



**Desarrollo de una hoja electrónica para el diseño de conexiones precalificadas
del tipo placa de extremo sin rigidizador**

Pablo Giovani Ramírez Pérez

Jairo Alberto Restrepo Sánchez

Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Mauricio José Castro García, Magister of Science (MSc) in Civil Engineering

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Restrepo Sánchez & Ramírez Pérez, 2023)
Referencia	Restrepo Sánchez, J., & Ramírez Pérez, P. (2023). <i>Desarrollo de una hoja electrónica para el diseño de conexiones precalificadas del tipo placa de extremo sin rigidizador</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.



Centro de documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

“Dedico esta monografía a mi esposa Nayely y a nuestros hijos por su comprensión y paciencia durante el tiempo que nos llevó realizar este trabajo”.

“Este trabajo de grado lo dedico a mi familia, a aquellos ángeles que siempre están presentes en mi ser y a “Mi Hermosa, Andrea” por su apoyo incondicional, por la paciencia, por el amor y comprensión”.

Agradecimientos

Entre muchas personas, nuestros agradecimientos para el profesor asesor Mauricio José Castro García, por su tiempo, dedicación y su enorme ayuda. A todos los profesores y a Juan Carlos Vélez, Coordinador Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras.

A todos los compañeros de especialización y a nuestros demás familiares.

Tabla de contenido

Lista de Tablas	6
Lista de figuras	7
Resumen	8
Abstract	9
1 Estado del arte	10
2. Justificación.....	14
3 Objetivos	15
3.1 Objetivo general	15
3.2 Objetivos específicos	15
4 Marco teórico	16
4.1 Diseño por capacidad	16
4.2 Procedimiento general para el diseño sismorresistente.....	17
4.5 Factor de modificación de respuesta R	18
4.6 Acciones sísmicas para el diseño por capacidad.....	21
4.7 Pórticos resistentes a momento	22
4.8 Conexiones Precalificadas	23
4.9 Pórticos resistentes a momentos con capacidad especial de disipación de energía (PRM-DES).....	24
4.10 Conexiones Viga - Columna	24
4.11 Conexión con placa de extremo extendida apernada no rigidizada y rigidizada (END PLATE).....	25
5 Hoja de cálculo y manual de usuario, Conexión Precalificada tipo End-Plate de cuatro pernos no rigidizada	27
5.1 Normatividad de Referencia	27
5.2 Límites de precalificación	27

5.7 Procedimiento de diseño (AISC 358-16)	28
6 Conclusiones	30
7. Referencias Bibliográficas	31
8. Anexos.....	33

Lista de Tablas

Tabla 1. Conexiones precalificadas para pórticos resistentes a momento realizadas en Colombia. (Delgado y Cruz, 2017)	12
---	----

Lista de figuras

Ilustración 1. Tabla Esfuerzo – deformación	16
Ilustración 2. Etapas del procedimiento de diseño sismoresistente	17
Ilustración 3. Relación Corte Basal Vs Desplazamiento	18
Ilustración 4. Criterio de igual energía.....	19
Ilustración 5. Variación del factor R en función del periodo fundamental T.....	19
Ilustración 6. Desplazamientos de diseño, teniendo en cuenta el factor de amplificación de desplazamientos CD.....	20
Ilustración 7. Tipos de pórticos resistentes a momento	22
Ilustración 8. Mecanismo de deformación plástica con rotulación en vigas.....	24
Ilustración 9. Geometría de los tres tipos de conexión END PLATE.....	26
Ilustración 10. Límites de precalificación para conexiones de placa extendida tipo 4E, 4ES y 9 ES	27

Resumen

El diseño estructural requiere del uso de las herramientas tecnológicas que hagan más eficiente el trabajo de los profesionales y permitan diseños más confiables mediante la utilización de modelos matemáticos de computación.

En las edificaciones en estructura metálica se utilizan distintos tipos de sistemas estructurales entre los cuales se destacan los pórticos resistentes a momento (PRM), por su alta resistencia y ductilidad y su versatilidad arquitectónica. Este tipo de pórticos tienen la capacidad de disipar energía durante un evento sísmico a través de deformaciones inelásticas que ocurren principalmente a través de la formación de rótulas plásticas en las vigas.

El desempeño esperado de los PRM requiere que el diseño de las conexiones entre vigas y columnas garantice un comportamiento consistente con dicho desempeño. A este efecto, las especificaciones de diseño estructural establecen una serie de condiciones que deben cumplir dichas conexiones, cuya validez debe demostrarse a través de un proceso de calificación que involucra un estricto programa de ensayos. Aquí es donde el uso de conexiones precalificadas, que han pasado por un extensivo programa de ensayos y pueden usarse de manera segura y confiable, constituye un importante recurso para el diseñador.

En este trabajo de monografía se estudia el procedimiento de diseño para las conexiones precalificadas del tipo Placa de Extremo y se presenta una hoja de cálculo en Excel para el diseño de conexiones de este tipo.

Abstract

Structural design requires the use of technological tools in order to make the work of professionals more efficient and increase the reliability of designs through the use of mathematical computer models.

Different structural systems are used in structural steel buildings, the moment frames arising among the most used systems due to their high resistance, ductility and architectural versatility. These frames have the capacity to dissipate energy in a seismic event through inelastic deformations which occur mainly through formation of plastic hinges in the beams.

The expected performance of moment frames requires that the beam to column connections warrant a behavior that is consistent with such performance. To this purpose, structural design specifications set a series of conditions that the connections must comply, and the accomplishment of these conditions must be demonstrated through a qualification process that involves a strict tests program. It is at this point that the use of prequalified connection designs, which have passed an extensive qualification process and can be used in a secure and reliable manner, becomes an important resource for the design engineer.

This monograph presents the design procedure for the Four-Bolt Unstiffened End-Plate prequalified connection and includes a spreadsheet for the design of the same as an aid to design engineers.

1 Estado del arte

La precalificación de conexiones para estructuras metálicas surge a partir de los eventos sísmicos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995, los cuales presentaron magnitudes de 6.7 y 7.3 en la escala de Richter respectivamente. (Guerrero y Angarita, 2019); en estos sismos se evidenció un desempeño no satisfactorio de las conexiones dado que las solicitaciones de esfuerzo - deformación fueron superiores a los parámetros de diseño. (Torres y Cruz, 2012).

Es así como se iniciaron una serie de investigaciones con el fin de hallar las causas del mal desempeño de las conexiones en los sismos anteriormente nombrados y se encontró que las principales causas fueron: baja calidad de inspección durante la fabricación y montaje de las estructuras, deficiente calidad y diseño de las soldaduras, materiales inapropiados, entre otras. (Andrade, 2015).

De acuerdo con lo anterior fue necesario replantear las conexiones viga – columna en pórticos resistentes a momento. Para esto la FEMA realizó ensayos en elementos a escala real, teniendo en cuenta la rigidez, resistencia y capacidad de deformación de las conexiones, con el fin de establecer procedimientos de diseño y directrices y normas para reparar pórticos resistentes a momento. (Torres y Cruz, 2012).

De esta manera, la FEMA precalifica y recomienda 9 conexiones, entre soldadas y empernadas, para la unión viga – columna, las cuales fueron validadas de forma experimental. (Delgado, Garza, y Cruz, 2017). En dicho trabajo se incluyen especificaciones, procedimientos de diseño y limitaciones para cada tipo de conexión. (Guerrero y Angarita, 2019).

Con base en la experiencia de dichos sismos, la especificación AISC del año 2002 precisa los requisitos que se deben cumplir para precalificar una conexión. Posteriormente en el año 2010, la AISC actualiza la normatividad mediante la AISC 341-10 (Provisiones Sísmicas para Construcciones de Acero Estructural), actualización que fue incluida en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Capítulo F.3, y particularmente en la sección F.3.11- Ensayos Para Calificación De Conexiones. Para el mismo año se actualiza la norma AISC 358, Conexiones Precalificadas para Pórticos Resistentes a Momento con Capacidad Intermedia y Especial de Energía para Aplicaciones Sísmicas. (Torres y Cruz, 2012).

Algunas de las investigaciones a nivel internacional que se han desarrollado para calificar conexiones son: “The 2005 American Steel Structures Design Code”, realizada en los Estados Unidos por Reidar Bjorhovde, (Bjorhovde, 2006); “Seismic Behavior of Bolted Beam-to-Column Connections for Concrete Filled Steel Tube (CFT)” desarrollada por Lai-Yun Wu, Lap-Loi Chung, Sheng-Fu Tsai, Tung-Ju Shen y Guo-Luen Huang, en el Centro Nacional Para Investigaciones en Ingeniería Sísmica, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Taiwán, en Taipéi, (Wu, 2005); “Behavior of Welded CFT Column to H-Beam Connections With External Stiffeners” desarrollada por Tae-Sup Moon en el Departamento de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad de Hanyang Seúl, Corea del Sur, (Moon, 2004). Entre muchas otras. (Torres y Cruz, 2012).

Del mismo modo en Colombia se han venido calificando conexiones tanto soldadas como empernadas. Una importante investigación es la tesis de maestría de la Ingeniera Carolina Andrade, donde se presenta la conexión de viga al eje débil para una columna perfil tipo I. Cabe anotar que, para ese año, las conexiones precalificadas presentadas por la AISC, el FEMA o la NSR-10, solo se habían desarrollado para la conexión al eje fuerte de la columna. En esta investigación se analizó el comportamiento de dicha conexión a partir de experimentación, análisis por elementos finitos y pruebas cíclicas con base a la NSR-10, concluyendo que las conexiones evaluadas pueden utilizarse en edificaciones sismorresistente de acero, ya que cumplieron con todos los protocolos de la normatividad NSR-10 y AISC 340. (Andrade, 2015).

En la Tabla 1, se presentan algunas conexiones precalificadas realizadas en Colombia.

CONEXIÓN	SISTEMA	AÑO	AUTORES
UNIONES A MOMENTO EN PERFILES DE LÁMINA DELGADA DOBLADOS EN FRÍO.	DMI, DMO	2004	A. Gallo, J. Narváz
CONEXIÓN TUBO-VIGA REFORZADA.	DES	2004	J. Posada, C. Pabón
CONEXIÓN A COLUMNA LAMINADA SOLDADA CON CUBREPACAS.	DES	2005	H. Acero

CONEXIONES PARA PÓRTICOS DE LÁMINA DELGADA	DMI	2006	E. López
CONEXIONES PARA PÓRTICOS DE LÁMINA DELGADA 2DA PARTE	DMI, DMO	2007	S. Villar
CONEXIÓN RÍGIDA DE UNA VIGA I Y UNA COLUMNA TUBULAR RELLENA DE CONCRETO	DES	2008	M. Uribe
CONEXIÓN A COLUMNA LAMINADA SOLDADA CON CUBREPLACAS Y SECCIÓN REDUCIDA	DES	2011	C. Cerón
CONEXIÓN A MOMENTO EMPLEANDO VIGAS DE ALMA EXPANDIDA	DMO	2011	E. Ramírez
CONEXIÓN METÁLICA RÍGIDA VIGA I – COLUMNA COMPUESTA EMBEBIDA	DES	2012	C. Torres
CONEXIONES DE PERFILES I DE ACERO - VIGA CONECTADA AL EJE DÉBIL DE LA COLUMNA	DES	2015	C. Andrade

Tabla 1. Conexiones precalificadas para pórticos resistentes a momento realizadas en Colombia. (Delgado y Cruz, 2017)

Por otra parte, Colombia acrecienta importantes investigaciones respecto a software de diseño para conexiones en estructuras de acero, un ejemplo es, (Clavijo. F. 2016), investigación que desarrolló el software Fc Connection, herramienta educativa que permite diseñar 5 tipos de conexiones sometidas a fuerzas axiales en platinas y tubería, 2 conexiones a cortante en vigas y 3 tipos de conexiones viga-columna a momento.

En síntesis, el programa se realizó para facilitar el diseño y chequeo de 10 tipos de conexiones, con la ventaja que este software presenta en sus módulos una plataforma interactiva, donde el usuario verifica los resultados de diseño, siguiendo el paso a paso de cada uno de cálculos ejecutados.

En la tabla 1, se presentan algunas conexiones precalificadas, teniendo en cuenta la referencia de cada investigación y el enlace de consulta de los documentos.

De acuerdo con (Camacho. 2022), hay una gran diversidad de autores que explican los tipos de conexiones precalificadas existentes, teniendo en cuenta el apropiado cumplimiento de la normatividad mundial y nacional.

Para dar cumplimiento a lo anterior, los autores evalúan y analizan en diferentes etapas el comportamiento individual y colectivo de los componentes que conforman la conexión precalificada; con el fin, de obtener datos cuantitativos y cualitativos que certifiquen los requisitos normativos establecidos para que la conexión se pueda emplear con total confianza en una estructura metálica.

2. Justificación

Las estructuras metálicas dentro del campo de la ingeniería son un elemento fundamental que ha promovido el desarrollo y sustento de la industria de la construcción brindando seguridad, resistencia, economía y ahorro en el tiempo de ejecución. Su uso en países en vía de desarrollo como Colombia está en continuo crecimiento, razón por la cual es de suma importancia el estudio y la implementación de especificaciones adecuadas que gobiernen el diseño y la construcción de cada una de las partes que conforman este tipo de edificaciones.

Las conexiones viga-columna, son una de las partes más sensibles bajo la acción de un sismo y las que tienden a fallar inicialmente como quedó demostrado en los sismos de Northridge (1994) y Kobe (1995).

Debido a los importantes e inesperados daños (fallas frágiles) ocurridos en las conexiones de acero en estos dos eventos en particular, se hizo de vital importancia el estudio profundo no sólo de los procedimientos analíticos, sino de los relacionados con el diseño, detallado, fabricación, construcción e inspección de las conexiones en estructuras metálicas.

Con base a estos estudios, los institutos AISC y ANSI desarrollaron una normatividad dirigida a estandarizar los procedimientos necesarios para el diseño y la construcción de las conexiones precalificadas.

En la actualidad se cuenta con un catálogo de conexiones que han sido precalificadas por entidades gubernamentales, educativas y privadas, facilitando grandemente el diseño y la construcción de las estructuras metálicas a lo largo del mundo.

El aporte que hacemos con la creación de herramientas como una hoja de cálculo electrónico para el diseño de una conexión precalificada en particular, es un avance en el estudio y desarrollo de este tipo de conexiones, ya que permite masivamente el acceso de distintos actores a esta herramienta.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una hoja electrónica para el diseño de conexiones precalificadas del tipo End – Plate sin rigidizador.

3.2 Objetivos específicos

Realizar una detallada revisión de las fuentes bibliográficas relacionadas con los aspectos más relevantes de las conexiones precalificadas para estructuras metálicas.

Establecer el alcance de las solicitudes que puede atender la conexión precalificada tipo End – Plate.

Desarrollar una hoja de cálculo para una conexión precalificada tipo End - plate, que permita obtener el diseño geométrico y especificaciones de los elementos de la conexión.

4 Marco teórico

4.1 Diseño por capacidad

Se fundamenta categorizando la resistencia de los elementos y componentes que conforman la estructura sismorresistente, con el objetivo de establecer el mecanismo de falla denominado “deformación plástica”. Se precisan las zonas, elementos y componentes que deben responder de manera satisfactoria con el fin de asegurar la protección de la vida humana ante un evento sísmico con baja probabilidad de ocurrencia, el cual se determina con base a la normatividad vigente.

El mecanismo de falla que se desea establecer, implica que en diferentes zonas críticas se formen “rótulas plásticas”, mientras que otros elementos permanezcan en el rango elástico, de esta manera la estructura falle pero no colapse y se comporte en orden categorizado, es decir utilizando el criterio de columna fuerte - viga débil, basado en sobrerresistencia, de acuerdo en la categorización de los elementos, para que no se insten otros mecanismos de falla.

Los componentes se diseñan para que disipen energía de manera adecuada, teniendo en cuenta que la rótula plástica fluye primero que los demás elementos y se comportará de manera dúctil, disipando energía por deformación ante la demanda del sismo.

En la siguiente imagen se presentan dos elementos diferentes para una estructura sismorresistente, que pueden tener igual ductilidad, pero diferente capacidad de disipación de energía, por consiguiente, a pesar de que ambos elementos fluyen con una misma deformación se requieren diferentes rangos de fuerzas para lograr que fluya un elemento respecto del otro. (Crisafulli F; 2008).

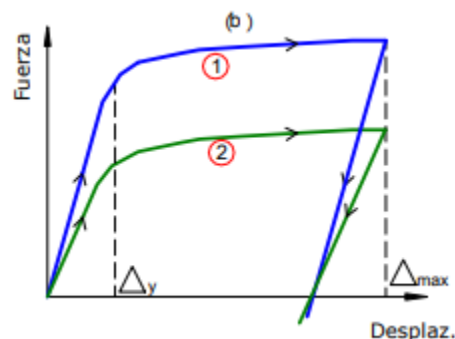


Ilustración 1. Tabla Esfuerzo – deformación

4.2 Procedimiento general para el diseño sismorresistente

Este procedimiento está dividido en dos etapas. Una etapa conceptual y una etapa reglamentaria.

En la etapa conceptual se deben proponer de acuerdo a la experiencia del diseñador, materiales, secciones y disposición de elementos estructurales.

Mientras en la etapa reglamentaria se realizan una serie de pasos encaminados a garantizar que la estructura cumpla con los requisitos de seguridad y funcionalidad exigidos por la ley.

En la siguiente figura se muestra un esquema resumen de los pasos a seguir para el diseño sismorresistente. Crisafulli, F. (2018)

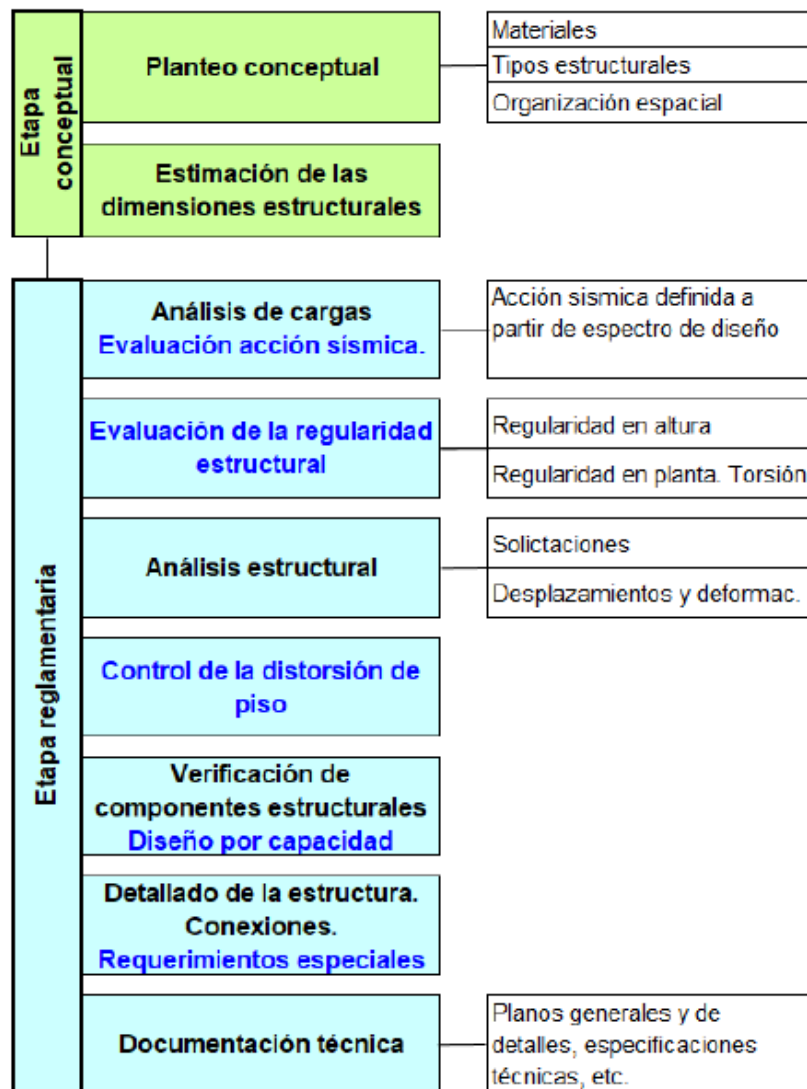


Ilustración 2. Etapas del procedimiento de diseño sismorresistente

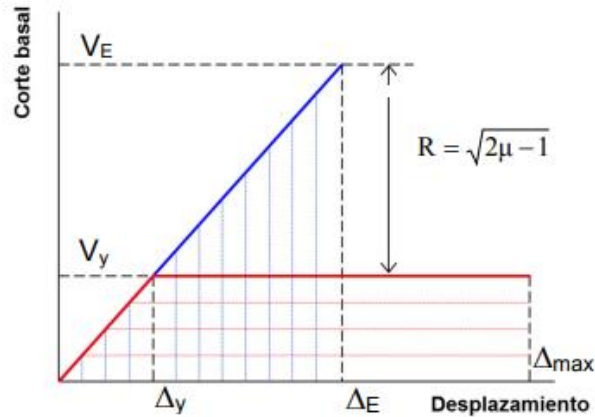


Ilustración 4. Criterio de igual energía

EL Criterio simplificado, en estructuras con periodos intermedios, considera una variación lineal de $R=1$, para periodos fundamentales $T=0$ y $R = \mu$, en la siguiente ilustración se grafican la variación del factor R en función del periodo fundamental T , combinando las dos ecuaciones anteriores, para cubrir el rango de períodos intermedios, se presentan dos valores de ductilidad, donde las líneas punteadas corresponden al criterio simplificado, el cual fue aceptado por diferentes códigos de diseños durante varias décadas.

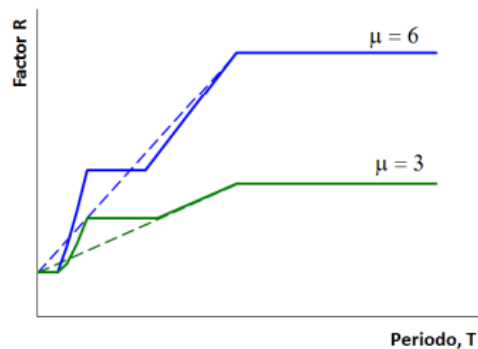


Ilustración 5. Variación del factor R en función del periodo fundamental T

Se presentan modificaciones para el cálculo del factor R , con base a estudios de diferentes investigadores, partiendo de las investigaciones de Newmark y Veletsos, teniendo en cuenta la ductilidad y la sobrerresistencia estructural, como efectos de todo el sistema. Reglamentos latinoamericanos especifican lo siguiente:

$$R = R_{\mu} \Omega_0$$

donde $R\mu$ es el factor de reducción por ductilidad y Ω_0 es el factor de sobrerresistencia.

El siguiente diagrama permite analizar la respuesta estructural Cortante basal Vs Desplazamiento lateral, donde presenta la respuesta lineal y elástica de la estructura correspondiente a la línea verde discontinua y de la misma manera presenta la respuesta esperada de la estructura correspondiente a la línea continua azul.

La cortante basal elástica V_E , precisa la fuerza sísmica del espectro de diseño, representado en el punto A de la gráfica. Sin embargo, la cortante basal V_d , se refiere a la fuerza de diseño, representado en el punto B de la gráfica, este valor se calcula con base al factor de reducción R , que reduce las fuerzas sísmicas del espectro de diseño V_E .

Con la fuerza de diseño V_d , se determinan las solicitaciones del análisis estructural respecto a la resistencia y los desplazamientos elásticos, que permiten hallar los desplazamientos de diseño, teniendo en cuenta el factor de amplificación de desplazamientos C_d , controlando las distorsiones de piso.

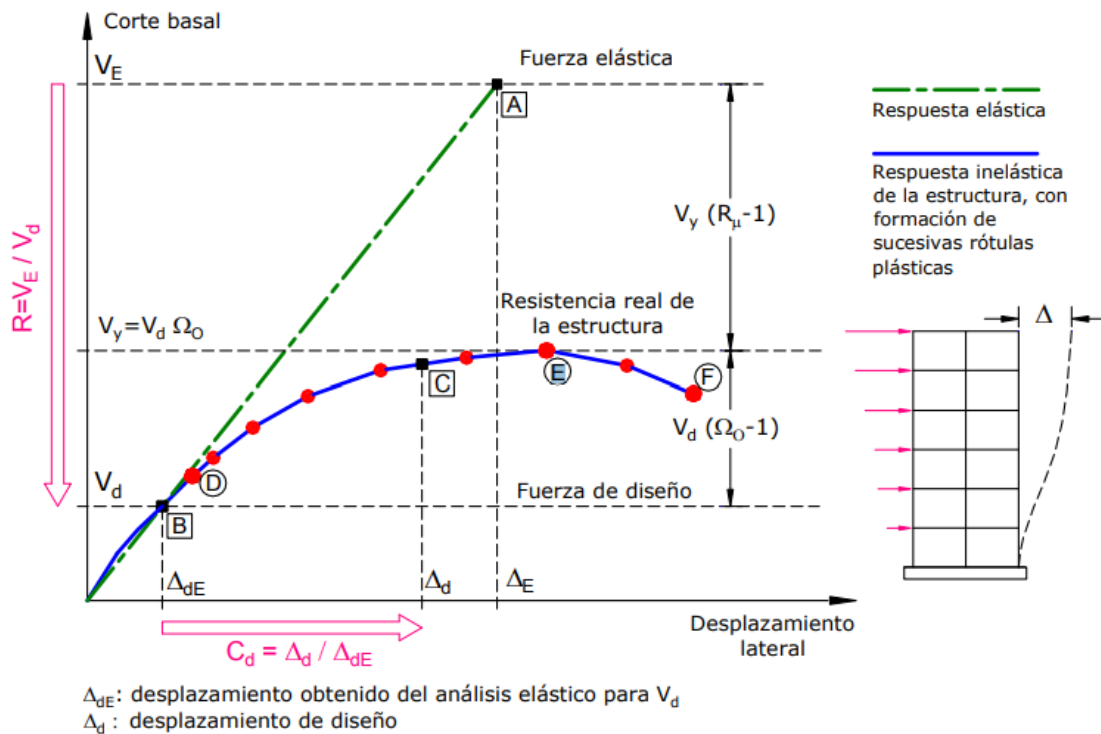


Ilustración 6. Desplazamientos de diseño, teniendo en cuenta el factor de amplificación de desplazamientos C_d

En la fase inicial se considera una rigidez efectiva en el análisis estructural por efectos de fisuración, tensiones residuales entre otros. A medida que se incrementa la fuerza lateral desde fuerza de diseño V_d , aparecen rótulas plásticas o zonas de fluencia, debido a factores de resistencia que reducen la capacidad nominal, hasta obtener la respuesta inelástica de la estructura y finalmente desarrollar la máxima resistencia.

La resistencia real de la estructura es mayor a la resistencia de diseño debido al factor de sobrerresistencia Ω_o . El factor R_μ tiene en cuenta la ductilidad de los componentes del sistema estructural.

$$R_\mu = \frac{V_E}{V_Y}$$

De este modo, se presentan variaciones de ductilidad y capacidad de disipación de energía de acuerdo con el tipo de estructura, con base al nivel de degradación de rigidez y resistencia que soporta el sistema estructural. (Crisafulli F; 2008)

4.6 Acciones sísmicas para el diseño por capacidad

Cuando hacemos el dimensionamiento de los elementos estructurales debemos considerar dos tipos de componentes estructurales, los componentes dúctiles y los componentes frágiles que requieren ser protegidos por capacidad.

Con las combinaciones de carga reglamentarias obtenemos la resistencia requerida para los elementos dúctiles no olvidando adicionar la acción sísmica proveniente del espectro de diseño. Sin embargo, para los componentes frágiles debemos considerar dos acciones sísmicas adicionales para asegurar la resistencia por capacidad.

- Acciones sísmicas con sobrerresistencia, Emh :

$$Emh = W_o QE$$

Esta acción depende directamente del factor de sobrerresistencia W_o que varía de acuerdo al tipo de estructura del análisis y es un valor promedio o aproximado para condiciones usuales, más no para condiciones particulares.

QE representa el efecto de la acción sísmica determinada a partir del espectro de diseño y reducida por el factor R.

- *Acciones sísmicas limitadas por capacidad, Ecl: estas acciones se definen como las máximas solicitaciones obtenidas de un análisis plástico racional, considerando los valores esperados de la resistencia de los materiales. Estas acciones sísmicas permiten determinar valores más precisos de la resistencia requerida de los componentes que deben permanecer en rango elástico, dado que en su determinación se consideran las características propias de cada estructura, tales como propiedades geométricas, secciones utilizadas, materiales, etc. (Crisafulli F; 2008).*

4.7 Pórticos resistentes a momento

Pórticos compuestos por elementos tipo viga y tipo columna, conectados con pernos, soldaduras o la combinación de estas, que forma una estructura resistente y se caracterizan por la capacidad de disipar energía a demandas de esfuerzos cortantes y momentos flectores.

Se clasifican en tres categorías de acuerdo al nivel de desempeño “*pórticos especiales, intermedios u ordinarios*”.

Sistemas de pórticos a momento	Pórticos no arriostrados ordinarios, OMF
	Pórticos no arriostrados intermedios, IMF
	Pórticos no arriostrados especiales, SMF
	Pórticos no arriostrados especiales con vigas reticuladas, STMF
	Sistemas de columnas ordinarias en voladizo, OCCS
	Sistemas de columnas especiales en voladizo, SCCS

Ilustración 7. Tipos de pórticos resistentes a momento

Un caso particular son los pórticos con vigas reticuladas, los cuales se diseñan para que en una sección especial y preestablecida de la viga se presenten deformaciones en el rango inelástico, plastificando el segmento principalmente por la flexión a que se pueden someter el elemento, ante las demandas de un sismo de diseño con base a la normatividad vigente, con la condición de que los demás segmentos de la viga así como los elementos conectados a esta se mantengan en el rango elástico, incluyendo la conexión.

La norma ANSI/AISC 341- 16, establece límites respecto a distancia de la rótula plástica y dimensiones de la luz de la viga, con el fin de “*controlar la demanda de ductilidad en los componentes que fluyen*”. (Crisafulli F; 2008)

4.8 Conexiones Precalificadas

Las conexiones precalificadas son aquellas que se verifican mediante ensayos controlados y sus datos son debidamente recolectados. Estas conexiones pueden realizarse para un proyecto en específico o lo pueden hacer diferentes organizaciones para conexiones generalizadas.

Para precalificar una conexión:

1. Se debe contar con los resultados de los ensayos necesarios para garantizar que la conexión tiene suficiente capacidad de deformación plástica
2. Se debe contar con un modelo teórico donde se analicen y se obtengan la resistencia asociada a los modos de falla y la capacidad de deformación, en base a las propiedades y dimensiones de los elementos que componen dicha conexión.
3. Los datos obtenidos de los ensayos, deben permitir una evaluación de la confiabilidad de dicha conexión.

En la ANSI/AISC 341-16, se encuentra contenida todos los requisitos necesarios para precalificar una conexión, incluido las recomendaciones para la realización de los ensayos. De igual forma, en la ANSI/AISC 358-16 se encuentra el procedimiento de diseño de 9 conexiones preestablecidas de las cuales se puede hacer uso gratuito.

4.9 Pórticos resistentes a momentos con capacidad especial de disipación de energía (PRM-DES).

Se caracterizan por tener la mayor capacidad para disipar energía, respecto a otros sistemas estructurales tipo pórtico y se caracterizan por que ante las demandas del sismo, las conexiones no deben distorsionarse o deformarse y no se deben formar rotulaciones o plastificaciones en las columnas de modo que se evite el pandeo local en estos elementos, considerando cada extremo de la viga como una zona protegida, lo anterior con el objetivo que se desarrolle un comportamiento dúctil y estable en la estructura.

“Las rótulas plásticas deben exhibir una capacidad de rotación inelástica de 0.03 radianes, como mínimo, para lo cual se requiere el uso de conexiones precalificadas”. (Crisafulli F; 2008)

La siguiente ilustración describe el mecanismo de deformación plástica con rotulación en vigas.

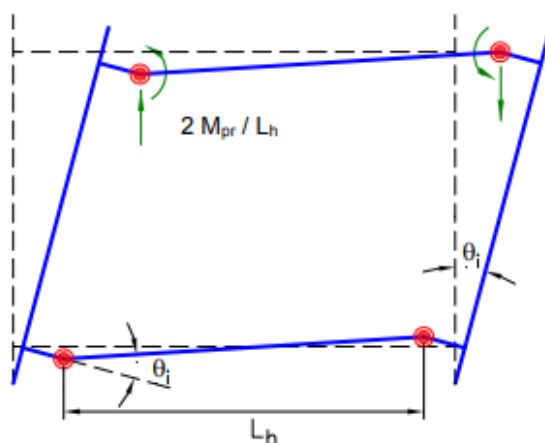


Ilustración 8. Mecanismo de deformación plástica con rotulación en vigas

4.10 Conexiones Viga - Columna

Las conexiones viga-columnas de un pórtico no arriostrado deben cumplir con una serie de condiciones entre las cuales se destacan:

1. La conexión debe permitir y soportar las rotaciones plásticas correspondientes a un nivel de distorsión de piso total de 0.04 radianes.

2. La capacidad a flexión de la conexión, medida en la cara de la columna, debe ser como mínimo 0.8 Mp (momento de plastificación) de la viga conectada para un nivel de distorsión de piso de 0.04 radianes
3. La resistencia a cortante requerida de la conexión se halla utilizando las combinaciones de cargas sísmicas limitadas por capacidad, considerando:

$$Ecl = 2 Mpr / Lh$$

$$Mpr = Cpr Ry Fy Ze$$

$$C_{pr} = \frac{(F_y + F_u)}{F_y} \leq 1.20$$

donde

Mpr: Momento máximo probable en la rótula plástica

Lh: distancia entre rótulas plásticas en la viga

Ry: relación entre la tensión de fluencia esperada y la tensión mínima de fluencia

Cpr: factor que tiene en cuenta el endurecimiento por deformación.

4.11 Conexión con placa de extremo extendida apernada no rigidizada y rigidizada (END PLATE).

Conexiones precalificadas, caracterizadas por presentar una placa o platina de acero perforada, unida por soldadura al extremo del perfil de la viga sobre la sección transversal y conectada con pernos al patín de la columna.

Entre los principales beneficios de este tipo de conexiones es la facilidad de instalación en obra, ya que al ser pernada no necesita soldadura para el montaje, no obstante, requiere de gran precisión de fabricación en taller respecto a la longitud de la viga, debido a la baja tolerancia para el ajuste de las conexiones en los extremos de la viga. (Crisafulli F; 2008)

Este tipo de conexiones precalificadas presentan dos clasificaciones: la primera es con base a la cantidad de perforaciones y la segunda es de acuerdo a que contiene o no rigidizadores, como se ilustra a continuación.

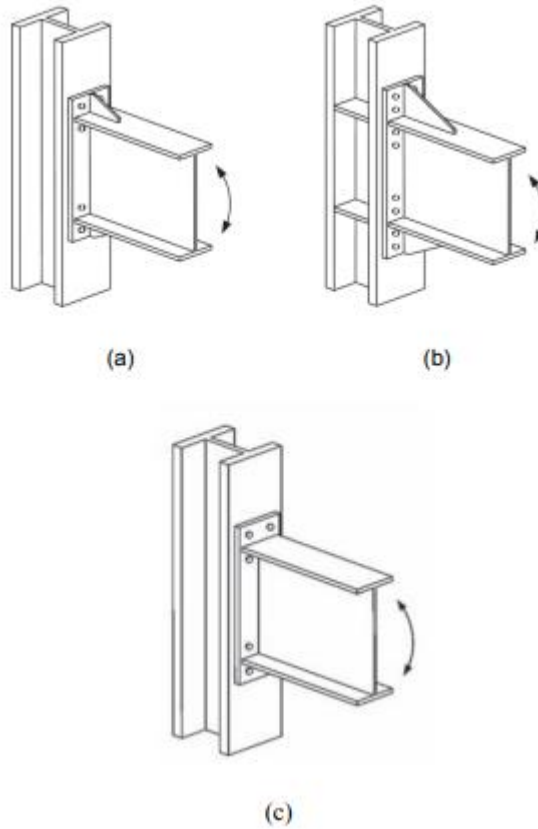


Ilustración 9. Geometría de los tres tipos de conexión END PLATE

Los criterios de diseño buscan que los elementos de las conexiones tengan la resistencia suficiente para asegurar que la deformación inelástica de la conexión se alcance por fluencia de la viga. (AISC-358-16)

5 Hoja de cálculo y manual de usuario, Conexión Precalificada tipo End-Plate de cuatro pernos no rigidizada

5.1 Normatividad de Referencia

Para la creación de la hoja de cálculo nos basamos principalmente en el procedimiento de diseño de la norma ANSI/AISC 358-16

5.2 Límites de precalificación

Mediante los siguientes límites, se verifica si un elemento tipo columna o tipo viga es apto para ser utilizado en una conexión precalificada. Este es uno de los criterios integrados a la hoja de cálculo y que son de vital importancia.

Parámetro	Cuatro pernos sin rigidizadores (4E)		Cuatro pernos con rigidizadores (4ES)		Ocho pernos con rigidizadores (8ES)	
	Máximo mm (in.)	Mínimo mm (in.)	Máximo mm (in.)	Mínimo mm (in.)	Máximo mm (in.)	Mínimo mm (in.)
t_{bf}	19.1 $\left(\frac{3}{4}\right)$	9.5 $\left(\frac{3}{8}\right)$	19.1 $\left(\frac{3}{4}\right)$	9.5 $\left(\frac{3}{8}\right)$	25.4 (1)	14.3 $\left(\frac{9}{16}\right)$
b_{bf}	235 $\left(9\frac{1}{4}\right)$	152 (6)	229 (9)	152 (6)	311 $\left(12\frac{1}{4}\right)$	190 $\left(7\frac{1}{2}\right)$
d	1400 (55)	349 $\left(13\frac{3}{4}\right)$	610 (24)	349 $\left(13\frac{3}{4}\right)$	914 (36)	457 (18)
t_p	57.2 $\left(2\frac{1}{4}\right)$	12.7 $\left(\frac{1}{2}\right)$	38 $\left(1\frac{1}{2}\right)$	12.7 $\left(\frac{1}{2}\right)$	63.5 $\left(2\frac{1}{2}\right)$	19.1 $\left(\frac{3}{4}\right)$
b_p	273 $\left(10\frac{3}{4}\right)$	178 (7)	273 $\left(10\frac{3}{4}\right)$	178 (7)	381 (15)	229 (9)
g	152 (6)	102 (4)	152 (6)	83 $\left(3\frac{1}{4}\right)$	152 (6)	127 (5)
p_{fi}, p_{fo}	114 $\left(4\frac{1}{2}\right)$	38 $\left(1\frac{1}{2}\right)$	140 $\left(5\frac{1}{2}\right)$	44 $\left(1\frac{3}{4}\right)$	51 (2)	41 $\left(1\frac{5}{8}\right)$
p_b	-	-	-	-	95 $\left(3\frac{3}{4}\right)$	89 $\left(3\frac{1}{2}\right)$
b_{bf} = ancho de la aleta de la viga, mm b_p = ancho de la placa de extremo, mm d = peralte de la viga que se conecta, mm g = distancia horizontal entre pernos, mm p_b = distancia vertical entre las hileras de pernos interiores y entre las hileras de pernos exteriores en una conexión 8ES, mm p_{fi} = distancia vertical desde la cara interior de la aleta a tracción de una viga hasta la hilera interior de pernos más cercana, mm p_{fo} = distancia vertical desde la cara exterior de la aleta a tracción de una viga hasta la hilera exterior de pernos más cercana, mm t_{bf} = espesor de la aleta de la viga, mm t_p = espesor de la placa de extremo, mm						

Ilustración 10. Límites de precalificación para conexiones de placa extendida tipo 4E, 4ES y 8ES

5.7 Procedimiento de diseño (AISC 358-16)

Diseño de por el lado de la viga

- Paso 1. Cálculo del momento en la cara de la columna
- Paso 2. Determinación del diámetro requerido de los pernos
- Paso 3. Selección de un diámetro de perno de tanteo que no sea inferior al obtenido en el paso 2.
- Paso 4. Determine el espesor requerido para la placa extremo
- Paso 5. Selección de un espesor de placa t_p no menor que el valor requerido
- Paso 6. Calcule la fuerza mayorada en la aleta de la viga
- Paso 7. Verifique la resistencia a cortante de la porción extendida de la placa de extremo de 4 pernos sin rigidizadores (4E)
- Paso 8. Verifique la rotura por cortante de la porción extendida de la placa de extremo extendida de 5 pernos no rigidizada (4E)
- Paso 9. Seleccione el espesor de rigidizador de la placa de extremo y diseñe las soldaduras de rigidizador a la aleta de la viga y de rigidizador a la placa de extremo. (ESTE PASO SE DEBE OMITIR YA QUE NO APLICA PARA LA CONEXIÓN EN ESTUDIO)
- Paso 10. Verificar la resistencia de la conexión por rotura de los pernos a cortante en la aleta a compresión.
- Paso 11. Verificar la falla por aplastamiento y desgarramiento producidos por las fuerzas de los pernos en la placa extrema y en la aleta de la columna
- Paso 12. Diseño de la soldadura de la aleta a la placa extremo y del alma a la placa extremo usando los requisitos de la sección 6.7.6

Diseño por el lado de la columna

- Paso 1. Cálculo del momento en la cara de la columna
- Paso 2. Determine la fuerza en la aleta de la columna asociada a la resistencia de diseño por flexión de dicha aleta (sin placa de continuidad)
- Paso 3. Verifique la resistencia a fluencia local del alma de la columna, para el alma de la columna sin rigidizar en las aletas de la columna.

Paso 4. Verifique la resistencia a pandeo del alma de la columna para el alma de la columna sin rigidizar en la aleta a compresión de la viga.

Paso 5. Verifique la resistencia por arrugamiento para el alma de la columna sin rigidizar a nivel de la aleta a compresión de la viga

Paso 6. En caso de requerirse placas de continuidad para cualquiera de los estados límites del lado de la columna

Paso 7. Verifique la zona de panel

Cualquier duda adicional remitirse a la norma AISC 358-16

6 Conclusiones

- Por múltiples motivos, la conexión precalificada de tipo placa de extremo extendida (End Plate) es una de las conexiones más utilizadas en el medio de la construcción del acero por lo cual es probable que el trabajo que hemos desarrollado pueda ser usado por otros usuarios como una guía de investigación que permite la verificación del diseño basado en la norma AISC.
- El trabajo desarrollado debe complementarse con el diseño de los elementos rigidizadores tales como las placas de continuidad y las placas de enchape para el alma.
- Este trabajo se desarrolló siguiendo la guía de diseño *ANSI/AISC 358-16/358s1-18, Conexiones Precalificadas para Pórticos de Acero Resistentes a Momentos, con Capacidad moderada o Especial de Disipación de Energía, para Aplicaciones Sísmicas, Incluyendo el Suplemento no. 1*, por tal motivo nuestro alcance quedó supeditado al alcance de este documento.

7. Referencias Bibliográficas

- American Institute Of Steel Construction. (2016). ANSI/ AISC 341- 16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings.
<https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/seismic-provisions-for-structural-steel-buildings-ansi-aisc-341-16.pdf>
- American Institute Of Steel Construction. (2016). ANSI/ AISC 360 - 16 Specification for Structural Steel Buildings.
<https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16w-rev-june-2019.pdf><https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16w-rev-june-2019.pdf>
- American Institute Of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 358-16 ANSI/AISC 358s1-18. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No.1 and N° 2.
<https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a358-20w.pdf>
- Andrade. C. (2015). Calificación de conexiones de perfiles I de acero - viga conectada al eje débil de la columna. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54270?show=full>
- Camacho. G. (2022). Estudio Paramétrico Del Diseño De Las Conexiones Precalificadas A Momento Viga-Columna En Edificaciones De Acero: Una Revisión De Estado Del Arte. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia.
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/43782>
- Clavijo. F. (2016). Desarrollo De Software Para Diseño De Conexiones En Estructuras De Acero Bajo Las Especificaciones Del AISC. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57191/1020746215.2016.pdf?sequence=1>
- Crisafulli, F. (2018). Diseño sismorresistente de construcciones de acero. Asociación Latinoamericana de Acero. Tomado de
https://cms.alacero.org/uploads/disenosismorresistente_de_construcciones_de_acero_5ta_ed_20135148cc.pdf
- Delgado. C, Garza. L y Cruz. R. (2017). Conexiones Precalificadas En Colombia. UIS. Bucaramanga, Colombia. <https://icca.com.co/publicaciones/>

- Guerrero. S. y Angarita. C. (2019). Creación De Una Herramienta De Chequeo De Conexiones Precalificadas Con Verificación De La Norma Vigente. Bogotá, Colombia. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22332/GuerreroSergioAngaritaCarolina2019.pdf;jsessionid=19B89646FE2A85A072F0289858E9BBD4?sequence=1>
- Merino. V. (2022). “Análisis Comparativo De Conexiones Precalificadas Con Tipología Soldadas Y Empernadas Para Un Sistema Smf En Un Edificio De Estructura Metálica”. Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/36426>
- Murray. T, & Shoemaker. W. (2002). Flush and Extended Multiple- Row Moment End- Plate Connections. American Institute Of Steel Construction. <https://www.aisc.org/Design-Guide-16-Flush-and-Extended-Multiple-Row-Moment-End-Plate-Connections>
- Murray. T, & Summer. E. (2004). Extended End – Plate Moment Connections Seismic and Wind Applications. American Institute of Steel Construction. <https://www.aisc.org/Design-Guide-4-Extended-End-Plate-Moment-Connections-Seismic-and-Wind-Applications-Second-Edition>
- Picazo, A. (2007). Medios de unión de estructuras metálicas. 1er Jornada Nacional de Investigación en Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. <https://oa.upm.es/3786/1/Picazo-E15.pdf>
- Pimiento. J., Salas. A., Ruiz. D. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol 29 N°3. Pontificia Universidad Javeriana Bogotá. https://www.researchgate.net/publication/272030225_Desempeno_sismico_de_un_portico_con_disipadores_de_energia_pasivos_de_placas_ranuradas_de_acero
- Riaño J. (2019). Determinación del comportamiento mecánico de una conexión en acero resistente a momento mediante modelación por elementos finitos. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/9f1364d0-5f7d-4532-899f-f31a0e719e2b>
- Torres. C. y Cruz. R. (2012). Estado Del Arte En Calificación De Conexiones Rígidas Metálicas Viga Columna, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 - Número 20 - Año 2012, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcta/article/view/1954/2054>
- Villalobos. F. (2016). Evaluación de diseños de conexiones viga-columna para su uso como conexiones precalificadas en estructuras con sistema sismorresistente a base de marcos intermedios de acero estructural. Costa Rica. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2375451>

8. Anexos

- Anexo 1. Hoja electrónica para el diseño de conexiones precalificadas del tipo placa de extremo de cuatro pernos sin rigidizadores (4e), basada en la norma de diseño AISC 358-16 "Conexiones precalificadas para pórticos de acero resistentes a momentos, con capacidad moderada o especial de disipación de energía, para aplicaciones sísmicas" Universidad de Antioquia, Medellín 2023
- Anexo 2. Manual de usuario hoja electrónica para el diseño de conexiones precalificadas del tipo placa de extremo de cuatro pernos sin rigidizadores (4e), basada en la norma de diseño AISC 358-16