



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i2.4385>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

Design and modeling of a prequalified, stiffened end plate metal connection in SolidWorks

Projeto e modelagem de uma conexão metálica de placa final pré-qualificada e reforçada no SolidWorks

Javier Alejandro Cevallos-Rosado ^I
jcevallos1864@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-7047-6153>

Marcos Geovanny Zevallos-Loor ^{II}
marcos.zevallos@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7979-8363>

Correspondencia: jcevallos1864@utm.edu.ec

***Recibido:** 11 de marzo de 2025 ***Aceptado:** 02 de abril de 2025 * **Publicado:** 27 de mayo de 2025

- I. Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Manabí, Ecuador.
- II. Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Estructura, Docente en Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Manabí, Ecuador.

Resumen

El presente trabajo está basado en el diseño y modelado de una conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada (8ES) con la ayuda del software SolidWorks. Dichas conexiones se dan en estructuras de acero sismo-resistentes y tienen la capacidad de disipar de forma eficiente los momentos flectores que se producen en las vigas que forman la conexión; esto asegura que las estructuras sean dúctiles y respondan de forma segura frente a cargas. Se tiene como finalidad desarrollar una conexión que cumpla con las provisiones sísmicas de la norma ANSI/AISC 358-16. Para ello es necesario tomar en cuenta los límites paramétricos que da la norma, tanto para vigas como para columnas, como también el uso de materiales de alta resistencia como el acero A572 Grado 50, pernos A490 y soldaduras E7018, empleando una adecuada modelación de los elementos que conforman la conexión y de las cargas a las que se someterá la misma. Los resultados indican que la conexión diseñada se encuentra en condiciones de poder desarrollar una buena distribución de esfuerzos que se espera obtener a partir de cargas esperadas; por ende, los resultados obtenidos validan la funcionalidad de la conexión estructuralmente.

Palabras claves: Conexión metálica; placa de extremo; SolidWorks.

Abstract

This work is based on the design and modeling of a prequalified stiffened end plate (SEP) metallic connection using SolidWorks software. These connections are used in earthquake-resistant steel structures and are capable of efficiently dissipating bending moments occurring in the beams that form the connection; this ensures that the structures are ductile and respond safely to loads. The objective is to develop a connection that complies with the seismic provisions of the ANSI/AISC 358-16 standard. This requires considering the parametric limits established by the standard for both beams and columns, as well as the use of high-strength materials such as A572 Grade 50 steel, A490 bolts, and E7018 welds, employing adequate modeling of the elements that make up the connection and the loads to which it will be subjected. The results indicate that the designed connection is capable of developing the proper stress distribution expected from the expected loads; therefore, the results obtained validate the structural functionality of the connection.

Keywords: Metal connection; end plate; SolidWorks.

Resumo

Este trabalho baseia-se no projeto e modelagem de uma placa de extremidade reforçada (8ES) do tipo conexão metálica pré-qualificada com o auxílio do software SolidWorks. Essas ligações são encontradas em estruturas de aço resistentes a terremotos e têm a capacidade de dissipar eficientemente os momentos de flexão que ocorrem nas vigas que formam a ligação; Isso garante que as estruturas sejam dúcteis e respondam com segurança às cargas. O objetivo é desenvolver uma conexão que esteja em conformidade com as disposições sísmicas da norma ANSI/AISC 358-16. Para isso, é necessário levar em consideração os limites paramétricos previstos pela norma, tanto para vigas quanto para pilares, bem como a utilização de materiais de alta resistência como o aço A572 Grau 50, os parafusos A490 e as soldas E7018, utilizando uma modelagem adequada dos elementos que compõem a ligação e das cargas às quais ela será submetida. Os resultados indicam que a conexão projetada é capaz de desenvolver uma boa distribuição de tensões que se espera obter a partir das cargas esperadas; Portanto, os resultados obtidos validam estruturalmente a funcionalidade da conexão.

Palavras-chave: Conexão metálica; placa final; SolidWorks.

Introducción

En años recientes, los fenómenos naturales se han hecho evidentes a escala global, particularmente los sucesos telúricos que causan pérdidas humanas y materiales. Las áreas más vulnerables a terremotos en América se encuentran en la región del océano Pacífico, iniciando desde la falla de San Andrés en California hasta Costa Rica, continuando desde Colombia hasta Chile, siendo nuestra región propensa a sucesos telúricos que impactan directamente en las edificaciones (García Freire & Zevallos Loor, 2024). Ante la amenaza sísmica que posee el Ecuador por la zona en la que se encuentra, es indispensable adoptar técnicas que nos brinden seguridad ante estos eventos.

La evolución de los códigos de diseño ha hecho posible la elaboración de conexiones de estructuras metálicas precalificadas, muy adecuadas en cuanto a su comportamiento estructural, por medio de simulaciones numéricas o bien por medio de ensayos experimentales de laboratorio. La normativa ANSI/AISC 358-16 (2016) presenta a su vez la información indispensable a la hora de efectuar el diseño para una conexión metálica precalificada determinada, en función de la resistencia, la rigidez y la ductilidad.

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

Las conexiones metálicas son en la actualidad de vital importancia dentro del diseño estructural a la hora de garantizar la seguridad y el comportamiento durante eventos sísmicos en estructuras de acero (López Salamea & Maldonado Noboa, 2022). En especial, las conexiones a momento tipo placa extremo, las cuales han llegado a demostrar que logran transmitir cargas y controlar el comportamiento plástico de dichas estructuras durante un evento sísmico, la cual incorpora rigidizadores en la placa para mejorar la transmisión de fuerzas y el confinamiento en la zona de la rótula plástica (Pannillo et al. 2018). Según Ramírez Espitia & Molina Herrera (2020), las conexiones metálicas no solo deben tener confiabilidad en el rango elástico, sino que también deben tener capacidad para disipar energía en rango inelástico, con el fin de asegurar estructuras seguras que, tras un suceso sísmico, permitan la evacuación de las personas antes del derrumbe, o experimentar un nivel de daño que no perjudique su operación tras un desastre.

El modelado y análisis de este tipo de conexión a través del software SolidWorks permite estudiar el comportamiento que presenta dicho elemento estructural a través de simulaciones que nos facilita el programa. Efectuando el diseño de cada componente de la conexión para después, por medio de la simulación de elementos finitos, realizar el estudio de desplazamientos, tensiones, zonas críticas y factores de seguridad, además de corroborar el cumplimiento de los valores de diseño obtenidos correspondientes a las normas establecidas (Cruz et al. 2020).

La finalidad de esta investigación es la realización del diseño y modelado en SolidWorks de una conexión metálica precalificada de tipo placa de extremo rigidizada para un pórtico de acero resistente a momento con capacidad especial de disipación de energía (PRM-DES), según los criterios del ANSI/AISC 358-16 (2016). Este es un trabajo que pretende contribuir al desarrollo de metodologías que sean prácticas y que sean fiables para la verificación de conexiones metálicas en estructuras que estén sometidas a cargas sísmicas (Pannillo et al. 2020).

Métodos y Materiales

El diseño de una conexión se lleva a cabo mediante el cálculo de la resistencia de cada uno de los componentes que la conforman, con relación a las características de falla que pueda tener. El fallo en una conexión puede aparecer en los componentes conectados, en los elementos de conexión o en los conectores; por lo tanto, es necesario evaluar la resistencia de cada uno de los componentes de la conexión metálica.

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

Como se mencionó anteriormente, este trabajo se centrará en una conexión metálica tipo placa de extremo de ocho pernos con rigidizador (8ES), como se muestra en la figura 1; estas se utilizan para sistemas basados en pórticos de acero resistentes a momentos.

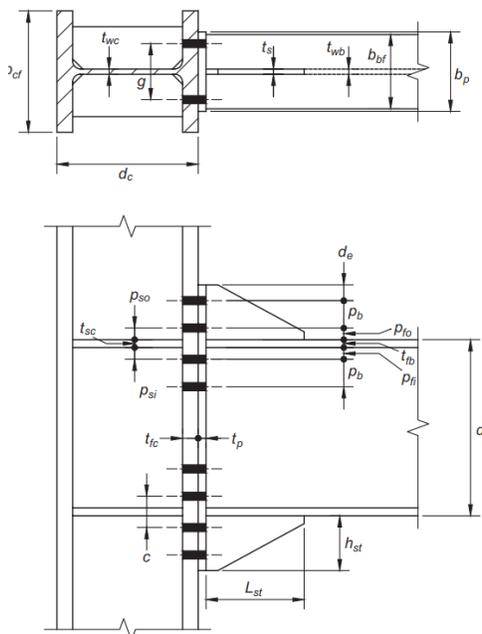


Figura 1: Geometría de placa de extremo rigidizada con ocho pernos (8ES)

Modelación de la estructura

Como se observa en las figuras 2 y 3, la estructura analizada corresponde a un edificio con un sistema estructural aporricado; esta estructura es regular tanto en planta como en elevación. La vista en planta está conformada por cinco ejes en sentido X y cuatro ejes en sentido Y; por otro lado, la vista en elevación nos muestra que la estructura posee cinco niveles con una altura de tres metros cada uno. Como último punto a señalar, el nudo escogido para realizar la conexión metálica es el nudo 1C.

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

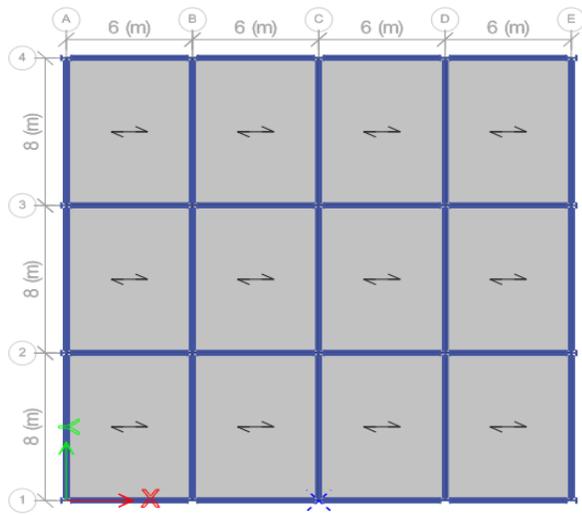


Figura 2: Vista en planta de la estructura

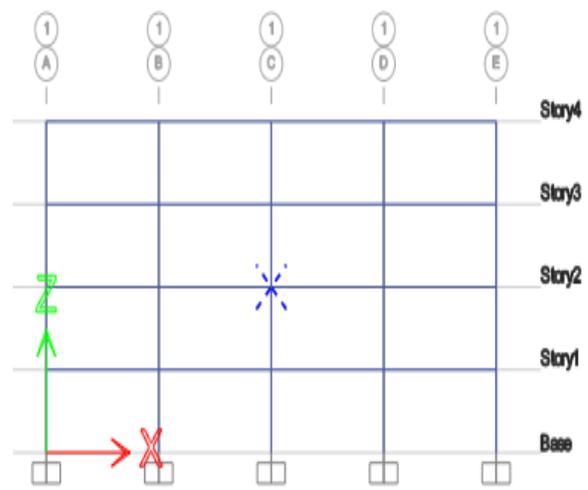


Figura 3: Vista en elevación de la estructura

Materiales

Como se muestra en la tabla 1, la selección de materiales para el diseño de la conexión metálica precalificada se basó en los requisitos establecidos por las normas ANSI/AISC 358-16 (2016) y ANSI/AISC 341-16 (2016), que regulan el comportamiento de estructuras de acero en condiciones sísmicas.

Elemento	Material	F_y/F_{nt} (MPa)	F_u (MPa)	E (MPa)	R_y	R_t
Laminas	ASTM A572 Gr. 50	345	450	200000	1.1	1.1
Soldaduras	E7018	400	480	N/A	N/A	N/A
Pernos	A490	780	1040	N/A	N/A	N/A

Tabla 1: Propiedades de los materiales usados

Límites de la precalificación

La precalificación de conexiones metálicas es un componente clave del diseño de estructuras, puesto que garantiza que se seleccione la conexión apta para llevar determinadas cargas y momentos en los márgenes establecidos por las normativas de diseño. Para la conexión de placas de extremo empernadas, el concepto de precalificación establece los márgenes dentro de los que se asegura un rendimiento satisfactorio de esta conexión sin necesidad de recurrir a un análisis detallado y de

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

pruebas adicionales. La evaluación de estos márgenes permite simplificar el proceso de diseño asegurando que la conexión es fiable y eficiente.

- **Límites para las vigas**

Las vigas deberán ser miembros laminados de aleta ancha o miembros ensamblados en I; es por ello que para este trabajo se ha escogido un perfil W 610x125 para la viga, la cual tiene las características geométricas y mecánicas que se mostrarán en la tabla 2.

Propiedades	
Peso	125 kg/m
Peralte (d_b)	612 mm
Ancho del patín (b_{fb})	229 mm
Espesor del alma (t_{wb})	11.90 mm
Espesor del patín (t_{fb})	19,60 mm
Módulo de sección plástica (Z_{xb})	3660000 mm ³

Tabla 2: Propiedades de la viga W 610x125

Esta norma también nos muestra límites en cuanto a las dimensiones de la viga, los cuales están directamente relacionados con los ensayos de las conexiones; el rango de parámetros establecidos por la norma se mostrará en la tabla 3.

Ocho pernos con rigidizadores (8ES)			
Parámetro	Mínimo (mm)	Utilizado (mm)	Máximo (mm)
t_{fb}	14	19.60	25
b_{fb}	190	229	311
d_b	457	612	914
t_p	19	28.60	64
b_p	229	270	381
g	127	140	152
p_{fi}, p_{fo}	41	50	51
p_b	89	95	95
d_e	N/A	60	N/A
t_{fb} = Espesor del patín de la viga, mm b_{fb} = Ancho del patín de la viga, mm d_b = Peralte de la viga que se conecta, mm t_p = Espesor de la placa de extremo, mm b_p = Ancho de la placa de extremo, mm g = Distancia horizontal entre pernos, mm			

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

p_{fi}	= Distancia vertical desde la cara interior del patín de la viga hasta el eje de pernos más cercano, mm
p_{fo}	= Distancia vertical desde la cara exterior del patín de la viga hasta el eje de pernos más cercano, mm
p_b	= Distancia vertical entre ejes de pernos (8ES), mm
d_e	= Distancia del borde de la placa al primer eje de pernos, mm

Tabla 3: Limitaciones paramétricas de la precalificación

• **Límites para las columnas**

A caso contrario de las vigas, las columnas que se utilicen para conexiones a momento de placa de extremo rigidizada no tienen exigencias particulares; tomando en cuenta esto, para este trabajo se ha escogido un perfil W 460x286 para la columna, la cual tiene las características geométricas y mecánicas que se mostrarán en la tabla 4.

Propiedades	
Peso	286 kg/m
Peralte (d_c)	518 mm
Ancho del patín	292 mm
Espesor del alma	24.40 mm
Espesor del patín	44.40 mm
Módulo de sección plástica	7280000 mm ³

Tabla 4: Propiedades de la columna W 460x286

Una vez escogidos los perfiles de viga y columna a utilizar, se debe verificar la relación entre la luz libre y el peralte de la viga; para sistemas con capacidad especial de disipación de energía (PRM-DES) deberá ser igual o mayor a 7, como se muestra en la ecuación (1).

$$\frac{L_x - d_c}{d_b} = \frac{6000 \text{ mm} - 518 \text{ mm}}{612 \text{ mm}} = 8.958 \geq 7 \quad (1)$$

Procedimiento de diseño

El procedimiento se basa en garantizar que la rótula plástica se alcance en la viga, que es el único elemento para el cual se permitirá que se genere una rótula plástica, mientras que el resto de los elementos (placas, rigidizadores y columna) deben estar en el rango elástico. Para ello se parte del cálculo del momento máximo probable, considerando factores de sobrerresistencia, con el que se dimensionan los elementos de la conexión con el fin de dar respuesta a esas demandas sin llegar a la falla.

• Diseño del rigidizador

El rigidizador es un elemento estructural, el cual conecta la viga con la placa de extremo por medio de soldaduras; estos se utilizan para reforzar la zona de la conexión en una unión viga-columna. Su función principal es evitar deformaciones locales como el pandeo de la columna. En conexiones precalificadas, los rigidizadores son fundamentales para garantizar que la deformación y la fluencia ocurran en la viga, y no en la columna ni en la zona de la unión.

Paso 1. Geometría del rigidizador

Una vez escogidos los parámetros de la placa de extremo, los cuales tienen que estar dentro del rango que solicita la norma, como se muestra en la tabla 3, podemos comenzar calculando la altura del rigidizador con la ayuda de la ecuación (2), para luego calcular su longitud por medio de la ecuación (3).

$$h_{st} = d_e + p_b + p_{fo} = 60 \text{ mm} + 95 \text{ mm} + 50 \text{ mm} = 205 \text{ mm} \quad (2)$$

$$L_{st} = \frac{h_{st}}{\tan 30} = \frac{205 \text{ mm}}{\tan 30} = 360 \text{ mm} \quad (3)$$

Paso 2. Espesor del rigidizador

El espesor del rigidizador deberá ser, como mínimo, el mayor valor entre la ecuación (4) y (5).

$$t_{bw} * \left(\frac{F_{yb}}{F_{yr}} \right) = 11.90 \text{ mm} * \left(\frac{345 \text{ MPa}}{345 \text{ MPa}} \right) = 11.90 \text{ mm} \quad (4)$$

$$\frac{h_{st}}{0.56 * \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}}} = \frac{205 \text{ mm}}{0.56 * \sqrt{\frac{200000 \text{ MPa}}{345 \text{ MPa}}}} = 15.20 \text{ mm} \quad (5)$$

En este caso, el mayor valor nos dio en la ecuación (5), con un valor de 15.20 mm, por lo cual asumiremos un espesor de placa comercial de 5/8 in o 15.90 mm.

Paso 3. Ubicación de la rótula plástica

Aún no conocemos el espesor de la placa de extremo; sin embargo, podríamos asumir un espesor de placa de unos 40 mm para determinar la ubicación de la rótula plástica con la ecuación (6).

$$S_h = L_{st} + t_p = 360 \text{ mm} + 40 \text{ mm} = 400 \text{ mm} \quad (6)$$

Paso 4. Modelado del rigidizador

Los rigidizadores deberán tener arranques de 25 mm de largo, como también un corte de 20 mm en la esquina donde se encuentran el patín de la viga y la placa de extremo para proporcionar un espacio

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks libre entre el rigidizador y la soldadura. Una vez diseñado el rigidizador, se procede a modelarlo en el software SolidWorks, como se muestra en la figura 4.

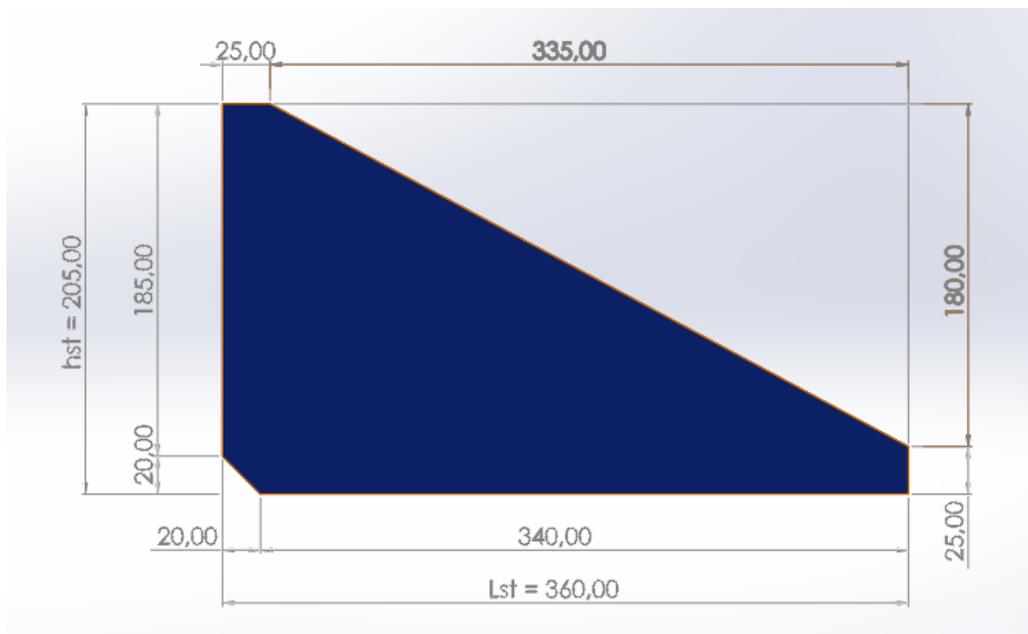


Figura 4: Modelado del rigidizador en SolidWorks

- **Cálculo del momento en la cara de la columna**

Es el momento flector que llega a la cara de la columna como consecuencia del diseño de una conexión metálica por capacidad. Este es el valor que debe ser capaz de resistir la conexión como resultado del momento máximo probable de la viga. Este momento es el que determina la dimensión de la placa de extremo y sus pernos, ya que muestra los esfuerzos que los componentes de la conexión deben ser capaces de resistir sin entrar en falla, es decir, sin que alguno de sus elementos entre en condiciones de fluencia.

Paso 1. Momento máximo probable

Para encontrar este valor, aplicamos la ecuación (8), en donde se multiplica el momento plástico por coeficientes de sobrerresistencia, como el coeficiente de variación del límite de fluencia R_y , el cual se muestra en la tabla 1, y el factor de endurecimiento por deformación C_{pr} , el cual se calculará con la ecuación (7). En resumen, el momento máximo probable M_{pr} se refiere a la capacidad de flexión de la viga; esta capacidad se utiliza para determinar el cortante, de modo que se busca que la falla sea por flexión en lugar de corte. Este momento máximo probable será el que se utilizará en la práctica del diseño por la capacidad, el cual permite que la conexión soporte toda la fuerza que puede ser

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

generada por la viga antes de que esta tenga la posibilidad de romperse, favoreciendo un comportamiento seguro y dúctil.

$$C_{pr} = \frac{F_{yb} + F_{ub}}{2 * F_{yb}} = \frac{345 \text{ MPa} + 450 \text{ MPa}}{2 * 345 \text{ MPa}} = 1.15 \leq 1.2 \quad (7)$$

$$M_{pr} = F_{yb} * Z_{xb} * R_y * C_{pr} = 345000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 3.66 \times 10^{-3} \text{ m}^3 * 1.1 * 1.15 \\ = 1600.34 \text{ kN} * \text{m} \quad (8)$$

Paso 2. Distancia entre rótulas

Es la distancia que existe entre rótulas plásticas o, en otras palabras, la separación longitudinal que se genera entre las zonas de fluencia que aparecen en los extremos de la viga que se somete a un momento flector; esta distancia se calcula con la ecuación (9).

$$L_h = L_x - 2(S_h) - 2(d_c) = 6000 \text{ mm} - 2(400 \text{ mm}) - 2(518 \text{ mm}) = 4164 \text{ mm} \quad (9)$$

Paso 3. Fuerza cortante en el extremo de la viga

Es la fuerza generada por el momento máximo probable en la rótula plástica y el cortante gravitatorio que llega a la viga. Con la ayuda del ETABS, en donde hicimos el modelamiento estructural, obtenemos este cortante gravitatorio para calcular la fuerza cortante en el extremo de la viga del lado izquierdo con la ecuación (10) y del lado derecho con la ecuación (11).

$$V_{ui} = \frac{2 * M_{pr}}{L_h} + V_{grv} = \frac{2 * 1600.34 \text{ kN} * \text{m}}{4.16 \text{ m}} + 79.97 \text{ kN} = 848.63 \text{ kN} \quad (10)$$

$$V_{ud} = \frac{2 * M_{pr}}{L_h} - V_{grv} = \frac{2 * 1600.34 \text{ kN} * \text{m}}{4.16 \text{ m}} - 79.97 \text{ kN} = 688.68 \text{ kN} \quad (11)$$

Paso 4. Momento en la cara de la columna

Una vez obtenidos los cortantes en el extremo de la viga, se pueden calcular los momentos en las caras de la columna, tal y como lo hicimos con los cortantes. Tenemos que calcular el momento en las dos caras, del lado izquierdo con la ecuación (12) y el derecho con la ecuación (13), escogiendo el mayor de ambos como el momento de diseño para cálculos posteriores.

$$M_{fi} = M_{pr} + V_{ui} * S_h = 1600.34 \text{ kN} * \text{m} + 848.63 \text{ kN} * 0.4 \text{ m} \\ = 1939.79 \text{ kN} * \text{m} \quad (12)$$

$$M_{fd} = M_{pr} + V_{ud} * S_h = 1600.34 \text{ kN} * \text{m} + 688.68 \text{ kN} * 0.4 \text{ m} \\ = 1875.81 \text{ kN} * \text{m} \quad (13)$$

- **Diseñamos la placa de extremo**

La placa de extremo forma parte fundamental de la conexión a momento emperrada, la cual se sitúa en el extremo de la viga por medio de la soldadura y se atornilla a la columna, pues su función fundamental es la de transmitir las solicitaciones de flexión y cortante de la viga a la columna de forma segura y eficaz.

Paso 1. Valores geométricos de la placa de extremo

Cuando hablamos de los valores geométricos de la placa de extremo, estamos hablando del espesor, del alto y ancho de la placa, de la disposición de los pernos y de las distancias a los bordes. Estos valores piensan garantizar que la placa resista los esfuerzos generados por el momento máximo probable, de forma que no se vean presentados los diferentes tipos de fallas que pueden tener lugar por aplastamiento, corte, tracción y pandeo. La norma ANSI/AISC 358-16 (2016) prevé rangos para estas dimensiones, a fin de garantizar un adecuado comportamiento y de asegurar la compatibilidad para este tipo de diseño por capacidad; los valores geométricos escogidos para la placa de extremo se mostraron en la tabla 3.

Paso 2. Aferencia de pernos

Como ya sabemos los valores geométricos de la placa de extremo, calculamos la aferencia debajo del último perno que está a tensión con la ecuación (14).

$$s = \frac{1}{2} * \sqrt{b_p * g} = \frac{1}{2} * \sqrt{270 \text{ mm} * 140 \text{ mm}} = 97.21 \text{ mm} \quad (14)$$

Luego se determina la distancia de palanca de cada uno de los pernos de la placa extremo con las ecuaciones (15), (16), (17) y (18).

$$h_1 = d_b - \frac{t_{fb}}{2} + p_{fo} + p_b = 612 \text{ mm} - \frac{19.60 \text{ mm}}{2} + 50 \text{ mm} + 95 \text{ mm} \quad (15)$$
$$= 747.20 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_1 - p_b = 747.20 \text{ mm} - 95 \text{ mm} = 652.20 \text{ mm} \quad (16)$$

$$h_3 = d_b - \frac{3 * t_{fb}}{2} - p_{fi} = 612 \text{ mm} - \frac{3 * 19.60 \text{ mm}}{2} - 50 \text{ mm} \quad (17)$$
$$= 532.60 \text{ mm}$$

$$h_4 = h_3 - p_b = 532.60 \text{ mm} - 95 \text{ mm} = 437.60 \text{ mm} \quad (18)$$

Paso 3. Altura total de la placa

Esta altura se determina considerando la geometría de la placa, como se muestra en la ecuación (19).

$$H_p = 2 * \left(\frac{d_b}{2} + p_{fo} + p_b + d_e \right) = 2 * \left(\frac{612 \text{ mm}}{2} + 50 \text{ mm} + 95 \text{ mm} + 60 \text{ mm} \right) \quad (19)$$

$$= 1022 \text{ mm}$$

Paso 4. Diámetro de pernos

Una vez diseñada la placa de extremo, se tiene que calcular el diámetro que tendrán los pernos, tal y como se muestra en la ecuación (20). Como se indicó en la tabla 1, los pernos deben ser de alta resistencia; en este caso serán A490.

$$d_{preq} = \sqrt{\frac{2 * M_f}{\pi * \phi_n * F_{nt} * (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 * 1939790000 \text{ N} * \text{mm}}{3.14 * 0.9 * 780 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * (747.20 \text{ mm} + 652.20 \text{ mm} + 532.60 \text{ mm} + 437.60 \text{ mm})}} \quad (20)$$

$$= 27.25 \text{ mm}$$

Como ya se sabe el diámetro requerido para la conexión, se procede a escoger un diámetro de perno comercial; en este caso se escogió un diámetro de 1 1/8 in o 28.60 mm.

Paso 5. Mecanismo de línea de falla de la placa de extremo

Para poder calcular este valor, la norma nos muestra 2 casos que hay que tomar en cuenta, en donde nuestros valores nos dan a conocer que estamos en el caso 1; por ende, aplicamos la ecuación (21). A continuación, se observan los casos en la tabla 5.

Caso 1 ($d_e \leq s$)	$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{2d_e} \right) + h_2 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) + h_3 \left(\frac{1}{p_{fi}} \right) + h_4 \left(\frac{1}{s} \right) \right]$ $+ \frac{2}{g} \left[h_1 \left(d_e + \frac{3p_b}{4} \right) + h_2 \left(p_{fo} + \frac{p_b}{4} \right) + h_3 \left(p_{fi} + \frac{3p_b}{4} \right) + h_4 \left(s + \frac{p_b}{4} \right) \right] + g$
Caso 2 ($d_e > s$)	$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{s} \right) + h_2 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) + h_3 \left(\frac{1}{p_{fi}} \right) + h_4 \left(\frac{1}{s} \right) \right]$ $+ \frac{2}{g} \left[h_1 \left(s + \frac{p_b}{4} \right) + h_2 \left(p_{fo} + \frac{3p_b}{4} \right) + h_3 \left(p_{fi} + \frac{p_b}{4} \right) + h_4 \left(s + \frac{3p_b}{4} \right) \right] + g$
$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g}$	Nota: Si $p_{fi} > s$, use $p_{fi} = s$

Tabla 5: Parámetros del mecanismo de línea de falla para la placa de extremo

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

$$\begin{aligned}
 Y_p = & \frac{270 \text{ mm}}{2} \left[747.20 \text{ mm} \left(\frac{1}{2 \cdot 60 \text{ mm}} \right) + 652.20 \text{ mm} \left(\frac{1}{50 \text{ mm}} \right) + 532.60 \text{ mm} \left(\frac{1}{50 \text{ mm}} \right) + \right. \\
 & 437.60 \text{ mm} \left. \left(\frac{1}{97.21 \text{ mm}} \right) \right] + \frac{2}{140 \text{ mm}} \left[747.20 \text{ mm} \left(60 \text{ mm} + \frac{3 \cdot 95 \text{ mm}}{4} \right) + \right. \\
 & 652.20 \text{ mm} \left(50 \text{ mm} + \frac{95 \text{ mm}}{4} \right) + 532.60 \text{ mm} \left(50 \text{ mm} + \frac{3 \cdot 95 \text{ mm}}{4} \right) + \\
 & \left. 437.60 \text{ mm} \left(97.21 + \frac{95 \text{ mm}}{4} \right) \right] + 140 \text{ mm} = 8554.13 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{21}$$

Paso 6. Espesor de la placa extremo

Tal y como se realizó el cálculo del diámetro requerido para los pernos, ahora se hace lo mismo para el espesor de la placa de extremo, calculando un espesor requerido como se muestra en la ecuación (22), para luego elegir un espesor comercial.

$$t_{p \text{ req}} = \sqrt{\frac{1.11 \cdot M_f}{\phi_d \cdot F_{yp} \cdot Y_p}} = \sqrt{\frac{1.11 \cdot 1939790000 \text{ N} \cdot \text{mm}}{1 \cdot 345 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 8554.13 \text{ mm}}} = 27.01 \text{ mm} \tag{22}$$

Entonces tenemos un diámetro requerido de 27.01 mm, por lo cual escogemos un espesor de placa comercial de 1 1/8 in o 28.60 mm.

Paso 7. Modelado de la placa de extremo

Una vez conocida la geometría y el espesor de la placa, como también el diámetro de los pernos para la conexión, se procede a modelarla en el software SolidWorks, mostrando el resultado en la figura 5.

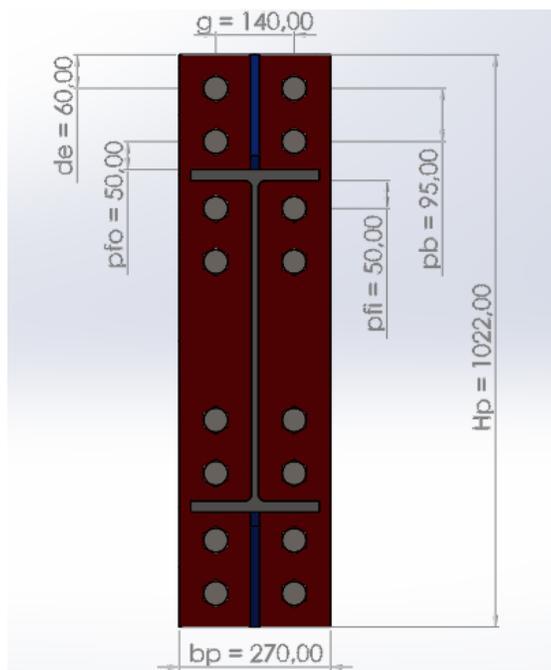


Figura 5: Modelado de la placa de extremo en SolidWorks

Resultados y discusión

Una vez diseñados todos los elementos que componen la conexión metálica precalificada, se procede a ensamblarlos en el software SolidWorks bajo los criterios de El Gran Libro de SolidWorks (Gómez González, 2019), el cual nos da la información suficiente para realizar este trabajo y su posterior simulación. La conexión se analizó bajo la acción del momento máximo probable $Mpr = 1600.34 \text{ kN} \cdot \text{m}$ y los cortantes que son producidos por este momento $Vui = 848.63 \text{ kN}$ y $Vud = 688.68 \text{ kN}$, con el fin de avalar su comportamiento estructural y de comprobar la creación de la rótula plástica en la viga, así como lo indica el criterio de diseño por capacidad.

La evaluación de tensiones llevada a cabo en SolidWorks muestra que se obtiene un valor de esfuerzo máximo de $\sigma = 425.35 \text{ MPa}$ que recae únicamente en la viga justo después de los rigidizadores, es decir, el punto donde decidimos que apareciera la rótula plástica, como se muestra en la figura 6, específicamente en la zona donde se une el patín con el alma de la viga, como se observa en la figura 7.

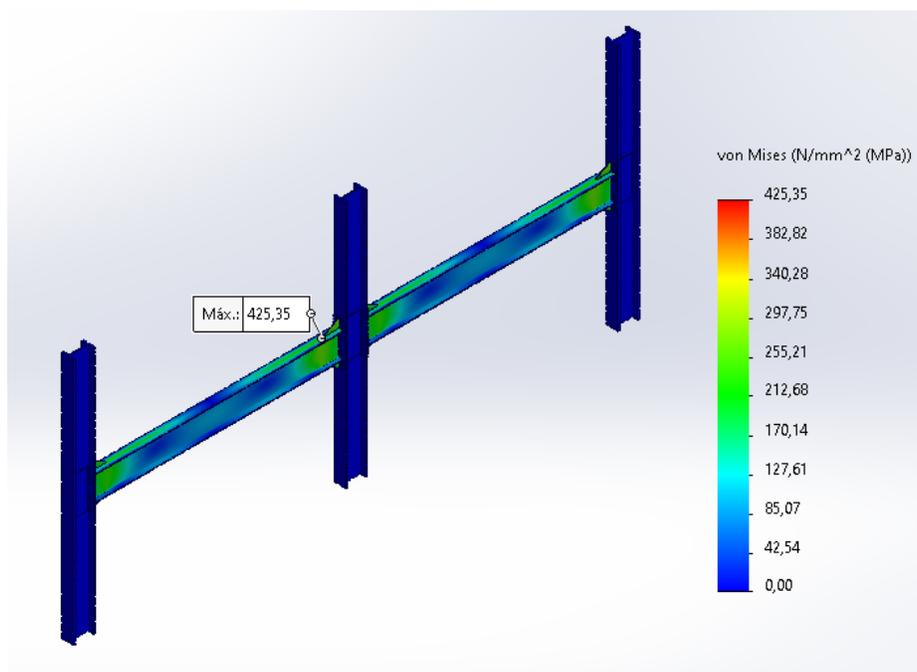


Figura 6: Tensiones (von Mises) de la conexión

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

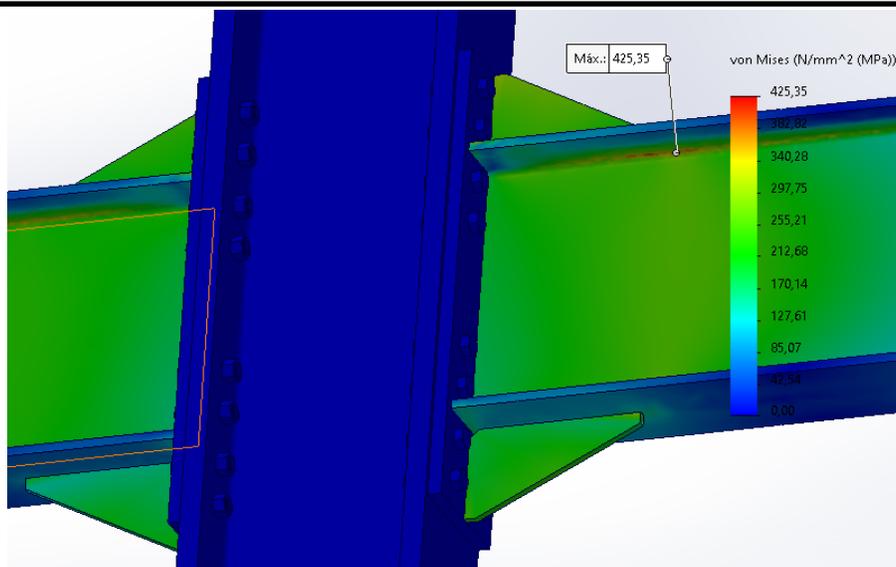


Figura 7: Ubicación del máximo valor de tensión (von Mises) de la conexión

En lo que respecta a las deformaciones unitarias, se obtuvo un valor máximo de $\varepsilon = 0.001843$ en la zona de la viga donde también se concentra el esfuerzo máximo, como se observa en la figura 8. En el caso de los demás componentes de la conexión, las deformaciones se mantienen por debajo de este valor, resultado coherente con el sistema de deformación elástica establecido para el acero A572 Gr 50, pues el módulo de elasticidad de este acero se establece en $E = 200.000 \text{ MPa}$, razón por la cual la deformación unitaria elástica se estima en $\varepsilon = 0.001725$, como se demuestra en la ecuación (23).

$$\varepsilon_y = \frac{F_y}{E} = \frac{345 \text{ MPa}}{200000 \text{ MPa}} = 0.001725 \quad (23)$$

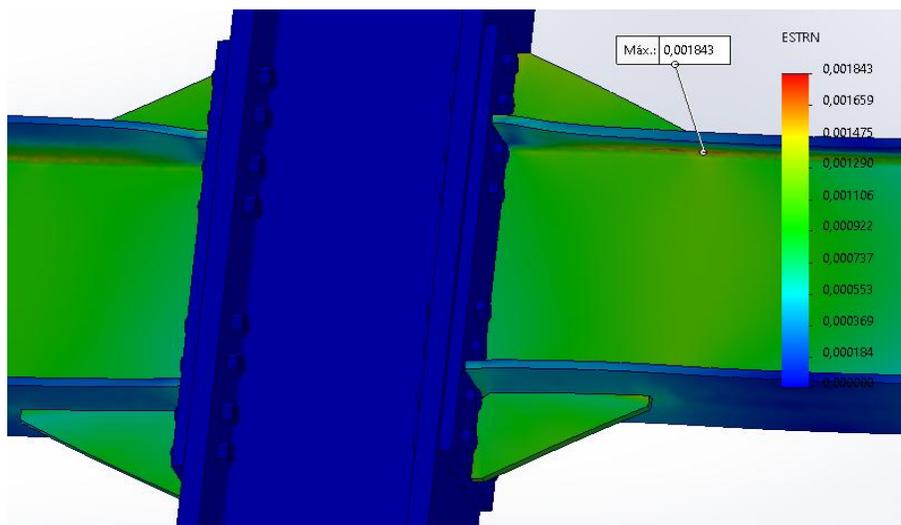


Figura 8: Ubicación del máximo valor de deformación unitaria de la conexión

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

En lo que respecta a los desplazamientos, el máximo que obtuvo el modelo fue de 3.02 mm en el extremo de la viga. La deformación es moderada y define un comportamiento que se alinea con la existencia de una rótula plástica, ya que el máximo desplazamiento se localiza justo allí; además, se puede observar que los desplazamientos aparecen en ambos extremos de la viga sin incurrir en la pérdida de estabilidad global de la conexión, como se muestra en la figura 9.

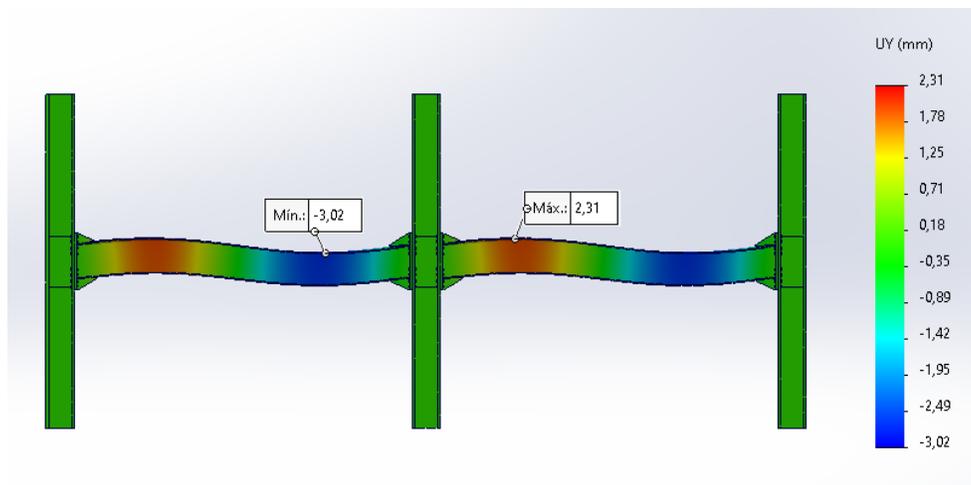


Figura 9: Desplazamientos de la conexión

Conclusiones

El presente trabajo evaluó el comportamiento de una conexión metálica precalificada de tipo placa de extremo rigidizada con ocho pernos (8ES), aplicando un modelo tridimensional en SolidWorks para la evaluación de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos bajo la aplicación del momento probable. El objetivo principal fue validar el comportamiento plástico esperado en la viga, así como el hecho de que los elementos integrantes de la conexión permanecieran en estado elástico según lo que se encuentra establecido en la norma AISC 358-16 en cuanto al diseño por capacidad.

El uso de placas de extremo para conexiones metálicas se presenta como una opción adecuada para la transferencia de los momentos flectores en uniones viga-columna, favoreciendo al reforzado y a los trabajos de prefabricación y de montaje en obra. Sin embargo, para conseguir un comportamiento estructural adecuado ante la influencia de acciones sísmicas, es necesario incluir rigidizadores a la placa que la refuercen, haciéndola resistir deformaciones locales y consiguiendo una mejor transferencia de esfuerzos a la columna. La incorporación de rigidizadores permitirá que la conexión

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

mantenga la rigidez estructural en condiciones severas, favoreciendo de tal forma el desarrollo de rótulas plásticas en zonas controladas (León Escobedo & Trueba Albino, 2020).

De esta forma, el análisis generó un esfuerzo máximo de $\sigma = 425.35 \text{ MPa}$ en la viga, que efectivamente supera el límite de fluencia $F_y = 345 \text{ MPa}$ y se sitúa cerca del esfuerzo último $F_u = 450 \text{ MPa}$ del acero A572 Grado 50, lo que evidencia que la viga ha entrado en una zona de fluencia o plastificación, cumpliendo la condición establecida para lograr la formación de rótula plástica en la viga. El resto de los elementos de la conexión, como las placas de extremo, los rigidizadores y las columnas, no alcanzan el límite de fluencia, estableciendo la coherencia de la jerarquía de resistencias, que es la que debe existir en un diseño que contempla el comportamiento dúctil.

Respecto a las deformaciones unitarias, en la viga se obtuvo un máximo de $\varepsilon = 0.001843$, mientras que el resto de la conexión mostró valores menores de $\varepsilon = 0.001725$, que confirma que la inelasticidad se produce exactamente en la viga. Este tipo de patrón de deformación es habitual en el inicio de una rótula plástica para la disipación de energía sísmica en conexiones que han sido precalificadas.

También se obtuvo un factor de seguridad de 1.05 sobre el esfuerzo último $F_u = 450 \text{ MPa}$ en la parte más crítica de la viga, lo que indica que la sección se encuentra cerca de la condición límite, mas no de provocar ruptura. Cabe recalcar que a la conexión se le aplicaron factores de sobrerresistencia que hicieron crecer el momento plástico de la viga; esto quiere decir que el valor de $F_y = 345 \text{ MPa}$ puede llegar más allá de lo establecido. Es así que la conexión presenta márgenes aceptables que le permitirían absorción de energía antes de provocar un posible fallo por fractura.

En líneas generales, los resultados alcanzados permiten llegar a la conclusión de que la conexión considerada cumple con los requerimientos para el comportamiento que la norma vigente demanda. El posicionamiento del esfuerzo máximo y de las deformaciones en la viga valida la hipótesis planteada para su diseño, el cual es permitir que sean las zonas dúctiles (las vigas) las que absorban la mayor parte de la energía, permitiendo que las zonas frágiles (placas de extremo, rigidizadores y columnas) se mantengan en el rango elástico.

Este trabajo reafirma la importancia del diseño por capacidad en conexiones que quedan sometidas a solicitaciones sísmicas, demostrando que con una adecuada configuración y la utilización de materiales apropiados queda garantizado el resultado de un comportamiento predecible y seguro, incluso para solicitaciones muy severas como las que provoca el momento máximo probable. Los

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks resultados que se presentan pueden formar una base para el desarrollo de estudios más detallados, optimización del diseño o validaciones experimentales.

Referencias

1. American Institute of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings.
2. American Institute of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 358-16 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications.
3. Cruz, H. J., Perea Olvera, T., & Varela Rivera, J. L. (2020). Comportamiento de la conexión tipo árbol con placa extremo extendida a partir de análisis con elementos finitos. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 24(2), 40-56. Obtenido de <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/179>
4. García Freire, J. P., & Zevallos Loor, M. G. (2024). Comportamiento de marcos de acero con arriostramientos excéntricos sometidos a secuencias sísmicas. *Revista Ciencia y Construcción*, 5(1), 76-87. Obtenido de <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/227>
5. Gómez González, S. (2019). *El gran libro de SOLIDWORKS*. Marcombo S.A.
6. León Escobedo, D., & Trueba Albino, J. C. (2020). Comparación entre 3 tipos alternativos de conexión en un edificio de acero bajo cargas sísmicas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(3), 1-12. doi:<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.028>
7. López Salamea, D. J., & Maldonado Noboa, J. S. (2022). Análisis de la capacidad de rotación de uniones metálicas soldadas con perfiles tubulares. *CIENCIAMATRIA*, 8(3), 2112-2138. doi:<https://doi.org/10.35381/cm.v8i3.950>
8. Pannillo, G., Chacón, M., & Riera, H. (2018). Desarrollo y programación de conexiones sismorresistentes tipo BFP y RBS conforme a la normativa ANSI/AISC 358-16. *Revista Gaceta Técnica*, 19(2), 51-68. doi:<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14002.50888>
9. Pannillo, G., Vielma, E., Ocanto, W., & Vielma, J. (2020). Desarrollo y programación de conexiones tipo end-plate 4E y 8ES conforme a la normativa ANSI/AISC 358-16. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(1), 39-60. doi:<https://doi.org/10.24133/riie.v25i1.1618>

Diseño y modelado de conexión metálica precalificada tipo placa de extremo rigidizada en SolidWorks

10. Ramírez Espitia, D. A., & Molina Herrera, M. (2020). Uso de conexiones tipo placa de extremo en columnas con perfiles tipo H. *Revista Ciencia Y Construcción*, 1(3), 3-11. Obtenido de <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/18>

©2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).