

**Optimización del Diseño de Conexiones Metálicas a Momento y a
Cortante en Vigas-Columna y Entre Vigas para Aplicaciones
Industriales**

**Optimization of the Design of Moment and Shear Metal Connections in
Beam-Column and Beam-to-Beam Joints for Industrial Applications**

AUTORES

Peñafiel López Pablo Moisés

Universidad Politécnica Salesiana

Ecuador– Cuenca

dpenafiell1@est.ups.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0007-8758-2371>

Mogrovejo Mogrovejo Gabriela

Universidad Politécnica Salesiana

Ecuador– Cuenca

bmogrovejo@est.ups.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-1164-5369>

Como citar:	Fecha de recepción:2023-01-10 Fecha de aceptación: 2023-02-25 Fecha de publicación: 2023-03-15
-------------	--

Resumen

Las conexiones metálicas en estructuras industriales desempeñan un papel fundamental en la transmisión de cargas y en la estabilidad global de los sistemas estructurales. En particular, las conexiones a momento y a cortante en uniones viga-columna y entre vigas están sujetas a esfuerzos significativos que afectan el comportamiento global de la estructura. Este estudio se enfoca en la optimización del diseño de este tipo de conexiones para mejorar su desempeño estructural, garantizar la seguridad, y optimizar el uso de materiales mediante métodos de análisis avanzado, como simulaciones numéricas, modelado en elementos finitos y técnicas de diseño basadas en criterios normativos. El análisis de las conexiones a momento considera la capacidad de la unión para resistir esfuerzos de flexión y la redistribución de cargas en sistemas hiperestáticos. Por otro lado, las conexiones a cortante se estudian en función de su resistencia y ductilidad para prevenir fallos frágiles. Se evalúan los efectos de distintos tipos de soldaduras, pernos de alta resistencia y placas de refuerzo en el desempeño estructural de las conexiones.

Para lograr la optimización del diseño, se emplean herramientas como software de análisis estructural, métodos de optimización topológica y técnicas de inteligencia artificial para predecir el comportamiento de las conexiones bajo diferentes condiciones de carga. Asimismo, se consideran las recomendaciones de normativas internacionales como el AISC (American Institute of Steel Construction) y el Euro código 3 para garantizar el cumplimiento de estándares de seguridad y eficiencia.

Los resultados esperados incluyen la identificación de configuraciones óptimas de diseño que reduzcan el consumo de material sin comprometer la resistencia estructural, el desarrollo de metodologías de optimización para futuras aplicaciones industriales y la validación de los modelos teóricos mediante ensayos experimentales.

Palabras clave: Conexiones metálicas, análisis estructural, optimización del diseño, resistencia a momento, resistencia a cortante

Abstract

Metal connections in industrial structures play a crucial role in load transmission and overall system stability. Specifically, moment and shear connections in beam-column and beam-to-beam joints are subjected to significant forces affecting the overall behavior of the structure. This study focuses on design optimization of these connections to enhance structural performance, ensure safety, and optimize material usage through advanced analysis methods such as numerical simulations, finite element modeling, and design techniques based on regulatory standards. The analysis of moment connections considers the joint's ability to withstand bending forces and load redistribution in hyperstatic systems. Conversely, shear connections are studied in terms of their resistance and ductility to prevent brittle failures. The influence of various factors, including weld types, high-strength bolts, and reinforcement plates, is evaluated to determine their impact on structural performance.

To achieve design optimization, tools such as structural analysis software, topological optimization methods, and artificial intelligence techniques are employed to predict the behavior of connections under different loading conditions. Additionally, international design codes such as AISC (American Institute of Steel Construction) and Eurocode 3 are considered to ensure compliance with safety and efficiency standards. The expected outcomes include the identification of optimal design configurations that reduce material consumption without compromising structural strength, the development of optimization methodologies for future industrial applications, and the validation of theoretical models through experimental testing.

This study contributes to the development of more efficient and sustainable metal structures in the industrial sector, providing innovative solutions for the construction of industrial buildings, bridges, and other structural systems subjected to dynamic and static loads.

Keywords: Metal connections, structural analysis, design optimization, moment resistance, shear resistance.

Introducción

Las estructuras metálicas desempeñan un papel esencial en la ingeniería civil e industrial debido a su alta resistencia, versatilidad y facilidad de montaje. En este contexto, las conexiones metálicas constituyen elementos críticos para la transmisión de cargas y la estabilidad global del sistema estructural. Dentro de estas conexiones, las uniones a momento y a cortante en sistemas viga-columna y viga-viga son de especial interés, ya que su comportamiento influye directamente en la respuesta estructural ante cargas estáticas y dinámicas. Un diseño inadecuado de estas conexiones puede comprometer la seguridad, aumentar el costo de los materiales y afectar la eficiencia estructural en edificaciones industriales.

Las conexiones a momento están diseñadas para transmitir esfuerzos de flexión entre los elementos conectados, proporcionando continuidad estructural y reduciendo deformaciones excesivas en el sistema. Estas uniones suelen encontrarse en naves industriales, estructuras de puentes, edificios de múltiples niveles y otros sistemas donde se requiere una rigidez adecuada. Por otro lado, las conexiones a cortante están orientadas a la transferencia eficiente de cargas transversales, asegurando la estabilidad de los elementos conectados y minimizando el riesgo de fallas por deslizamiento o fractura frágil(Cházaro, 2019).

La optimización del diseño de estas conexiones se ha convertido en un área clave de investigación en el ámbito de la ingeniería estructural, ya que busca mejorar el desempeño estructural sin incrementar el consumo de material ni los costos de construcción. Para ello, se emplean herramientas avanzadas como el modelado por elementos finitos, el análisis numérico y experimental, y técnicas de optimización topológica que permiten evaluar múltiples configuraciones de diseño y seleccionar la más eficiente. Además, la aplicación de normativas internacionales como el AISC 360-16 (American Institute of Steel Construction) y el Euro código 3 es fundamental para garantizar que las soluciones propuestas cumplan con los requisitos de seguridad y desempeño.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar estrategias para la optimización del diseño de conexiones metálicas en vigas-columna y entre vigas, con énfasis en la resistencia a momento y cortante. Se explorarán distintos tipos de uniones, materiales, configuraciones

geométricas y métodos de fabricación para determinar cuáles ofrecen un mejor desempeño estructural en aplicaciones industriales. Para ello, se analizarán diferentes enfoques, desde el diseño tradicional basado en normas hasta la implementación de modelos computacionales avanzados.

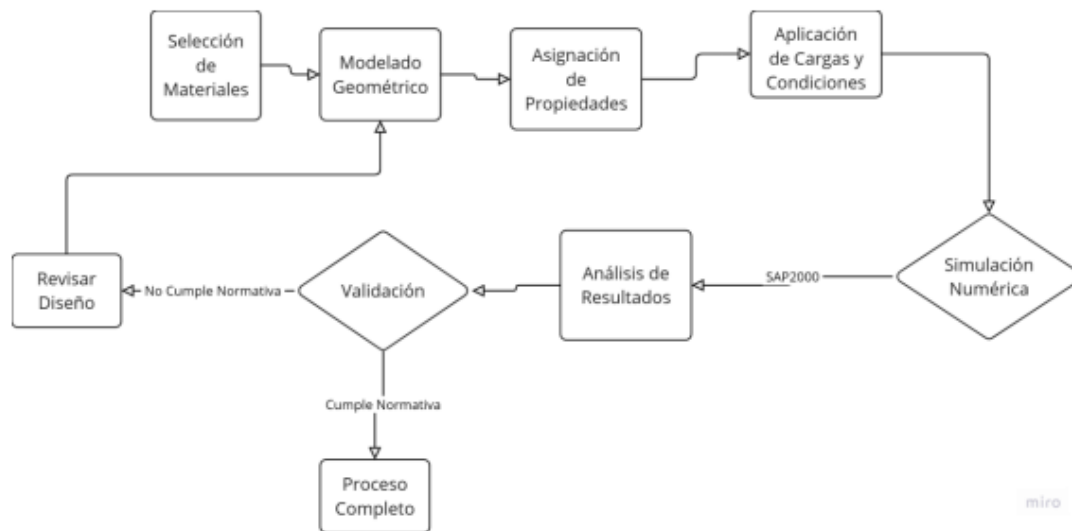
El resultado esperado es la identificación de soluciones óptimas que reduzcan el uso de material sin comprometer la seguridad y la estabilidad de las estructuras. Asimismo, se espera que este trabajo proporcione lineamientos para el desarrollo de futuras investigaciones en el campo del diseño estructural y la ingeniería de conexiones metálicas.(Moussa & Shazly, 2023) .

Material y métodos

Este análisis se realiza con el objetivo de evaluar el comportamiento de las conexiones metálicas a momento y a cortante en uniones viga-columna y viga-viga. La selección adecuada de los materiales y la aplicación de técnicas avanzadas de simulación estructural resultan fundamentales para obtener resultados precisos y validados. Estos resultados permiten optimizar el diseño de las conexiones metálicas, asegurando su eficiencia y seguridad en aplicaciones industriales. En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso metodológico, el cual describe las etapas necesarias para alcanzar los objetivos del estudio y garantizar un diseño estructural óptimo.

Figura 1.

Diagrama de flujo del proceso de la etapa de diseño



Nota: La imagen muestra un diagrama de flujo que describe el proceso de diseño y validación de conexiones metálicas mediante simulaciones estructurales. Se compone de bloques rectangulares y rombos, conectados con flechas direccionales que indican la secuencia lógica de pasos en la metodología.

Fuente: Autores, 2024

Material

Los materiales metálicos analizados en este proyecto de titulación incluyen principalmente aceros estructurales de alta resistencia, seleccionados en cumplimiento con las normativas vigentes. En particular, se considera el (A992M – 20, 2020) para estructuras de acero laminado y el (ASTM A325-04, 2024) para tornillos de alta resistencia. Estos materiales son ampliamente utilizados en la construcción de estructuras industriales debido a sus excelentes propiedades mecánicas, que les permiten resistir esfuerzos de tracción y cortante, garantizando así un desempeño estructural óptimo y seguro.

Aceros estructurales

Los aceros seleccionados para las vigas y columnas cumplen con las especificaciones de resistencia estructural requeridas para garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura. Para las vigas estructurales, se emplea el acero ASTM A992, reconocido por su alta resistencia y ductilidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones en estructuras sometidas a cargas dinámicas y sísmicas.

En cuanto a las conexiones atornilladas, se utilizan tornillos de alta resistencia conforme a la norma ASTM A325, los cuales garantizan una resistencia mínima a la tracción de 827 MPa (120 ksi), asegurando una sujeción confiable y eficiente en las uniones estructurales.

Soldadura.

Para las conexiones soldadas, se emplean soldaduras de penetración completa y soldaduras de filete, utilizando electrodos compatibles con los aceros seleccionados. Estas soldaduras cumplen con los requisitos de la American Welding Society (AWS), asegurando una resistencia a la tracción mínima equivalente a la del material base, lo que permite una transferencia eficiente de esfuerzos.

En la Tabla 1 e presenta una comparación detallada de los materiales utilizados en las conexiones atornilladas y soldadas, con base en la normativa (RCSC, 2020)

Tabla 1.
Comparación tipos de juntas

Material	Normativa	Resistencia a la tracción	Límite elástico
Acero estructural	ASTMA992	450 MPa (65 ksi)	345 MPa (50 ksi)
Tornillo de alta resistencia	ASTM A325	827MPa (120 ksi)	N/A
Soldadura	AWS D1.1	Resistencia de material base	N/A

Nota: La tabla presenta las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en conexiones metálicas estructurales, especificando su normativa, resistencia a la tracción y límite elástico. Se incluyen el acero estructural ASTM A992, con una resistencia a la tracción de 450 MPa y un límite elástico de 345 MPa; los tornillos de alta resistencia ASTM A325, con una resistencia a la tracción de 827 MPa; y la soldadura bajo la norma AWS D1.1, cuya resistencia equivale a la del material base.

Fuente: Autores, 2024

Herramientas de simulación:

Para la simulación y análisis estructural se utilizó el software SAP2000 e IDEA Statica para evaluar el desempeño de las conexiones bajo diversas condiciones de carga.

Métodos

Metodología de Investigación

Este estudio sigue un enfoque cuantitativo y explicativo, basado en la simulación numérica y complementado con estudios experimentales previos.

Tipos de investigación:

- **Cuantitativa:** Se centra en la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos de simulaciones estructurales.
- **Explicativa:** Identifica las causas y defectos que afectan el desempeño estructural de las conexiones sometidas a cargas de tracción y cortante.

Proceso de investigación:

- **Recolección de datos:** Se obtuvieron datos a partir de simulaciones realizadas en SAP2000, permitiendo analizar esfuerzos, deformaciones y fallas estructurales.
- **Modelado geométrico:** Se generaron modelos 3D de conexiones a momento y a cortante en configuraciones viga-columna y viga-viga.
- **Asignación de propiedades del material:** Se establecieron propiedades mecánicas del acero para las simulaciones.
- **Aplicación de cargas y condiciones de frontera:** Se aplicaron cargas de tracción, cortante y cíclicas para simular condiciones extremas.

Métodos de análisis de datos:

- **Distribución de tensiones:** Evaluación de las tensiones generadas en las conexiones bajo diferentes condiciones de carga.
- **Deformaciones y desplazamientos:** Análisis de la respuesta estructural ante cargas aplicadas.
- **Comparación de capacidad de carga:** Se compararon los valores obtenidos con los estándares normativos.

Este enfoque metodológico permite modelar, analizar y validar el desempeño de las conexiones metálicas en aplicaciones industriales, optimizando su diseño y seguridad.

Resultados

Análisis de los Resultados

Se presentan y analizan los estudios realizados y los resultados obtenidos a partir del análisis estructural y de conexiones efectuado mediante los programas SAP2000 e IDEA StatiCa, aplicando cargas gravitacionales, sísmicas y de cortante sobre la estructura objeto de estudio. El propósito principal es evaluar el comportamiento de las conexiones metálicas, tanto en las vigas como en las columnas, dentro de un entorno de modelación estructural detallado.

El análisis incluye la evaluación de las propiedades dinámicas de la estructura, las fuerzas cortantes estáticas y dinámicas, así como el diseño de las conexiones soldadas y atornilladas, considerando las fuerzas internas calculadas y la resistencia mecánica de los materiales seleccionados. Este enfoque permite verificar el desempeño estructural de las conexiones bajo distintos escenarios de carga, asegurando su eficiencia y cumplimiento con las normativas técnicas vigentes.(Gómez, 2020)

Ficha Técnica de la Estructura

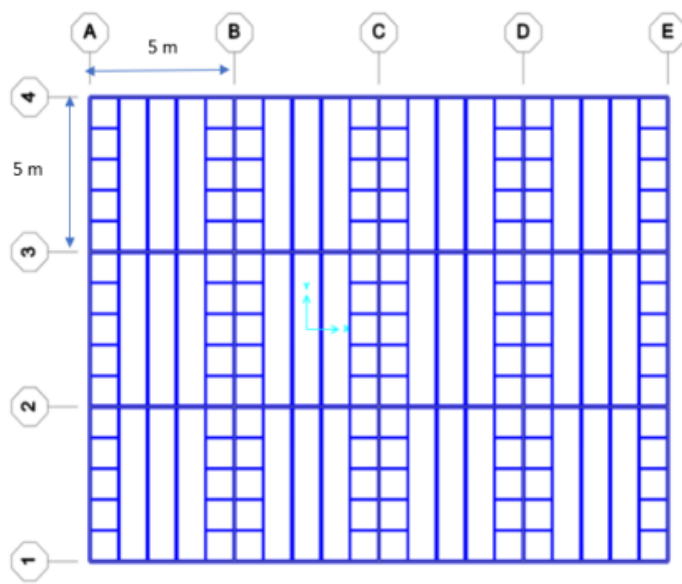
La estructura analizada corresponde a un edificio de 4 pisos, con alturas entre niveles definidas de la siguiente manera:

- Planta baja Nivel 0.00 m
- Piso 1: Nivel + 3.50 m
- Piso 2: Nivel + 6.50 m
- Piso 3: Nivel + 9.50 m
- Piso 4: Nivel +12.50 m

El diseño estructural contempla el uso de vigas tipo IPE y columnas tipo HEB, cumpliendo con las especificaciones de los materiales establecidas en las normas AISC 360-10 y NEC 15, tanto para los aceros estructurales como para el hormigón empleado en la construcción. Estos materiales han sido seleccionados para garantizar resistencia, estabilidad y seguridad estructural, acorde con los requerimientos del proyecto.

Figura 2.

Esquema de la base de la estructura



Nota: La imagen muestra un plano estructural en vista superior de una malla de vigas y columnas organizadas en una cuadrícula de 5 metros x 5 metros. Se identifican ejes etiquetados con letras (A, B, C, D, E) en sentido horizontal y con números (1, 2, 3, 4) en sentido vertical, lo que sugiere una distribución modular de la estructura.

Fuente: Autores, 2024

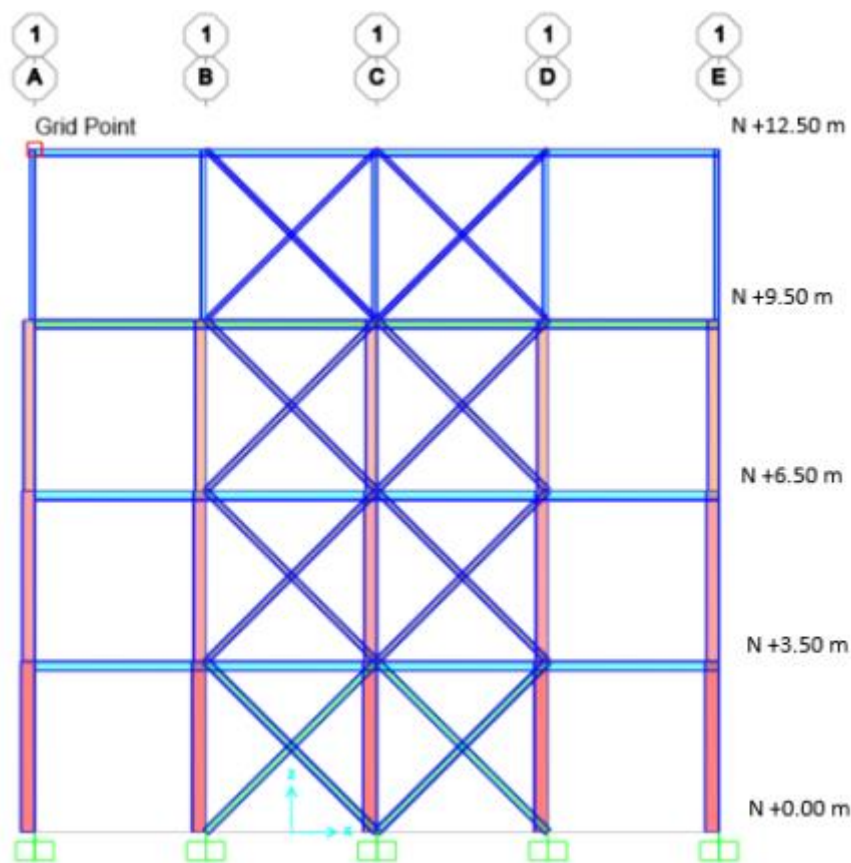
La selección de una base de 20×15 metros para la estructura se realizó considerando criterios tanto estructurales como funcionales. Estas dimensiones permiten una distribución eficiente de las cargas gravitacionales y sísmicas, optimizando la estabilidad global y asegurando una adecuada rigidez frente a deformaciones laterales.

Además, la elección de una base rectangular de 20×15 metros favorece el diseño modular de la estructura, lo que representa una ventaja en aplicaciones industriales, donde se requieren espacios amplios y abiertos que permitan una distribución eficiente de los componentes internos y un mejor aprovechamiento del espacio disponible.

Asimismo, estas dimensiones garantizan que los esfuerzos sean transmitidos de manera eficiente hacia el sistema de cimentación, mejorando la respuesta estructural ante cargas extremas, especialmente bajo condiciones sísmicas. El diseño cumple con los requerimientos normativos establecidos en NEC, asegurando la seguridad y funcionalidad de la estructura frente a diferentes escenarios de carga.

Figura 3.

Vista lateral de la estructura en el programa SAP 2000



Nota: La imagen muestra la vista lateral de una estructura de cuatro niveles, con un sistema de arriostramiento en cruz de San Andrés, utilizado para mejorar la estabilidad ante cargas laterales como sismos o viento. Los nodos estructurales están organizados en una cuadrícula, con referencias en los ejes A-E y niveles de altura desde 0.00 m hasta 12.50 m. Este modelo ha sido generado en software de análisis estructural, facilitando la evaluación de esfuerzos y deformaciones.

Fuente: Autores, 2024

Análisis de cargas

El análisis de cargas estructurales incluye tanto las cargas gravitacionales (muerta y viva) como las cargas sísmicas, conforme a los criterios establecidos en las normativas vigentes.

Calculo de cargas

Los valores asignados de carga muerta y carga viva para los diferentes niveles de la estructura fueron determinados en función del uso previsto de cada piso.

Las cargas muertas, que comprenden el peso propio de los elementos estructurales (vigas, columnas, losas y acabados), se fijaron en 2.3 kN/m² para todos los pisos. Este valor representa una estimación constante, basada en la masa específica de los materiales empleados, principalmente acero estructural y concreto.

Por otro lado, las cargas vivas, asociadas a usos variables según la ocupación del edificio, fueron definidas de acuerdo con la funcionalidad de cada nivel:

Primer piso: 10.0 kN/m², considerando un uso de tipo industrial con alta carga de operación.

Cuarto piso: 4.0 kN/m², reflejando una ocupación más liviana y menor demanda de carga.

Esta distribución diferenciada de cargas garantiza que cada nivel esté diseñado para soportar las condiciones operativas esperadas, asegurando tanto la seguridad estructural como la eficiencia del diseño. La incorporación de cargas sísmicas complementa este análisis, permitiendo una evaluación completa del comportamiento estructural bajo eventos extremos y asegurando el cumplimiento de los requisitos del Código Ecuatoriano de la Construcción (NEC).

Carga muerta.

Para la selección de estos valores se toma en cuenta la carga muerta de la construcción. y se toman los valores de la que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Carga muerta

Piso	Carga muerta (Kg/m^2)
1	2.3
2	2.3
3	2.3
4	2.3

Nota: La tabla muestra la distribución de la carga muerta en una estructura de cuatro pisos, expresada en kg/m². Se observa que el valor de carga muerta es constante en todos los niveles (2.3 kg/m²), lo que indica que los materiales y elementos estructurales considerados tienen un peso uniforme en cada planta. Este valor es fundamental para el análisis estructural, ya que influye en el diseño de la resistencia de la edificación ante cargas estáticas y dinámicas.

Fuente: Autores, 2024

Tomando en cuenta las cargas que se van a aplicar se procede a cargar los datos en el software SAP 2000 como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.
Aplicación de carga muerta en programa SAP 2000

Salidas	Global FX	Global FY	Global FZ	Global MY
Text	kN	kN	kN	kN-mm
Carga Muerta	-7,5E-06	-2,02E-7	1162.25	-2797849.46

Nota: La tabla presenta los valores de fuerzas y momentos globales resultantes del análisis de carga muerta en la estructura. Se observa que la carga muerta genera una fuerza predominante en la dirección Global FZ (1162.25 kN), lo que indica su efecto gravitacional sobre la estructura. Las fuerzas en Global FX y FY son cercanas a cero, lo que sugiere una distribución simétrica de la carga en los ejes horizontales. El momento global MY (-2,797,849.46 kN-mm) refleja el impacto de la carga muerta en la rotación estructural, siendo un parámetro clave en la evaluación de estabilidad y diseño de refuerzos.

Fuente: Peñafiel y Mogrovejo, 2024

Carga viva.

Las cargas vivas corresponden a las fuerzas temporales o dinámicas que actúan sobre una estructura debido a su ocupación y uso, variando en magnitud y ubicación a lo largo de su vida útil. De acuerdo con la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC), las cargas vivas mínimas para edificaciones se establecen en función del tipo de uso del espacio. Los valores típicos varían entre 200 kg/m² para áreas residenciales y 500 kg/m² o más en espacios industriales, donde se requieren mayores niveles de resistencia estructural.

La correcta consideración de estas cargas es esencial para garantizar la seguridad y funcionalidad de la estructura, evitando deformaciones excesivas o fallas bajo condiciones normales de operación. Además, este análisis permite optimizar el diseño estructural, asegurando su desempeño dentro de los límites de servicio y seguridad establecidos por la normativa (Valencia, 2014).

Se consideraron los valores mostrados en la Tabla 4 para cargas vivas:

Tabla 4.
Cargas vivas

Piso	Carga muerta (Kg/m^2)
1	1000
2	600
3	600
4	400

Nota: La tabla muestra la distribución de la carga muerta en cada nivel de la estructura, expresada en kg/m^2 . Se observa que el primer piso soporta la mayor carga (1000 kg/m^2), probablemente debido a la presencia de maquinaria pesada o áreas de almacenamiento. Los segundo y tercer pisos tienen una carga moderada de 600 kg/m^2 , mientras que el cuarto piso presenta la menor carga (400 kg/m^2), lo que sugiere una ocupación más ligera o la reducción de elementos estructurales pesados en los niveles superiores. Esta información es clave para el diseño estructural y la distribución de esfuerzos en la edificación.

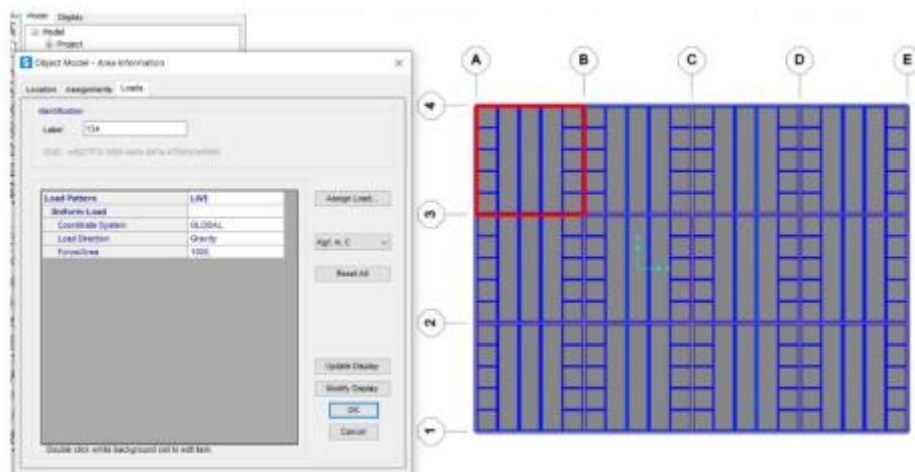
Fuente: Autores, 2024

Primer piso (1000 kg/m^2):

Se asigna un valor elevado de carga viva en el primer piso, considerando que este nivel suele estar destinado a actividades de mayor intensidad, tales como zonas de carga y descarga, almacenamiento de materiales pesados, instalación de maquinaria o altas concentraciones de personas en espacios comunes. Este valor elevado refleja la necesidad de que la estructura esté preparada para condiciones de uso intensivo y dinámico, propias de entornos industriales o comerciales. La adopción de esta carga viva permite garantizar la estabilidad estructural, evitando sobrecargas y asegurando el cumplimiento de los márgenes de seguridad establecidos por la normativa vigente.

Figura 4.

Aplicación de cargas vivas en SAP 2000



Nota: La imagen muestra una interfaz de software de análisis estructural, probablemente SAP2000, utilizada para la asignación de cargas en un modelo estructural. A la derecha, se observa una vista en planta de una malla de vigas y columnas, con una sección resaltada en rojo, indicando el área donde se está aplicando una carga distribuida. A la izquierda, la ventana de información del objeto detalla la configuración de la carga aplicada, especificando su dirección global (gravedad) y magnitud (100%). Este tipo de modelado permite evaluar la distribución de cargas en la estructura y verificar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

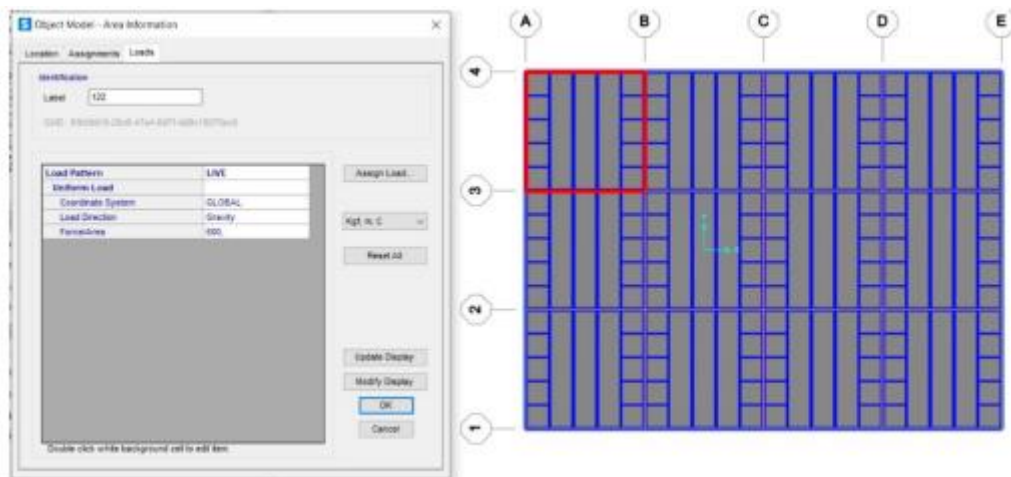
Fuente: Autores, 2024

Segundo y tercer piso (600 kg/m²):

En los niveles intermedios se considera una carga viva de 600 kg/m², correspondiente a áreas de uso moderado, donde las actividades no generan esfuerzos tan elevados como en el primer piso. Estos niveles están destinados a funciones como oficinas administrativas, espacios de trabajo o almacenamiento ligero, donde el tránsito de personas y la disposición de mobiliario o equipos es considerable, pero no excesivo. La selección de este valor garantiza que los pisos intermedios mantengan condiciones seguras y funcionales, permitiendo un uso eficiente del espacio sin comprometer la integridad estructural ni exceder los límites de carga establecidos por la normativa.

Figura 5.

Aplicación de cargas vivas en SAP 2000



Nota: La imagen muestra la interfaz de un software de análisis estructural, probablemente SAP2000, utilizado para la asignación de cargas vivas en una estructura. En el lado derecho, se observa la vista en planta de la estructura, compuesta por una malla de vigas y columnas, con una sección resaltada en rojo, lo que indica el área donde se está aplicando la carga.

Fuente: Autores, 2024

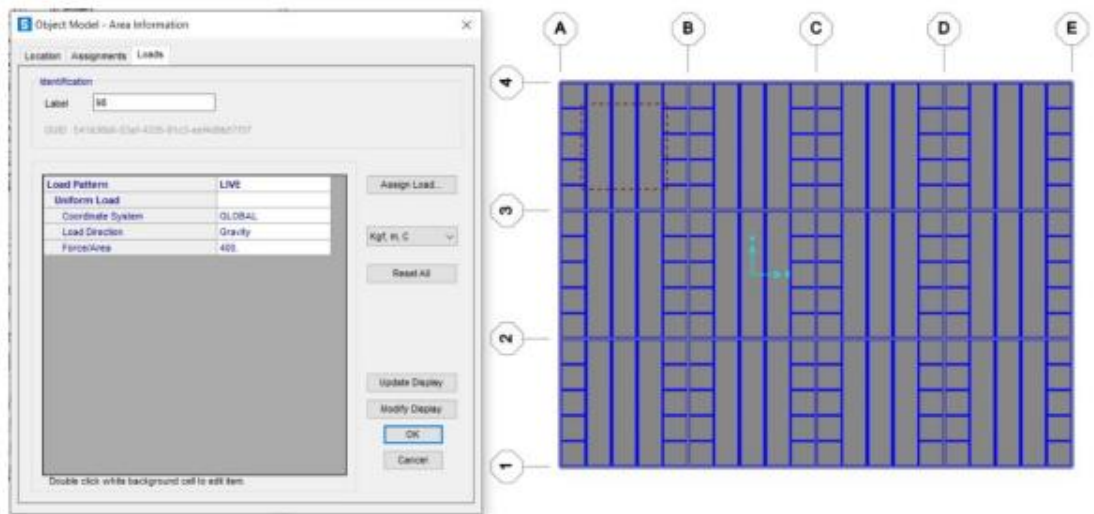
Cuarto piso (400 kg/m²):

En el último nivel se asigna una carga viva menor, ya que, por lo general, su uso es menos intensivo en comparación con los niveles inferiores. Este piso suele estar destinado a áreas técnicas o de servicios, tales como sistemas de aire acondicionado, equipos de telecomunicaciones o almacenamiento de equipos ligeros, los cuales generan una menor demanda de carga estructural.

La reducción de la carga viva en este nivel permite una distribución eficiente y segura de los esfuerzos a lo largo de toda la estructura, optimizando el diseño sin comprometer la seguridad. Como se muestra en la Figura 6, la aplicación de estas cargas en el software SAP2000 permite evaluar el comportamiento estructural bajo diferentes escenarios de carga, asegurando el cumplimiento de los estándares normativos y de estabilidad estructural.

Figura 6.

Aplicación de cargas vivas en SAP 2000



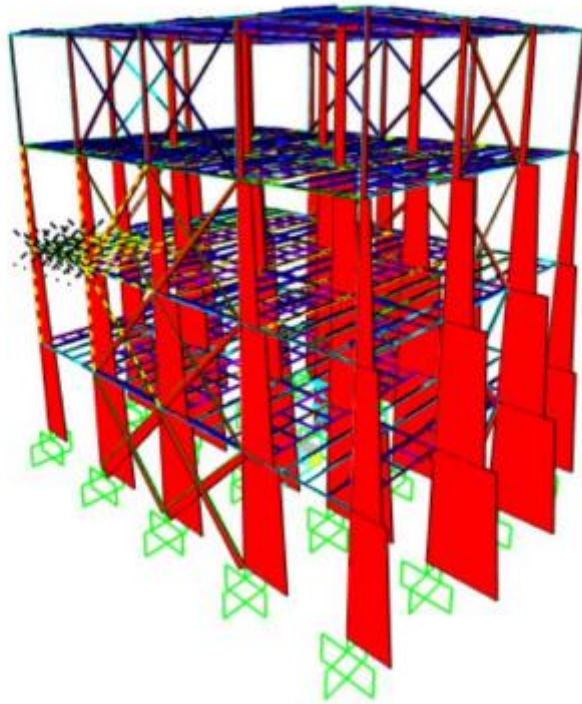
Nota: La imagen muestra la interfaz de un software de análisis estructural, posiblemente SAP2000, donde se está asignando una carga viva de 400 kg/m² en una sección específica de la estructura, resaltada en la vista en planta del lado derecho. La ventana de información en el lado izquierdo indica que la carga es de tipo LIVE (viva), aplicada en la dirección de la gravedad dentro de un sistema de coordenadas global. Este proceso es esencial para evaluar el comportamiento estructural bajo cargas variables y garantizar la estabilidad del diseño.

Fuente: Autores, 2024

En la figura a continuación, se identificar las cargas muertas aplicadas en la estructura para determinar la resistencia de esta y los puntos más críticos serán analizados para determinar una conexión ideal en el punto o conexión más crítica.

Figura 7.

Modelo estructural tridimensional SAP 2000



Nota: La imagen muestra un modelo estructural tridimensional generado en un software de análisis estructural, probablemente SAP2000 o similar. Se observan elementos estructurales como vigas, columnas y arriostramientos, con colores diferenciados para resaltar esfuerzos o condiciones de carga. Las superficies rojas representan elementos sometidos a cargas laterales o muros de cortante, mientras que los elementos en verde en la base sugieren apoyos o restricciones en la estructura.

Fuente: Autores, 2024

Carga sísmica

Para el análisis de esta carga, se aplican parámetros de la norma (NEC-SE-DS, 2020) . El sitio donde se encuentra la estructura corresponde a un suelo de tipo D, y, según el mapa de zona. Además, la estructura se clasifica como valores V. Los valores específicos utilizados en el análisis se detallan en la Tabla 5, lo que permite calcular el cortante y determinar el espectro de respuesta sísmica correspondiente .(Qureshi, 2022).

Tabla 5.

Datos cargas sísmicas

Datos sísmicos	Valor
Coeficiente de importancia	1
Factor Zona Sísmica (Z)	0,50
Tipo de Suelo	D
Coeficiente de Perfil de Zona (F_a)	1,18
Coeficiente de Perfil de Zona (F_d)	1,06
Coeficiente de Perfil de Zona (F_s)	1,23
Razón entre la aceleración espectral (η)	2,48
Periodo de vibración (T)	0,38
Periodo límite de vibración (T_o)	0,13
Periodo límite de vibración (T_c)	0,76
Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (S_a)	1,38
Coeficiente Sísmico (C)	1,38

Nota: La tabla presenta los parámetros sísmicos utilizados en el análisis estructural de acuerdo con la normativa vigente. Se incluyen valores como el coeficiente de importancia (1.0), el factor de zona sísmica ($Z = 0.50$) y el tipo de suelo (D), que influyen en la respuesta de la estructura ante sismos. Además, se especifican coeficientes de perfil de zona (F_a , F_d , F_s), que modifican la aceleración sísmica en función de las condiciones del suelo. También se reportan valores relacionados con el período de vibración estructural ($T = 0.38$ s) y el espectro de respuesta elástico ($S_a = 1.38$), determinantes para la evaluación del comportamiento dinámico de la edificación. Estos parámetros son esenciales para el diseño estructural y la seguridad sísmica de la construcción.

Fuente: Autores, 2024

Factor de zona sísmica (Z): Para los edificios de uso común, se utiliza el valor de Z, que representa la aceleración máxima esperada en roca para el sismo de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad. La ubicación de la estructura determinará a cuál de las seis zonas sísmicas de Ecuador pertenece, y esta se caracteriza por el valor del factor de zona Z correspondiente. El mapa de zonificación sísmica para diseño, que se encuentra en el anexo 1, se basa en los resultados del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (con un período de retorno de 475 años). Este estudio incluye una saturación de los valores de aceleración sísmica en roca a 0.50

g en el litoral ecuatoriano, lo cual define la zona V. Los valores del factor Z correspondientes a la zona sísmica que se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.
Valores del factor Z en zona sísmica

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta		Alta

Nota: La tabla muestra la clasificación de zonas sísmicas según el valor del factor Z, el cual indica la intensidad del peligro sísmico en diferentes regiones. Se establecen seis zonas, donde la Zona I tiene un factor Z de 0.15 y se caracteriza por un peligro sísmico intermedio, mientras que las zonas II a VI presentan valores de Z entre 0.25 y ≥ 0.50 , clasificadas con peligro sísmico alto. Esta información es clave en el diseño estructural, ya que influye en la determinación de cargas sísmicas y en la selección de estrategias de reforzamiento para garantizar la seguridad de las edificaciones.

Fuente: Autores, 2024

Para la selección de la zona de estudio, se tomó como referencia la región de la Sierra ecuatoriana, la cual, de acuerdo con el mapa de riesgo sísmico, se encuentra categorizada dentro de la zona sísmica de nivel 5. En esta región, el valor del factor sísmico Z es de 0.5, según la ecuación:

$$Z = \geq 0.5$$

Tipo de Suelo:

La clasificación del tipo de suelo se realiza considerando los 30 metros superiores del perfil geotécnico, de acuerdo con los tipos de perfiles A, B, C, D y E. En caso de que el perfil presente estratos diferenciados, estos deben ser subdivididos y asignados con un subíndice i, desde 1 en la superficie hasta n en la parte inferior de los 30 metros superiores del perfil.

Para el desarrollo del proyecto, se selecciona el tipo de suelo D, ya que, según el Anexo 3, es el más adecuado para la estructura analizada, proporcionando una combinación óptima de capacidad portante y comportamiento sísmico.

Coefficiente de Perfil de Zona (*Fa*):

En la e presentan los valores del coeficiente Fa , el cual amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de condiciones locales del sitio. Este coeficiente es fundamental para ajustar el análisis estructural y garantizar que la respuesta sísmica del diseño cumpla con los estándares normativos vigentes.

Tabla 7 e presentan los valores del coeficiente Fa , el cual amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de condiciones locales del sitio. Este coeficiente es fundamental para ajustar el análisis estructural y garantizar que la respuesta sísmica del diseño cumpla con los estándares normativos vigentes.

Tabla 7.
Tipos de suelo y factores de sitio Fa

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
A	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1	1	1	1	1	1
D	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
E	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
F	1.8	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2

Nota: La tabla presenta la relación entre el tipo de perfil del subsuelo y el factor sísmico Z en diferentes zonas sísmicas. Los perfiles de suelo están clasificados desde A (roca firme) hasta F (suelo blando y poco consolidado), con valores que afectan la amplificación sísmica. Se observa que los coeficientes aumentan a medida que el suelo es menos rígido, lo que indica una mayor amplificación de la aceleración sísmica en suelos blandos (F). Estos valores son fundamentales para el diseño sísmico de estructuras, ya que determinan la respuesta de la edificación ante eventos sísmicos y la necesidad de medidas de reforzamiento estructural.

Fuente: Autores, 2024

Donde se selecciona $Fa = 1.18$.

El coeficiente de perfil de zona Fd representa la amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para el diseño en roca, considerando

las condiciones geotécnicas del sitio. Este coeficiente es fundamental para ajustar los cálculos estructurales y evaluar el comportamiento de la edificación frente a eventos sísmicos, asegurando una respuesta adecuada de la estructura bajo condiciones de desplazamiento.

En la se presentan los valores del coeficiente F_d , los cuales se utilizan para amplificar las ordenadas del espectro de respuesta, permitiendo una correcta interpretación y aplicación en el diseño sísmico del proyecto.

Tabla 8 se presentan los valores del coeficiente F_d , los cuales se utilizan para amplificar las ordenadas del espectro de respuesta, permitiendo una correcta interpretación y aplicación en el diseño sísmico del proyecto.

Tabla 8.
Tipos de suelo y factores de sitio F_d

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
A	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1	1	1	1	1	1
D	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
E	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11

Nota: La tabla muestra la relación entre el tipo de perfil del subsuelo y el factor sísmico Z en diferentes zonas sísmicas. Los suelos están clasificados de A (roca firme) a E (suelo blando o poco consolidado), donde los coeficientes reflejan la amplificación de la aceleración sísmica. Se observa que los valores son mayores en suelos menos rígidos, lo que indica que las estructuras construidas sobre suelos blandos experimentan mayores efectos sísmicos. Estos datos son clave para el diseño estructural sismo-resistente, ya que permiten determinar la respuesta de las edificaciones ante eventos sísmicos y la necesidad de refuerzos en función del tipo de suelo.

Fuente: Autores, 2024

Coeficiente de Perfil de Zona (F_s):

En la se presentan los valores del coeficiente F_s , el cual tiene en cuenta el comportamiento no lineal del suelo, así como la degradación del período del sitio, que varía en función de la intensidad sísmica, el contenido de frecuencia de la excitación y los desplazamientos relativos del terreno.

Este coeficiente es esencial para ajustar los espectros de respuesta, tanto de aceleraciones como de desplazamientos, permitiendo una representación más precisa del comportamiento real del suelo bajo solicitaciones sísmicas severas, y contribuyendo a un diseño estructural más seguro y eficiente.

Tabla 9 se presentan los valores del coeficiente F_s , el cual tiene en cuenta el comportamiento no lineal del suelo, así como la degradación del período del sitio, que varía en función de la intensidad sísmica, el contenido de frecuencia de la excitación y los desplazamientos relativos del terreno.

Este coeficiente es esencial para ajustar los espectros de respuesta, tanto de aceleraciones como de desplazamientos, permitiendo una representación más precisa del comportamiento real del suelo bajo solicitaciones sísmicas severas, y contribuyendo a un diseño estructural más seguro y eficiente.

Tabla 9.
Tipos de suelo y factores del comportamiento elástico subsuelo F_s .

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
A	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
D	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
E	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
F	1.05	1.6	1.7	1.8	1.9	2

Nota: La tabla muestra la relación entre el tipo de perfil del subsuelo y el factor sísmico Z en distintas zonas sísmicas. Los suelos están clasificados de A (roca firme) a F (suelo muy blando o poco consolidado), donde los valores del coeficiente aumentan a medida que el suelo es menos rígido, reflejando una mayor amplificación sísmica. Se observa que el suelo tipo F, correspondiente a terrenos de baja compactación, presenta los valores más altos, alcanzando un coeficiente de 2.0 en la zona sísmica VI, lo que indica un mayor

riesgo sísmico. Esta información es fundamental para el diseño de estructuras sismo-resistentes, permitiendo determinar la necesidad de refuerzos estructurales en función del tipo de suelo y la zona sísmica en la que se ubica la construcción.

Fuente: Autores, 2024

Donde se selecciona $F_s = 1.23$

Discusión

El análisis del comportamiento de las conexiones metálicas a momento y a cortante en uniones viga-columna y entre vigas, aplicado a estructuras industriales, evidenció que las conexiones soldadas presentan una mayor capacidad de carga y proporcionan una mayor continuidad estructural. En contraste, las conexiones atornilladas destacan por su mejor ductilidad y capacidad de disipación de energía, características que las hacen más apropiadas para estructuras sometidas a cargas dinámicas o sísmicas (Zhang et al., 2019).

Se determinó que las cargas cíclicas pueden inducir una acumulación progresiva de daño en las uniones soldadas, lo que resalta la importancia de diseñarlas conforme a normativas específicas, como la AISC 341-16, especialmente en regiones con alta sismicidad (Guo et al., 2024). Asimismo, se observó que las conexiones viga-columna están sometidas a mayores demandas de carga, lo que sugiere la necesidad de incorporar refuerzos estructurales para mejorar su resistencia. Por otro lado, las conexiones entre vigas se encontraron más expuestas a esfuerzos de cortante, lo que requiere un diseño orientado a garantizar su estabilidad y resistencia al deslizamiento.

Finalmente, se concluye que la validación de los modelos computacionales mediante ensayos experimentales resulta fundamental para mejorar la precisión de los resultados y optimizar los diseños estructurales, asegurando un desempeño eficiente, seguro y conforme a norma de las conexiones metálicas en edificaciones de uso industrial (Tapia-Hernández et al., 2022).

Conclusiones

La estructura analizada cumple satisfactoriamente con los requisitos de participación modal, logrando captar el 90 % de la masa modal en los modos considerados en el software SAP2000. Este cumplimiento garantiza que el modelo estructural responde de manera adecuada frente a cargas dinámicas, optimizando su desempeño ante desplazamientos laterales y torsión bajo condiciones sísmicas, en conformidad con las normativas NEC y AISC.

En cuanto al comportamiento de las conexiones, la conexión empernada mostró una capacidad de resistir cargas axiales de hasta 450 kN y momentos flectores de 200 kN·m, según los cálculos de diseño estructural. Estas capacidades cumplen con los criterios de diseño requeridos, asegurando un comportamiento seguro y eficiente bajo las cargas propuestas.

Los resultados del análisis espectral validan que la estructura alcanza el 90 % de participación modal de masa y presenta una adecuada respuesta en los primeros modos de vibración, lo que confirma su rigidez estructural y capacidad de respuesta sísmica. Este desempeño es esencial para minimizar deformaciones y prevenir fallas en zonas de alta actividad sísmica.

La conexión soldada, por su parte, fue diseñada con soldadura de 10 mm en ambas caras del contorno de la viga IPE 330 unida a una columna HEB 400, utilizando material de aporte E70XX. Esta configuración permite una fusión efectiva entre el

material de aporte y el material base, proporcionando la resistencia necesaria frente a las cargas aplicadas.

Las placas de conexión tipo T presentan un espesor de 12 mm, una altura de 257 mm y una longitud de 160 mm. La separación entre pernos es de 140 mm en dirección vertical y 50 mm en sentido horizontal, lo que garantiza una distribución uniforme de cargas y evita concentraciones de esfuerzos, contribuyendo a una conexión más eficiente entre viga y columna.

Se utilizaron pernos grado A325 con un diámetro nominal de 19 mm. El número óptimo se determinó en cuatro pernos por placa, distribuidos en dos filas de dos pernos cada una. Cada perno tiene una resistencia a la tracción de 120 kN y una resistencia al corte de 60 kN, lo que asegura su desempeño bajo cargas aplicadas, con un margen de seguridad adecuado.

En la unión viga–viga, se analizó una fuerza cortante de -35.95 kN, obteniéndose un parámetro de diseño de 1.9, lo cual indica una capacidad adecuada para soportar las cargas establecidas.

Al evaluar el comportamiento de las conexiones frente a cargas combinadas de momento, tracción y cortante, se determinó un coeficiente de seguridad de 1.5 en las condiciones más críticas, lo que refleja un diseño robusto y confiable para distintos escenarios de carga.

La resistencia de las placas de conexión fue calculada para soportar momentos flectores de hasta 300 kN·m sin que se generen deformaciones plásticas significativas. Los análisis computacionales confirmaron deformaciones máximas de 2.5 mm en las placas, así como uniformidad en los desplazamientos y derivas en ambas direcciones, lo cual garantiza un comportamiento lateral controlado, aspecto esencial en estructuras expuestas a cargas dinámicas.

Finalmente, la elección de aceros estructurales como el ASTM A36, junto con el uso de soldaduras y pernos de alta resistencia, permitió desarrollar una estructura más liviana y eficiente, sin comprometer su capacidad resistente. Esto se traduce en un diseño óptimo tanto en términos de rendimiento estructural como de costo, cumpliendo con los objetivos.

Referencias bibliográficas

- A992M – 20. (2020). *Specification for Structural Steel Shapes*. ASTM International.
https://doi.org/10.1520/A0992_A0992M-20
- ASTM A325-04. (2024). *Designation: A 325-04 Standard Specification for*.
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/32189/7d0cccde6cf04c739f39f44c18ff2aa7/ASTM-A325-04.pdf>
- Cházaro, R. C. (2019). *DISEÑO DE CONEXIONES*.
https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/DISENO%20DE%20CONEXIONES_2019-min-min.pdf
- Gómez, P. E. (2020). *Simulación en SAP2000 de Uniones para Estructura Metálica y su Prototipado a Escala*. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/41151/TFG-I-1489.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guo, Z., Cai, W., Nie, Z., & Chen, Y. (2024). Simplified analytical model for prediction of collapse resistance of restrained steel beam-column substructure exposed to fire. *Engineering Failure Analysis*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108114>

- Moussa, A., & Shazly, M. (2023). Analysis For Flat-Recess Head Countersink Composite Bolted Connection Under Tensile Loading. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 14(03), 70–90. https://iaeme.com/Home/article_id/IJMET_14_03_007
- NEC-SE-DS. (2020). *NORMA ECUATORIANA DE LA*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/04/MTOP_NEC-SE-DS.pdf
- Qureshi, J. (2022). A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures. In *Fibers* (Vol. 10, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/fib10030027>
- RCSC. (2020). *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts Prepared by RCSC Committee A.1-Specifications and approved by the Research Council on Structural Connections*. <https://www.boltcouncil.org/files/2020RCSCSpecification.pdf>
- Tapia-Hernández, E., Santiago-Flores, A., & Guerrero-Bobadilla, H. (2022). Performance of seismic steel beam–column moment joints. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(12), 6741–6761. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01456-2>
- Valencia, D. A. (2014). *CARGAS (NO SÍSMICAS)*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/1.-NEC-SE-CG-Cargas-No-Sismicas.pdf>
- Zhang, X., Zheng, S., & Zhao, X. (2019). Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with different structural forms. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.028>