

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0215>

DISEÑO DE CONEXIONES SOLDADAS RCFT MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN PÓRTICOS A MOMENTO

DESIGN OF RCFT WELDED CONNECTIONS BY FINITE ELEMENT FINITE ELEMENT MOMENT GANTRIES

Orejuela-Mendoza Ivanova Claribel ¹; Suárez-Reyes David Joel ²;
Pino-Tarrago Julio Cesar ³; Regalado-Jalca Julio Johnny ⁴

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa. Ecuador. Correo: ivanova.orejuela@unesum.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5266-0120>

² Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa. Ecuador. Correo: suarez-david4783@unesum.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-1404-9240>

³ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa. Ecuador. Correo: julio.pino@unesum.edu.ec.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0377-4007>

⁴ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa. Ecuador. Correo: julio.regalado@unesum.edu.ec.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1669-8522>

Resumen

En el estudio, se evaluaron las conexiones soldadas RCFT en pórticos a momento con el objetivo de analizar su comportamiento bajo cargas sísmicas y gravitacionales. Para ello, se realizaron simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos utilizando el software IDEA StatiCa, el cual permitió modelar tanto las placas base como los pernos de anclaje y las uniones soldadas. Se analizaron las tensiones y deformaciones generadas en las conexiones y se verificó su comportamiento frente a las normativas AISC 360-16 y NEC-15. Los resultados mostraron que las conexiones RCFT distribuyeron adecuadamente las tensiones y presentaron un comportamiento satisfactorio frente a momentos flectores y fuerzas de compresión. Asimismo, las derivas por piso se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa, lo que garantiza la estabilidad estructural de las edificaciones bajo eventos sísmicos. En conclusión, las conexiones soldadas RCFT optimizadas mediante el método de elementos finitos son una solución efectiva para mejorar la seguridad y resistencia de las estructuras en zonas de alta sismicidad.

Palabras clave: conexiones soldadas, RCFT, elementos finitos, pórticos a momento, diseño sismorresistente.

Abstract

In this study, welded RCFT connections in moment frames were evaluated with the objective of analyzing their behavior under seismic and gravitational loads. Numerical simulations were carried out using the finite element method with the IDEA StatiCa software, which allowed the modeling of base plates, anchor bolts, and welded joints. The generated stresses and deformations in the connections were analyzed, and their performance was verified against the AISC 360-16 and NEC-15 standards. The results showed that the RCFT connections effectively distributed the stresses and demonstrated satisfactory behavior under bending moments and compressive forces. Additionally, the inter-story drifts remained within the limits established by the regulations, ensuring the structural stability of buildings during seismic events. In conclusion,

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de abril de 2024.

Fecha de aceptación: 25 de junio de 2024.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2024.

RCFT welded connections optimized through the finite element method are an effective solution to improve the safety and strength of structures in high seismicity areas.

Keywords: welded connections, RCFT, finite elements, moment frames, seismic-resistant design.

1. Introducción

El diseño de conexiones soldadas en pórticos a momento según Ye et al. (2019) es un área esencial en la ingeniería estructural, especialmente en regiones sísmicas donde la capacidad de disipación de energía y la ductilidad son fundamentales para la seguridad estructural. En este contexto, las conexiones soldadas RCFT (Rectangular Concrete-Filled Tubes) han demostrado ser una solución eficiente para mejorar la resistencia y la rigidez de las estructuras de acero, pero su comportamiento bajo cargas sísmicas aún requiere una investigación más profunda (Liu et al., 2019; Ye et al., 2019).

Por otro lado, estudios previos han planteado diversas estrategias para mejorar el rendimiento sísmico de las conexiones en pórticos a momento. Por ejemplo, se ha investigado el uso de mecanismos de fricción en conexiones atornilladas de acero

conformado en frío (CFS) para aumentar la ductilidad y la capacidad de disipación de energía (Mojtabaei et al., 2018). Asimismo, se han desarrollado modelos de elementos finitos (FE) que permiten predecir el comportamiento histerético y la falla de estas conexiones, considerando las propiedades no lineales de los materiales y las imperfecciones geométricas (Ghalandari et al., 2019).

De manera complementaria, Otro enfoque importante de acuerdo con Liu et al. (2019) es el diseño basado en el estado límite para marcos de acero tridimensionales bajo cargas de viento, utilizando análisis no lineales avanzados de elementos finitos. Este método permite una mayor precisión en la evaluación de la fiabilidad estructural y ha sido adoptado por la comunidad investigadora y los diseñadores. Además, las conexiones de sección reducida de viga (RBS) han sido ampliamente estudiadas por su

efectividad en mejorar la respuesta sísmica de las estructuras de acero. Sin embargo, se requiere una optimización geométrica para su aplicación segura en perfiles europeos (Sofias & Tzourmakliotou, 2018; Torres-Rodas et al., 2018).

En relación con las conexiones base de columnas en marcos a momento de acero, se ha demostrado que las conexiones expuestas pueden soportar momentos significativos incluso cuando se diseñan como articuladas, lo que destaca la importancia de una representación precisa de la flexibilidad de la base (Torres-Rodas et al., 2018). De igual forma, la optimización sísmica basada en la fiabilidad de marcos de concreto reforzado (RC) ha mostrado ser efectiva mediante el uso de algoritmos metaheurísticos y simulaciones de Monte Carlo para evaluar las respuestas no lineales estructurales (Bypour et al., 2019; Gholizadeh & Aligholizadeh, 2018).

Siguiendo esta línea de investigación, las conexiones soldadas entre columnas RCFT y las cimentaciones, son elementos importantes de estudio, ya que permiten combinar las ventajas del acero y el hormigón en un solo

componente estructural. Estas columnas, al estar rellenas de concreto y confinadas dentro de un perfil tubular de acero, tienen una gran capacidad para soportar cargas de compresión y momentos flectores. También, aportan mucha más ductilidad a las estructuras durante los sismos (Das et al., 2020). Sin embargo, el diseño adecuado de las conexiones soldadas en estas columnas es un desafío complejo, debido a la interacción de varios factores como las propiedades de los materiales, la geometría de los elementos, y las normativas aplicables.

En cuanto a los métodos de análisis, el método de elementos finitos (MEF) ha sido ampliamente utilizado para analizar y optimizar el diseño de conexiones estructurales debido a su capacidad para resolver ecuaciones diferenciales parciales discretas en aplicaciones de ingeniería y gráficos (Sofias & Tzourmakliotou, 2018). Este método ha demostrado ser altamente eficiente y versátil, permitiendo la creación de modelos precisos que representan el comportamiento de estructuras bajo diversas condiciones de carga y deformación (Marinković & Zehn,

2019; Schneider et al., 2019). Además, la popularidad del MEF ha impulsado el desarrollo de variantes que utilizan mallas tetraédricas o hexaédricas para los cálculos, lo que ha permitido su aplicación en una amplia gama de problemas estructurales y de análisis térmico (Peña et al., 2019).

No obstante, a pesar de sus ventajas, el MEF enfrenta ciertos desafíos, especialmente cuando se trata de manejar problemas con fronteras móviles, grandes deformaciones y la presencia de grietas o daños. Para superar estas limitaciones, se han propuesto enfoques innovadores como la combinación de Peridynamics y optimización topológica, que elimina la necesidad de tratamientos complejos para la conectividad de la malla y permite manejar problemas de optimización topológica en estructuras agrietadas (Kefal et al., 2019). Asimismo, se han desarrollado métodos híbridos, como el SoftFEM, que integran técnicas de computación blanda con el MEF para optimizar cambios geométricos y medidas mecánicas basadas en restricciones geométricas y propiedades del

material (Peña et al., 2019; Tawk & Alici, 2020).

El objetivo principal de este artículo es desarrollar un diseño optimizado de conexiones soldadas RCFT utilizando el método de elementos finitos en pórticos a momento. El propósito es analizar el comportamiento estructural de estas conexiones bajo condiciones sísmicas y gravitacionales, con el fin de garantizar su resistencia y seguridad en edificaciones ubicadas en zonas de alta actividad sísmica. Además, este estudio busca proporcionar a los ingenieros estructurales una herramienta técnica que les permita realizar diseños más eficientes y adecuados a las normativas vigentes, tanto nacionales como internacionales.

En cuanto a la metodología utilizada, se lleva a cabo un análisis numérico mediante el método de elementos finitos, utilizando el software IDEA StatiCa para modelar las conexiones soldadas. Se simulan diferentes condiciones de carga, incluyendo fuerzas axiales y momentos flectores, con el objetivo de predecir el comportamiento de las conexiones en pórticos a momento. Se realiza una evaluación del diseño siguiendo

los requisitos de las normativas AISC 360-16 y NEC-15, considerando tanto los parámetros geométricos como las propiedades de los materiales. Los resultados muestran que las conexiones RCFT diseñadas a través de este proceso presentan una adecuada resistencia frente a los diferentes tipos de cargas a los que están sometidas, distribuyendo de manera eficiente las tensiones y minimizando las posibles concentraciones que podrían comprometer la integridad estructural.

En términos de resultados y conclusiones, el análisis confirma que las conexiones RCFT, modeladas mediante elementos finitos, presentan un comportamiento satisfactorio ante cargas sísmicas, logrando una combinación eficiente de las propiedades del acero y el hormigón. Las columnas confinadas por un perfil tubular de acero muestran una capacidad mejorada para resistir las fuerzas de compresión y flexión, lo que favorece su uso en estructuras ubicadas en zonas de alta sismicidad. El estudio concluye que el uso del método de elementos finitos es una herramienta eficaz

para optimizar el diseño de conexiones soldadas, asegurando un rendimiento adecuado y cumpliendo con las normativas vigentes.

2. Materiales y métodos

En este estudio se utilizó el MEF para analizar las conexiones soldadas entre cimentación y columnas RCFT en pórticos a momento. El análisis se centró en simular las condiciones de carga a las que estas estructuras estarían sometidas en zonas de alta actividad sísmica. Para llevar a cabo la investigación, se emplearon programas de simulación estructural considerando las normativas vigentes tanto nacionales como internacionales.

De tal manera, se definieron las propiedades de los materiales a utilizar. Las columnas RCFT se componen de un perfil tubular de acero relleno de concreto, lo que permite aprovechar las ventajas de ambos materiales. Para el acero, se emplearon las propiedades mecánicas correspondientes a un acero estructural de alta resistencia, conforme a la norma AISC 360-16,

mientras que, para el concreto, se adoptaron los valores de resistencia a compresión establecidos en la normativa NEC-15. El diseño se realizó considerando que el perfil tubular proporciona confinamiento al concreto, mejorando su capacidad para resistir cargas de compresión.

Asimismo, se procedió a la modelación numérica de las conexiones mediante el software IDEA StatiCa, que permitió analizar el comportamiento de las uniones estructurales bajo diferentes condiciones de carga. Se generaron modelos tridimensionales de las conexiones soldadas que unen las columnas RCFT con las cimentaciones. En estos modelos, se incluyeron elementos como las placas base, los pernos de anclaje y las soldaduras, siguiendo los criterios de diseño de la AISC 360-16 y la ACI 318-19. El análisis se enfocó en evaluar las tensiones y deformaciones en las conexiones bajo fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores.

En el proceso de simulación se consideró las combinaciones de carga requeridas por las normativas para garantizar un diseño sismorresistente. Se aplicaron

cargas tanto gravitacionales como sísmicas, simulando eventos extremos que podrían comprometer la integridad de las estructuras. El análisis incluyó la evaluación de la capacidad de disipación de energía de las conexiones, así como su resistencia a las fuerzas de compresión y flexión. Además, se verificaron las propiedades geométricas de las secciones de las columnas y las placas base, ajustando el diseño según los resultados de las simulaciones.

Finalmente, para garantizar la precisión del modelo, se realizaron varias iteraciones en el diseño. En cada iteración, se ajustaron parámetros como el espesor de las placas base, la disposición de los pernos de anclaje y el tipo de soldadura utilizada. Se evaluaron las relaciones demanda-capacidad para cada uno de los componentes de la conexión, asegurando que cumplieran con los requisitos establecidos por las normativas sísmicas ecuatorianas e internacionales. Las simulaciones permitieron optimizar el diseño, asegurando que las conexiones pudieran resistir las cargas

impuestas sin sufrir deformaciones excesivas ni fallas prematuras.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a partir del análisis numérico mediante el método de elementos finitos se desarrollaron con el objetivo de simular las condiciones de carga a las que se enfrentan las conexiones soldadas RCFT en pórticos a momento, enfocándose principalmente en las cargas sísmicas, debido a que estas representan el mayor desafío en el diseño estructural en zonas de alta actividad sísmica. En esta sección se describen las propiedades de los materiales empleados, los comportamientos observados durante las simulaciones, y se evalúa el desempeño de las conexiones bajo las distintas cargas propuestas. Además, se comparan los resultados obtenidos con las normativas vigentes, como la NEC-15 y la AISC 360-16, a fin de verificar si cumplen con los requisitos de diseño sismorresistente.

Propiedades de los materiales

Las columnas RCFT están compuestas por un perfil tubular de

acero relleno de concreto, lo que permite combinar las propiedades de ambos materiales para mejorar su capacidad de resistencia bajo cargas de compresión y flexión. Se emplearon aceros de alta resistencia, y el concreto utilizado presenta una elevada resistencia a la compresión. Esta combinación maximiza el desempeño de las estructuras frente a cargas sísmicas. De manera complementaria, en este estudio, se utilizaron materiales seleccionados por su capacidad de proporcionar un rendimiento estructural adecuado bajo las condiciones de carga esperadas. El acero estructural empleado en las columnas RCFT cumple con los estándares ASTM, garantizando una alta resistencia tanto a la fluencia como a la tracción. Para el diseño, se eligieron tres tipos de acero: A36, A572 Gr. 50 y A588 Gr. 50, cada uno con propiedades específicas que permiten optimizar la respuesta de las conexiones bajo cargas sísmicas y gravitacionales. Por otro lado, el concreto utilizado tiene una resistencia a la compresión de 28 MPa, lo que asegura un buen comportamiento en términos de rigidez y capacidad de carga. Las propiedades mecánicas

establecidas para el acero y el concreto que fueron consideradas en el diseño y modelado de las

conexiones se muestran en la Tabla 1.

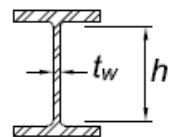
Tabla 1 Propiedades mecánicas del acero y del concreto

Material	Resistencia de fluencia (F_y)	Resistencia máxima (F_u)	Módulo de elasticidad (E_s)
Acero A36	250 MPa	400-550 MPa	200,000 MPa
Acero A572 Gr. 50	345 MPa	450 MPa	200,000 MPa
Acero A588 Gr. 50	345 MPa	483 MPa	200,000 MPa
Concreto	28 MPa (f'_c)	No aplica	21,000 MPa

Además de las propiedades de los materiales, también se ha considerado la relación ancho-espesor del alma de la viga principal, calculada de acuerdo con la tabla D1.1 del AISC 341-16. Estos valores son fundamentales para garantizar que el diseño estructural cumpla con los límites establecidos por la normativa, asegurando así un comportamiento adecuado bajo

cargas sísmicas y gravitacionales. La relación ancho-espesor limita el comportamiento inelástico de las vigas, y su adecuada proporción permite que el elemento conserve su capacidad de carga y ductilidad durante eventos sísmicos. A continuación, se presentan los valores límite correspondientes al alma de la viga principal, que fueron verificados conforme a la norma.

Tabla 2 Límite de la relación ancho-espesor del alma de la viga principal según AISC 341-16

Parámetro	Valor Calculado	Clasificación	Ejemplo
$2.57 \times \sqrt{E_s / (R_y \times F_y)}$	64.94	λ_{hd}	
hw/tw	30.67	Altamente Dúctil	

Análisis de cortante y momentos

Los resultados obtenidos del análisis de cortante para el modelo 3 muestran una clara verificación del comportamiento de las conexiones RCFT bajo cargas estáticas y

dinámicas. A través de las simulaciones, se compararon los valores de cortante en ambas direcciones, X e Y, cumpliendo con los requisitos establecidos por la normativa NEC-SE-DS. Según esta normativa, el cortante dinámico debe

representar al menos el 80% del cortante estático. En la Tabla 3, se presentan los valores que confirman que esta condición se cumple en

ambos casos, lo que garantiza que las conexiones mantienen su integridad estructural durante eventos sísmicos.

Tabla 3. Verificación de cortante dinámico y estático del modelo 3

Sentido	Cortante Estático V_e (Tn)	Cortante Dinámico V_d (Tn)	NEC-SE-DS $V_d = 80\%V_e$ (Tn)	Verificación
X	405.768	324.570	324.614	OK
Y	405.768	324.564	324.614	OK

En el análisis realizado, se observó que los cortantes dinámicos obtenidos en las simulaciones fueron muy cercanos al 80% del cortante estático, lo cual valida el diseño propuesto para las conexiones. Estos resultados reflejan que las estructuras estudiadas son capaces de soportar las fuerzas sísmicas de manera adecuada, cumpliendo con los estándares exigidos por las normativas.

Comportamiento de las conexiones soldadas

Las simulaciones realizadas sobre las conexiones RCFT permiten observar su comportamiento bajo diferentes combinaciones de cargas, destacando las solicitaciones de cortante y momentos. El análisis de las tensiones y deformaciones en las conexiones soldadas muestran una distribución uniforme de las tensiones en la mayoría de los

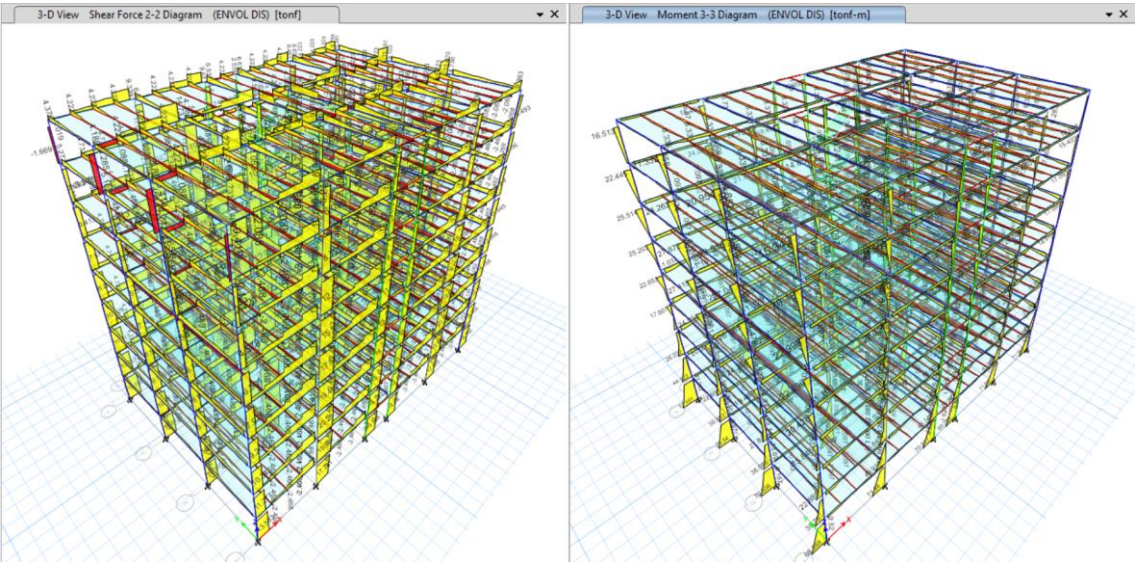
casos, lo que indica un desempeño favorable ante cargas de flexión y cortante. Sin embargo, en los puntos críticos cercanos a las soldaduras, se observa un incremento en las tensiones, lo cual debe considerarse para garantizar la seguridad estructural.

La verificación de las tensiones resultantes se realiza mediante la comparación con los límites establecidos por las normativas AISC 360-16 y NEC-15. Para este análisis, se emplean tanto los resultados de la tabla 3 de cortante dinámico y estático que muestran las tensiones y deformaciones en las conexiones. La Figura 1 permite visualizar claramente las zonas más solicitadas y las áreas donde se concentran las mayores tensiones. En el diagrama de cortante (izquierda), las fuerzas distribuidas en las vigas y columnas se

representan mediante colores que varían según la magnitud del esfuerzo. Por otro lado, en el diagrama de momentos (derecha), se aprecia cómo los momentos

generados se concentran en las uniones entre columnas y vigas, coherente con el comportamiento estructural esperado bajo cargas dinámicas y sísmicas.

Figura 1. Comportamiento de las conexiones soldadas



Análisis de las derivas por piso

En el análisis de las derivas por piso se compararon los resultados elásticos e inelásticos bajo condiciones de carga sísmica estática y dinámica. Este análisis es fundamental para determinar la capacidad de deformación de la estructura y su cumplimiento con las normativas sismorresistentes.

En el Modelo 1, la tabla 4 presenta la verificación de las derivas por piso bajo el sismo estático. Los resultados muestran que las derivas elásticas (Δ_E) y las derivas inelásticas (Δ_I) cumplen con los límites establecidos por la normativa NEC-SE-DS, con valores menores al 2%. Esto se observa en las dos direcciones principales (X y Y) en varios niveles de la estructura.

Tabla 4. Verificación de las derivas por piso por el sismo estático del modelo 1

Sentido	Nivel (m)	Deriva Elástica (Δ_E)	Deriva Inelástica (Δ_I)	Límite Normativo (Δ_{max})	Verificación
X	4.74	0.00114	0.683%	2.00%	OK
X	2.37	0.00091	0.547%	2.00%	OK
Y	4.74	0.00088	0.529%	2.00%	OK
Y	2.37	0.00061	0.367%	2.00%	OK

En el caso del Modelo 2, la Tabla 5 también evidencia que las derivas obtenidas bajo el sismo estático se mantienen dentro de los límites permisibles, con valores de deriva inelástica siempre inferiores a los máximos requeridos por la normativa. Los datos en las tablas

muestran un comportamiento estructural adecuado, donde las derivas inelásticas (Δ_I) no exceden el límite máximo permitido, verificando que las deformaciones en cada nivel se mantienen dentro de rangos seguros para la integridad estructural de la edificación.

Tabla 5. Verificación de las derivas por piso por el sismo estático del modelo 2

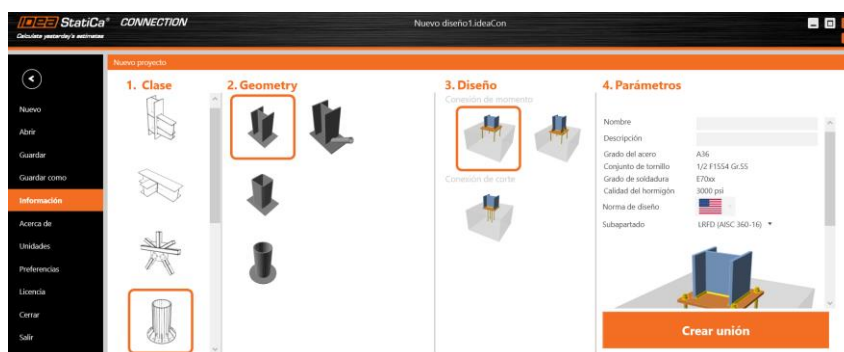
Sentido	Nivel (m)	Deriva Elástica (Δ_E)	Deriva Inelástica (Δ_I)	Límite Normativo (Δ_{max})	Verificación
X	12.00	0.000666	0.400%	2.00%	OK
X	9.00	0.001566	0.940%	2.00%	OK
X	6.00	0.00215	1.290%	2.00%	OK
X	3.00	0.001445	0.867%	2.00%	OK
Y	12.00	0.000857	0.514%	2.00%	OK
Y	9.00	0.001899	1.139%	2.00%	OK
Y	6.00	0.002453	1.472%	2.00%	OK
Y	3.00	0.001342	0.805%	2.00%	OK

Simulación de las Placas Base

La simulación de las placas base se realizó utilizando el software IDEA StatiCa, un programa especializado en el análisis y diseño de conexiones estructurales mediante el método de elementos finitos. Este software permitió modelar las placas base en condiciones reales, considerando

tanto las cargas gravitacionales como las sísmicas. En la Figura 2, se muestra el proceso de creación de la placa base, donde se definieron las dimensiones de la placa, la distribución de los pernos de anclaje, y los puntos de soldadura, lo que permite evaluar la resistencia de la conexión en su conjunto.

Figura 2. Creación de la placa base utilizando el programa IDEA StatiCa



El análisis se enfocó en la distribución de las tensiones en la placa base, principalmente en las zonas cercanas a los pernos y a la soldadura. Los resultados de las simulaciones, presentados en las Figuras 3 y 4, muestran cómo las tensiones se distribuyen a lo largo de

la placa bajo diferentes condiciones de carga. Se observaron mayores concentraciones de tensiones en las zonas adyacentes a los pernos de anclaje y en las uniones soldadas, lo cual era previsible, ya que son los puntos más críticos de la conexión.

Figura 3 Análisis de la placa base del modelo 1

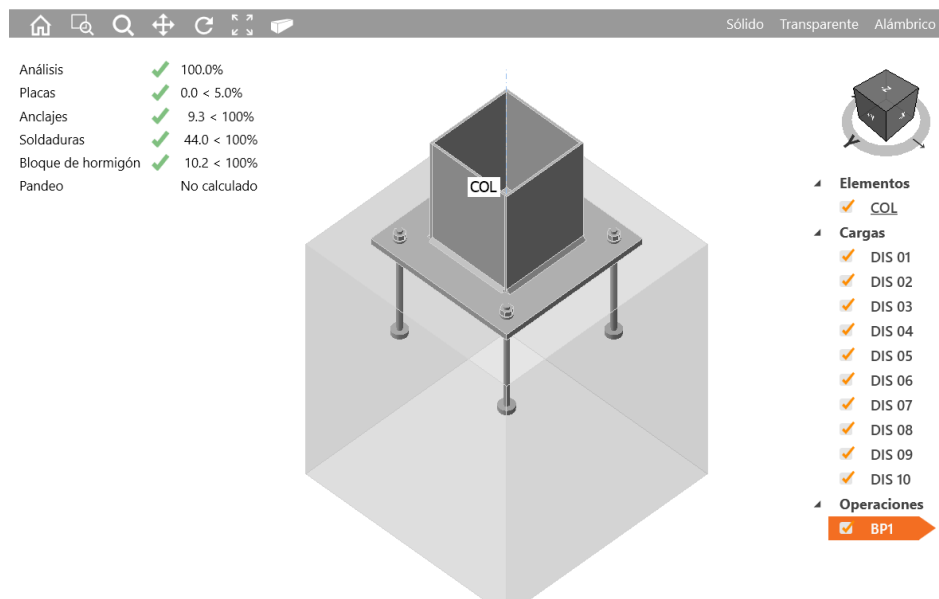
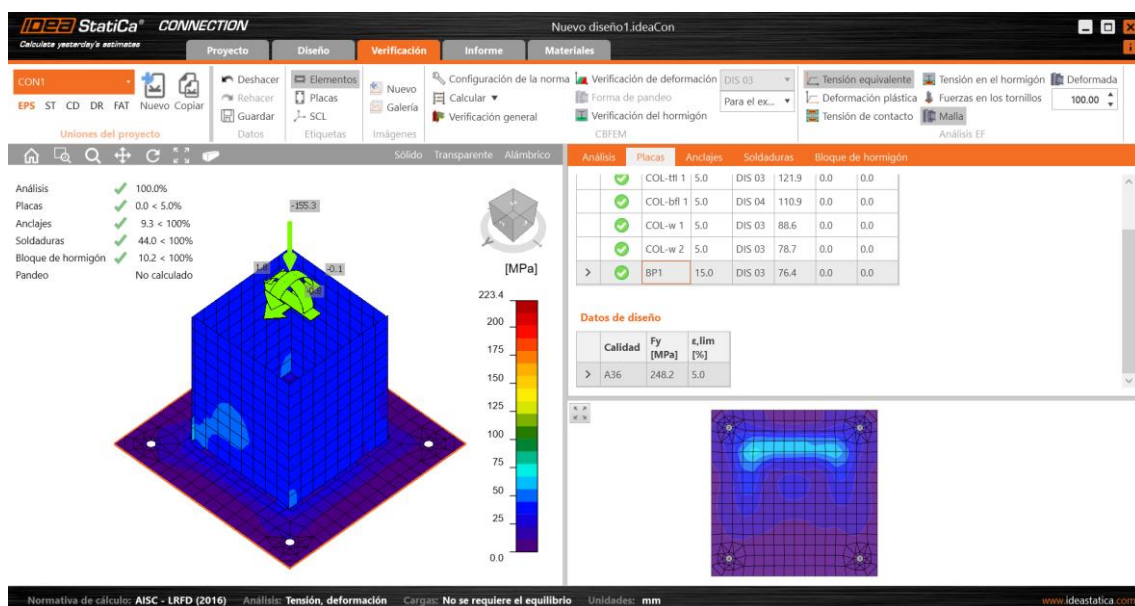


Figura 4 Visualización de los resultados de los componentes de la placa base en el modelo 1



En las simulaciones, se analizaron las deformaciones de la placa base bajo cargas extremas, tanto sísmicas como gravitacionales. Los resultados indicaron que, aunque las tensiones eran mayores en ciertas áreas, estas no superaban los límites permisibles establecidos por las normativas aplicables, como el AISC 360-16. La distribución uniforme de las tensiones en el resto de la placa base y los pernos de anclaje revelan que el diseño propuesto proporciona una conexión suficientemente rígida y segura. Asimismo, se evaluó el comportamiento de la placa base bajo momentos flectores. Las simulaciones mostraron que la conexión es capaz de absorber y redistribuir estos momentos sin sufrir deformaciones plásticas significativas. Esto es fundamental para garantizar que la placa base y el sistema de anclaje mantengan su integridad durante eventos sísmicos y cargas extremas.

Comparación con la normativa

Se verificaron las derivas por piso del modelo 3 con las normativas NEC-15 y AISC 360-16, utilizando los resultados obtenidos de las simulaciones estáticas. En la tabla 6 se presentan los valores de las

derivadas elásticas (Δ_E) y las inelásticas (Δ_I), comparándolos con los límites máximos permitidos (Δ_{max}) establecidos por la normativa NEC-SE-DS.

Los resultados muestran que en el sentido X, las derivas inelásticas (Δ_I) más altas se observan en el nivel 11.60, con un valor de 1.653%, pero aún se encuentra dentro del límite permitido del 2%. De manera similar, en el sentido Y, las derivas inelásticas alcanzan un valor máximo de 1.482% en el nivel 11.60, que también cumple con los límites normativos.

En general, los valores obtenidos en los diferentes niveles para ambos sentidos se mantienen dentro de los márgenes de seguridad permitidos por la normativa. Esto demuestra que el diseño estructural cumple con los requerimientos de seguridad para soportar eventos sísmicos, manteniendo las deformaciones dentro de los límites aceptados.

Tabla 6. Verificación de las derivas por piso por el sismo estático del modelo 3

Sentido	Nivel (m)	Deriva Elástica (ΔE)	Deriva Inelástica (ΔI)	Límite Normativo (Δ_{max})	Verificación
X	26.10	0.001224	0.734%	2.00%	OK
X	23.20	0.00158	0.948%	2.00%	OK
X	20.30	0.001991	1.195%	2.00%	OK
X	17.40	0.002364	1.418%	2.00%	OK
X	14.50	0.002638	1.583%	2.00%	OK
X	11.60	0.002755	1.653%	2.00%	OK
X	8.70	0.002633	1.580%	2.00%	OK
Y	26.10	0.001013	0.608%	2.00%	OK
Y	23.20	0.001344	0.806%	2.00%	OK
Y	20.30	0.001726	1.036%	2.00%	OK
Y	17.40	0.002076	1.246%	2.00%	OK
Y	14.50	0.00234	1.404%	2.00%	OK
Y	11.60	0.00247	1.482%	2.00%	OK

Los resultados del análisis comparativo con la normativa vigente confirman que las derivas por piso del modelo 3 cumplen con los límites establecidos, garantizando que el diseño es capaz de soportar los efectos de un sismo estático sin comprometer la estabilidad de la estructura.

Discusión

La discusión del presente estudio se enfocó en la evaluación de las conexiones soldadas RCFT en pórticos a momento, utilizando simulaciones mediante el método de elementos finitos para comprobar su capacidad de soportar cargas sísmicas y gravitacionales. Los resultados obtenidos mostraron que las conexiones cumplen con los requisitos de diseño sismorresistente establecidos por las

normativas NEC-15 y AISC 360-16. En particular, las derivas por piso se mantuvieron dentro de los límites permitidos, lo que asegura la estabilidad estructural de las edificaciones bajo eventos sísmicos.

Además, el análisis del comportamiento de las placas base confirma que la distribución de las tensiones se focaliza principalmente en las zonas cercanas a los pernos de anclaje y a las uniones soldadas, como era de esperar. Sin embargo, las simulaciones indicaron que estas tensiones no superan los límites permisibles, lo que demuestra que el diseño es adecuado para garantizar la rigidez y seguridad de las conexiones. El uso del software IDEA StatiCa mostró ser una herramienta eficaz para modelar y evaluar las conexiones, facilitando el

ajuste de los parámetros de diseño según los resultados de las simulaciones.

Finalmente, la comparación con los valores normativos confirma que las conexiones RCFT, diseñadas mediante el método de elementos finitos, son capaces de soportar adecuadamente las cargas sísmicas y gravitacionales a las que estarían sometidas en zonas de alta sismicidad. Esto valida que el diseño propuesto no solo garantiza la integridad estructural, sino que también optimiza el comportamiento de las conexiones bajo condiciones extremas de carga.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos de este estudio indican que las conexiones soldadas RCFT en pórticos a momento presentan un desempeño estructural satisfactorio frente a cargas sísmicas y gravitacionales. A través de simulaciones numéricas realizadas con el método de elementos finitos, se verificó que las conexiones cumplen con los requisitos de las normativas NEC-15 y AISC 360-16, lo que asegura la estabilidad de las estructuras en

zonas sísmicamente activas. Este cumplimiento normativo refuerza la confiabilidad del diseño propuesto, especialmente en situaciones donde la resistencia a la flexión y la compresión son críticas.

Además, las simulaciones mostraron que las tensiones se distribuyen de manera uniforme en la mayoría de las áreas, lo que resulta en un comportamiento estructural adecuado bajo cargas extremas. Sin embargo, en las zonas cercanas a las soldaduras, se identificaron mayores concentraciones de tensiones, aunque estas no excedieron los límites permitidos. Esto sugiere que el diseño de las conexiones RCFT es seguro y garantiza su durabilidad bajo condiciones de carga prolongada o eventos sísmicos.

Por último, el uso del software IDEA StatiCa permitió una modelación precisa de las conexiones y la optimización de los parámetros de diseño. Los resultados obtenidos indican que la utilización del método de elementos finitos es una herramienta efectiva para mejorar la seguridad estructural de las conexiones soldadas, proporcionando a los ingenieros una

solución confiable para diseñar edificaciones en zonas de alta actividad sísmica.

Bibliografía

- Bypour, M., Gholhaki, M., Kioumarsi, M., & Kioumarsi, B. (2019). Nonlinear analysis to investigate effect of connection type on behavior of steel plate shear wall in RC frame. *Engineering Structures*.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.11.010>
- Das, R., Castiglioni, C., Couchaux, M., Hoffmeister, B., & Degée, H. (2020). Design and analysis of laser-cut based moment resisting passing-through I-beam-to-CHS column joints. *Journal of Constructional Steel Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106015>
- Ghalandari, M., Bornassi, S., Shamshirband, S., Mosavi, A., & Chau, K. (2019). Investigation of submerged structures' flexibility on sloshing frequency using a boundary element method and finite element analysis. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13, 519–528.
<https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1619197>
- Gholizadeh, S., & Aligholizadeh, V. (2018). Reliability-based optimum seismic design of RC frames by a metamodel and metaheuristics. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28.
<https://doi.org/10.1002/tal.1552>
- Kefal, A., Sohoul, A., Oterkus, E., Yildiz, M., & Suleman, A. (2019). Topology optimization of cracked structures using peridynamics. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 31, 1645–1672.
<https://doi.org/10.1007/s00161-019-00830-x>
- Liu, W., Zhang, H., Rasmussen, K., & Yan, S. (2019). System-based limit state design criterion for 3D steel frames under wind loads. *Journal of Constructional Steel Research*.
<https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2019.02.015>
- Marinković, D., & Zehn, M. (2019). Survey of Finite Element Method-Based Real-Time Simulations. *Applied Sciences*.
<https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-8816>
- Mojtabaei, S. M., Kabir, M., Hajirasouliha, I., & Kargar, M. (2018). Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames. *Journal*

- of Constructional Steel Research, 143, 18–31. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2017.12.013>
- Peña, J., Latorre, A., & Jérusalem, A. (2019). SoftFEM: The Soft Finite Element Method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 118, 606–630. <https://doi.org/10.1002/nme.6029>
- Schneider, T., Hu, Y., Gao, X., Dumas, J., Zorin, D., & Panozzo, D. (2019). A Large-Scale Comparison of Tetrahedral and Hexahedral Elements for Solving Elliptic PDEs with the Finite Element Method. ACM Transactions on Graphics (TOG), 41, 1–14. <https://doi.org/10.1145/3508372>
- Sofias, C., & Tzourmakliotou, D. (2018). Reduced Beam Section (RBS) Moment Connections-Analytical Investigation Using Finite Element Method. Civil Engineering Journal. <https://doi.org/10.28991/CEJ-0309170>
- Tawk, C., & Alici, G. (2020). Finite Element Modeling in the Design Process of 3D Printed Pneumatic Soft Actuators and Sensors. Robotics, 9, 52. <https://doi.org/10.3390/robotics9030052>
- Torres-Rodas, P., Zareian, F., & Kanvinde, A. (2018). Seismic Demands in Column Base Connections of Steel Moment Frames. Earthquake Spectra, 34, 1383–1403. <https://doi.org/10.1193/062317EQS127M>
- Ye, J., Mojtabaei, S. M., & Hajirasouliha, I. (2019). Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism. Journal of Constructional Steel Research. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2019.01.013>