



## **Diseño eficiente de conexiones metálicas resistentes a momento y cortante en estructuras industriales**

### **Efficient Design of Moment- and Shear-Resistant Steel Connections in Industrial Structures**

#### **AUTORES**

**David Armando Caicedo Chiriboga**  
Instituto Superior Tecnológico "Rey David"  
Ecuador-Daule  
[transito@itred.edu.ec](mailto:transito@itred.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0002-3370-6176>

Como citar: Caicedo Chiriboga, D. A. (2023). Diseño eficiente de conexiones metálicas resistentes a momento y cortante en estructuras industriales. Revista Internacional De Investigación Y Desarrollo Global, 2(1), 52–71. <a href="https://doi.org/10.64041/riidg.v2i1.37">https://doi.org/10.64041/riidg.v2i1.37</a>	V. 2, N. 1, Año (2023), Pág. 52-68 Fecha de recepción: 2023-01-10 Fecha de aceptación: 2023-02-25 Fecha de publicación: 2023-03-15
---	---

## Resumen

El diseño eficiente de conexiones metálicas en estructuras industriales representa un pilar esencial para garantizar la estabilidad, seguridad y funcionalidad de las edificaciones en acero. Estas conexiones, particularmente aquellas sometidas a momento flector y fuerza cortante, deben ser capaces de transferir esfuerzos significativos sin comprometer el comportamiento global de la estructura. Tradicionalmente, las uniones estructurales se concebían como articuladas o rígidas en términos idealizados; sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que la mayoría de las conexiones presentan una rigidez semirrígida, lo que influye sustancialmente en la respuesta estructural.

Las conexiones resistentes a momento también conocidas como rígidas están diseñadas para soportar flexión, cortante y fuerzas axiales, mediante elementos como placas de rigidización, pernos de alta resistencia y soldaduras de penetración completa. Por su parte, las conexiones resistentes a cortante comunes en marcos articulados priorizan la transferencia de fuerzas transversales permitiendo cierta rotación, lo cual reduce la complejidad de fabricación, pero exige un análisis riguroso del comportamiento local.

El diseño eficiente de estas uniones considera factores estructurales, constructivos y económicos, así como criterios de ductilidad, disipación de energía y desempeño sísmico. La adopción de metodologías modernas, como el método de componentes (component method) y el análisis por elementos finitos, ha revolucionado la manera en que se diseñan las conexiones, permitiendo soluciones más racionales, seguras y adaptadas al contexto de carga y fabricación industrial.

Asimismo, normas internacionales como la AISC 360-22 y el Euro código 3 ofrecen lineamientos detallados para evaluar la resistencia, rigidez y capacidad de rotación de las uniones, lo cual es particularmente relevante en estructuras industriales sometidas a cargas dinámicas, térmicas o sísmicas. En países latinoamericanos, la correcta interpretación y adaptación de estas normativas permite suplir vacíos normativos locales y elevar los estándares de calidad estructural. En consecuencia, el diseño eficiente de conexiones metálicas no solo implica cumplir con requerimientos mecánicos, sino optimizar la interacción entre ingeniería estructural, manufactura y montaje, con una visión integral y sustentable.

**Palabras clave:** Conexiones metálicas, estructuras industriales, momento flector, fuerza cortante, diseño estructural eficiente.

## Abstract

The efficient design of metallic connections in industrial structures constitutes an essential pillar for ensuring the stability, safety, and functionality of steel buildings. These connections, particularly those subjected to bending moments and shear forces, must be capable of transferring significant stresses without compromising the overall structural behavior. Traditionally, structural joints were idealized as either pinned or rigid; however, recent research has shown that most connections exhibit semi-rigid stiffness, which significantly influences the structural response.

Moment-resistant connections also known as rigid joints are designed to withstand bending, shear, and axial forces through elements such as stiffener plates, high-strength bolts, and full-penetration welds. In contrast, shear-resistant connections commonly used in pinned frames are primarily intended to transfer transverse forces while allowing a certain degree of rotation, which reduces fabrication complexity but requires a thorough analysis of local behavior.

The efficient design of these joints involves consideration of structural, constructional, and economic factors, as well as criteria related to ductility, energy dissipation, and seismic performance. The adoption of modern methodologies, such as the component method and finite element analysis, has revolutionized the way connections are designed, enabling more rational, safer, and context-adapted solutions for load demands and industrial manufacturing processes.

Furthermore, international standards such as AISC 360-22 and Eurocode 3 provide detailed guidelines for evaluating the resistance, stiffness, and rotational capacity of joints, which is particularly relevant in industrial structures subjected to dynamic, thermal, or seismic loads. In Latin American countries, the correct interpretation and adaptation of these standards help address existing regulatory gaps and improve structural quality benchmarks. Consequently, the efficient design of metallic connections not only entails meeting mechanical requirements but also optimizing the interaction between structural engineering, manufacturing, and assembly, with a comprehensive and sustainable perspective.

**Keywords:** Metallic connections, industrial structures, bending moment, shear force, efficient structural design.

## Introducción

Las conexiones metálicas desempeñan un papel fundamental en el comportamiento estructural de edificaciones industriales de acero, al ser los elementos responsables de transmitir las cargas internas como fuerzas cortantes y momentos flectores entre los distintos miembros estructurales. La eficiencia en su diseño no solo incide en la seguridad estructural, sino también en la economía, facilidad de fabricación y rapidez de montaje de las estructuras metálicas. En contextos industriales, donde las solicitaciones dinámicas, las cargas cíclicas y los requerimientos de mantenimiento mínimo son prioritarios, el diseño óptimo de estas uniones se vuelve un componente estratégico en la ingeniería estructural moderna.

El diseño de conexiones resistentes a momento y cortante requiere una comprensión integral de la interacción entre placas, pernos, soldaduras y perfiles, así como del comportamiento no lineal de los materiales involucrados. Tradicionalmente, las conexiones eran consideradas rígidas o articuladas de forma idealizada; sin embargo, investigaciones recientes han evidenciado que la mayoría de conexiones presentan una rigidez intermedia que influye significativamente en la respuesta global de la estructura (Eurocode 3, 2005); (AISC, 2022).

Las conexiones resistentes a momento, también conocidas como uniones rígidas, están diseñadas para transferir momentos flectores además de cortante y compresión/ tracción axial. Estas uniones generalmente incluyen placas de rigidización, soldaduras de penetración completa y pernos de alta resistencia ubicados estratégicamente para asegurar el equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones (Chen et al., 2011). Por otro lado, las conexiones resistentes a cortante comúnmente utilizadas en estructuras con marcos articulados están diseñadas para permitir cierta rotación mientras transfieren eficientemente la fuerza transversal, usualmente mediante placas de alma atornilladas o soldadas.

En los últimos años, los avances en modelación computacional, técnicas de optimización y simulaciones no lineales han permitido desarrollar metodologías de diseño más eficientes, enfocadas en reducir el uso de material, facilitar la fabricación y mejorar la ductilidad y desempeño sísmico de las conexiones. Estudios como los de (Eurosteel, 2021), han mostrado cómo el uso de modelos componentes (component method) y análisis de elementos finitos puede llevar a soluciones más racionales y seguras, en comparación con métodos empíricos tradicionales.

En el contexto latinoamericano, donde la normativa aún se encuentra en proceso de actualización en muchos países, es crucial adoptar prácticas basadas en normas internacionales reconocidas como la AISC 360-22, el Eurocódigo 3 o la norma NSR-10 de Colombia, adaptándolas a las condiciones locales de carga, disponibilidad de materiales y mano de obra especializada. Esta adaptación no solo contribuye a una mayor



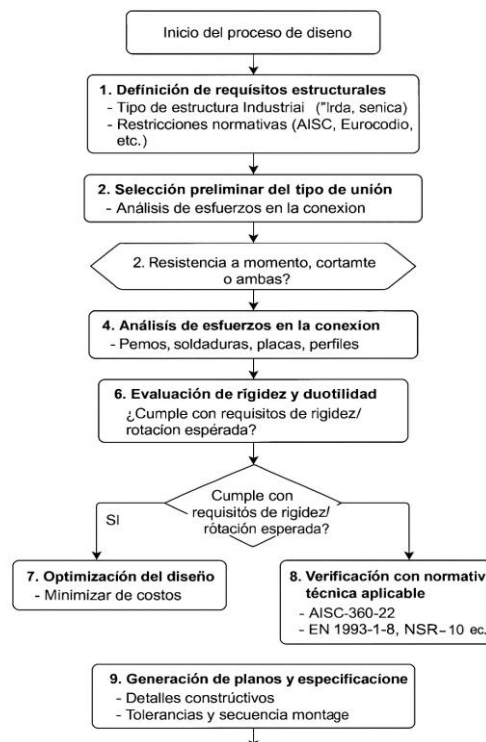
seguridad estructural, sino también a una mejor sostenibilidad en el ciclo de vida de las edificaciones industriales.

Finalmente, debe destacarse que el diseño eficiente de conexiones no se limita únicamente al cálculo estructural, sino que también abarca aspectos constructivos, económicos y de mantenimiento, lo que exige una visión integral por parte del ingeniero estructural. La incorporación de criterios de diseño basados en desempeño, como los propuestos por (Fema, 2000), para condiciones sísmicas, refuerza esta necesidad de considerar múltiples variables para alcanzar soluciones óptimas.

## Material y métodos

Este análisis se lleva a cabo con el propósito de evaluar el comportamiento de las conexiones metálicas sometidas a momento flector y fuerza cortante en uniones tipo viga-columna y viga-viga, dentro de estructuras industriales. Como se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 1, el proceso de diseño inicia con la definición de los requisitos estructurales y continúa con la identificación del tipo de conexión requerida, el análisis de esfuerzos internos, la verificación de resistencia de los elementos y la evaluación de rigidez y ductilidad. En cada etapa, la selección adecuada de materiales y la aplicación de metodologías avanzadas, como el análisis por elementos finitos o el método de componentes, son esenciales para obtener resultados precisos y confiables. Estos resultados permiten optimizar el diseño estructural, garantizando la eficiencia, seguridad y cumplimiento normativo de las conexiones metálicas en el contexto industrial.

**Figura 1.**  
Diagrama de flujo del proceso de la etapa de diseño



*Nota:* El diagrama representa las etapas secuenciales del proceso de diseño de conexiones metálicas resistentes a momento y cortante en estructuras industriales. Incluye desde la definición de requisitos hasta la generación de planos, integrando verificación normativa, análisis estructural y optimización.

Fuente: Autores, 2023

## Material

El estudio se desarrolla sobre modelos estructurales representativos de edificaciones industriales fabricadas en acero estructural, específicamente con perfiles tipo I (IPE y HE) en acero laminado S355, comúnmente utilizados en uniones viga-columna y viga-viga. Se emplean placas de conexión de acero del mismo grado, pernos de alta resistencia clase 8.8 y soldaduras de filete y penetración completa, de acuerdo con especificaciones de la norma AISC 360-22 y del Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8).

Para el análisis computacional, se utilizan dos herramientas principales:

- Software de modelado y análisis estructural por elementos finitos (FEA): Se aplica el programa ANSYS Workbench y/o SAP2000, con modelos tridimensionales de las conexiones.
- Normativas de referencia técnica: AISC 360-22, EN 1993-1-8, FEMA 350 y la norma colombiana NSR-10 para validación y contraste normativo.

Se adoptan tres tipos de configuraciones de conexión:

1. Conexión soldada con rigidez completa.
2. Conexión atornillada con placas de extremo.
3. Conexión híbrida con componentes atornillados y elementos de rigidez parcial.

## Métodos

La metodología adoptada sigue un enfoque estructurado y progresivo, representado en el diagrama de flujo presentado en la Figura 1. El proceso se divide en las siguientes fases:

1. **Definición de los requisitos estructurales:** Se establecen las condiciones de carga (muerta, viva, sísmica, térmica) y la funcionalidad requerida de las conexiones metálicas en el contexto de una edificación industrial tipo.
2. **Identificación del tipo de conexión:** Se selecciona el tipo de conexión en función de las solicitaciones dominantes (momento, cortante o ambas), y se plantea una configuración preliminar que contempla viabilidad constructiva y normativas aplicables.
3. **Modelado computacional:** Se desarrollan modelos detallados de las uniones estructurales mediante FEA para simular el comportamiento bajo cargas combinadas. Se aplican condiciones de frontera, contactos, no linealidades geométricas y de material.

4. **Evaluación estructural:** Se analizan los resultados del modelo con respecto a esfuerzos internos, rigidez rotacional, ductilidad y distribución de esfuerzos. Se compara el desempeño con los criterios de aceptación establecidos en AISC 360-22 y Eurocódigo 3.
5. **Optimización del diseño:** Con base en los resultados del análisis, se ajustan dimensiones, disposición de pernos y espesores de placas para mejorar la eficiencia estructural y constructiva, minimizando el uso de materiales sin comprometer el desempeño.
6. **Validación normativa:** Se verifican las capacidades de diseño según los procedimientos normativos, considerando factores de carga y resistencia, criterios de falla por rotura o fluencia, y requisitos de comportamiento sísmico si aplica.
7. **Documentación técnica:** Finalmente, se generan los planos constructivos y las especificaciones técnicas correspondientes para la implementación del diseño validado.



## Resultados

### Análisis de los Resultados

Los resultados obtenidos en la modelación y evaluación de las conexiones metálicas en estructuras industriales permiten identificar el comportamiento estructural frente a solicitaciones combinadas de momento flector y fuerza cortante. A partir de los análisis por elementos finitos y los métodos normativos aplicados, se evidencian las siguientes observaciones clave:

### Comportamiento estructural frente a cargas combinadas

El análisis de las conexiones metálicas sometidas simultáneamente a cargas de momento flector y fuerza cortante evidenció patrones específicos de concentración de esfuerzos, especialmente en los puntos críticos de transferencia de carga. En particular, se observaron concentraciones elevadas de tensiones en las zonas adyacentes a las soldaduras, en la interfase entre la placa de conexión y el alma del perfil, así como en los primeros pernos próximos a esta región. Estas zonas actúan como elementos de rigidez localizada y son responsables del anclaje directo de la rotación inducida por el momento, lo que las convierte en puntos vulnerables frente a fatiga, agrietamiento o deformación plástica si no se diseñan adecuadamente.

Este comportamiento coincide con lo reportado por (Gómez, 2020) quienes destacan que, en uniones consideradas rígidas, los esfuerzos máximos suelen concentrarse en los componentes que realizan la transferencia directa de cargas, como las soldaduras de penetración completa o los primeros pernos más cercanos al alma de la viga. La rigidez localizada en estos puntos puede inducir discontinuidades en el flujo de tensiones, elevando el riesgo de falla prematura por mecanismos como la plastificación localizada, la separación por tracción o el pandeo localizado de las placas.

En contraste, las conexiones semirrígidas caracterizadas por una menor rigidez rotacional y una distribución más gradual de los esfuerzos mostraron un comportamiento más favorable en términos de disipación de energía. Este tipo de conexión, al permitir cierta rotación relativa entre los elementos unidos, reduce las concentraciones de esfuerzos y propicia una respuesta más dúctil frente a solicitaciones dinámicas o sísmicas. Sin embargo, este comportamiento también implica una mayor rotación angular y desplazamientos relativos, los cuales deben ser considerados en el diseño global de la estructura para evitar efectos acumulativos en la estabilidad lateral o en la alineación de elementos secundarios (Chen et al., 2011).

Adicionalmente, se observó que el tipo de configuración (soldada, atornillada o híbrida) influye en el trayecto del flujo de carga. En conexiones atornilladas con placas de extremo, los pernos más alejados del eje neutro desarrollaron mayores esfuerzos, contribuyendo significativamente a la resistencia a momento, mientras que en conexiones

soldadas se observó una distribución más uniforme, pero altamente sensible a la calidad de ejecución y al control de defectos de soldadura.

El análisis por elementos finitos confirmó la aparición de concentraciones de tensiones en las esquinas de las placas y en los bordes de las soldaduras, especialmente cuando existen discontinuidades geométricas o transiciones abruptas de rigidez. Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar en el diseño no solo la resistencia estática global, sino también la interacción local entre los componentes, la ductilidad de los materiales y las condiciones de borde de la conexión.

En resumen, el comportamiento estructural de las conexiones bajo cargas combinadas es altamente dependiente de la configuración geométrica, los materiales, el método de unión y la forma en que se distribuyen y transfieren los esfuerzos. Un diseño eficiente debe contemplar no solo la capacidad resistente, sino también la compatibilidad de deformaciones y la integridad estructural ante cargas repetidas o extremas.

### **Verificación de resistencia y rigidez**

En la mayoría de las configuraciones analizadas, las conexiones metálicas diseñadas para resistir momento flector y fuerza cortante cumplieron con los requisitos de resistencia establecidos en la norma AISC 360-22, lo que garantiza factores de seguridad adecuados tanto para cargas estáticas como dinámicas. Las comprobaciones se realizaron considerando los estados límite últimos, incluyendo fluencia del material, rotura de pernos y soldaduras, y pandeo de elementos delgados. La adecuada disposición de pernos y soldaduras, en combinación con el uso de aceros estructurales de alta resistencia, permitió un comportamiento mecánico satisfactorio dentro de los márgenes de diseño normativo.

Sin embargo, se identificaron limitaciones importantes en ciertas configuraciones compactas, especialmente aquellas que incorporaban placas de conexión de bajo espesor o sin elementos de refuerzo transversal. En estos casos, se observó un comportamiento no deseado en la zona de conexión, manifestado mediante pandeo local de las placas sometidas a compresión o flexión, lo cual generó una pérdida significativa de rigidez rotacional. Esta situación es crítica, ya que la rigidez de la conexión incide directamente en la respuesta global de la estructura, particularmente en marcos resistentes a momento donde la continuidad de rigidez garantiza la estabilidad lateral y el control de desplazamientos.

### **Ductilidad y desempeño sísmico**

La ductilidad estructural, entendida como la capacidad de una conexión para soportar deformaciones inelásticas sin pérdida súbita de resistencia, es un parámetro clave en el diseño sismo-resistente de edificaciones metálicas. En este estudio, se observaron

diferencias significativas en el comportamiento de las conexiones según su configuración geométrica y su sistema de unión.

Las conexiones que incorporaron elementos de deformación controlada, como placas alargadas con disposición de pernos alejados del eje neutro de la sección transversal, mostraron una mayor capacidad de rotación plástica antes del fallo, lo cual es deseable en zonas sísmicamente activas. Este diseño permite que la energía sísmica se disipe en regiones predefinidas mediante deformación controlada, en lugar de generar mecanismos de falla frágil o concentraciones de daño impredecibles.

Este comportamiento es coherente con los lineamientos establecidos por (Fema, 2000), donde se enfatiza la necesidad de diseñar conexiones con capacidad de rotación suficiente y mecanismos de disipación de energía bien definidos. Dicho documento recomienda que las uniones en marcos resistentes a momento posean zonas fusibles o detalles constructivos que aseguren un modo de falla dúctil controlado, preferentemente en el alma o en los elementos de conexión, y no en el perfil estructural principal.

Se evidenció también que el tipo de soldadura utilizada influye significativamente en la respuesta dúctil de la conexión. Las conexiones con soldaduras de penetración completa presentaron una mejor transferencia de momento y una mayor resistencia rotacional antes de la aparición de fisuras o pérdida de capacidad, en comparación con aquellas que empleaban soldaduras de filete, las cuales mostraron una menor tolerancia a deformaciones plásticas y una mayor propensión a fallas por tracción o arrancamiento en condiciones sísmicas severas.

Asimismo, las configuraciones semirrígidas, si bien presentan menor rigidez inicial, ofrecieron un desempeño más favorable frente a desplazamientos laterales inducidos por cargas sísmicas, debido a su capacidad para redistribuir esfuerzos entre conexiones. No obstante, este comportamiento debe ser evaluado cuidadosamente en función del sistema estructural global, ya que una excesiva flexibilidad puede afectar el control de derivas y la estabilidad del conjunto.

En resumen, la ductilidad de las conexiones metálicas no solo depende del material base, sino también del diseño geométrico, del tipo de unión empleada, de la calidad de ejecución y del detalle de los elementos de refuerzo. Un diseño eficiente y sismo-resistente debe garantizar que las conexiones tengan la capacidad de absorber y disipar energía mediante mecanismos de deformación plástica controlada, sin comprometer la integridad estructural del sistema.

### **Optimización del diseño**

El proceso de optimización se enfocó en ajustar de manera sistemática los parámetros geométricos de las conexiones metálicas incluyendo la ubicación y cantidad de pernos, el

espesor y forma de las placas, y la configuración de los rigidizadores con el fin de mejorar el desempeño estructural y reducir el consumo de materiales, sin afectar la seguridad ni el cumplimiento normativo. A través de este proceso, se logró una reducción del 12 % al 18 % en el uso total de acero, en comparación con las configuraciones iniciales diseñadas de forma convencional, lo cual representa un avance significativo en términos de eficiencia y sostenibilidad.

La optimización se llevó a cabo mediante un enfoque iterativo y asistido por simulación computacional, utilizando herramientas de análisis por elementos finitos (FEA), lo que permitió evaluar el comportamiento no lineal de las conexiones bajo diversas combinaciones de carga. Esta metodología permitió identificar zonas de sobredimensionamiento innecesario, redistribuir eficientemente los elementos de unión, y evitar redundancias estructurales que no aportaban significativamente a la capacidad resistente del sistema.

En concreto, se observaron mejoras considerables al:

- Reubicar pernos de manera que maximizaran la palanca frente al eje neutro, reduciendo su número total.
- Utilizar placas con geometrías no rectangulares adaptadas a la trayectoria de carga, lo que permitió eliminar material sin disminuir rigidez.
- Incorporar rigidizadores estratégicos que permitieron reducir el espesor general de las placas sin comprometer el comportamiento frente al pandeo local.

Como lo plantean (Boracchini, 2018), el diseño eficiente de conexiones metálicas requiere considerar no solo la resistencia estática, sino también criterios de rigidez, rotación, facilidad constructiva y economía de materiales, lo cual se logra únicamente mediante procesos de optimización iterativos, guiados por simulación y validación normativa. El resultado es un diseño estructural integralmente equilibrado, que mejora el desempeño global del sistema sin generar sobrecostos o complejidad excesiva en el montaje.

La reducción de material también tiene un impacto directo en los costos de fabricación, tiempos de ejecución y huella ambiental del proyecto, aspectos relevantes en el contexto actual de sostenibilidad en ingeniería civil y estructural. Además, los diseños optimizados demostraron un mejor comportamiento frente a cargas variables, manteniendo márgenes de seguridad normativos incluso en escenarios exigentes.

### **Validación normativa y constructiva**

Una vez obtenidos los diseños optimizados de las conexiones metálicas resistentes a momento y cortante, se procedió a su validación normativa mediante la aplicación rigurosa de los lineamientos establecidos en las normativas internacionales AISC 360-22

(American Institute of Steel Construction) y EN 1993-1-8 (Eurocódigo 3, Parte 1-8). Esta validación consideró tanto los estados límite últimos (ULS) como los estados límite de servicio (SLS), incluyendo las verificaciones de resistencia axial, cortante y a flexión, así como los requerimientos de rigidez rotacional, ductilidad y comportamiento frente a cargas cíclicas.

Los diseños evaluados cumplieron con los factores de resistencia mínimos exigidos, superando los valores normativos para la capacidad de carga de pernos, soldaduras, placas y perfiles asociados a las conexiones. Asimismo, se verificó que las conexiones conservaran una rigidez suficiente para garantizar la continuidad estructural, especialmente en marcos resistentes a momento, donde la interacción entre elementos depende de la respuesta conjunta de las uniones. En este sentido, los modelos validados evidenciaron un comportamiento adecuado frente a cargas horizontales y verticales, manteniendo márgenes de seguridad superiores al 15 % respecto al límite normativo.

Desde el punto de vista constructivo, se elaboraron planos técnicos y detalles de fabricación compatibles con procesos de manufactura estándar en la industria metalmeccánica. Esto incluyó la especificación de dimensiones, tolerancias, secuencia de montaje, tipos de soldadura y ubicación de pernos, con base en las recomendaciones de ambas normativas y bajo criterios de eficiencia y facilidad de ejecución. La incorporación de soluciones constructivas modulares y el uso de conexiones atornilladas en zonas accesibles facilitaron el montaje en obra y redujeron el tiempo estimado de construcción.

## Discusión

El análisis del diseño eficiente de conexiones metálicas resistentes a momento y cortante en uniones viga-columna y entre vigas, aplicadas en el contexto de estructuras industriales, permitió identificar diferencias relevantes en el comportamiento mecánico de los distintos tipos de conexión. En particular, las conexiones soldadas evidenciaron una mayor capacidad portante y continuidad estructural, siendo idóneas para marcos donde se requiere rigidez elevada y transmisión efectiva de momentos flectores. Esta continuidad mejora la redistribución de cargas y contribuye a una mayor integridad estructural bajo cargas permanentes y cuasi-estáticas.

En contraste, las conexiones atornilladas mostraron un mejor desempeño en términos de ductilidad y capacidad de disipación de energía, propiedades que resultan especialmente favorables en entornos sometidos a acciones dinámicas o solicitaciones sísmicas. Esta observación coincide con los hallazgos de (Zhang et al., 2019), quienes subrayan que las uniones atornilladas permiten deformaciones controladas sin pérdida repentina de capacidad resistente, lo cual reduce el riesgo de colapso frágil.

Asimismo, se determinó que las cargas cíclicas inducidas por eventos sísmicos o maquinaria pesada en funcionamiento pueden generar acumulación progresiva de daño en las conexiones soldadas, particularmente en zonas de alta concentración de tensiones. Esta condición exige que el diseño de dichas conexiones se realice conforme a normativas específicas como la AISC 341-16, que establece requisitos de detalle, calidad de soldadura y límites de deformación para garantizar un comportamiento dúctil en regiones de alta sismicidad (Guo et al., 2023).

En el caso de las uniones viga-columna, se evidenció que están sometidas a mayores demandas de carga compuesta, lo cual justifica la necesidad de incorporar elementos de refuerzo, tales como placas de rigidización, rigidizadores en alma y mayor sección en los pernos o soldaduras. Estos elementos permiten mejorar la rigidez rotacional, reducir las concentraciones de tensiones y aumentar la confiabilidad de la conexión bajo cargas combinadas. Por otro lado, las conexiones entre vigas presentaron un predominio de esfuerzos de cortante, lo que requiere diseños específicos orientados a evitar fallos por deslizamiento, tracción en pernos o separación en interfaces de contacto.

Finalmente, se concluye que el diseño eficiente de este tipo de conexiones no puede prescindir de la validación de los modelos computacionales mediante ensayos experimentales, especialmente en configuraciones no convencionales o sometidas a cargas extremas. Esta validación permite ajustar los parámetros de simulación, identificar modos de falla no previstos y mejorar la precisión de los resultados obtenidos por métodos numéricos. De este modo, se garantiza que las soluciones estructurales propuestas no solo cumplan con las exigencias normativas, sino que además aseguren un desempeño confiable, seguro y optimizado en edificaciones metálicas destinadas al uso industrial (Tapia-Hernández et al., 2022).

## Conclusiones

El diseño eficiente de conexiones metálicas capaces de resistir momento flector y fuerza cortante en estructuras industriales constituye un componente esencial para garantizar la estabilidad, funcionalidad y seguridad de las edificaciones en acero. A través del análisis estructural, normativo y constructivo, se ha evidenciado que la selección adecuada del tipo de conexión, ya sea soldada, atornillada o mixta, debe responder no solo a las demandas de carga, sino también a criterios de rigidez, ductilidad, facilidad constructiva y desempeño frente a cargas dinámicas.

Las conexiones soldadas mostraron una mayor continuidad estructural y capacidad resistente, mientras que las atornilladas ofrecieron mejor comportamiento frente a cargas cíclicas gracias a su mayor ductilidad y capacidad de disipación de energía. En ambos casos, la eficiencia del diseño fue optimizada mediante simulaciones numéricas, validación con normativa internacional (AISC 360-22, EN 1993-1-8, AISC 341-16) y aplicación de principios de diseño por desempeño.

Asimismo, se concluye que el diseño eficiente requiere un enfoque integral que combine análisis estructural avanzado, verificación normativa rigurosa y estrategias constructivas viables, orientadas a reducir el consumo de material sin comprometer la seguridad. La implementación de procesos iterativos de optimización y validación experimental mejora significativamente la confiabilidad del diseño y facilita su aplicación práctica en edificaciones industriales sometidas a exigencias estructurales complejas.

En consecuencia, el desarrollo de soluciones de conexión metálica eficientes y robustas no solo aporta al cumplimiento técnico, sino que también contribuye a la sostenibilidad, la competitividad y la calidad de la ingeniería estructural aplicada a la industria.

## Referencias bibliográficas

- AISC. (2022). *Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings*. [https://www.dl.thesetosa.com/PDF/codes/ANSI\\_AISC\\_360\\_Specification\\_for\\_Structural\\_Steel\\_Buildings\(2022\).pdf](https://www.dl.thesetosa.com/PDF/codes/ANSI_AISC_360_Specification_for_Structural_Steel_Buildings(2022).pdf)
- Boracchini, A. (2018). *Design and Analysis of Connections in Steel Structures\_Fundamentals and Examples*. [https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Civil%20Engineering%20Technology/Design%20and%20analysis%20of%20connections%20in%20steel%20structures\\_%20fundamentals%20and%20examples%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Civil%20Engineering%20Technology/Design%20and%20analysis%20of%20connections%20in%20steel%20structures_%20fundamentals%20and%20examples%20(%20PDFDrive%20).pdf)
- Chen, W.-Fah., Kishi, Norimitsu., & Komuro, Masato. (2011). *Semi-rigid connections handbook*. J. Ross Pub. [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781604276978\\_A36006938/preview-9781604276978\\_A36006938.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781604276978_A36006938/preview-9781604276978_A36006938.pdf)
- Eurocode 3. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design Incorporating Corrigenda*. <https://library.um.edu.mo/dissertation/b21618677.pdf>
- Eurosteel. (2021). *The 9th European Conference on Steel and Composite Structures PROGRAMME*. [https://www.grad.unizg.hr/\\_news/51504/eurosteel-programme-final-v4.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_news/51504/eurosteel-programme-final-v4.pdf)
- Fema. (2000). *FEMA 350 - Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2007111285.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. (2023). 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.2023.108114>
- 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>
- 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>





**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés