# Diseño y estudio de un mezanine para mejorar la producción y seguridad de la planta estructuras – SISPRO S.A

Sebastian Páez Pacheco

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Asesor

Carlos Trujillo, Doctor (PhD) en Ingeniería mecánica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

| | |
|---|---|
| **Cita** | (Páez Pacheco, 2025) |
| **Referencia**<br><br>**Estilo APA 7 (2020)** | Páez Pacheco, S. (2025). Diseño y estudio de un mezanine para mejorar la producción y seguridad de la planta estructuras – SISPRO S.A Trabajo de grado de práctica profesional, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia |

creative commons BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Dedicatoria

Para los integrantes de las plantas de estructuras y forjados, por su apoyo y conocimientos brindados, durante el proceso de prácticas en la empresa SISPRO S.A

- David Ruiz - Ingeniero encargado de la planta de estructuras.
- Camilo Pineda - Ex director de producción
- Jonathan Sandoval – Director de producción
- David Salame – Ingeniero encargado de la planta de forjados
- David Ramírez - Director de la planta de estructuras
- Luis Villegas - Gerente de SISPRO S.A
- Alduban Agudelo – Coordinador de calidad

**Agradecimientos**

A mi familia, que ha sido mi pilar en cada etapa de mi vida, acompañándome en los buenos y malos momentos, les agradezco profundamente por ser el motor que me impulsa a seguir adelante. Gracias a ustedes me he formado con valores y principios que me definen, y hoy puedo decir con orgullo que todo lo que soy se lo debo a su amor y apoyo incondicional. Mamá y papá, gracias por su fortaleza, por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles, por darme ánimo cuando la adversidad se presentaba y por recordarme que siempre hay una salida. Sus palabras de aliento y su respaldo han sido fundamentales en mi camino. Espero seguir compartiendo momentos inolvidables con ustedes, que mis alegrías sigan siendo las suyas y las de ustedes las mías.

Para mi compañero de carrera, Brayan Castaño gracias por el apoyo brindado a lo largo de este proceso; tanto en el ámbito académico como en el personal el cual me ayudo a sobresalir.

**Tabla de contenido**


Resumen 8

1. Introducción 9

2. Objetivos 10

2.1 Objetivo general 10

2.2 Objetivos específicos 10

3. Marco teórico 11

4. Metodología 13

4.1 Diseño y elección de material 16

4.1.2. Cálculos 19

5. Análisis de resultados 28

5.1 Comparación de Resultados Teóricos vs. Simulación en Inventor 29

6. Conclusiones y recomendaciones 33

Referencias 35

## Lista de tablas

**Tabla 1** Selección de material 18

**Tabla 2** Tamaño mínimo de filete 27

**Tabla 3** Resultados obtenidos por método teorico y software 29

**Tabla 4** Porcentajes de error obtenidos 29

**Tabla 5** Validación de la deformación máxima permitida 32

## Lista de figuras

**Figura 1** Panorama planta estructuras 13

**Figura 2** Panorama planta estructuras 14

**Figura 3** Levantamiento de planta 15

**Figura 4** Diseño propuesto de mezanine 17

**Figura 5** Perfil cuadrado, Viga tipo 1 y viga tipo 2 28

**Resumen**

En entornos industriales y comerciales donde el espacio físico es limitado, la optimización del área disponible se convierte en una prioridad para garantizar la eficiencia operativa y la seguridad laboral. Este trabajo de grado presenta el diseño y desarrollo de un mezanine como solución estructural destinada a maximizar el uso del espacio vertical. Al crear un nivel adicional dentro de las instalaciones existentes, el mezanine incrementa la capacidad funcional y mejora la distribución de áreas clave

La propuesta reorganiza zonas de trabajo, almacenamiento y oficinas para optimizar los flujos operativos. Este enfoque facilita el acceso a materiales y herramientas, reduce tiempos improductivos y promueve un entorno más ordenado, incrementando significativamente la productividad. Además, el diseño del mezanine cumple con los estándares estructurales requeridos para soportar cargas específicas, garantizando estabilidad y seguridad.

Un aspecto fundamental del proyecto es la mejora de las condiciones de seguridad laboral. La redistribución del espacio minimiza riesgos asociados a la saturación, como tropiezos, caídas de objetos y accidentes por desorganización. Esto no solo protege a los trabajadores, sino que también asegura un cumplimiento normativo en materia de seguridad industrial.

# 1. Introducción

En el contexto industrial actual, donde las limitaciones espaciales son un desafío recurrente, se hace imprescindible buscar soluciones que optimicen la funcionalidad de las instalaciones sin comprometer la seguridad ni la productividad. Este proyecto aborda el diseño e implementación de un mezanine, una estructura elevada que maximiza el uso del espacio vertical, permitiendo la redistribución de áreas funcionales como almacenamiento, oficinas y zonas de trabajo.

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en un entorno con restricciones físicas significativas, donde previamente se habían implementado sistemas de organización y almacenamiento que resultaron insuficientes ante el crecimiento de las operaciones. Ante este escenario, la necesidad de una solución estructural eficiente llevó a la selección del mezanine, justificada por su capacidad para optimizar el espacio sin necesidad de modificaciones mayores en la planta existente.

El objetivo principal es abordar el problema de la saturación de espacios, que impacta negativamente en los flujos de trabajo y la seguridad laboral. Este proyecto aporta a la planta el integrar un diseño estructural eficiente, económico y adaptable, demostrando cómo una solución técnica puede transformar las condiciones operativas de una instalación.

La metodología incluye un análisis detallado de cargas estructurales, simulaciones mediante software y la implementación de estándares técnicos vigentes. Los resultados obtenidos reflejan mejoras en la productividad, seguridad y organización, demostrando que el mezanine es una herramienta estratégica para enfrentar las limitaciones de espacio y mejorar el desempeño operativo.

## 2. Objetivos

***Objetivo General:***

Diseñar un mezanine que evite la acumulación de equipo de trabajo material y por consecuente genere un mejor transito sobre ella, dándole al operario una nueva área de trabajo, aprovechando el espacio vertical, mejorando la seguridad y disminuyendo la contaminación visual presente.

***Objetivos Específicos:***

1. **Analizar las características y necesidades de la planta**: Evaluar la distribución actual del espacio y determinar los requisitos de carga, uso y seguridad que debe cumplir el mezanine.
2. **Desarrollar un diseño estructural adecuado**: Elaborar el diseño detallado del mezanine utilizando software CAD, asegurando que cumpla con las normativas de seguridad y resistencia.
3. **Calcular las cargas y distribuciones de fuerza**: Determinar las cargas que el mezanine debe soportar y realizar los cálculos correspondientes para garantizar la estabilidad de la estructura.
4. **Evaluar la viabilidad económica**: Realizar un análisis de costos de materiales, mano de obra y plazos de ejecución para evaluar la viabilidad del proyecto en función del presupuesto disponible.
5. **Optimizar la ergonomía y funcionalidad**: Asegurar que el diseño del mezanine permita una circulación eficiente y segura, así como la integración de las actividades y equipos dentro de la planta.

## 3. Marco teórico

El diseño de un mezanine se fundamenta en diversos aspectos técnicos y estructurales que aseguran la funcionalidad y sostenibilidad de la estructura. A continuación, se exploran los conceptos clave y bases teóricas que sustentan este proyecto.

***Diseño estructural y distribución de cargas***

El diseño de estructuras requiere un análisis detallado de la distribución de cargas y la resistencia de los materiales. El análisis de cargas es un proceso crítico utilizado para evaluar las fuerzas, tensiones y momentos aplicados a las estructuras, asegurando su estabilidad y seguridad. Este análisis debe considerar cargas permanentes, cargas vivas y su constante interacción, lo cual influye directamente en el comportamiento estructural y determina los requerimientos del diseño para garantizar que la estructura soporte las demandas operativas durante su vida útil.

***Selección de materiales y sostenibilidad***

La selección de materiales para estructuras metálicas se basa en sus propiedades mecánicas y comportamiento bajo carga. El acero es comúnmente utilizado debido a su resistencia, ductilidad y capacidad de reciclaje. Además, incorporar criterios de sostenibilidad, como el uso de material reciclable que se puede hallar en planta (aceros) reduciendo significativamente el impacto ambiental del proyecto y en especial el económico.

***Análisis y simulación computacional***

El uso de herramientas computacionales como software CAD permite modelar y optimizar estructuras de manera eficiente. Estas herramientas facilitan el análisis de la capacidad de carga, la estabilidad estructural y la identificación de posibles puntos críticos en el diseño.

***Dinámica y vibraciones en estructuras***

Las estructuras metálicas están sujetas a vibraciones que pueden afectar su desempeño y seguridad. El diseño debe considerar la frecuencia natural de la estructura y las cargas dinámicas inducidas

por el movimiento de personas o equipos. Un análisis adecuado previene problemas como resonancia o fatiga en los materiales.

### *Ergonomía y diseño funcional*

El diseño del mezanine debe garantizar un entorno seguro y eficiente para los operarios. Es fundamental integrar criterios de ergonomía y accesibilidad, asegurando un flujo adecuado de personas y materiales en el espacio disponible. Esto contribuye a mejorar la funcionalidad y operatividad dentro de la planta industrial.

### *Sostenibilidad en el diseño estructural*

El enfoque sostenible en el diseño de estructuras implica la utilización de materiales que se encuentran disponibles en planta asegurando la optimización de los procesos de fabricación y la reducción del consumo energético. Estas prácticas no solo disminuyen el impacto ambiental, sino que también pueden contribuir a una mayor eficiencia económica del proyecto.

## 4. Metodología

En la planta de Estructuras de SISPRO S.A. desde el inicio de la práctica se evidenció la limitación del espacio disponible. A medida que aumentaban las órdenes de producción, la ocupación de la planta se fue reduciendo considerablemente, hasta el punto que gran parte de la mercancía debía ser almacenada fuera de la instalación. Esta situación hace que el desarrollo de un mezanine sea una solución clave para generar un espacio útil en la planta.

Esta nueva área de trabajo estará destinada principalmente para los equipos de soldadura, esta decisión se fundamenta en la necesidad que tienen los operarios de "cercar" su área de trabajo con unas vallas para proteger a los demás de la luz ultravioleta provocada por el arco de soldadura, por consiguiente al instalar estas áreas de trabajo se dificulta el paso a ciertas zonas donde están instalados generando así contaminación visual y congestión en la planta, se debe mencionar que actualmente hay alrededor de 7 equipos de soldadura

Además, la falta de áreas adecuadas para transitar libremente dentro de la planta representa un riesgo significativo para la seguridad de los operarios. La acumulación de equipos y mercancía en áreas abiertas dificulta la movilidad, lo que aumenta la probabilidad de accidentes laborales. La implementación del mezanine contribuirá a mejorar esta situación, optimizando el flujo de personas y equipos, lo que no solo incrementará la eficiencia operativa, sino que también garantizará un ambiente más seguro para los trabajadores.



Figura 1. Panorama planta estructuras

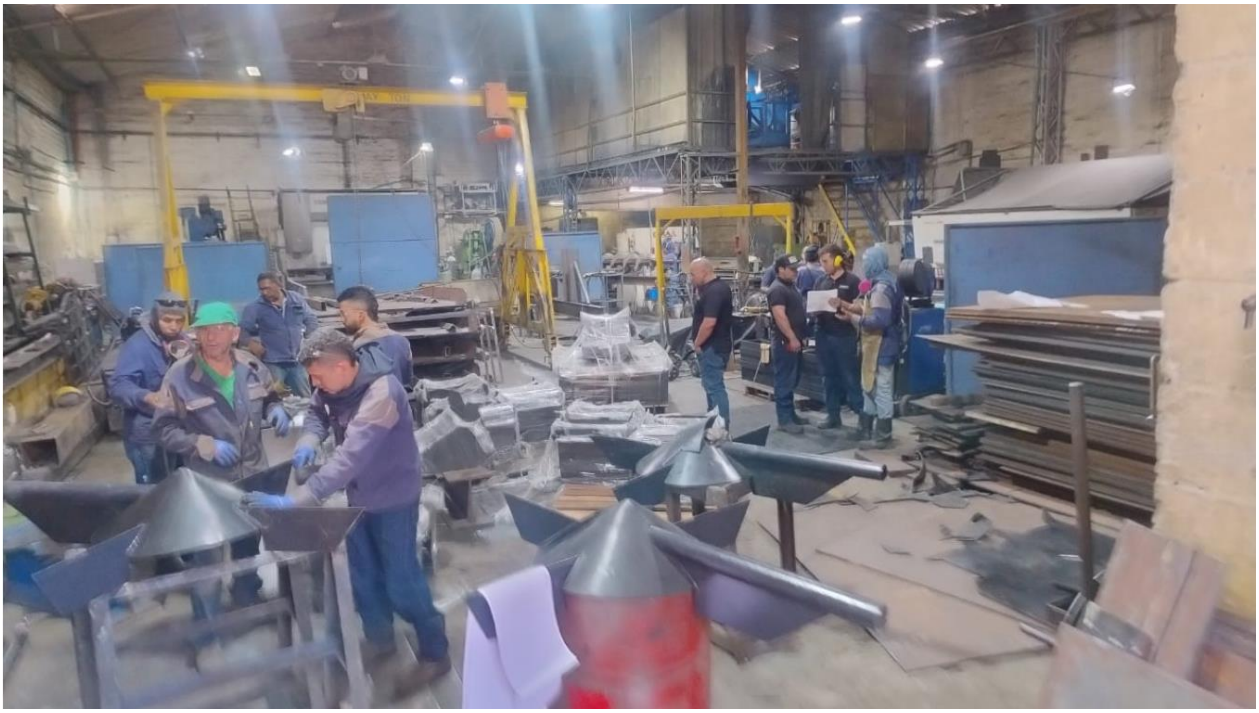

Figura 2. Panorama planta estructuras

En las figuras 1 y 2 se puede observar uno de los múltiples escenarios que ocurren a diario en la planta de estructuras, lo cual ha evidenciado la necesidad de buscar e implementar una solución para esta problemática desde el área de ingeniería. Esta situación, caracterizada por el desorden generado por piezas, láminas o máquinas, ha ocasionado que tanto ingenieros como operarios sufran caídas o tropiezos, afectando no solo la seguridad de los trabajadores, sino también la eficiencia operativa.

A partir de esta problemática, y con la información recopilada, se tomó la decisión de realizar un levantamiento detallado de la planta. Este levantamiento implicó la toma de medidas precisas y la recopilación de datos sobre la distribución de las áreas disponibles, la cantidad de máquinas presentes y su ubicación dentro de la planta. Cabe destacar que, debido a su naturaleza dinámica, los equipos de soldadura no se incluyeron en este análisis, ya que cambian de posición constantemente en función de las necesidades operativas diarias.

En la siguiente imagen se presenta el levantamiento de planta obtenido, que sirvió como base fundamental para desarrollar las propuestas de mejora y optimización del espacio.

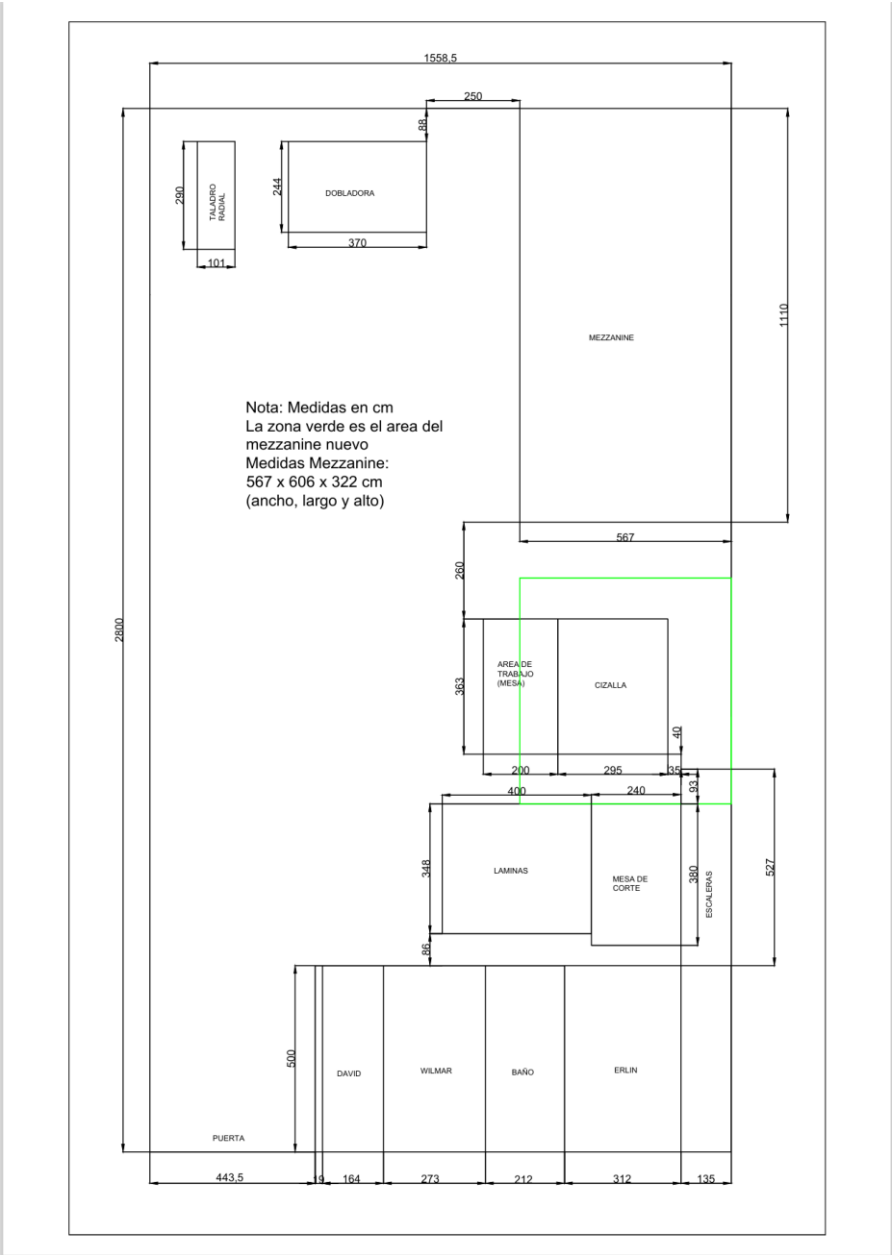


Figura 3. Levantamiento de planta

En un primer análisis de la planta, se identificó una zona considerablemente amplia que no contaba con maquinaria ni oficinas, lo que la posicionaba como el espacio más adecuado para la instalación del mezanine. Este espacio se tomó como la primera propuesta, ya que sus dimensiones ofrecían la posibilidad de desarrollar una estructura mucho más grande y funcional, optimizando significativamente el uso del área disponible. En consecuencia, se inició el diseño preliminar del mezanine considerando esta ubicación, avanzando en cálculos y proyecciones específicas.

No obstante, tras la presentación de la propuesta, se recibió una notificación por parte de la gerencia indicando que esta área había sido previamente destinada para un proyecto más ambicioso que ya formaba parte de sus planes estratégicos. Este cambio de dirección implicó la cancelación de lo avanzado hasta ese momento, lo que representó un retroceso significativo y la necesidad de replantear el enfoque del proyecto.

Frente a este escenario, fue necesario regresar a la fase inicial, evaluar nuevamente las dimensiones y condiciones de la planta, y considerar otras alternativas para el desarrollo del mezanine. Tras un análisis exhaustivo, se identificó como nueva ubicación estratégica la zona donde actualmente se encuentra instalada la cizalla (señalada como zona verde en el plano). Este cambio de localización no solo responde a la disponibilidad del espacio, sino también a su potencial para cumplir con los objetivos del proyecto de manera eficiente y adecuada.

4.1 Diseño y elección de material:

Con base en el levantamiento de la planta (ver figura 3), se determinaron las medidas previstas para la ubicación del mezanine. Utilizando el software Autodesk Inventor, se desarrolló un diseño preliminar que prioriza el respeto de las dimensiones de largo y ancho, dado que estas representan el espacio horizontal disponible. (ver figura 4)

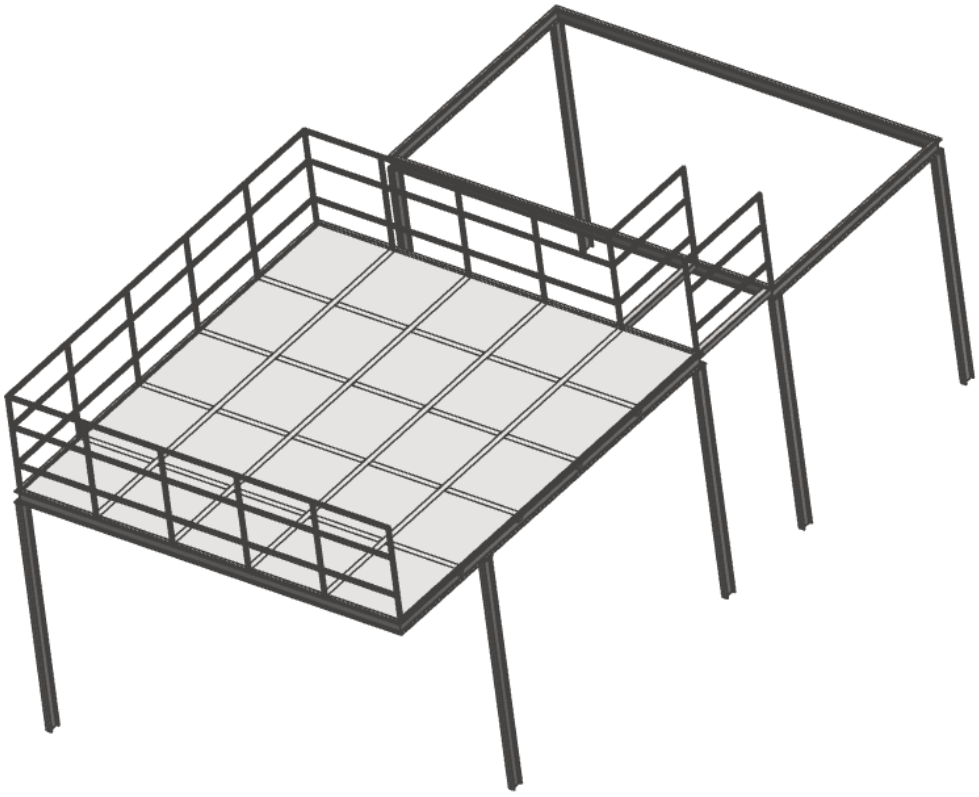

Figura 4. Diseño propuesto de mezanine

Es crucial mencionar que, frente al mezanine propuesto (ver figura 4), se encuentra otro mezanine cuya extensión resulta inviable debido al funcionamiento constante de un polipasto utilizado para el traslado de materiales. Por tal motivo, se ha decidido interconectar ambos mezanines mediante un puente, permitiendo un acceso directo y eliminando la necesidad de construir escaleras adicionales. Esta solución no solo optimiza el aprovechamiento del espacio al garantizar una mayor fluidez en los desplazamientos, sino que también libera áreas valiosas que pueden destinarse a actividades operativas o funciones clave dentro de la planta.

Para la selección del material tenemos en cuenta materiales que se puedan fabricar o conseguir en Colombia.

| Propiedad | Acero ASTM A36 | Acero ASTM 572 | Acero ASTM A588 | Acero ASTM A500 |
|---|---|---|---|---|
| **Resistencia mínima a la tracción** | 400-550 MPa | 450-620 MPa | 450-620 MPa | 400-550 MPa |
| **Límite elástico** | 250 MPa | 290-450 MPa | 290-450 MPa | 250-345 MPa |
| **Ductilidad (elongación)** | 20-23% | 18-21% | 16-19% | 20-23% |
| **Soldabilidad** | Buena | Buena | Excelente (alta resistencia a la corrosión) | Buena (generalmente buena para soldadura) |
| **Resistencia a la corrosión** | Moderada | Moderada | Excelente (resistente a la corrosión atmosférica) | Moderada (requiere protección adicional) |
| **Aplicaciones típicas** | Construcción general, estructuras, puentes, equipos de fabricación | Puentes, edificios de gran altura, estructuras industriales | Puentes expuestos, estructuras exteriores, construcciones expuestas a la intemperie | Estructuras metálicas, edificios, puentes, perfiles tubulares en construcción |

Tabla 1. Selección de materiales

Para el diseño del mezanine en la planta de Estructuras de SISPRO SA, el uso de vigas IPE fabricadas en acero A572 en sus columnas resulta ser la opción óptima, dado que este material combina alta resistencia con una relación peso/resistencia superior. Esto permite soportar cargas de hasta 3 toneladas de manera segura y eficiente, minimizando el peso total de la estructura y reduciendo los costos asociados al transporte y la instalación.

La elección de acero A572 también contribuye a la durabilidad y la estabilidad de la estructura, características esenciales para garantizar la seguridad de los operarios y equipos de soldadura que ocuparán el mezanine. Además, su buena soldabilidad facilita los procesos de ensamblaje y adaptación, mejorando la eficiencia en la construcción y asegurando que los tiempos de ejecución sean más cortos.

En el mercado, se encuentra disponible una tubería estructural fabricada bajo la norma NTC 4526 (equivalente a ASTM A500/A500M), suministrada por el fabricante Ternium. Esta norma garantiza que la tubería cumple con los requisitos específicos de calidad, resistencia y desempeño mecánico necesarios para aplicaciones estructurales.

4.1.2 Cálculos:

Para la sección horizontal del mezanine, representada por barras cuadradas, se establece que estas deben ser capaces de soportar una carga estimada de 1 tonelada. Al aplicar un factor de seguridad de 1.5, el diseño estructural debe dimensionarse para resistir una carga máxima de 1.5 toneladas, asegurando así la seguridad y la integridad del sistema.

El análisis comienza calculando la fuerza generada por la carga de 1.5 toneladas. Esto implica convertir la masa en fuerza mediante la aceleración gravitacional estándar (9.81 m/s²), obteniendo la fuerza en Newtons. Este valor será fundamental para dimensionar correctamente los elementos estructurales del mezanine, garantizando su resistencia y fiabilidad frente a las cargas previstas

$$F = 1500\ kg * 9.8\frac{m}{s^2} = 14700\ N$$

Si distribuimos los 14,700 N de carga uniformemente a través de toda la estructura del mezanine, y considerando el diseño preliminar, identificamos que la carga se reparte entre 4 barras principales. Utilizando la siguiente fórmula, podemos calcular la carga que cada barra deberá soportar:

$$\boldsymbol{F_{barra} = \frac{F_{total}}{n}}$$

**Donde:**

- $F_{barra}$ $es\ la\ carga\ que\ soporta\ cada\ barra$
- $F_{total}$ $es\ la\ fuerza\ total$
- n es el número de barras

De este modo, podemos determinar la carga individual que cada barra deberá resistir, lo cual es fundamental para el dimensionamiento y verificación estructural.

$$F_{barra} = \frac{14700\ N}{4} = 3675\ N$$

Este tipo de estructuras está diseñado para trabajar bajo el principio de carga distribuida, lo que implica que el peso total se reparte uniformemente a lo largo de los elementos estructurales. El cálculo de la carga distribuida se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{W = \frac{F}{L}}$$

**Donde:**

- W es la carga en N/mm
- F fuerza aplicada en N
- L es la longitud total de la barra en mm

De la anterior ecuación se obtiene el siguiente resultado:

$$\mathrm{W} = \frac{3675\mathrm{N}}{5380\mathrm{mm}} = 0.68\frac{N}{mm}$$

Este cálculo es esencial para garantizar que cada elemento pueda soportar su parte proporcional de la carga total, manteniendo la integridad estructural y cumpliendo con los criterios de seguridad establecidos en el diseño. A partir de estos valores, se procederá a calcular la deformación de cada barra, asegurando que se mantenga dentro de los límites permisibles para garantizar un desempeño seguro y eficiente de la estructura.

$$\delta = \frac{W * L^4}{384 * E * I}$$

**Donde:**

- $\delta$ Es la deformación en mm
- W es la carga en N/mm
- L es la longitud en $mm^4$
- E es el módulo de elasticidad del material en $N/mm^2$
- I es la inercial en $mm^4$

Para resolver la ecuación de deflexión, es fundamental determinar el momento de inercia de las barras cuadradas. El momento de inercia cuantifica la resistencia de una sección a la flexión alrededor de un eje específico.

Para una sección cuadrada hueca, el momento de inercia respecto al eje que atraviesa su centro y es perpendicular a uno de sus lados se calcula con la siguiente fórmula:

$$\mathrm{I} = \frac{b_o^4 - b_i^4}{12}$$

Donde:

- I es el momento de inercia
- $b_o$ Es la longitud de lado externo de la sección cuadrada
- $b_i$ Es la longitud del lado interno de la sección cuadrada que se calcula de la siguiente manera

$$b_i = b_o - 2t$$

- t es el espesor de la barra cuadrada

Es la longitud del lado interno de la sección cuadrada que se calcula de la siguiente manera

Desarrollando la ecuación teniendo en cuenta que se van a trabajar con perfiles cuadrados de 90x90x4.5 mm obtenemos el siguiente resultado:

$$I = \frac{90\ mm^4 - 81\ mm^4}{12} = 1880273.25\ mm^4$$

Con el valor de la inercia obtenido, se procede a resolver la ecuación:

$$\frac{\frac{0.68N}{mm} * (5380\ mm)^4}{384 * 200000 \frac{N}{mm^2} * 1880273.25\ mm^4} = 3.95\ mm$$

Se obtiene un resultado de deflexión de 3.95 mm en las barras cuadradas presentes en el diseño.

Calculo del momento flector:

$$M_{max} = \frac{w * L^2}{12} = \frac{0.68\ \frac{N}{mm} * (5380mm)^2}{12} = 1640182\ N.mm$$

El momento flector máximo representa la fuerza de flexión más alta que la barra debe soportar. Este valor es fundamental para evaluar si la barra puede resistir las cargas aplicadas sin experimentar fallos por flexión, garantizando así la seguridad y estabilidad de la estructura.

Esfuerzo máximo de por flexión:

Se calcula a partir del momento flector máximo y el modulo resistente:

$$\sigma_{Max} = \frac{M_{max}}{S}$$

Donde:

- $M_{max} =$ Momento máximo flector
- S = Modulo resistente

$$S = \frac{I}{C}$$

- I = Inercia de la barra
- C = Distancia del eje neutro al borde externo

$$S = \frac{1880273.25mm^4}{45\ mm} = 41783.85mm^3$$

Con el valor obtenido de la S, resolvemos la ecuación de esfuerzo máximo por flexión

$$\sigma_{Max} = \frac{1640182\ N.mm}{41783.85mm^3} = \frac{39.25\ N}{mm^2}$$

El esfuerzo máximo representa el nivel de estrés por flexión que experimenta la barra en su sección más crítica. Comparar este valor con el esfuerzo admisible es fundamental para verificar si la barra puede soportar las cargas aplicadas sin superar su límite elástico, garantizando así la seguridad y funcionalidad de la estructura.

Esfuerzo admisible:

$$\sigma_{admisible} = \frac{F_y}{FS}$$

Donde:

- $F_y = Limite\ elastico\ del\ acero$ A500
- FS = Factor de seguridad, en este caso 1.5

**Determinación del factor de seguridad (FS):**

El factor de seguridad (FS) es un parámetro fundamental en el diseño estructural, ya que permite garantizar la resistencia y estabilidad de una estructura bajo diversas condiciones de carga. Para el mezanine en cuestión, se ha determinado un FS de 1.5, conforme a los criterios establecidos en la NSR-10 (Norma Sismo Resistente de Colombia) y la AISC 360 (Especificación para el Diseño de Estructuras de Acero).

Este valor se adopta debido a que la estructura estará sometida principalmente a cargas estáticas y bien definidas, como equipos de soldadura y operarios, sin presencia significativa de cargas dinámicas o impactos severos. Según la AISC 360, un FS de 1.5 es adecuado para estructuras metálicas que no estén expuestas a variaciones bruscas de carga, proporcionando un margen de seguridad suficiente sin sobredimensionar innecesariamente los elementos estructurales. Además, el uso de acero A572 en los perfiles estructurales garantiza una resistencia óptima dentro de los márgenes establecidos por la norma. En caso de que existan cargas dinámicas, impactos frecuentes o un aumento en la demanda estructural, podría considerarse un FS mayor. No obstante, para las condiciones actuales, un FS de 1.5 ofrece un equilibrio óptimo entre seguridad y eficiencia estructural.

Sin embargo, es importante destacar que los momentos flectores máximos calculados están muy por debajo del esfuerzo admisible del material. Esto indica que el factor de seguridad real es superior a 1.5, lo que proporciona un margen adicional de seguridad. Como resultado, la estructura no solo garantiza la ejecución segura de las operaciones previstas, sino que también tiene la capacidad de soportar cargas adicionales dentro de los límites estructurales, sin comprometer su estabilidad ni resistencia.

Retomando el cálculo del esfuerzo admisible tenemos como resultado:

$$\sigma_{admisible} = \frac{317 \frac{N}{mm^2}}{1.5} = 211 \frac{N}{mm^2}$$

Para las vigas IPE 140 podemos usar el mismo caso de que las vigas están empotradas en sus extremos, esta consideración es válida dado que se encuentran soldadas a una placa.

En el caso de las vigas IPE vamos a realizar los cálculos como si este tuviera que soportar 2 toneladas, como el sistema va a estar bajo carga continua, se usara el mismo proceso que se usó con las barras cuadradas

Calculo de la fuerza:

$$F = 2000\ kg * 9.8\frac{m}{s^2} = 18000\ N$$

$$F_{Viga} = \frac{18000\ N}{4} = 4500\ N$$

Calculo de la carga en N/mm

$$C_{Viga} = \frac{4500\ N}{5120\ mm} = 0.88\frac{N}{mm}$$

Calculo de la deflexión:

$$\delta = \frac{W * L^4}{384 * E * I}$$

En este caso no es necesario calcular la inercia, debido a que es un perfil comercial podemos encontrar este valor en una tabla obtenida del catálogo del proveedor

$$\frac{0.88\frac{N}{mm} * (5120mm)^4}{384 * 200000\frac{N}{mm^2} * 5410000\ mm^4} = 1.45\ mm$$

Calculo del momento máximo:

$$M_{max} = \frac{0.88\frac{n}{mm} * (5120\ mm)^2}{12} = 1922389\ N.mm$$

Esfuerzo máximo de por flexión:

Se calcula a partir del momento flector máximo y el modulo resistente:

$$\sigma_{Max} = \frac{M_{max}}{S} = \frac{1922389\ N.mm}{77300mm^3} = 24.86\frac{N}{mm^2}$$

El modulo resistente (S) se sacó del proveedor Panelco,

Esfuerzo admisible:

$$\sigma_{admisible} = \frac{F_y}{FS} = \frac{345\,\frac{N}{mm^2}}{1.5} = 230\,\frac{N}{mm^2}$$

Procedemos a hacer el cálculo de la viga que se encuentra empotrada en un extremo y voladizo en el otro, para este caso puntual podemos encontrar que vamos a tener un cambio en la ecuación de deformación debido a las condiciones en que se encuéntrala viga.

$$\delta = \frac{W * L^4}{8 * E * I}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene una deformación de:

$$\delta = \frac{0.88\,\frac{N}{mm} * 5050^4}{8 * 200000\,\frac{N}{mm} * 5410000\ mm^4} = 66.11\ mm$$

Calculo de momento máximo:

Por las condiciones de la viga encontramos otro cambio en la ecuación con la que vamos a calcular las condiciones teóricas de esta, teniendo en cuenta la siguiente ecuación de momento flector:

$$M_{max} = \frac{W * L^2}{2}$$

Resolviendo la ecuación tenemos como resultado:

$$M_{Max} = \frac{0.88\,\frac{N}{mm} * 5050mm^2}{2} = 11221100\ N.mm$$

Esfuerzo máximo por flexión:

$$\sigma_{Max} = \frac{M_{max}}{S} = \frac{11221100\ N.mm}{77300mm^3} = 145.16\,\frac{N}{mm^2}$$

El esfuerzo admisible es el mismo obtenido en la anterior viga.

Calculo de la soldadura:

El cálculo de una soldadura de filete es fundamental para garantizar la resistencia y seguridad de las estructuras metálicas. Este cálculo se basa en la capacidad de carga de la soldadura y en la resistencia del material base y del metal de aporte, siguiendo los lineamientos de la norma AWS D1.1.

Para realizar un cálculo preciso de la soldadura en la estructura, es fundamental considerar la carga distribuida actuante sobre las vigas, el momento flector generado y la longitud efectiva del cordón de soldadura. En este caso, se cuenta con una placa base de 160 mm × 100 mm × 9.5 mm de espesor, la cual desempeña un papel clave en la transferencia de cargas y la estabilidad del sistema.

Calculo de fuerza por viga:

$$F_{viga} = \frac{14700N}{4} = \ 3675\ N$$

El cálculo de la fuerza ejercida en cada viga es esencial debido a que la resistencia de la soldadura debe ser mayor a la carga aplicada:

$$R_{sold} \geq F_{viga}$$

$$R_{sold} = 06.\, F_w\, .\, L\, .\, \alpha$$

Donde:

$R_{sold} = Resistencia\ de\ la\ soldadura$

$F_w = Resistencia\ ultima\ del\ material\ de\ aporte$

$L = Longitud\ efectiva\ de\ la\ soldadura$

$\alpha = Garganta\ efectiva$

La garganta efectiva se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = 0.707\ .\ Z$$

Donde Z es el tamaño mínimo del filete

Según la norma AWS D1.1 el tamaño mínimo del filete, depende del espesor de la pieza más delgada a la unión:

- Si el espesor del material base es menor o igual a 6 mm, el tamaño del filete debe ser 1/8 del espesor del metal base

- Si el espesor del material es superior a 6 mm, el tamaño del filete debe ser al menos 3/16 del espesor de la pieza más delgada

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la viga IPE 140 usada en el diseño, tiene de espesor en su ala 6.9 mm y la placa base tiene 9.5 mm, en este caso se usará el espesor del ala para determinar el tamaño mínimo del filete [10]

$$Z_{min} = \frac{3}{16} \,.\, 6.9mm = 1.29\ mm$$

Con el resultado obtenido se podría definir el valor del tamaño del filete, sin embargo, la norma NSR-10, norma vigente para Colombia, establece que el tamaño mínimo para el filete debe ser 5mm según la siguiente tabla

| Tamaño mínimo de soldaduras de filete | |
|---|---|
| Espesor de la parte más delgada a unir, mm | Tamaño mínimo de la soldadura de filete, mm |
| Hasta 6.4 inclusive | 3 |
| Mayor que 6.4 a 12.7mm | 5 |
| Mayor que 12.7 | 6 |
| Mayor que 19.1 | 8 |

Tabla 2. Tamaño mínimo de filete

Calculo de la garganta:

$$\alpha = 0.707\ .\ 5 = 3.53\ mm$$

Calculo de la longitud efectiva:

$$L = 2\ (160 + 73) = 466mm$$

Calculo de la soldadura:

Como se va a soldar con un electrodo 7018, el $F_w$ es igual a 490 MPA

$$R_{sold} = 06.\, F_w\ .\, L\ .\, \alpha$$

$$R_{sold} = 0.6\ .\, 490\, \frac{N}{mm^2}\ .\, 466\ mm.\, 3.53\ mm = 483624\ N\ \approx 483.62\ kN$$

Según la resistencia calculada se puede determinar que:

$$R_{sold} \geq F_{viga}$$

## 5. Análisis de resultados

Para el análisis de resultados, vamos a tener en cuenta los resultados obtenidos por medio del software inventor y los obtenidos teóricamente, en las siguientes figuras vamos a observar los resultados obtenidos en software:

| Resultados | |
|---|---|
| Longitud | 5380.000 mm |
| $Fx_{max}$ | -105.708 N |
| $Fy_{max}$ | 892.839 N |
| $Fz_{max}$ | 102.590 N |
| $Mx_{max}$ | 629766.169 N mm |
| $My_{max}$ | 64925.076 N mm |
| $Mz_{max}$ | 203965.642 N mm |
| $Smax_{max}$ | 16.075 MPa |
| $Smin_{min}$ | -16.171 MPa |
| $Smax(Mx)_{max}$ | 15.933 MPa |
| $Smax(My)_{max}$ | 1.643 MPa |
| $Smin(Mx)_{min}$ | -15.933 MPa |
| $Smin(My)_{min}$ | -1.643 MPa |
| $Saxial_{max}$ | -0.069 MPa |
| $Tx_{max}$ | 0.155 MPa |
| $Ty_{max}$ | -1.313 MPa |

| Resultados | |
|---|---|
| Longitud | 5427.000 mm |
| $Fx_{max}$ | -83.356 N |
| $Fy_{max}$ | 3366.153 N |
| $Fz_{max}$ | -3831.085 N |
| $Mx_{max}$ | -2417988.395 N mm |
| $My_{max}$ | 52259.588 N mm |
| $Mz_{max}$ | 2966.832 N mm |
| $Smax_{max}$ | 34.535 MPa |
| $Smin_{min}$ | -34.223 MPa |
| $Smax(Mx)_{max}$ | 31.273 MPa |
| $Smax(My)_{max}$ | 4.247 MPa |
| $Smin(Mx)_{min}$ | -31.273 MPa |
| $Smin(My)_{min}$ | -4.247 MPa |
| $Saxial_{max}$ | 2.332 MPa |
| $Tx_{max}$ | 0.116 MPa |
| $Ty_{max}$ | -5.845 MPa |

| Resultados | |
|---|---|
| Longitud | 5050.000 mm |
| $Fx_{max}$ | 149.261 N |
| $Fy_{max}$ | -2600.370 N |
| $Fz_{max}$ | -5416.645 N |
| $Mx_{max}$ | 1600288.646 N mm |
| $My_{max}$ | -87497.317 N mm |
| $Mz_{max}$ | -10717.589 N mm |
| $Smax_{max}$ | 27.139 MPa |
| $Smin_{min}$ | -21.844 MPa |
| $Smax(Mx)_{max}$ | 20.698 MPa |
| $Smax(My)_{max}$ | 7.110 MPa |
| $Smin(Mx)_{min}$ | -20.698 MPa |
| $Smin(My)_{min}$ | -7.110 MPa |
| $Saxial_{max}$ | 3.298 MPa |
| $Tx_{max}$ | -0.207 MPa |
| $Ty_{max}$ | 4.516 MPa |

Figura 5. Perfil cuadrado, viga tipo 1 y viga tipo 2

El presente análisis tiene como objetivo comparar los valores teóricos obtenidos mediante cálculos analíticos con los resultados generados por el software Autodesk Inventor en el diseño estructural de un mezanine para la planta de Estructuras de SISPRO SA. Este mezanine se plantea como una solución para optimizar el espacio disponible, permitiendo una mejor distribución de los equipos de soldadura y operarios, reduciendo la contaminación visual generada por los cubículos de soldadura.

En este estudio, se analizarán los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad obtenidos tanto teóricamente como por simulación, identificando discrepancias y estableciendo criterios de validación para el diseño final del mezanine.

Es importante tener en cuenta que, tanto en los cálculos teóricos como en los resultados obtenidos mediante el software Inventor, el factor de seguridad se mantiene constante. Esta metodología se aplica con el objetivo de garantizar la coherencia en los análisis, permitiendo corroborar la precisión de los valores obtenidos y asegurando que la comparación entre ambos enfoques sea

fiable y representativa. De esta manera, se puede evaluar con mayor certeza el comportamiento estructural del diseño y detectar posibles discrepancias que requieran ajustes o mejoras.

| Estructura | Método | Deformación (mm) | Momento flector (N.mm) | Esfuerzo máximo $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$ |
|---|---|---|---|---|
| Perfil cuadrado | Teórico | 3.95 | 1640182 | 39.25 |
| Perfil cuadrado | Inventor | 12.47 | 629766 | 16.075 |
| Viga Ipe tipo 1 | Teórico | 1.45 | 1922389 | 24.86 |
| Viga Ipe tipo 1 | Inventor | 3.88 | 2417988 | 34.53 |
| Viga Ipe tipo 2 | Teórico | 66.11 | 11221100 | 146.16 |
| Viga Ipe tipo 2 | Inventor | 9 | 16000288 | 27.139 |

Tabla 3. Resultados obtenidos por método teórico y software

| | % error de deformación | % error en momento flector | % error Esfuerzo máximo |
|---|---|---|---|
| Perfil cuadrado | 68.32 % | 160% | 144% |
| Viga Ipe tipo 1 | 62.6% | 20.5% | 28% |
| Viga Ipe tipo 2 | 634.5% | 601.19% | 438% |

Tabla 4. Porcentajes de error obtenidos

### *5.1 Comparación de Resultados Teóricos vs. Simulación en Inventor*

En la tabla presentada, se comparan los valores de deformación, momento flector y esfuerzo máximo obtenidos mediante cálculos teóricos y a través de la simulación en Inventor para diferentes elementos estructurales. Se observa una variación significativa entre ambos métodos, lo que se debe a múltiples factores inherentes a la forma en que se realiza cada análisis.

***Diferencias en el Cálculo Teórico y la Simulación en Inventor***

**Cálculo Teórico**

Los cálculos teóricos se basan en modelos matemáticos simplificados, donde se aplican ecuaciones de resistencia de materiales y mecánica de sólidos. Estos métodos generalmente asumen condiciones ideales como:

- Materiales homogéneos e isótropos (propiedades iguales en todas direcciones).
- Apoyos y cargas perfectamente distribuidos sin efectos adicionales.
- Despreciar el peso propio del elemento si no se especifica en la ecuación.
- Considerar secciones ideales sin imperfecciones ni discontinuidades.

Si bien estos cálculos proporcionan un buen punto de partida, no contemplan todas las variables que afectan el comportamiento real de una estructura.

**Simulación en Inventor**

Por otro lado, la simulación en Inventor utiliza el método de elementos finitos (FEM), que descompone la estructura en pequeñas partes interconectadas para analizar el comportamiento real del material y la geometría bajo carga. Esto permite considerar una mayor cantidad de factores, como:

- Peso propio del elemento, que genera esfuerzos adicionales.
- Efectos de la gravedad, que influye en la deformación total.
- Condiciones de apoyo más realistas, que pueden generar restricciones parciales y efectos secundarios.
- Concentraciones de esfuerzo en ciertas zonas, que los cálculos manuales no siempre detectan.
- Flexión no lineal y efectos de pandeo, que aparecen en estructuras esbeltas o con grandes cargas.
- Diferencias en la distribución de cargas reales frente a las idealizadas en cálculos manuales.

Estas consideraciones hacen que los resultados de Inventor sean más cercanos al comportamiento real de la estructura, pero también generan discrepancias con los cálculos teóricos.

## *Comparación de Resultados y Explicación de las Diferencias*

### Deformación

Se observa que los valores de deformación obtenidos en Inventor son significativamente mayores en comparación con los valores teóricos. Los errores relativos van desde 68.32% en el perfil cuadrado hasta 634.5% en la viga IPE tipo 2. Esto se debe a:

- La simulación sí considera el peso propio del elemento, lo que contribuye a una mayor deflexión.
- En los cálculos teóricos, muchas veces se desprecia el peso propio, lo que subestima la deformación real.
- Inventor modela los efectos de cargas distribuidas más fielmente, mientras que el cálculo manual puede asumir cargas concentradas o distribuciones ideales.

Momento Flector

Los valores de momento flector también presentan variaciones significativas, especialmente en el perfil cuadrado, donde el error alcanza el 160%. Sin embargo, en la viga IPE tipo 1, la diferencia es menor, con un error del 20.5%. Esta variación se explica por:

- Condiciones de carga más realistas en Inventor, que generan momentos flectores diferentes a los obtenidos en ecuaciones simplificadas.
- En la simulación, las cargas se redistribuyen debido a la deformación, lo que cambia el diagrama de momentos respecto al cálculo teórico.
- Diferencias en los apoyos y restricciones: en la práctica, los apoyos no son completamente rígidos, lo que puede alterar la distribución de momentos.

### Esfuerzo Máximo

El esfuerzo máximo presenta diferencias importantes, con errores que van desde 144% en el perfil cuadrado hasta 438% en la viga IPE tipo 2. Las razones de esta variabilidad incluyen:

- En Inventor, se detectan concentraciones de esfuerzo en puntos críticos que los cálculos teóricos no consideran.

- La simulación analiza el comportamiento local de la sección, mientras que el cálculo teórico entrega valores globales promedio.
- La presencia de efectos como torsión y flexión secundaria que se generan en la simulación, pero no siempre en el cálculo manual.

La deformación obtenida tanto por el método teórico como mediante simulación en software puede considerarse válida siempre que se encuentre dentro de los límites establecidos por las normativas vigentes. En este caso, se tomará como referencia la norma NSR-10, la cual define los criterios de deformación admisible para garantizar la seguridad y el desempeño estructural adecuado de la construcción.

| Tipo de carga | NSR-10/AISC360-16 | Eurocodigo 3 |
|---|---|---|
| Vigas de entrepiso (uso general, carga de gravedad) | L/240 | L/250 |
| Vigas con acabados frágiles (Yeso, mampostería, etc) | L/360 | L/300 |
| Vigas con sobrecarga transitoria (mezanines, pasarelas, etc) | L/240 | L/250 |
| Vigas principales en estructuras industriales | L/200 | L/200 |
| Vigas sometidas solo a cargas permanente | L/180 | L/200 |
| Vigas de techos sin cielo raso | L/180 | L/200 |
| Vigas soportando maquinaria o equipos sensibles a vibraciones | L/500 | L/500 |

Tabla 5. Validación de la deformación máxima permitida

Basándonos en las deformaciones obtenidas en la tabla 3 y comparándolas con los valores límite establecidos en la normativa NSR-10, podemos determinar que el mezanine propuesto y diseñado cumple con la deformación máxima permitida. Esto indica que la estructura mantiene un comportamiento dentro de los rangos de seguridad establecidos, garantizando su estabilidad y funcionalidad bajo las cargas previstas.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

La implementación del mezanine en la planta de estructuras de SISPRO S.A. es una solución esencial para optimizar el espacio disponible, mejorar la distribución de equipos y operarios, y garantizar un flujo de trabajo más eficiente. Al elevar ciertas áreas de trabajo, se reduce la congestión en el nivel principal, permitiendo una mejor organización y facilitando el acceso de los materiales y herramientas necesarias. Además, el mezanine contribuye a mejorar la seguridad de los operarios al minimizar la interferencia entre diferentes procesos productivos y reducir la contaminación visual generada por los cubículos de soldadura.

Por otro lado, la realización de cálculos teóricos y el uso de software especializado son fundamentales para garantizar la seguridad y eficiencia estructural del mezanine. Los cálculos manuales permiten verificar los principios básicos de diseño y dimensionamiento, asegurando que la estructura cumpla con los requisitos normativos y de carga. Mientras tanto, el análisis por software facilita la simulación de condiciones reales, optimizando el diseño y permitiendo prever posibles fallos estructurales. La combinación de ambos métodos proporciona un diseño confiable, seguro y eficiente, asegurando la viabilidad del mezanine en el entorno industrial de la planta.

Tras comparar los resultados obtenidos mediante cálculo teórico, basado en ecuaciones de libros de resistencia de materiales, y la simulación en Autodesk Inventor, se observa que ambos métodos aportan información valiosa para el diseño del mezanine. Sin embargo, dado que la simulación computacional permite un análisis más detallado y realista, considerando concentraciones de esfuerzos, efectos de conexiones y condiciones de carga más cercanas a la realidad, se recomienda basar la construcción de la estructura en los resultados obtenidos mediante Autodesk Inventor.

Si bien las ecuaciones teóricas proporcionan un marco de referencia sólido y validado por normativas como la NSR-10 y la AISC 360, estas suelen basarse en suposiciones simplificadas que pueden no captar completamente el comportamiento real de la estructura. La simulación computacional, en cambio, permite evaluar con mayor precisión el desempeño de los elementos

estructurales bajo las cargas previstas, reduciendo la incertidumbre y garantizando un diseño más seguro y optimizado. Por ello, el método recomendado para la construcción del mezanine es el basado en los resultados de la simulación en Autodesk Inventor, asegurando un equilibrio entre seguridad, eficiencia y cumplimiento normativo.

**Referencias**


American Institute of Steel Construction. (2016). Especificación para construcciones de acero AISC360-16. Scribd. https://es.scribd.com/document/365675604/especificacion-para-construcciones-de-acero-aisc-360-16

American Welding Society (AWS). (2015). AWS D1.1/D1.1M:2015 - Código de soldadura estructural - Acero. Scribd. https://es.scribd.com/document/363902426/AWS-D1-1-2015-ESPANOL-pdf

BuildSoft. (s.f.). Conceptos básicos de diseño y análisis estructural. BuildSoft. https://www.buildsoft.eu/es/blog/conceptos-basicos-de-diseno-y-analisis-estructural

Cervera, M. (s.f.). Mecánica de estructuras. Universitat Politècnica de Catalunya. https://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mec%C3%A1nica%20de%20Estructuras.pdf

Desarrollo ESC. (s.f.). ¿Qué es un mezanine? - Ingeniería estructural. Desarrollo ESC. https://desarrollosesc.com/que-es-un-mezanine

Ingenium. (s.f.). Estructuras metálicas: Lo que necesitas saber. Ingenium. https://ingenium.edu.pe/blog/construccion/que-son-las-estructuras-metalicas-lo-que-necesitas-saber/

Panelco. (2023). Ficha técnica vigas IPE, HEA, WF [PDF]. https://panelco.com.co/wp-content/uploads/2023/08/FICHA-TECNICA-VIGAS-IPE-HEA-WF.pdf

Pardo, M. (s.f.). Demostración de deflexión de viga doblemente empotrada y carga distribuida. Marcelo Pardo. https://marcelopardo.com/demostracion-de-deflexion-de-viga-doblemente-empotrada-y-carga-distribuida/

Ternium. (s.f.). Catálogo de tuberías y perfiles Ternium Colombia. Ternium. https://co.ternium.com/media/1bajaxyo/cata-logo-productos-tuberi-a-y-perfiles-ternium-colombia.pdf

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (1997). NSR-10. UNDRR. https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf