	1.2CM + (Wey+Wib) + 0.5CT
COM 9	0.95CM + Sey	COM 26	1.2CM + (Wey+Wis) + 0.5CT

COM 10	$0.95CM - S_{ey}$	COM 27	$0.9CM + (W_{ex}+W_{ib}+W_c)$
COM 11	$1.2CM + 1.6CT + 0.5 (W_{ex}+W_{ib}+W_c)$	COM 28	$0.9CM + (W_{ex}+W_{is}+W_c)$
COM 12	$1.2CM + 1.6CT + 0.5(W_{ex}+W_{is} +W_c)$	COM 29	$0.9CM + (W_{ey}+W_{ib}+W_c)$
COM 13	$1.2CM + 1.6CT + 0.5(W_{ey}+W_{ib} +W_c)$	COM 30	$0.9CM + (W_{ey}+W_{is}+W_c)$
COM 14	$1.2CM + 1.6CT + 0.5(W_{ey}+W_{is} +W_c)$	COM 31	$0.9CM + (W_{ex}+W_{ib})$
COM 15	$1.2CM + 1.6CT + 0.5(W_{ex}+W_{ib})$	COM 32	$0.9CM + (W_{ex}+W_{is})$
COM 16	$1.2CM + 1.6CT + 0.5(W_{ex}+W_{is} )$	COM 33	$0.9CM + (W_{ey}+W_{ib})$
COM 17	$1.2CM + 1.6CT + 0.5(W_{ey}+W_{ib})$	COM 34	$0.9CM + (W_{ey}+W_{is})$

*De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

Dónde:

CM=Carga Muerta.

CT=Carga viva.

S<sub>cx</sub>=Sismo en la dirección del eje X.

S<sub>cy</sub> = Sismo en la dirección del eje Y.

W<sub>ex</sub>= Presión de viento externa aplicada perpendicular al eje Y.

W<sub>ey</sub> = Presión de viento externa aplicada perpendicular al eje X.

W<sub>is</sub> = Presión de viento interna a succión.

W<sub>ib</sub> = Presión de viento interna a presión.

W<sub>c</sub> = Caso de carga de presión de viento en el techo donde se distribuye equitativamente sobre toda la superficie de techo

Las combinaciones se limitan a los casos de signo positivo, ya que los parámetros calculados consideran ambas direcciones del viento debido a la simetría de la estructura. Por lo tanto, se suponen únicamente las combinaciones con valores positivos. Las combinaciones son similares para los dos casos analizados, siendo las presiones de viento netas las variables en cada caso.

#### 4.15.5 Cálculo de cargas viento de servicio.

Para la revisión de las derivas en las edificaciones se realiza el mismo cálculo de las presiones netas bajo el mismo procedimiento, el parámetro variable es el periodo de retorno, Tr=

10 años, por lo tanto, el único parámetro dependiente del periodo de retorno es el coeficiente de recurrencia, el cual se define aplicando la ecuación (16).

#### 4.15.6 Coeficiente de recurrencia Heredia, Centro (Servicio)

$$C_r = [0.36 + 0.10 \ln(12 * T_r)]^2$$

$$C_r = [0.36 + 0.10 \ln(12 * 10)]^2$$

$$C_r = 0.70$$

Los valores de los coeficientes de exposición, direccionalidad y topografía, junto con la presión básica del viento, permanecen invariables y se corresponden con los cálculos realizados en la sección 4.1.2.3 para cada región geográfica mencionada en este documento

Lo cual conduce a las presiones de viento resultantes ( $q(z)$ ):

Presión de viento Heredia, Centro (Servicio)

$$q(z) = 66.125 * 0.97 * 0.70 * 1 * 0.85 \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

$$q(z) = 38.3 \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

Por último, las presiones de viento obtenidas a partir de los cálculos originan nuevos valores para los parámetros de presiones netas:

**Tabla 15**

*Presiones netas sentido transversal, condición servicio (Centro, Heredia)*

Superficie	$q(z)$	G	Cp	-GCpi	+GCpi
<b>Paredes</b>					
Pared Barlovento	38.3	0.85	0.8	32.9	19.1
Pared Sotavento	38.3	0.85	-0.43	-7.2	-21.0
Paredes Laterales	38.3	0.85	-0.7	-15.9	-29.6
<b>Techo</b>					
hasta h	38.3	0.85	-0.9	-22.4	-36.2

0	38.3	0.85	-0.18	1.0	-12.7
de h a 2 h	38.3	0.85	-0.5	-9.4	-23.1
0	38.3	0.85	-0.18	1.0	-12.7
Mayor a 2h	38.3	0.85	-0.3	-2.9	-16.6
	38.3	0.85	-0.18	1.0	-12.7

*Nota. Las presiones GCpi están dadas en kg/m2, Las filas donde Cp=-0.18 la presión de techo se distribuye por toda la superficie sin variaciones. De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

**Tabla 16**

*Presiones netas sentido Longitudinal, condición servicio (Centro, Heredia)*

Superficie	$q(z)$	G	Cp	-GCpi	+GCpi
<b>Paredes</b>					
Pared Barlovento	38.256	0.85	0.8	32.9	19.1
Pared Sotavento	38.256	0.85	-0.43	-9.4	-23.1
Paredes Laterales	38.256	0.85	-0.7	-15.9	-29.6
<b>Techo</b>					
hasta h	38.256	0.85	-0.9	-22.4	-36.2
0	38.256	0.85	-0.18	1.0	-12.7
de h a 2 h	38.256	0.85	-0.5	-9.4	-23.1
0	38.256	0.85	-0.18	1.0	-12.7
Mayor a 2h	38.256	0.85	-0.3	-2.9	-16.6
	38.256	0.85	-0.18	1.0	-12.7

*Nota. Las presiones GCpi están dadas en kg/m2, Las filas donde Cp=-0.18 la presión de techo se distribuye por toda la superficie sin variaciones. De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

Las combinaciones de carga en servicio se ingresan en SAP 2000 por separado, y se aplican al modelo estructural solo utilizando las siguientes combinaciones, tal como se indica en la ecuación combinaciones para cargas de servicio, para la verificación de los estados de límite

de servicio para cargas gravitaciones y de viento, cada elemento, componente o unión de la edificación, y esta como unidad, debe tener capacidad de soportar la combinación de carga:

**Ecuación 29**

$$R_r = CP + 0.5CT \pm CVs$$

Donde:

*CP* = Carga permanente. Se puede tomar como la carga permanente que ocurre después de colocados los componentes no estructurales.

*CT*= Carga temporal, sin la reducción indicada en el CRCR vigente.

*CVs*= Carga de viento para un período de retorno de servicio.

**4.15.7 Límites de desplazamientos y derivas:**

Las directrices establecen la necesidad de estimar los desplazamientos horizontales en cada nivel, junto con sus correspondientes derivas o desplazamientos relativos. Estos valores se utilizarán para comprobar que las razones de deriva en cada nivel no sobrepasen los límites indicados en la siguiente tabla de este documento. Estos controles se llevarán a cabo en los puntos donde se registren los mayores desplazamientos relativos de cada nivel.

**Tabla 17**

*Límite superior de la razón de deriva inelástica según categoría de edificación y sistema estructural.*

Sistema estructural	Edificaciones A y C	Edificaciones B, D y E
Tipo marco	0.013	0.020
Tipo dual	0.013	0.018
Tipo muro	0.010	0.010
Tipo voladizo	0.013	0.020
Tipo otros	0.007	0.010

*De Código Sísmico de Costa Rica 2010. Revisión 2014, por CFIA, 2014, Editorial Tecnología de Costa Rica.*

**Tabla 18**

*Combinaciones de carga para condición de servicio.*

Combinación	Descripción
-------------	-------------

---

COMB 1	$CM + 0.5CT + (W_{ex} + W_{ib} + W_c)$
COMB 2	$CM + 0.5CT - (W_{ex} + W_{ib} + W_c)$
COMB 3	$CM + 0.5CT - (W_{ex} + W_{is} + W_c)$
COMB 4	$CM + 0.5CT + (W_{ex} + W_{is} + W_c)$
COMB 5	$CM + 0.5CT + (W_{ey} + W_{ib} + W_c)$
COMB 6	$CM + 0.5CT - (W_{ey} + W_{ib} + W_c)$
COMB 7	$CM + 0.5CT - (W_{ey} + W_{is} + W_c)$
COMB 8	$CM + 0.5CT + (W_{ey} + W_{is} + W_c)$
COMB 9	$CM + 0.5CT - (W_{ex} + W_{ib})$
COMB 10	$CM + 0.5CT + (W_{ex} + W_{ib})$
COMB 11	$CM + 0.5CT + (W_{ex} + W_{is})$
COMB 12	$CM + 0.5CT - (W_{ex} + W_{is})$
COMB 13	$CM + 0.5CT - (W_{ey} + W_{ib})$
COMB 14	$CM + 0.5CT + (W_{ey} + W_{ib})$
COMB 15	$CM + 0.5CT + (W_{ey} + W_{is})$
COMB 16	$CM + 0.5CT - (W_{ey} + W_{is})$

---

*De Fuente propia, por F. Cabezas, 2023*

Donde:

CM=Carga Muerta.

CT=Carga viva.

S<sub>cx</sub> = Sismo en la dirección del eje X.

S<sub>cy</sub> = Sismo en la dirección del eje Y.

W<sub>ex</sub>= Presión de viento externa aplicada perpendicular al eje Y.

W<sub>ey</sub> = Presión de viento externa aplicada perpendicular al eje X.

W<sub>is</sub> = Presión de viento interna a succión.

W<sub>ib</sub> = Presión de viento interna a presión.

W<sub>c</sub> = Caso de carga de presión de viento en el techo donde se distribuye equitativamente sobre toda la superficie de techo.

#### **4.16 Diseño de Marco de Acero usando el Método LRFD**

La elección del Método LRFD (Load and Resistance Factor Design) se justifica por su enfoque contemporáneo y la confiabilidad estructural que proporciona. Este método considera

las variabilidades tanto en las cargas aplicadas como en las capacidades de resistencia de los materiales, aplicando factores de carga y de resistencia que garantizan un nivel adecuado de confiabilidad y seguridad en la estructura.

El marco de acero seleccionado desempeña un papel fundamental en el sistema estructural de la nave industrial. Durante su diseño, se consideraron todas las cargas relevantes, incluyendo cargas muertas, vivas, de viento y sísmicas. Estas cargas se amplificaron según los factores prescritos por el método LRFD, siguiendo las indicaciones del código AISC 360-16.

Para llevar a cabo el diseño estructural de la nave industrial, se utilizó el software SAP2000. Esta herramienta, conocida por su precisión y fiabilidad, facilita el análisis estructural y la determinación de las demandas de carga. No obstante, para asegurar la exactitud y rigor en el proceso de diseño, se validaron los resultados obtenidos con SAP2000 mediante cálculos manuales en Excel, siempre alineados con las directrices del AISC 360-16.

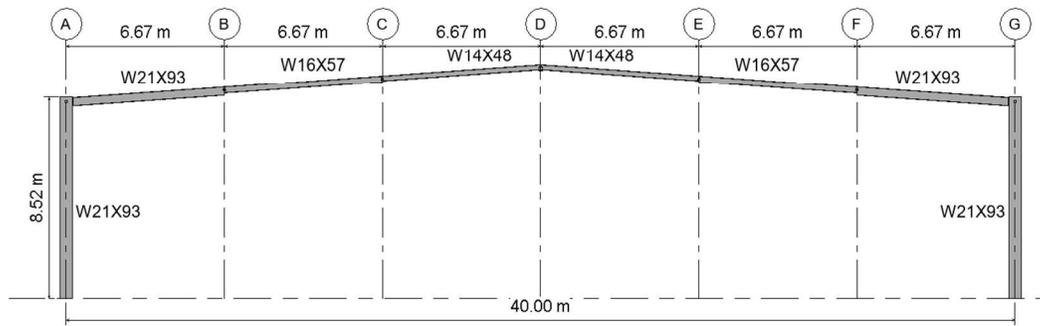
Dentro del diseño, se asignaron cargas específicas a los componentes estructurales. Específicamente, las cubiertas se diseñaron considerando una carga de  $54 \text{ kg/m}^2$ , mientras que las paredes se diseñaron para soportar una carga de  $15 \text{ kg/m}^2$ . Estos valores, y su desglose, están detallados en la Tabla 1, evidenciando la metodología aplicada para garantizar la integridad de la estructura ante las cargas previstas.

La sinergia entre el análisis realizado con SAP2000 y la validación manual asegura que el diseño de la nave no solo es robusto y óptimo, sino que también cumple plenamente con las actuales normativas de construcción.

### **Figura 15**

*Marco de acero*





De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

#### 4.16.1 Consideraciones de Carga en el Diseño del Marco de Acero

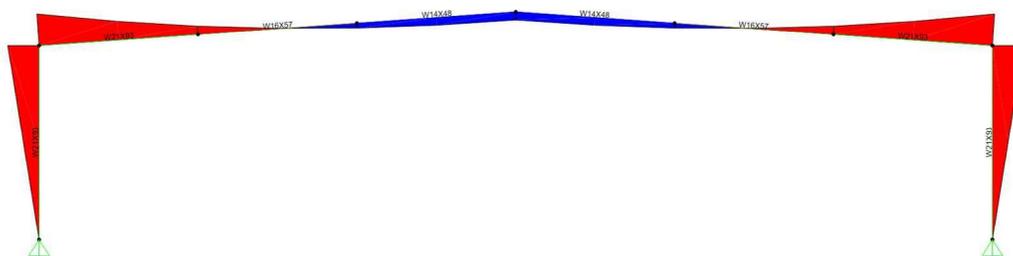
Uno de los desafíos inherentes al diseño del marco de acero en la nave industrial es su magnitud y escala. La tipología del marco, dada su gran envergadura, dictó una consideración especial en términos de las cargas que influirían predominantemente en el diseño.

Si bien en estructuras de menor tamaño o en ubicaciones con alta exposición, las cargas de viento podrían ser determinantes, en este caso, las cargas gravitacionales (principalmente el peso propio de la estructura y las cargas permanentes asociadas) superaron significativamente a las cargas inducidas por el viento. Esta predominancia de las cargas gravitacionales influyó directamente en las decisiones de diseño y en la selección de los elementos estructurales.

Por lo tanto, el diseño del marco se orientó hacia la resistencia y estabilidad requeridas para soportar estas cargas gravitacionales, asegurando que la estructura cumpla con todas las normativas y requisitos de seguridad sin estar sobredimensionada innecesariamente por cargas externas menos significativas.

#### Figura 16

Diagrama de momento del marco de acero



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

#### 4.16.2 Diseño de columna

Las columnas, siendo elementos estructurales verticales, primordialmente llevan cargas axiales de compresión que resultan de las cargas superpuestas y del peso propio de la estructura. En el contexto del marco de acero de la nave industrial, la columna es un componente crítico que garantiza la estabilidad y seguridad de toda la estructura.

Diseñar una columna para resistir cargas de compresión involucra considerar no solo la resistencia material sino también el potencial de pandeo. El pandeo es una respuesta inestable que puede ocurrir en elementos comprimidos, llevando a su falla súbita. Dada la altura y esbeltez de las columnas en nuestro marco, es fundamental asegurar que estén adecuadamente diseñadas para resistir tanto la carga axial directa como el potencial de pandeo.

##### 4.16.2.1 Especificaciones del Diseño:

Siguiendo las directrices del AISC 360-16 y empleando el método LRFD, se llevaron a cabo los cálculos pertinentes para determinar la capacidad de compresión de la columna y su comportamiento frente a las cargas aplicadas según la combinación 2 de la **Tabla 14** del presente documento.

**Tabla 19**

*Datos de entrada.*

Condición de apoyo en la base:	Articulado
¿Desplazamiento lateral impedido en el eje X-X?	Si
¿Desplazamiento lateral impedido en el eje Y-Y?	Si
Longitud libre de la columna en X, $L_x$ (m)	850cm
Longitud libre de la columna en Y, $L_y$ (m)	850cm
Tipo de acero	A-992 Gr 50
Esfuerzo de fluencia, $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	3515kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de cortante elástico de fluencia, $G$ (kg/cm <sup>2</sup> )	790000kg/cm <sup>2</sup>
Modulo elástico del acero, $E$ (kg/cm <sup>2</sup> )	2.04E+06
Carga axial a compresión, $P_u$ (kg)	18Tn
Momento último en el eje X, $M_{ux}$ (kg*m)	65.4Ton*m
Momento último en el eje Y, $M_{uy}$ (kg*m)	0.0Ton*m
Perfil seleccionado de columna	W21X93

---

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**Tabla 20**

*Propiedades geométricas de la columna.*

---

Propiedades geométricas de la columna	
Peralte de la columna, d (cm)	54.86
Longitud libre del alma, h (cm)	47.60
Ancho del patín, $b_f$ (cm)	21.39
Espesor del patín, $t_f$ (cm)	2.36
Espesor del alma, $t_w$ (cm)	1.47
Distancia entre centros del patin, $h_o$ (cm)	52.58
Inercia en X, $I_x$ (cm <sup>4</sup> )	86159.91
Inercia en Y, $I_y$ (cm <sup>4</sup> )	3866.79
Area global, $A_g$ (cm <sup>2</sup> )	176.13
Peso propio, $P_p$ (kg/m)	138.40
Módulo de alabeo, $C_w$ (cm <sup>6</sup> )	2670736.92
Módulo de torsión, J (cm <sup>4</sup> )	250.99
Modulo plástico en X, $Z_x$ (cm <sup>3</sup> )	3621.54
Modulo plástico en Y, $Z_y$ (cm <sup>3</sup> )	572.34
Modulo elástico en X, $S_x$ (cm <sup>3</sup> )	3140.85
Modulo elástico en Y, $S_y$ (cm <sup>3</sup> )	364.52
Radio de giro efectivo para LTB, $r_{st}$ (cm)	5.69
Radio de giro en X, $r_x$ (cm)	22.10
Radio de giro en Y, $r_y$ (cm)	4.69

---

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**Tabla 21**

*Datos de salida.*

---

Datos de salida	
Coefficiente de longitud efectiva en x, $K_x$	1
Coefficiente de longitud efectiva en y, $K_y$	1
Coefficiente de esbeltez en X, $\lambda_x$	38.47
Coefficiente de esbeltez en Y, $\lambda_y$	174.58
<b>Coefficiente de esbeltez max, <math>\lambda_{max}</math></b>	<b>174.58</b>

---

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**Tabla 22**

*Análisis de esbeltez local.*

Análisis de esbeltez local	Zona 1
<b>Pandeo local en el patín</b>	Ala no esbelta, no ocurre el pandeo, compacto
Esbeltez en el patín, $bf/2t_f$	4.53
Esbeltez límite inferior caso 1	9.49
Esbeltez límite superior	24.81
<b>Factor de reducción por pandeo del patín</b>	1
	Alma no esbelta, no ocurre el pandeo, compacto
<b>Pandeo local en el alma</b>	
Esbeltez en el alma, $h/t_w$	32.3
Esbeltez límite caso 5	35.88
Tensión de pandeo elástico, $F_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )	611.46
Esfuerzo crítico, $F_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	536.3

De Fuente, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**Tabla 23**

*Resistencia por pandeo Flexional.*

Resistencia por pandeo Flexional			
Esbeltez límite, $\lambda_{lim}$		113.43	
Esfuerzo crítico de euler, $F_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )		660.24	
Esfuerzo crítico de la columna, $F_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )		579.03	
<b>Resistencia por pandeo flexional, <math>\phi R_n</math> (Ton)</b>		91.79	
	$\phi R_r > P_u$	Cumple	20%
Resistencia por pandeo flexo torsional			
Esfuerzo límite entre elástico - plástico, $0,44*Q*F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )		1546.75312	
Esfuerzo crítico de euler, $F_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )		3094.63	
Esfuerzo crítico de la columna, $F_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )		2185.15	
<b>Resistencia por pandeo flexo torsional, <math>\phi R_n</math> (Ton)</b>		346.38	
	$\phi R_r > P_u$	Cumple	5%
Resistencia a momento en X			
Longitud plástica, $L_p$ (cm)	Mp1	12730977.26	
Longitud elástica, $L_r$ (cm)	Mn2	10594824.32	198.60
	Mn3	3057740.863	650.45
<b>Resistencia a flexión en X, <math>\Phi M_n</math> (Tn*m)</b>		105.95	
		Cumple	

**Resistencia a momento  
en Y**

---

Longitud plástica, $L_p$ (cm)	936.65	
<b>Resistencia a flexión en Y, <math>\Phi M_n</math> (<math>T_n \cdot m</math>)</b>	18.11	
	Cumple	

---

**Ecuación de interacción**

---

Relación de resistencia axial, $P_u/P_r$	0.20	
Chequeo por combinación de esfuerzos	0.72	66%
	Cumple	

---

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**Figura 17**

*Resultados de diseño de la columna con sap2000 con clavadores a cada 1,5m*

```

AISC 360-16 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : Tonf, m, C

Frame : 5      X Mid: 0.      Combo: 6-2      Design Type: Column
Length: 8.179  Y Mid: 10.     Shape: W21X93   Frame Type: OMF
Loc : 8.179    Z Mid: 4.089    Class: Compact  Princpl Rot: 0. degrees

Provision: LRFD Analysis: Effective Length
D/C Limit=1.  2nd Order: Amplified 1st Order
Ignore Seismic Code? No Ignore Special EQ Load? No D/P Plug Welded? Yes

SDC: D      I=1.      Rho=1.      Sds=0.5
R=3.      Omega0=3.  Cd=5.5
PhiB=0.9    PhiC=0.9    PhiTY=0.9   PhiTF=0.75
PhiS=0.9    PhiS-RI=1.  PhiST=0.9

A=0.018     I33=3.616E-04  r33=0.221    S33=0.003     Av3=0.008
J=2.510E-06 I22=3.967E-05  r22=0.047    S22=3.616E-04 Av2=0.008
E=20389019.16 Fy=35153.481  Ry=1.1       z33=0.004     Cw=2.665E-06
RLLF=1.     Fu=45699.526  z22=5.686E-04

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 6-2)
Location      Pu      Mu33      Mu22      Vu2      Vu3      Tu
8.179         -18.023  -65.422   0.003     8.001   -4.005E-04  -0.013

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-lb)
D/C Ratio:    0.593 = 0.022 + 0.571 + 0.
              = (1/2)(Pr/Fc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

COMPACTNESS
Slenderness   Lambda  Lambda_p  Lambda_r  Lambda_s  Compactness
Major/Flange  4.527   9.152     24.083    232.      Compact
/Web          32.31   90.553    137.274   232.      Compact
Minor/Flange  4.527   9.152     24.083    232.      Compact
/Web          32.31   90.553    137.274   232.      Compact
Axial/Flange  4.527   9.152     24.083    232.      Compact
/Web          32.31   90.553    137.274   232.      Compact

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-lb)
Factor        L        K1        K2        B1        B2        Cm
Major Bending 1.        1.        1.        1.        1.        0.6
Minor Bending 0.37     1.        1.        1.        1.        0.944

LTB           Lltb     Kltb     Cb
0.075        1.        1.059

Axial         Pu      phi*Pnc  phi*Pnt
Force         -18.023 410.758  557.238
Capacity

Major Moment  Mu      phi*Mn   phi*Mn   phi*Mn
Moment        -65.422 114.579  114.579  114.579
Capacity      Cb=1

Minor Moment  0.003   17.99

SHEAR CHECK
Vu      phi*Vn   Stress   Status
Force   Capacity Ratio   Check
Major Shear 8.001 170.478 0.047 OK
Minor Shear 4.005E-04 191.803 2.088E-06 OK

```

De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

Durante el proceso de diseño de la columna, se llevaron a cabo análisis tanto manuales como mediante el software SAP2000. En los cálculos manuales, se consideró primeramente la columna en su totalidad con una longitud libre de 8.5 metros, lo que resultó en una utilización del 72% de su capacidad. Luego, al incorporar clavadores de pared a intervalos de 1,5 metros en el mismo ejercicio, la resistencia de la columna aumentó, alcanzando una capacidad del 57%.

Posteriormente, se procedió a verificar los datos utilizando el programa SAP 2000, tomando en cuenta los clavadores de las paredes a cada 1,5 metros como se había hecho en el cálculo manual. El programa arrojó un valor del 59% en su capacidad, lo que resultó en un

porcentaje de error del 3,51%. Este valor de error se considera aceptable para la validación de los datos, tanto de los cálculos manuales como del programa.

Las adiciones, como los clavadores de pared, fortalecieron significativamente la columna, aumentando su capacidad de carga al 59%. Estos resultados resaltan la ventaja de combinar métodos manuales tradicionales con herramientas de modelado computacional, como SAP2000, para optimizar el diseño y garantizar una resistencia estructural adecuada.

#### **4.16.3 Diseño de vigas**

Las vigas, en contraste con las columnas, son elementos estructurales primordialmente horizontales que transportan cargas transversales a su longitud y las distribuyen hacia las columnas o muros de soporte. En el contexto del marco de acero de la nave industrial, las vigas desempeñan un papel crucial al proporcionar soporte horizontal y al asegurar que las cargas, como las de la cubierta y cargas móviles, sean transmitidas de manera eficiente y segura a las columnas.

El diseño de vigas implica considerar la resistencia a la flexión, al corte y, en algunos casos, la torsión. Las cargas aplicadas sobre una viga pueden generar momentos flectores, fuerzas cortantes y, en ciertas situaciones, torsiones. Es esencial que las vigas estén adecuadamente diseñadas para resistir estas demandas. Además, otro aspecto fundamental en el diseño de vigas es la prevención del fenómeno de pandeo lateral torsional, que puede ocurrir cuando una viga sometida a momentos flectores no está adecuadamente arriostrada a lo largo de su longitud. Este fenómeno puede llevar a una falla prematura si no se considera durante la fase de diseño.

##### **4.16.3.1 Especificaciones del Diseño:**

Con base en las normas del AISC 360-16 y utilizando el método LRFD, se efectuaron los cálculos esenciales para determinar la capacidad de flexión de las vigas y su respuesta ante las cargas impuestas, de acuerdo con la combinación 2 de la **Tabla 14** del presente documento.

**Tabla 24**

*Datos de entrada.*

Datos de entrada	
Momento último, Mu (Ton*m)	219.53Ton*m

Cortante último aplicada, $V_u$ (Ton)	28.89Tn
Longitud de la viga, $L$ (cm)	666cm
Longitud de trabajo, $L_b$ (cm)	666cm
Tipo de acero	A-992 Gr 50
Esfuerzo de fluencia del acero, $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	3515kg/cm <sup>2</sup>
Módulo elástico del acero, $E_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	2.04E+06
Deflexión límite, $\Delta_{lim}$	$L / 120$
Tipo de viga	W21X93

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

**Tabla 25**

*Propiedades Geométricas de la viga.*

Propiedades Geométricas de la viga			
Peralte de la viga, $D$ (cm)	54.864	Módulo de alabeo, $C_w$ (cm <sup>6</sup> )	2.67E+06
Longitud libre del alma, $h$ (cm)	47.60	Módulo de torsión, $J$ (cm <sup>4</sup> )	250.9876
Ancho del patín, $b_f$ (cm)	21.3868	Módulo plástico, $Z_x$ (cm <sup>3</sup> )	3621.5411
Espesor del patin, $t_f$ (cm)	2.3622	Modulo elástico, $S_x$ (cm <sup>3</sup> )	3140.8539
Espesor del alma, $t_w$ (cm)	1.4732	Radio de giro efectivo, $r_{ts}$ (cm)	5.69
Inercia en X, $I_{xx}$ (cm <sup>4</sup> )	86159.91	Radio de giro en Y, $r_y$ (cm)	4.6855
Inercia en Y, $I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> )	3866.79	Distancia entre centros de patín, $h_o$ (cm)	52.58

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

**Tabla 26**

*Compacidad del Perfil.*

Esbeltez local	$L/r$ 142		
Límite inferior de esbeltez en el patín, $\lambda_p$	4.527	9.152	
Límite superior de esbeltez en el patín, $\lambda_r$	13.487	24.083	
<b>Límite de esbeltez en el patín, <math>\lambda_f</math></b>	Ala no esbelta, no ocurre el pandeo		4.527 Compacto
Límite de esbeltez en el alma, $\lambda_p$	32.31	90.553	
Límite superior de esbeltez en el alma, $\lambda_r$	35.884	137.274	
<b>Límite de esbeltez en el alma, <math>\lambda_w</math></b>	Alma no esbelta, no ocurre el pandeo		32.31 Compacto

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

"Compacidad de alas y alma TABLE B4.1b Limiting Width-to-Thickness Ratio case 10,15." La normativa AISC 360-16 define una sección compacta cuando sus alas y alma cumplen con los límites máximos de esbeltez presentados a continuación.

#### 4.16.3.2 Soporte lateral

Los soportes laterales de los miembros en flexión son elementos que impiden desplazamiento lateral para ello se debe conectar el patín a compresión del perfil a otro miembro estructural que brinde rigidez al conjunto. Si el patín a compresión de una viga no tiene apoyo lateral en cierta longitud  $L_p$ , tendrá una condición de pandeo lateral Elástico e inelástico, afectando notablemente su resistencia por flexión.

#### 4.16.3.3 Caso I. Comportamiento de plastificación Fluencia $L_b \leq L_p$

Viga compacta lateralmente soportada, por ser compacta no habrá pandeo local antes de que se presente plastificación. (AISC F.2.1)

#### Ecuación 30

Distancia entre soporte lateral para que el miembro alcance plastificación. AISC 360-16 (F2-5)

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

Un miembro compacto que este lateralmente soportado, no presentará falla por inestabilidad flexo torsional (Pandeo lateral torsional), por lo cual su momento resistente podrá ser igual a la máxima resistencia de la viga en estado de plastificación.

#### Ecuación 31

Momento nominal resistente de plastificación (F2-1)

$$M_p = \phi Z_x F_y \quad \phi_b = 0.9$$

#### Tabla 27

*Resistencia a flexión*

Longitud plástica, $L_p$ (cm)	198.6015cm
$M_p$	11457879.5kg/cm

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**4.16.3.4 Caso II. Pandeo lateral torsional inelástico  $L_p < L_b \leq L_r$**

La longitud límite sin soporte lateral  $L_r$ , es la longitud no soportada de un segmento de viga bajo momento uniforme en que comienza el régimen de pandeo lateral torsional elástico. Para perfiles I de simetría doble y para canales, cargados en el plano del alma, se determina con la siguiente expresión:

**Ecuación 32**

AISC (F2-6)

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

**Ecuación 33**

$$M_r = 0.7F_y S_x$$

**Tabla 28**

*Longitud elástica y momento resistente.*

---

Longitud elástica, $L_r$ (cm)	650.4476cm
Momento resistente con $L_b=L_r$ , $\phi M_r$	6955952.5kg*cm

---

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

**4.16.3.5 Valores de momento nominal para caso II - Zona II Pandeo lateral inelástico**

En la expresión que se ilustra a continuación en la tabla 27 y 28 se evalúa el vector  $L_b$  definido en la parte izquierda en la expresión referenciada para  $M_{n2}$

**Tabla 29**

*Vectores.*

---

Ecuación de momento nominal para caso II	Vectores
$M_{n2} = C_b \left( M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right) =$	11457879.5kg*cm
	10638359.5kg*cm
	9818839.4kg*cm
	8999319.3kg*cm
	7728836.1kg*cm

---

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

**Tabla 30**

*Valores del momento resistente para caso II.*

Longitud de Pandeo Torsional		Momento nominal		
$L_p$	198.60cm		10312091.6kg*cm	
1.5 $L_p$	297.90cm		9574523.5kg*cm	
2 $L_p$	397.20cm	$\phi M_{n2} =$	8836955.4kg*cm	
2.5 $L_p$	496.50cm		8099387.4kg*cm	
$L_r$	650.45cm		6955952.5kg*cm	Valores de momento resistente caso II

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

#### 4.16.3.6 Caso III. Pandeo lateral torsional elástico $L_b > L_r$

El pandeo lateral-torsional es un fenómeno crítico que puede surgir en vigas esbeltas y no soportadas lateralmente a lo largo de su longitud. Este tipo de pandeo se caracteriza por una deformación fuera del plano de la viga acompañada de una torsión. La evaluación del pandeo lateral-torsional elástico es esencial para determinar la capacidad de una viga para resistir cargas de flexión.

En el contexto del código AISC 360-16, se hace uso de la ecuación de esfuerzo crítico para evaluar el pandeo lateral-torsional elástico. Para ello, se considera la longitud de pandeo efectiva, que representa la longitud no soportada de la viga. Esta longitud es multiplicada por diferentes factores, desde 1.10 hasta 4.80, para tener en cuenta diversas condiciones de soporte y cargas aplicadas.

La tabla 29 proporcionada muestra una serie de longitudes de pandeo efectivas ajustadas desde 1.10 hasta 4.80 en intervalos de 0.10. Para cada longitud ajustada, se tiene un valor correspondiente en centímetros, lo cual brinda una herramienta para evaluar el comportamiento de la viga bajo diferentes escenarios y condiciones de soporte.

Posteriormente, con estos valores y utilizando la ecuación del AISC, se determina el esfuerzo crítico de pandeo lateral-torsional para cada escenario. La evaluación punto a punto permite identificar los puntos críticos y garantizar que la viga mantendrá su integridad estructural bajo las cargas aplicadas.

Este análisis es fundamental para garantizar la seguridad y el desempeño adecuado de la viga dentro de la estructura de la nave industrial, especialmente en situaciones donde las cargas pueden inducir este tipo de pandeo.

### Ecuación 34

Esfuerzo crítico AISC 360-16 (F2-4)

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

### Tabla 31

*Longitud de pandeo efectivo caso III.*

Intervalo Lr	Longitud en cm.
1.10 Lr	715.49cm
1.20 Lr	780.54cm
1.30 Lr	845.58cm
1.40 Lr	910.63cm
1.50 Lr	975.67cm
1.60 Lr	1040.72cm
1.70 Lr	1105.76cm
1.80 Lr	1170.81cm
1.90 Lr	1235.85cm
2.00 Lr	1300.90cm
2.10 Lr	1365.94cm
2.20 Lr	1430.98cm
2.30 Lr	1496.03cm
2.40 Lr	1561.07cm
2.50 Lr	1626.12cm
2.60 Lr	1691.16cm
2.70 Lr	1756.21cm
2.80 Lr	1821.25cm
2.90 Lr	1886.30cm
3.00 Lr	1951.34cm
3.10 Lr	2016.39cm
3.20 Lr	2081.43cm
3.30 Lr	2146.48cm
3.40 Lr	2211.52cm
3.50 Lr	2276.57cm
3.60 Lr	2341.61cm
3.70 Lr	2406.66cm
3.80 Lr	2471.70cm
3.90 Lr	2536.75cm

$L_b =$

4.00 Lr	2601.79cm
4.10 Lr	2666.83cm
4.20 Lr	2731.88cm
4.30 Lr	2796.92cm
4.40 Lr	2861.97cm
4.50 Lr	2927.01cm
4.60 Lr	2992.06cm
4.70 Lr	3057.10cm
4.80 Lr	3122.15cm

De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

A continuación, se evalúa por medio de la **ecuación 34** y la **ecuación 38** vectores de  $L_b$ , con el objetivo de obtener su respuesta Elástica:

**Tabla 32**

*Vectores  $L_b$ .*

1. $L_{b\_1} = L_b(0) =$	715.5cm		
Fcr= 2157 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 6776365 kg*cm	$\varphi$ Mn = 6098728.4 kg*cm	
2. $L_{b\_2} = L_b(1) =$	780.5cm		
Fcr= 1922 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 6036640 kg*cm	$\varphi$ Mn = 5432976.1 kg*cm	
3. $L_{b\_3} = L_b(2) =$	845.6cm		
Fcr= 1733 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 5443231 kg*cm	$\varphi$ Mn = 4898908.1 kg*cm	
4. $L_{b\_4} = L_b(3) =$	910.6cm		
Fcr= 1578 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 4957284 kg*cm	$\varphi$ Mn = 4461555.3 kg*cm	
5. $L_{b\_5} = L_b(4) =$	975.7cm		
Fcr= 1449 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 4552335 kg*cm	$\varphi$ Mn = 4097101.6 kg*cm	
6. $L_{b\_6} = L_b(5) =$	1040.7cm		
Fcr= 1340 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 4209819 kg*cm	$\varphi$ Mn = 3788837.3 kg*cm	
7. $L_{b\_7} = L_b(6) =$	1105.8cm		
Fcr= 1247 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 3916369 kg*cm	$\varphi$ Mn = 3524732.0 kg*cm	
8. $L_{b\_8} = L_b(7) =$	1170.8cm		
Fcr= 1166 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 3662140 kg*cm	$\varphi$ Mn = 3295925.6 kg*cm	
9. $L_{b\_9} = L_b(8) =$	1235.9cm		
Fcr= 1095 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 3439734 kg*cm	$\varphi$ Mn = 3095761.0 kg*cm	

---

10. Lb_10 = Lb(9) =	1300.9cm	
Fcr= 1033 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 3243496 kg*cm	φMn = 2919146.6 kg*cm
11. Lb_11 = Lb(10) =	1365.9cm	
Fcr= 977 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 3069028 kg*cm	φMn = 2762125.6 kg*cm
12. Lb_12 = Lb(11) =	1431.0cm	
Fcr= 927 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2912866 kg*cm	φMn = 2621579.1 kg*cm
13. Lb_13 = Lb(12) =	1496.0cm	
Fcr= 883 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2772241 kg*cm	φMn = 2495016.6 kg*cm
14. Lb_14 = Lb(13) =	1561.1cm	
Fcr= 842 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2644918 kg*cm	φMn = 2380426.1 kg*cm
15. Lb_15 = Lb(14) =	1626.1cm	
Fcr= 805 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2529072 kg*cm	φMn = 2276164.9 kg*cm
16. Lb_16 = Lb(15) =	1691.2cm	
Fcr= 772 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2423199 kg*cm	φMn = 2180878.7 kg*cm
17. Lb_17 = Lb(16) =	1756.2cm	
Fcr= 741 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2326046 kg*cm	φMn = 2093441.3 kg*cm
18. Lb_18 = Lb(17) =	1821.3cm	
Fcr= 712 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2236565 kg*cm	φMn = 2012908.2 kg*cm
19. Lb_19 = Lb(18) =	1886.3cm	
Fcr= 686 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2153868 kg*cm	φMn = 1938481.5 kg*cm
20. Lb_20 = Lb(19) =	1951.3cm	
Fcr= 661 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2077203 kg*cm	φMn = 1869482.5 kg*cm
21. Lb_21 = Lb(20) =	2016.4cm	
Fcr= 639 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 2005923 kg*cm	φMn = 1805330.4 kg*cm
22. Lb_22 = Lb(21) =	2081.4cm	
Fcr= 617 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 1939472 kg*cm	φMn = 1745524.6 kg*cm
23. Lb_23 = Lb(22) =	2146.5cm	
Fcr= 598 kg/cm <sup>2</sup>	Mn = Fcr*Sx = 1877369 kg*cm	φMn = 1689632.2 kg*cm

---

---

24. Lb_24 = Lb(23) =	2211.5cm	
Fcr= 579 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1819195 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1637275.9 kg*cm
25. Lb_25 = Lb(24) =	2276.6cm	
Fcr= 562 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1764585 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1588126.2 kg*cm
26. Lb_26 = Lb(25) =	2341.6cm	
Fcr= 545 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1713215 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1541893.3 kg*cm
27. Lb_27 = Lb(26) =	2406.7cm	
Fcr= 530 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1664802 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1498321.8 kg*cm
28. Lb_28 = Lb(27) =	2471.7cm	
Fcr= 515 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1619095 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1457185.5 kg*cm
29. Lb_29 = Lb(28) =	2536.7cm	
Fcr= 502 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1575870 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1418283.3 kg*cm
30. Lb_30 = Lb(29) =	2601.8cm	
Fcr= 489 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1534929 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1381435.9 kg*cm
31. Lb_31 = Lb(30) =	2666.8cm	
Fcr= 476 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1496092 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1346482.7 kg*cm
32. Lb_32 = Lb(31) =	2731.9cm	
Fcr= 465 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1459200 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1313279.7 kg*cm
33. Lb_33 = Lb(32) =	2796.9cm	
Fcr= 453 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1424108 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1281697.1 kg*cm
34. Lb_34 = Lb(33) =	2862.0cm	
Fcr= 443 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1390687 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1251618.0 kg*cm
35. Lb_35 = Lb(34) =	2927.0cm	
Fcr= 433 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1358818 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1222936.3 kg*cm
36. Lb_36 = Lb(35) =	2992.1cm	
Fcr= 423 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1328395 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1195555.9 kg*cm
37. Lb_37 = Lb(36) =	3057.1cm	
Fcr= 414 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1299321 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1169389.3 kg*cm
38. Lb_38 = Lb(37) =	3122.1cm	
Fcr= 405 kg/cm2	Mn = Fcr*Sx = 1271507 kg*cm	$\varphi$ Mn = 1144356.6 kg*cm

---

De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

**Tabla 33**

*Valores para gráfico de resistencia.*

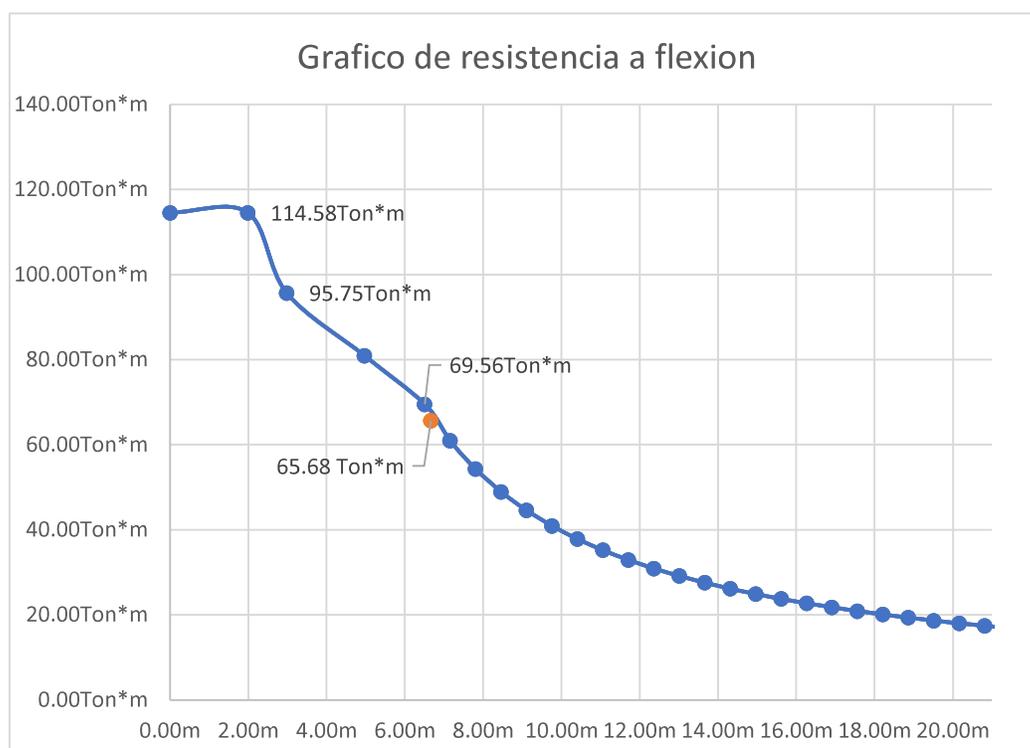
$L_b$	$\phi M_p$			
0	$\phi M_p$	0		114.58Ton*m
Lp	$\phi M_p$	1.99m		114.58Ton*m
1.5Lp	$\phi M_{n2}$	2.98m		95.75Ton*m
2.5Lp	$\phi M_{n2}$	4.97m		80.99Ton*m
Lr	$\phi M_r$	6.50m		69.56Ton*m
Lb_1	$\phi M_{ncr\_1}$	7.15m		60.99Ton*m
Lb_2	$\phi M_{ncr\_2}$	7.81m		54.33Ton*m
Lb_3	$\phi M_{ncr\_3}$	8.46m		48.99Ton*m
Lb_4	$\phi M_{ncr\_4}$	9.11m		44.62Ton*m
Lb_5	$\phi M_{ncr\_5}$	9.76m		40.97Ton*m
Lb_6	$\phi M_{ncr\_6}$	Lb = 10.41m	$\phi M_n =$	37.89Ton*m
Lb_7	$\phi M_{ncr\_7}$	11.06m		35.25Ton*m
Lb_8	$\phi M_{ncr\_8}$	11.71m		32.96Ton*m
Lb_9	$\phi M_{ncr\_9}$	12.36m		30.96Ton*m
Lb_10	$\phi M_{ncr\_10}$	13.01m		29.19Ton*m
Lb_11	$\phi M_{ncr\_11}$	13.66m		27.62Ton*m
Lb_12	$\phi M_{ncr\_12}$	14.31m		26.22Ton*m
Lb_13	$\phi M_{ncr\_13}$	14.96m		24.95Ton*m
Lb_14	$\phi M_{ncr\_14}$	15.61m		23.80Ton*m
Lb_15	$\phi M_{ncr\_15}$	16.26m		22.76Ton*m
Lb_16	$\phi M_{ncr\_16}$	16.91m		21.81Ton*m
Lb_17	$\phi M_{ncr\_17}$	17.56m		20.93Ton*m
Lb_18	$\phi M_{ncr\_18}$	18.21m		20.13Ton*m
Lb_19	$\phi M_{ncr\_19}$	18.86m		19.38Ton*m
Lb_20	$\phi M_{ncr\_20}$	19.51m		18.69Ton*m
Lb_21	$\phi M_{ncr\_21}$	20.16m		18.05Ton*m
Lb_22	$\phi M_{ncr\_22}$	20.81m		17.46Ton*m
Lb_23	$\phi M_{ncr\_23}$	21.46m		16.90Ton*m
Lb_24	$\phi M_{ncr\_24}$	22.12m		16.37Ton*m
Lb_25	$\phi M_{ncr\_25}$	22.77m		15.88Ton*m
Lb_26	$\phi M_{ncr\_26}$	23.42m		15.42Ton*m
Lb_27	$\phi M_{ncr\_27}$	24.07m		14.98Ton*m
Lb_28	$\phi M_{ncr\_28}$	24.72m		14.57Ton*m

Lb_29	$\varphi$ Mncr_29	25.37m	14.18Ton*m
Lb_30	$\varphi$ Mncr_30	26.02m	13.81Ton*m
Lb_31	$\varphi$ Mncr_31	26.67m	13.46Ton*m
Lb_32	$\varphi$ Mncr_32	27.32m	13.13Ton*m
Lb_33	$\varphi$ Mncr_33	27.97m	12.82Ton*m
Lb_34	$\varphi$ Mncr_34	28.62m	12.52Ton*m
Lb_35	$\varphi$ Mncr_35	29.27m	12.23Ton*m
Lb_36	$\varphi$ Mncr_36	29.92m	11.96Ton*m
Lb_37	$\varphi$ Mncr_37	30.57m	11.69Ton*m
Lb_38	$\varphi$ Mncr_38	31.22m	11.44Ton*m

De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

### Figura 18

Gráfico de resistencia a flexión.



De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

En la gráfica presentada se ilustra la variación de la resistencia al pandeo lateral torsional de una sección compacta en función de la longitud sin soporte lateral. La curva representa de forma esquemática la variación en el esfuerzo crítico cuando ocurre el fenómeno de inestabilidad para una viga perfectamente recta.

En esencia hay tres rangos de comportamiento:

- Comportamiento plástico, donde la longitud sin soporte lateral es lo suficientemente corta como para que el pandeo ocurra después de que se alcanza el momento plástico.
- Pandeo lateral inelástico, cuando ocurre inestabilidad después de que han fluido algunas partes de la viga.
- Pandeo lateral elástico, los dos primeros rangos toman importancia para las vigas de una estructura terminada, mientras que el tercer rango suele preocupar durante la construcción, porque con frecuencia hay un periodo breve pero potencialmente peligroso con pérdida de resistencia entre la colocación de la viga y la instalación de los soportes laterales.

**Tabla 34**

*Resistencia a flexión en la longitud de trabajo asignada.*

Resistencia a flexión en la longitud de trabajo asignada, $\phi M_n$ (Ton*m)			68.4Ton*m	Zona 3
Mp1	11457880kg*cm	114.579Ton*m	$\Phi M_n \geq M_u?$	Cumple 96%
Mn2	6838222kg*cm	68.38Ton*m		
Mn3	6721157kg*cm	67.21Ton*m		

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

**Tabla 35**

*Resistencia a cortante.*

Resistencia a cortante			
Coeficiente de pandeo, $K_v$			5.34
Coeficiente $C_v$			1
Área de cortante $A_w$ , (cm <sup>2</sup> )			80.83
Resistencia a cortante, $\phi V_n$ (Ton)			170.478Tn
		$\Phi V_n \geq V_u?$	Cumple 8%

*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

**Tabla 36**

*análisis de deflexión*

Análisis de deflexión	
Deflexión calculada, $\Delta$ (cm)	15.69

Deflexión permitida,  $\Delta_{lim}$  (cm)

16.66666667

$\Delta_{lim} \geq \Delta?$

Cumple

94%

De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

### Figura 19

Diseño de la viga en sap2000

AISC 360-16 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)  
 Units : Tonf, m, C

Frame : 84 X Mid: 3.333 Combo: 6-2 Design Type: Brace  
 Length: 6.683 Y Mid: 10. Shape: W21X93 Frame Type: OMF  
 Loc : 6.683 Z Mid: 8.412 Class: Compact Princpl Rot: 0. degrees

Provision: LRFD Analysis: Effective Length  
 D/C Limit=1. 2nd Order: Amplified 1st Order  
 Ignore Seismic Code? No Ignore Special EQ Load? No D/P Plug Welded? Yes

SDC: D I=1. Rho=1. Sds=0.5  
 R=3. Omega0=3. Cd=5.5  
 PhiB=0.9 PhiC=0.9 PhiTY=0.9 PhiTF=0.75  
 PhiS=0.9 PhiS-RI=1. PhiSI=0.9

A=0.018 I33=8.616E-04 r33=0.221 S33=0.003 Av3=0.008  
 J=2.510E-06 I22=3.867E-05 r22=0.047 S22=3.616E-04 Av2=0.008  
 E=20389019.16 Fy=35153.481 Ry=1.1 z33=0.004 Cw=2.665E-06  
 RLLF=1. Fu=45699.526 z22=5.686E-04

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 6-2)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
6.683	-20.051	6.329	-0.024	-8.056	0.009	-0.003

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-lb)  
 D/C Ratio: 0.076 = 0.019 + 0.056 + 0.001  
 = (1/2)(Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

COMPACTNESS

Slenderness	Lambda	Lambda_p	Lambda_r	Lambda_s	Compactness
Major/Flange	4.527	9.152	24.083		Compact
/Web	32.31	90.553	137.274	232.	Compact
Minor/Flange	4.527	9.152	24.083		Compact
/Web	32.31	90.553	137.274	232.	Compact
Axial/Flange	4.527		13.487		Compact
/Web	32.31		35.884		Compact

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-lb)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1.	1.	1.	1.005	1.	1.
Minor Bending	0.013	1.	1.	1.	1.	0.806

LTB

	Lltb	Kltb	Cb
	0.075	1.	1.052

Axial

	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity
	-20.051	521.254	557.238

Major Moment

	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB	phi*Mn Cb=1
	6.362	114.579	114.579	114.579

Minor Moment

	Mu Moment	phi*Mn Capacity
	-0.024	17.99

SHEAR CHECK

	Vu Force	phi*Vn Capacity	Stress Ratio	Status Check
Major Shear	8.056	170.478	0.047	OK
Minor Shear	0.009	191.803	4.932E-05	OK

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS

	P Comp	P Tens
Axial	-20.428	0.

De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.

Durante el diseño de la nave industrial, la viga de apoyo desempeñó un papel central en las consideraciones estructurales. Esta viga, encargada de soportar diversas cargas provenientes de las

secciones superiores hasta la cumbrera, fue inicialmente evaluada de manera independiente sin contar con la intervención de clavadores y bracones, mediante cálculos manuales y una simulación en Excel.

Sin embargo, para obtener una representación más exacta y buscando potenciar la resistencia de la viga, se incluyeron clavadores espaciados a 1.5 metros y bracones con una separación de 3 metros en el modelo estructural de SAP2000. Estos elementos secundarios, al ser integrados, fortalecieron a la viga principal, proporcionando una rigidez adicional y elevando su capacidad resistente ante las cargas impuestas.

Al contrastar los resultados de la viga evaluada individualmente (modelo en Excel) con la viga reforzada en SAP2000, surgió una diferencia significativa en términos de resistencia. Esta variación destaca el papel crucial de los refuerzos, evidenciando cómo mejoran la eficiencia estructural de la viga principal.

Adicionalmente, al llevar a cabo un análisis de interacción, que considera la combinación de diferentes tipos de esfuerzos en un elemento estructural, el resultado obtenido fue del 98%. Este valor cercano al límite de la capacidad de diseño indica que la viga, con la adición de los refuerzos, está optimizada casi en su totalidad, maximizando su uso sin comprometer la seguridad.

La combinación del análisis manual con herramientas de simulación avanzadas como SAP2000 enfatiza la importancia de una evaluación holística al diseñar estructuras, garantizando no sólo el cumplimiento de las normas, sino también la optimización y seguridad del diseño.

## **Figura 20**

*Diseño del marco en sap2000*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

Tras llevar a cabo el diseño estructural de la nave mediante el software SAP2000, se ha determinado que todos los elementos estructurales cumplen con las condiciones de seguridad y funcionalidad. Los ratios de demanda-capacidad de los elementos se encuentran dentro de los límites aceptables, lo que sugiere que las configuraciones y cargas empleadas en el modelo son adecuadas para asegurar el buen comportamiento estructural de la nave en servicio. Por lo tanto, se concluye que el diseño de la nave no sólo cumple con las especificaciones y criterios de diseño establecidos, sino que también garantiza la seguridad y estabilidad de la estructura durante su vida útil.

#### **4.16.4 Análisis de pandeo en el marco mediante elementos finitos en sap2000**

En el estudio estructural del marco, el pandeo se presenta como un fenómeno crítico que puede afectar significativamente la estabilidad y capacidad de carga de la estructura. La importancia de un análisis detallado y preciso es esencial para garantizar la seguridad durante y después del proceso constructivo. Con este propósito, se llevó a cabo una evaluación computacional utilizando el software SAP2000, enfocándose en dos escenarios distintos de carga inducida por pandeo.

Se definieron dos casos de análisis: uno bajo carga permanente y otro bajo carga muerta. En el caso de carga permanente, se asignó una carga de  $100\text{kg/m}^2$  al marco, basada en recomendaciones típicas para techos y entrepisos en ciertas normativas internacionales como el ASCE 7 y el Eurocódigo 1. Este valor, aunque se asemeja a cargas típicas para entrepisos en edificaciones, fue escogido para simular un escenario donde el marco experimenta una carga significativa, emulando condiciones durante la fase constructiva.

El objetivo principal de este análisis es entender cómo se comporta el marco bajo estas cargas en una etapa constructiva temprana, comparado con el comportamiento cuando se completa la estructura. Durante la construcción, es posible que solo se tengan los primeros marcos en pie, lo que altera las condiciones de contorno y la respuesta estructural global. Es fundamental identificar si estas estructuras parcialmente completas están en riesgo de pandeo y, de ser así, tomar medidas adecuadas para garantizar su estabilidad.

Este estudio proporciona una perspectiva detallada sobre la importancia de considerar la secuencia constructiva y las cargas temporales en el análisis de pandeo, asegurando así un proceso constructivo seguro y una estructura final robusta y resiliente.

#### 4.16.4.1 Factor de Carga Crítica de Pandeo en SAP2000:

SAP2000 determina las cargas críticas de pandeo utilizando el método de Ritz. El software produce un factor de carga crítica para cada modo de pandeo. Si el factor es igual a 1.0, significa que la estructura pandeará bajo la carga aplicada. Si el factor es mayor que 1.0, indica que la estructura puede soportar una carga mayor antes de pandear. Por el contrario, si el factor es menor que 1.0, indica que la estructura pandeará antes de alcanzar la carga aplicada.

En general:

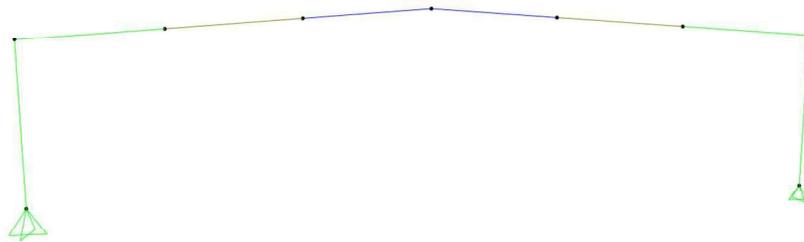
- Si el factor de carga crítica es mayor que 1, la estructura es segura contra el pandeo para las cargas actuales.
- Si el factor de carga crítica es menor que 1, la estructura es susceptible al pandeo y es insegura para las cargas actuales.

Es fundamental entender que, aunque un factor de carga crítica mayor que 1 indica que la estructura es segura contra el pandeo, se debe tener un margen de seguridad adecuado. Muchos códigos de diseño tienen requisitos específicos sobre cuánto debe ser este margen.

Es esencial consultar las normativas y códigos de diseño pertinentes y trabajar con un ingeniero estructural para interpretar correctamente los resultados de SAP2000 y determinar la adecuación y seguridad de la estructura diseñada.

#### Figura 22

*Espécimen 1*, marco sin refuerzos o soportes adicionales



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

En el análisis realizado con SAP2000 para nuestro primer espécimen, el cual consiste en un marco sin refuerzos o soportes adicionales, se obtuvo un factor de carga crítica de 0.12046.

Este valor se determinó tanto para las cargas muertas como para las permanentes. Un factor de carga crítica menor que 1 sugiere que el marco es propenso al pandeo bajo las cargas actuales, mucho antes de que estas alcancen su magnitud completa. En este caso, dado que el factor es 0.12046 indica que la estructura solo puede soportar alrededor del 12.046% de las cargas previstas antes de entrar en una situación de pandeo.

Estos resultados evidencian la inseguridad estructural del marco en su estado actual, resaltando la urgente necesidad de tomar medidas de refuerzo o modificación del diseño para evitar el pandeo. Si no se toman acciones correctivas, existe un riesgo significativo de fallo estructural durante las etapas iniciales de la aplicación de cargas, ya sea durante la construcción o en las fases iniciales de ocupación del edificio.

#### **4.16.4.1.1 Refuerzo y Mejora de la Estabilidad Lateral**

##### **Fase 1 de montaje**

Durante la revisión del diseño estructural, se detectó una necesidad urgente de reforzamiento para combatir un problema potencial de pandeo. Para ello se presentan dos opciones para combatir el problema del pandeo.

##### **Opción 1**

Se integran dos columnas adicionales W21X93 en la parte central del marco. Estas columnas, estratégicamente ubicadas, no solo proporcionaron un soporte vertical adicional, sino también mejoraron la estabilidad lateral del sistema.

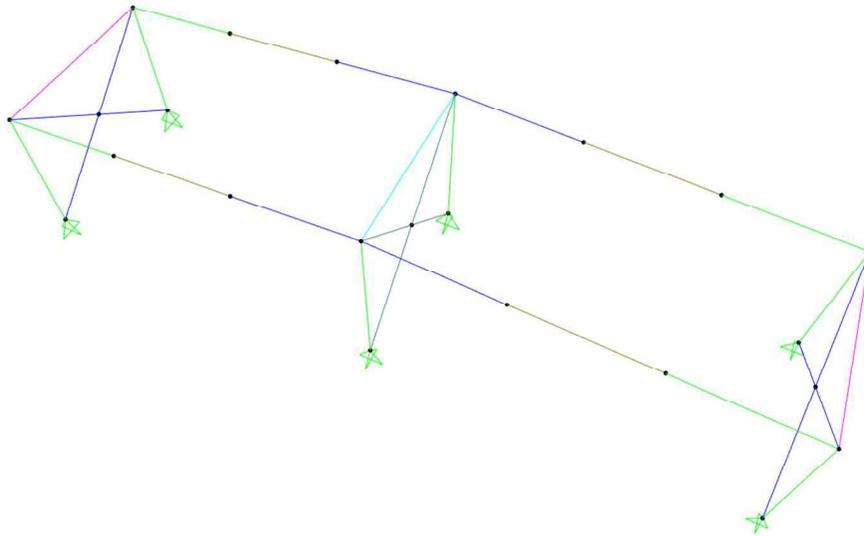
Para garantizar estabilidad en la construcción, se reutilizaron las vigas colectoras del diseño principal como riostras, optimizando la utilización de materiales y fomentando un enfoque de construcción sostenible.

El resultado de estas modificaciones fue una mejora significativa en la estabilidad de la estructura, como lo evidencia el factor de pandeo de 3.57511. Es crucial entender que un factor de pandeo mayor que 1 indica que la estructura puede soportar más carga de la que se le aplica,

garantizando su resistencia al pandeo. En comparación con el análisis inicial, donde el factor era menor que 1 (indicando una posible falla por pandeo), el diseño optimizado ofrece un margen de seguridad considerablemente mayor.

### **Figura 23**

*Espécimen 2, marco reforzado con columnas en su parte central.*



*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

### **Opción 2**

En busca de otra solución efectiva, se implementó una estrategia que involucra la integración de varillas numero 8 como tensores ancladas al suelo y conectadas al patín superior de la viga en intervalos regulares de 6.6 metros. Estas varillas, de calibre 8 y debidamente tensadas, desempeñan un papel clave en la mejora de la estabilidad de la estructura.

La incorporación de varillas tensores ancladas al suelo aborda tanto la estabilidad longitudinal como la lateral del marco de la estructura. Cada varilla se extiende desde el nivel del terreno hasta el patín superior de la viga, brindando un refuerzo vertical y ayudando a resistir las posibles fuerzas de pandeo. Además, al estar tensadas y fijadas a la viga, también contribuyen a fortalecer la estabilidad lateral del sistema.

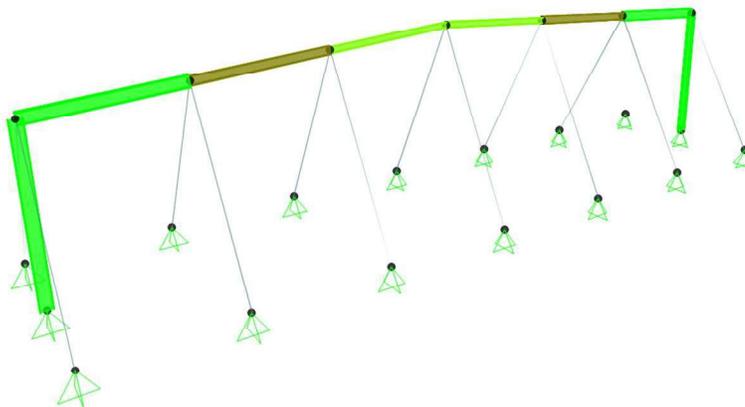
Un aspecto importante de esta solución es que las varillas tensoras aprovechan el suelo como punto de anclaje, lo que agrega una capa adicional de seguridad al sistema. Esta disposición estratégica garantiza una distribución eficaz de las fuerzas y refuerza la capacidad de la estructura para resistir cargas y momentos adversos.

Los resultados de esta modificación se reflejan en un factor de pandeo de 54.31, lo que indica una mejora significativa en la resistencia al pandeo. En comparación con el análisis inicial, donde existía una preocupación por la estabilidad, la implementación de las varillas tensoras ancladas al suelo ha proporcionado un margen de seguridad considerablemente amplio.

Esta solución demuestra la versatilidad y la adaptabilidad de las estrategias de refuerzo en ingeniería estructural, al tiempo que garantiza una mejora sustancial en la estabilidad y la integridad de la estructura en cuestión.

#### **Figura 24**

*Espécimen 3, marco reforzado con tensoras.*



*De Fuente propia, por F Madrigal Cabezas, 2023.*

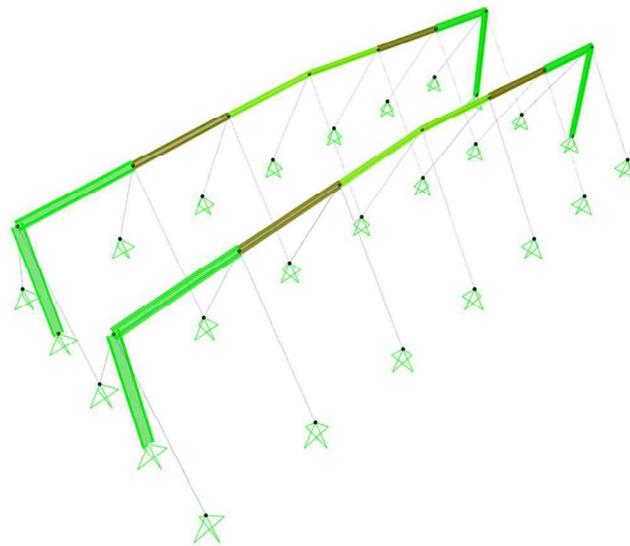
Luego, se procedió a analizar la estructura incorporando un marco adicional, como se ilustra en la figura 25. Esta nueva etapa marca el inicio de una fase de montaje en la que se busca simular la configuración de dos marcos, utilizando el mismo sistema previamente propuesto y explicado con el espécimen 3. En esta instancia, la carga de pandeo aún se encuentra dentro del rango de seguridad ante el fenómeno de pandeo lateral torsional, lo que resultó en un valor de

8.11 para la carga de pandeo. Este valor continúa excediendo el umbral crítico de 1, reafirmando la estabilidad estructural en esta nueva fase.

Con este análisis confirmado, se asegura que la estructura es capaz de soportar cargas de pandeo en esta etapa, lo que brinda la confianza necesaria para continuar con el montaje de los marcos subsiguientes. Esta etapa es fundamental para permitir la construcción completa y segura de la edificación en su totalidad.

### **Figura 25**

*Espécimen 4, marcos reforzados con tensores.*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

### **Fase 2 de montaje**

En la siguiente fase del proceso de montaje, se da paso a la construcción de los marcos restantes que conforman la nave industrial. En esta etapa crucial, se pone en práctica la solución adoptada previamente, ya sea la opción 1 que involucra columnas estratégicamente ubicadas en el centro de los marcos, o la opción 2 que incorpora varillas tensores ancladas al suelo y sujetas al patín superior de las vigas. Ambas alternativas han sido diseñadas con el firme propósito de asegurar la estabilidad y la resistencia de la estructura durante su proceso de ensamblaje.

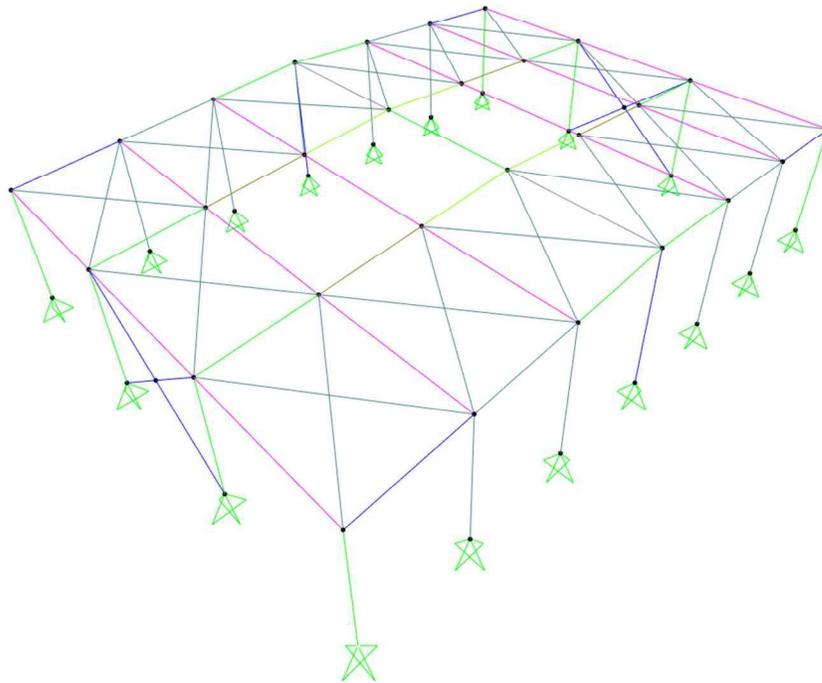
En el caso de la opción 1, se ha comprobado que la estructura posee una condición de estabilidad segura para enfrentar las cargas aplicadas durante el montaje. Para mantener esta seguridad a lo largo de todo el proceso constructivo, resulta esencial mantener los refuerzos que han sido implementados, tal como se detalló en las etapas anteriores. Esta precaución garantiza que la estructura alcance su máximo nivel de resistencia al completar la totalidad de sus marcos. Este enfoque asegura una integridad estructural robusta y confiable.

Por otro lado, en la opción 2, las varillas tensoras ancladas al suelo y sujetas al patín superior de las vigas proporcionan un refuerzo adicional para prevenir el pandeo lateral torsional. Estas varillas tensoras han sido diseñadas y evaluadas para cumplir con los requerimientos de resistencia y estabilidad necesarios durante el proceso de montaje. Mantener estos refuerzos a lo largo de la construcción es esencial para garantizar la integridad y la seguridad de la estructura en todas las etapas del ensamblaje.

Esta fase de montaje destaca la importancia de la elección acertada de estrategias de refuerzo y de la continua implementación de dichos refuerzos durante todas las etapas de construcción. La meticulosa aplicación de estas medidas garantiza que la estructura no solo alcance los niveles deseados de resistencia, sino que también mantenga su estabilidad y seguridad a lo largo de todo el proceso de ensamblaje.

## **Figura 26**

*Espécimen 5, estructura final con todos sus marcos y elementos principales.*



De *Fuente propia*, por F Madrigal Cabezas, 2023.

En la fase final del proceso de montaje, se alcanza un hito crucial en la investigación al lograr la construcción completa de la nave industrial, con todos sus marcos y elementos ensamblados en su totalidad. Este logro marca un paso significativo hacia la consecución de los objetivos planteados, en particular, la comparación de la estabilidad estructural en la etapa constructiva en contraste con la estabilidad en la etapa final.

El análisis exhaustivo de pandeo realizado en esta etapa revela un factor de pandeo de 1.90, lo que indica una robusta capacidad de la estructura para soportar las cargas aplicadas durante el montaje y operación. Esta cifra supera el valor mínimo de 1 requerido para la estabilidad y refleja una integridad estructural sólida que cumple con las normas y especificaciones pertinentes.

Además, es crucial destacar que la estabilidad integral de la estructura también ha sido sometida a rigurosas evaluaciones conforme a los módulos de diseño y análisis estipulados por la normativa vigente, incluyendo la AISC 360-16 y las normativas nacionales como el CSCR 2010 y los Lineamientos Técnicos para el Cálculo y la Aplicación de las Fuerzas de Viento en el

Diseño y Construcción de Edificaciones en Costa Rica. Los elementos estructurales han sido minuciosamente analizados para verificar su capacidad de resistir las cargas últimas de diseño.

El resultado exitoso de estas evaluaciones y análisis confirma que la estructura en su totalidad satisface las exigencias normativas tanto en términos de estabilidad como en el cumplimiento de los módulos de diseño requeridos. Esto respalda la conclusión de que las soluciones implementadas en la fase anterior de montaje, ya sea mediante columnas estratégicamente ubicadas o varillas tensoras ancladas, han logrado elevar la resistencia y la estabilidad general de la estructura a niveles óptimos.

En resumen, el análisis integral de pandeo, junto con la evaluación exhaustiva de la estabilidad y el cumplimiento de las normativas, demuestran que la etapa final de montaje de la nave industrial ha alcanzado los objetivos establecidos. La estructura se erige como un ejemplo exitoso de cómo abordar de manera efectiva y segura los desafíos del pandeo y garantizar su estabilidad y resistencia en todas las fases del proceso constructivo.

## **5. Conclusiones**

La investigación emprendida se ha guiado por objetivos específicos que buscaban abordar de manera exhaustiva los desafíos inherentes al pandeo lateral torsional en la etapa constructiva de estructuras de marcos en naves industriales. A través de un riguroso proceso de análisis y evaluación, se han alcanzado conclusiones claras y valiosas en relación con cada uno de los objetivos planteados:

En primer lugar, se ha logrado un entendimiento profundo de las diversas condiciones de carga a las que la estructura se somete durante las etapas de construcción. La identificación y consideración meticulosa de estas cargas han sido esenciales para comprender los desafíos específicos asociados con el pandeo lateral torsional en esta etapa crítica del proceso constructivo.

En segundo lugar, mediante la aplicación de métodos matriciales, vectores y valores propios, se ha logrado modelar de manera precisa las condiciones de pandeo lateral torsional en la nave industrial. Este enfoque analítico ha permitido evaluar exhaustivamente los efectos de diferentes condiciones de carga en la estabilidad estructural, brindando una visión integral de los riesgos potenciales y oportunidades de mejora.

La tercera conclusión se centra en la comparación de la estabilidad estructural entre la etapa constructiva y la etapa final de la nave industrial. El análisis detallado de esta comparación ha demostrado que las soluciones implementadas tienen un impacto significativo en la resistencia a la inestabilidad y el pandeo lateral torsional. Esta evaluación cuantitativa ha validado la eficacia de las estrategias propuestas para abordar estos desafíos.

Por último, y quizás de mayor importancia, se ha logrado proponer soluciones concretas para restringir el pandeo lateral torsional de las vigas en su etapa constructiva. Las opciones presentadas, que incluyen la incorporación de columnas adicionales estratégicas y el uso de varillas tensoras ancladas, han demostrado ser efectivas en la mejora de la estabilidad estructural durante el proceso de montaje.

En conjunto, esta investigación ha demostrado que el pandeo lateral torsional en la etapa constructiva de estructuras de marcos en naves industriales es un desafío abordable con soluciones ingeniosas y técnicamente sólidas. Las estrategias implementadas no solo han cumplido con los objetivos propuestos, sino que también han sentado las bases para un enfoque más seguro y resistente en la construcción de este tipo de edificaciones. Los resultados obtenidos y las recomendaciones formuladas contribuyen significativamente al avance de la ingeniería estructural y ofrecen valiosas pautas para futuras investigaciones en el campo.

## **6. Recomendaciones**

Los lineamientos técnicos para el análisis del pandeo lateral torsional en vigas durante la etapa constructiva de naves industriales son esenciales. Sin embargo, no se debe confiar exclusivamente en un solo conjunto de criterios. Se recomienda enriquecer la perspectiva profesional con otras fuentes, como literatura especializada o códigos internacionales, por ejemplo, el ASCE o la norma europea.

Adoptar buenas prácticas es fundamental, evaluando constantemente los criterios relacionados con el pandeo lateral torsional en vigas, sin importar el tipo de estructura o su ubicación. Esta actitud proactiva es esencial para combatir el desconocimiento del fenómeno entre los profesionales del sector.

Esta investigación se centró en las vigas, pero se debe enfatizar que las columnas y, particularmente, las conexiones entre vigas y columnas también juegan un papel crucial en la

estabilidad estructural de las naves industriales. Por ello, se recomienda encarecidamente que se realice un análisis similar del pandeo lateral torsional en columnas y que se evalúe detalladamente el diseño y comportamiento de las conexiones durante la etapa constructiva. Las conexiones, cuando se diseñan y se ejecutan adecuadamente, pueden desempeñar un papel vital en la prevención de este tipo de pandeo y en garantizar la integridad global de la estructura.

Aunque SAP2000 es una herramienta ampliamente reconocida y utilizada en la industria, es beneficioso considerar otras plataformas, como IDEA StatiCa, que ofrecen capacidades avanzadas para el análisis por elementos finitos. Ampliar el espectro de herramientas de análisis puede brindar una comprensión más amplia y detallada del comportamiento estructural en la etapa constructiva de naves industriales, optimizando así la calidad del diseño y fortaleciendo la confianza en los resultados.

### **Bibliografía**

Grupo LOBE. (s.f.). Naves Industriales. Grupo LOBE.  
<https://grupolobe.com/industrial/naves-industriales/>

Aguilar, J. (2018). Análisis de pandeo en columnas y vigas de sección abierta. Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala. Repositorio de la Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/11704/>

Pérez, L. F. (2016). Estudio del pandeo de estructuras de barras. Tesis de grado, Universidad de Carabobo. Repositorio Universidad de Carabobo.  
<http://dspace.uc.edu.ve/handle/123456789/2553>

González, J. (2015). Modos de falla en elementos de acero sometidos a tracción. Revista de Ingeniería, 24(2), 15-22.

Restrepo, J. I., Blandón, C. A., & Londoño, C. A. (2005). Evaluación de la estabilidad global y local en estructuras metálicas mediante análisis numérico. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, (36), 69-79.

García, G., Martínez, J. L., & Ramírez, J. A. (2006). Evaluación de la estabilidad en estructuras de acero sometidas a cargas variables y cambios climáticos. Revista Internacional de Estructuras de Acero, (3), 16-22.

Díaz, J. C., Ramírez, J. A., & Sandoval, L. A. (2015). Uso de refuerzos estructurales para prevenir el pandeo global en edificios de acero. *Revista de Investigación Académica*, (23), 54-61.

López, E., Cordero, R., & Castro, J. (2017). Evaluación forense de un edificio de acero tras un evento sísmico en Costa Rica. *Revista Ingeniería*, 22(1), 44-49.

CSI (2018). *SAP2000 - Integrated Software for Structural Analysis & Design*. Computers & Structures, Inc.

Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons.

American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-16)*. Chicago, IL: AISC.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2021). *Lineamientos Técnicos para el Cálculo y la Aplicación de las Fuerzas de Viento en el Diseño y Construcción de Edificaciones en Costa Rica*. Costa Rica.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2016). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

McCormac, J. Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (5ª ed). Alfaomega Grupo Editor, S.A. México.

## **Glosario**

Carga crítica: es el valor límite de carga que un elemento estructural puede soportar sin sufrir un colapso o una deformación excesiva. Este valor se encuentra asociado a la configuración geométrica y las propiedades materiales del elemento estructural, y puede ser influenciado por factores como la geometría, la rigidez, el material y las condiciones de contorno.

Resistencia Nominal: la resistencia nominal define la capacidad de soportar una carga, incluyendo la fluencia excesiva, la fractura, el pandeo, la fatiga y el movimiento bruto del cuerpo rígido.

Estado Límite de Servicio: Define el comportamiento, incluyendo la deflexión, el agrietamiento, los deslizamientos, la vibración y el deterioro.

Esfuerzo: Parámetro que permite medir la intensidad que actúa una fuerza sobre un objeto.

Esfuerzo axial: Esfuerzo que es perpendicular al plano sobre el que se aplica la fuerza de tracción o compresión, que es distribuido de manera uniforme por toda su superficie.

Coefficiente: Número que expresa el valor de un cambio en relación con las condiciones en que se produce.

Pandeo: Fenómeno de inestabilidad estructural que puede presentarse cuando un elemento es sometido a compresión, provocando su deformación lateral sin que haya alcanzado su capacidad máxima de compresión.

Elementos finitos: Método numérico utilizado para resolver problemas de ingeniería y física aplicada. Se emplea para predecir cómo reaccionará un producto a fuerzas físicas.

Factor de pandeo: Valor numérico que indica la relación entre la carga de pandeo crítica de una estructura y la carga aplicada. Un valor mayor a 1 indica que la estructura puede soportar la carga aplicada sin pandear.

SAP2000: Software de análisis estructural y diseño utilizado por ingenieros civiles para modelar y analizar edificaciones y estructuras.

Carga muerta: Cargas permanentes que actúan sobre una estructura, como el peso propio de los elementos constructivos.

Carga viva: Cargas variables o móviles que actúan sobre una estructura, como el peso de los ocupantes, muebles, vehículos, entre otros.

Viga colectora: Elemento estructural que se encarga de recoger y distribuir las cargas aplicadas en una dirección específica hacia los pilares o columnas.

Columna: Elemento vertical que transmite las cargas de la estructura al cimiento.

Riostra: Elemento estructural que proporciona estabilidad lateral a la estructura, resistiendo cargas horizontales como las producidas por el viento o un sismo.

Tensor: Elemento estructural que trabaja a tracción, soportando cargas que tienden a estirarlo.

Bracones: Elementos diagonales que se emplean en una estructura para brindar estabilidad contra cargas laterales.

Rigidez estructural: Capacidad de una estructura o de un elemento estructural de resistir deformaciones cuando se le aplica una carga.

Análisis estático: Análisis estructural que considera las cargas y respuestas que no varían con el tiempo.

Norma técnica: Documento que establece requisitos, especificaciones, guías o características que deben ser cumplidas para que materiales, productos, servicios y sistemas cumplan con un nivel mínimo de calidad y seguridad.