RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Mauricio Fernando Lobo Noguera Jhon Breiner Sandoval Toro
FACULTAD	De Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Especialización Interventoría de Obras Civiles
DIRECTOR	MSc. Milton Mena Serna
TÍTULO DE LA TESIS	Seguimiento y control técnico para conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales en Colombia.
TITULO EN INGLES	Monitoring and technical control for prequalified beam-column metal connections used in the construction of vertical buildings in Colombia.

RESUMEN
(70 palabras)

El siguiente documento hace referencia al seguimiento y control técnico necesario para el uso de conexiones precalificadas viga-columna en edificaciones de acero en Colombia, en donde adicionalmente se realiza una compilación de información referente al uso de las estructuras metálicas e investigaciones sobre calificación de conexiones dentro del territorio colombiano. Como resultado de la investigación se obtienen una serie de tablas que detalla parcialmente los controles que se deben tener en cuenta para la supervisión en la ejecución de conexiones precalificadas para estructuras en acero.

RESUMEN EN INGLES

The following document refers to the monitoring and technical control necessary for the use of prequalified beam-column connections in steel buildings in Colombia, where additionally a compilation of information is made regarding the use of metallic structures and investigations on the qualification of connections within of the Colombian territory. As a result of the investigation, a series of tables is obtained that partially details the controls that must be taken into account for the supervision of the execution of prequalified connections for steel structures.

PALABRAS CLAVES	Ductilidad, rotula plástica, soldadura, conexión pernada
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Ductility, plastic hinge, welding, bolted connection

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 106	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 52	CD-ROM:

Seguimiento y control técnico para conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales en Colombia.

Mauricio Fernando Lobo Noguera

Jhon Breiner Sandoval Toro

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Especialización en Interventoría de Obras Civiles

MSc. Milton Mena Serna

06 de octubre del 2022

Índice

Pág.

Capítulo 1. Seguimiento y control técnico para conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales en Colombia 9
1.1 Tipo de monografía 9
1.2 Elección del tema 9
1.3 Delimitación de tema 12
1.4 Desarrollo del argumento 13
1.5 Metodología 15
Capítulo 2. Uso de conexiones precalificadas para edificaciones verticales en Colombia 17
2.1 Historia de las estructuras metálicas en Colombia 18
2.2 Rehabilitación de edificios con estructuras metálicas 21
2.2.1 Clínica Materno Infantil Los Farallones – Cali Valle del Cauca 22
2.2.2 Edificio de la Gobernación del Quindío Armenia 24
2.2.3 Edificio del Palacio de Justicia de Palmira 25
2.2.4 Clínica el Parque Armenia - Quindío 26
2.2.5 Edificio Hospital de Caldas – Manizales 26
2.2.6 Edificio Hospital San Juan de Dios de Armenia – Quindío 27
2.3 Conexiones para estructuras de acero calificadas en Colombia 29
2.3.1 Conexión Viga I a PTE Rectangular sin refuerzo 30
2.3.2 Conexión Tubo LDF a LDF pernada 31
2.3.3 Conexión Viga I a PTE Rectangular con refuerzo 32
2.3.4 Conexión Viga I a Columna I soldada con cubre placas 33
2.3.5 Conexión Tubo LDF A LDF soldada 34
2.3.6 Conexión Tubo LDF a LDF soldada 35
2.3.7 Conexión Viga I a PTE relleno pernada 35
2.3.8 Conexión Viga I reducida a I soldada con sección 37
2.3.9 Conexión Viga I expandida a I soldada 38
2.3.10 Conexión Viga I a columna compuesta con I embebida 40
2.3.11 Conexión Viga I a PTE circular relleno 42

2.3.12 Conexión Viga I armada a I armada pernada 43
2.3.13 Calificación Viga I a PTE circular relleno con diafragma 44
Capítulo 3. Marco referencial 45
3.1 Antecedentes 45
3.2 Marco Conceptual 46
3.2.1 Rotulas Plásticas 47
3.2.2 Conexiones 47
3.2.3 Tipos de sistemas sismorresistentes usados en edificios de acero 53
3.2.4 Ductilidad 55
3.2.5 Conexión Precalificada 56
3.3 Marco Teórico 56
3.3.1 Conexión a momento de sección reducida (Reduced beam section, RBS) 59
3.3.2 Conexión a momento de placa de extremo rigidizada o no rigidizada 61
3.3.3 Conexión a momento de placas pernadas a las aletas (BFP) 62
3.3.4 conexión de aletas no reforzadas soldadas-alma soldada 64
3.4 Marco Legal 66
Capítulo 4. Generalidades del seguimiento y control técnico en conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales 69
4.1 Inspección y Verificación de materiales 69
4.2 Inspección y verificación de soldaduras 72
4.3 Inspección y verificación de pernos 80
4.3.1 Inspección antes de comenzar la instalación de pernos 82
4.3.2 Inspección durante el proceso de pernado 87
4.3.3 Inspección luego de finalizado la instalación de pernos 90
Capítulo 5. Controles técnicos y normativos para la verificación en obra de conexiones metálicas precalificadas de viga-columna en Colombia 91
Conclusiones 95
Referencias 97

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 *Fallas típicas en conexiones viga-columna* 10
Figura 2 *Clínica Materno Infantil los Farallones sin muros de mampostería* 22
Figura 3 *Rehabilitación con arriostramientos concéntricos en Clínica Materno Infantil* 23
Figura 4 *Rehabilitación con arriostramientos en edificio de la Gobernación en Armenia* 24
Figura 5 *Rehabilitación con arriostramientos en V invertida Edificio Palacio de Justicia* 25
Figura 6 *Reforzamiento con arriostramientos Clínica el Parque Armenia* 26
Figura 7 *Reforzamiento con arriostramientos Edificio Hospital de Caldas* 27
Figura 8 *Reforzamiento con arriostramientos Edificio Hospital San Juan de Dios Armenia* 27
Figura 9 *Sistema de arriostramiento Edificio Hospital San Juan de Dios Armenia* 28
Figura 10 *Ensayo Conexión soldada viga I a PTE rectangular sin refuerzo* 31
Figura 11 *Ensayo Conexión Tubo LDF a LDF pernada* 32
Figura 12 *Conexión Viga I a PTE Rectangular con refuerzo* 33
Figura 13 *Conexión Viga I a Columna I soldada con cubre placas* 33
Figura 14 *Conexión Tubo LDF A LDF soldada* 34
Figura 15 *Conexión Tubo LDF a LDF soldada* 35
Figura 16 *Conexión Viga I a PTE relleno pernada* 36
Figura 17 *Deformación en Conexión Viga I a PTE relleno pernada* 37
Figura 18 *Conexión Viga I reducida a I soldada con sección* 38
Figura 19 *Elaboración viga de alma expandida* 39
Figura 20 *Conexión viga I expandida a I soldada* 40
Figura 21 *Conexión Viga I a columna compuesta con I embebida* 41
Figura 22 *Conexión Viga I a PTE circular relleno* 42
Figura 23 *Conexión Viga I armada a I armada pernada* 43
Figura 24 *Ensayo Conexión Viga I a PTE circular relleno con diafragma* 44
Figura 25 *Fracturas típicas en estructuras de acero durante el sismo de Northridge 1994* 45
Figura 26 *Tipos de conexiones* 48
Figura 27 *Ubicación de rotulas platicas en vigas* 49
Figura 28 *Características geométricas de un perno según la ASTM* 50

Figura 29 *Clasificación de soldaduras y posiciones* 51
Figura 30 *Comportamiento de un pórtico resistente a momento sometido a carga sísmica* 53
Figura 31 *Tipos de pórticos con arriostramientos concéntricos* 54
Figura 32 *Tipos de pórticos con arriostramientos excéntricos* 55
Figura 33 *Diagrama de esfuerzo - deformación* 56
Figura 34 *Mecanismos de falla de un sistema estructural* 58
Figura 35 *Conexión de sección con viga reducida* 59
Figura 36 *Conexión a momento de placa de extremo rigidizada o no rigidizada* 61
Figura 37 *Conexión a momento de placas pernadas a las aletas* 63
Figura 38 *Conexión de aletas no reforzadas soldadas-alma soldada* 64
Figura 39 *Sistema de clasificación para electrodos* 74
Figura 40 *Actividades de inspección antes de comenzar la soldadura* 75
Figura 41 *Actividades de inspección durante el proceso de soldadura* 76
Figura 42 *Actividades de inspección después del proceso de soldadura* 77
Figura 43 *Fallas típicas de soldadura* 77
Figura 44 *Tipos de pernos según su resistencia* 82
Figura 45 *Resistencia Nominal para Pernos y Piezas Roscadas, MPa* 83
Figura 46 *Pernos de tensión controlada* 84
Figura 47 *Arandelas indicadoras de tensión directa* 85
Figura 48 *Actividades de inspección antes de comenzar la instalación de pernos* 86
Figura 49 *Mínima Tensión de Instalación de los Pernos, en kN* 88
Figura 50 *Distancia mínima del centro de una perforación al borde de la parte conectada* 89
Figura 51 *Dimensiones de perforaciones* 89
Figura 52 *Actividades de inspección durante el proceso de pernado* 90

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 *Edificios de acero en Colombia* 18
Tabla 2 *Conexiones precalificadas en Colombia* 29
Tabla 3 *Requisitos de control de materiales para estructuras metálicas* 70
Tabla 4 *Ensayos de control de calidad para estructuras metálicas* 71
Tabla 5 *Especificaciones de electrodos según AWS D1.1* 72
Tabla 6 *Defectos y correcciones en soldadura* 78
Tabla 7 *Clasificación de ensayos para soldaduras* 79
Tabla 8 *Clasificación de grado para pernos según la NTC4034* 81
Tabla 9 *Clasificación del grado para pernos según la norma ASTM A563* 81
Tabla 10 *Controles técnicos para la inspección y verificación de materiales en estructuras* 91
Tabla 11 *Controles técnicos para la inspección y verificación de Soldaduras* 92
Tabla 12 *Controles técnicos para la inspección y verificación de pernos* 94

Resumen

El siguiente documento trata sobre los controles técnicos y normativos necesarios para supervisión e inspección en la construcción y montaje de conexiones precalificadas en edificios de acero, teniendo en cuenta parámetros normativos basados en la NSR-10. Los controles para el seguimiento técnico que se obtienen como resultado de la investigación están encaminados a la inspección visual y verificación de uniones soldadas y pernadas, como también al recibo, y almacenamiento del material en obra. La investigación incluye además una compilación sobre el uso de estructuras metálicas en el territorio colombiano.

Introducción

Uno de los factores indispensables para la construcción de edificios en acero, son las conexiones que unen cada uno de los elementos que conforman la estructura, por lo que luego de ocurrido el evento sísmico de Northridge 1994 en los Ángeles EEUU, a causa de que se presentaran fallas frágiles en las conexiones viga-columna de algunos edificios de acero, se realizaron investigaciones que conllevo al uso de nuevas conexiones viga-columna previamente ensayadas en laboratorio garantizando que no se presentara la falla frágil en los nodos viga-columna; este tipo de conexiones se denominó como Conexiones precalificadas. Actualmente en Colombia existe una serie de conexiones precalificadas que han sido evaluadas a través de ensayos con muestras a escala real, pero debido a la creciente demanda de construcciones en estructuras de acero en el país, se hace indispensable contar con herramientas de apoyo para el seguimiento y control técnico, en este tipo de estructuras.

A continuación, en el siguiente documento se relaciona la historia sobre las edificaciones en estructuras metálicas que incursionaron en el territorio colombiano, como también el uso de estructuras de acero para la rehabilitación y reforzamiento de estructuras existentes en el país. Posteriormente se registran las conexiones precalificadas que fueron evaluadas en Colombia, dando a conocer algunos detalles de dichas conexiones. El presente documento incluye un marco referencial en donde se contextualiza el tema y la importancia sobre las conexiones precalificadas. También se aprecia cuáles son los controles técnicos y normativos más relevantes en base a la norma colombiana NSR-10 y la norma internacional AISC 358.

Capítulo 1. Seguimiento y control técnico para conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales en Colombia

1.1 Tipo de monografía

El tipo de monografía de la presente investigación corresponde a una monografía de compilación en donde recopila información de diferentes autores en relación al tema de estudio el cual para el caso corresponde al seguimiento y control técnico para las conexiones precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales en Colombia.

1.2 Elección del tema

La construcción de edificaciones verticales en estructuras metálicas, es un material que ofrece un gran desempeño, debido a su resistencia, durabilidad y ductilidad, en donde la rigidez y el comportamiento sísmico, depende en gran medida de cómo están conectados los elementos estructurales viga-columna y de su capacidad para resistir momentos. Según Guerrero y Angarita (2019) las estructuras metálicas han tenido un buen comportamiento durante movimientos sísmicos, sin embargo, luego de presentarse el sismo Northridge ocurrido en 1994 y el sismo Kobe ocurrido en 1995, se produjeron fracturas en las conexiones de varios edificios y en algunos casos colapsos. Estos eventos marcaron un punto importante dentro de la ingeniería estructural, siendo este hecho motivo para revisión de códigos y procedimientos de diseño, sobre todo en el área de las conexiones viga-columna. (Guerrero & Angarita, 2019).

Algunos de los tipos de conexiones en estructuras metálicas que presentaron fallas durante la ocurrencia de los sismos de Northridge y Kobe se pueden apreciar en la figura 1, en donde se aprecia la fractura en columna y conexiones soldadas.

Figura 1

Fallas típicas en conexiones viga-columna



Nota: Tomado de Guerrero y Angarita (2019)

De acuerdo a lo anterior, después de los eventos sísmicos de Northridge, las normas y códigos a nivel mundial se preocuparon por incorporar diferentes tipos de conexiones para viga-columna utilizadas en pórticos resistentes a momentos, calificando su comportamiento mediante pruebas físicas en laboratorio a escala real, definiendo este tipo de conexiones como precalificadas. Según Acero y Guerrero (2006), en muchos países, el diseño de las conexiones se está realizando de acuerdo a parámetros que han sido previamente estandarizados, calificándolas por su buen comportamiento durante ensayos.

Los criterios para el diseño de conexiones viga-columna en Colombia, se basan en las especificaciones de la Norma Colombiana de Diseño y Construcciones Sismo-resistentes (NSR-

10), la cual presenta un detallado similar al documento FEMA-355D, 2000. Con relación a normas internacionales en EE.UU. se creó el código AISC 358, con el fin de dar algunos lineamientos para prevenir y/o mitigar la afectación o el colapso de estructuras en acero ante eventos sísmicos, en el cual se incluyeron algunas conexiones de acero precalificadas". Lo anterior debido a que los documentos FEMA son documentos de investigación más no normativos.

Según Delgado C. (2017) las estructuras metálicas tienen unas ventajas estructurales en cuanto a su resistencia, uniformidad y ductilidad. Sin embargo, al momento de plantear estas estructuras se dificulta el diseño de sus conexiones. Con frecuencia se ha encontrado que una de las causas de daños estructurales parciales o incluso de colapso en estructuras de acero es debido a la falla de alguna conexión (FEMA 350, 2000).

Con relación a la supervisión de obra de estructuras metálicas específicamente en el montaje e instalación de los elementos conectados viga-columna, para algunos casos vale la pena mencionar la apreciación que según Enderica P. (2018), dice:

> La geometría de las conexiones dificulta la inspección de las soldaduras para determinar su calidad y la detección de fallas ocultas. A pesar de existir métodos como el ultrasonido para determinar la calidad de la soldadura, esta práctica no es muy habitual lo cual genera incertidumbre en la condición real de la conexión.

De acuerdo a lo anterior, las conexiones precalificadas viga-columna son de gran importancia a la hora de construir edificaciones en estructuras metálicas, motivo por el cual con

la presente investigación, se busca dar a conocer cuál es el correcto seguimiento y control técnico que se deben tener en cuenta a la hora de realizar la verificación del montaje y soldadura de conexiones precalificadas para viga-columna desde el punto de vista de la interventoría.

1.3 Delimitación de tema

Delimitación Conceptual: Se hace referencia a los conceptos utilizados para la investigación, de los cuales predominan, el saber identificar que es una conexión precalificada soldadura de electrodo, resistencia de electrodo, conexión pernada, platina de refuerzo entre otros. Con relación al tipo de conexiones precalificadas, se pueden apreciar los diferentes tipos de conexiones, establecida por el reglamento NSR-10, entre los que se encuentran conexión simple, conexión a momento, conexión a momento parcialmente restringida, conexión a momento totalmente restringida, conexión con separación, conexión de deslizamiento crítico, conexión en cruz, conexión en K, conexión en T, conexión traslapada y conexión tipo aplastamiento.

Delimitación Geográfica: Teniendo en cuenta que el alcance de la investigación contempla el uso de la reglamentación NSR-10, los resultados obtenidos son aplicables dentro del territorio colombiano.

Delimitación Temporal: Las actividades se desarrollarán en un tiempo estimado de tres (03) meses contados a partir de la aprobación de la propuesta.

Delimitación Operativa: Se realiza una investigación inicial con respecto al tema de estudio caracterizando el uso de las conexiones metálicas precalificadas en el territorio colombiano, luego se realiza un marco referencial en donde se compilan todos parámetros normativos que rigen la construcción de conexiones precalificadas en Colombia. Posteriormente se realiza un compendio de los factores que influyen en el seguimiento y control técnico en la construcción de conexiones metálicas precalificadas para edificaciones verticales de viga-columna, y por último como resultado de la investigación, se dedica un capítulo a desarrollar los controles técnicos necesarios para la correcta instalación de conexiones precalificadas en Colombia desde el punto de vista de la interventoría mediante el uso de tablas con recomendaciones técnicas y parámetros normativos.

1.4 Desarrollo del argumento

De acuerdo a la problemática planteada, la presente investigación conforma una herramienta desde el punto de vista de la interventoría que sirve de apoyo para el seguimiento y control técnico de obras de estructuras metálicas, en donde se especifique el procedimiento adecuado que se debe regir para los distintos procesos que contempla la instalación de conexiones precalificadas de viga-columna en una edificación vertical de estructura metálica.

Por consiguiente, con relación a investigaciones relacionadas al tema de estudio vale la pena mencionar a la realizada por Devera, F. y Ortiz D. (2019), titulada “Guía para el control de calidad en la construcción de estructuras metálicas” en donde se basan en la generación de listas de chequeo para diferentes tipos de conexiones metálicas, pero no describen un procedimiento

constructivo para el seguimiento y control técnico de una conexión precalificada en la construcción de estructuras metálicas para edificaciones, razón por la cual, con la presente propuesta se busca dar a conocer el procedimiento a seguir para la verificación, seguimiento y control de calidad, de los diferentes procesos que puede conllevar la instalación de una conexión precalificada.

El control de calidad en la ejecución de estructuras metálicas, depende más de la elección del constructor, en la supervisión y control de sus medios de trabajo y llevar después esta inspección al montaje. En el periodo de montaje la mejor inspección y el mejor control que se puede ejercer, es el de tener permanentemente en obra un técnico cualificado que de manera permanente vigile la labor de los montadores y soldadores realizando controles de tipo geométrico de la estructura. (Capistran & Arrieta, 2010)

Es importante tener en cuenta que la investigación se enmarca en todo el territorio colombiano, por lo cual a pesar de que hay manuales sobre estructuras metálicas, no existe una metodológica que indique cual es la forma correcta de realizar una supervisión técnica para conexones precalificadas, teniendo en cuenta el marco normativo colombiano, en cuanto a normas de construcción NSR-10, normas de Seguridad y salud en el trabajo, entre otras. La investigación tiene como objetivo dar a conocer cuáles son los parámetros más relevantes para el seguimiento y control técnico de los procedimientos necesarios para la instalación de conexiones precalificadas de viga-columna.

1.5 Metodología

De acuerdo al proceso de la investigación el tipo de metodología corresponde a la Descriptiva ya que se realiza la recopilación de información para luego poder determinar y describir los controles técnicos necesarios que son requeridos para la instalación de conexiones metálicas precalificadas de viga-columna en la construcción de edificaciones verticales, basándose en el cumplimiento de las normas aplicables.

Técnicas de recolección de información. Es necesario realizar una exploración documental, utilizando manuales, guías técnicas, trabajos de investigación, dialogo con profesionales expertos en el tema, proyectos ejecutados y en ejecución que incluyan el uso de estructuras metálicas, entre otros.

Instrumentos para la recolección de información: Se utilizan fuentes bibliografías de información como libros, monografías, tesis, artículos de revista, y bases de datos de uso institucional por la Biblioteca UFPSO.

Procedimiento metodológico: Para el desarrollo de la investigación, se contemplan los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Uso de las conexiones precalificadas para edificaciones verticales en Colombia.

Capítulo 2. Marco referencial de las conexiones metálicas precalificadas de viga-columna en edificaciones verticales.

Capítulo 3. Generalidades del seguimiento y control técnico en conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales.

Capítulo 4. Controles técnicos y normativos para la verificación en obra de conexiones metálicas precalificadas de viga-columna en Colombia.

Capítulo 2. Uso de conexiones precalificadas para edificaciones verticales en Colombia

Las conexiones precalificadas hacen referencia a la configuración estructural de conexiones viga-columna previamente ensayadas y comprobadas en laboratorio calificadas mediante la evaluación y ensayos controlados a escala real. La importancia de usar una conexión precalificada es controlar la falla de la estructura ante cargas sísmicas generando la falla en ciertos elementos específicos de la estructura.

Con relación al sistema estructural para construcción de edificios en estructuras metálicas, en Colombia se emplean pórticos resistentes a momentos (PRM), pórticos arriostrados concéntricos (PAC), y pórticos arriostrados excéntricos (PAE). En este caso las conexiones viga-columna responden al sistema estructural de pórticos resistentes a momentos (PRM), en donde es necesario emplear conexiones precalificadas previamente ensayadas que garantice la ductilidad y que la rótula plástica se genere en la viga y no en la columna. En el Capítulo 3 del presente documento, se relacionan los conceptos y teorías sobre las conexiones precalificadas de viga columna en pórticos resistentes a momentos.

A continuación, se relaciona la cronología sobre el uso de las estructuras metálicas en Colombia, las fallas más representativas que han quedado registradas, y las conexiones precalificadas de viga-Columna que son calificadas por norma para el territorio colombiano.

2.1 Historia de las estructuras metálicas en Colombia

Aunque el uso de conexiones precalificadas comienza a implementarse después de los eventos sísmicos ocurridos en el año 1994 en la ciudad de los Ángeles California EEUU, para hacer referencia al uso de las conexiones precalificadas en Colombia, es importante mencionar la historia de las primeras edificaciones construidas en el país con estructuras de acero; según Vargas H. (2006) las primeras estructuras metálicas en Colombia se remontan a los años 1890, en donde se construyó la primera planta industrial para la Fábrica de Bavaria en estructuras metálicas importadas de Alemania. En la construcción de edificios según Concreacero (s.f.), el primer edificio de varios niveles construido con esqueleto de acero corresponde al edificio Pedro López construido en 1924 con una estructura de acero atornillada con revestimiento en concreto. A continuación, en la siguiente tabla 1 se resume la cronología de las edificaciones más relevantes en estructuras metálicas construidas en el territorio colombiano.

Tabla 1

Edificios de acero en Colombia

Nombre del proyecto	Año	Imagen	Descripción
Edificio Pedro López	1924		Ciudad de Bogotá. Se construyo entre 1919 y 1924 se usó una estructura de acero atornillada con revestimiento en concreto. La imagen es obtenida de: Legis SA (2013).
Edificio Caja Colombiana de Ahorros	1948		Av. Jiménez Bogotá. Se construyo con una estructura importada de EEUU, con perfiles de sección I, las vigas y columnas fueron recubiertos en concreto. La imagen es obtenida de: Historia Fotográfica de Bogotá y Colombia [@HistoriaFotBog], (2020, 02 de octubre)

Tabla 1 Continuación

Nombre del proyecto	Año	Imagen	Descripción
Edificio Banco de Bogotá	1958		Carrera 10 con Calle 14 centro de Bogotá. Construido en estructura de acero importado de EEUU, para espacios de oficina con 25 pisos para una altura de 89 metros. La imagen es obtenida de: Imágenes Corner (2020).
Edificio Lugano Bogotá	1993		Estructura de acero importada desde Ecuador, fue el primer edificio en tener arriostramientos excéntricos, con vigas y columnas de acero cubiertas en concreto. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)
Edificio Terranova	1994		Edificio de 7 pisos ubicado en Bogotá para uso de apartamentos, construido con luces de 10 x 6 m, columnas cajón mixtas, viguetas en celosía, lamina colaborante formada en press brake. Imagen obtenida de: Vargas H. (2007)
Edificio Santa Lucia	1994		Edificio de 6 pisos y dos sótanos ubicados en la ciudad de Bogotá, está construido con acero ASTM A36, con columnas tipo cajón mixtas, arriostramientos con diagonales excéntricos. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)
Edificio San Sebastián	1995		Edificio de 5 pisos de uso apartamentos, ubicado en Bogotá, construido con uniones pernadas y soldadas entre vigas y columnas. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)

Tabla 1 Continuación

Nombre del proyecto	Año	Imagen	Descripción
Edificio Ferrara	1995		Edificio de 7 pisos ubicado en Bogotá, construido en estructura apernada y soldada con luces de 10 x 5,5 m. Columnas tubulares mixtas con tubería Conduven. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)
Edificio de bienestar estudiantil Universidad Jorge Tadeo Lozano [UJTL]	1999		Edificio universitario de 9 pisos, ubicado en la ciudad de Bogotá, construido con uniones pernadas en obra, columnas cajón mixtas, diagonales excéntricas en fachada y puntos fijos. Divisiones interiores en bloque de concreto reforzado. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)
Edificio Cámara de comercio de Bogota	1999		Ubicado en el centro de Bogotá Sede cedritos. Se fabrico en acero grado 50, y cuenta con 5 pisos, un sótano y un cuarto de máquinas. Imagen obtenida de: Castro H. (2009).
Edificio Preto	2004 -2005		Edificio de 11 pisos ubicado en la ciudad de Medellín para uso de oficinas y bodegas. Esta construido en acero estructural con pórticos arriostrados concéntricos. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)
Edificio Ingenio Risaralda	2005		Edificio de 5 pisos, ubicado en la Virginia-Risaralda, construido con pórticos arriostrados concéntricos con unión rígida viga-columna. Entrepiso en rejilla y concreto. La imagen es obtenida de: Vargas H. (2007)

Nota. La tabla muestra las construcciones en acero más representativas de Colombia hasta el año 2005. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla 1, se discriminan algunas edificaciones en estructuras metálicas que se han construido en el territorio colombiano a través de los años, en donde según la descripción, para algunas edificaciones registradas con vigencias después del sismo de Northridge 1994, se emplean nuevos métodos para estructuras metálicas como lo son las conexiones precalificadas para la unión viga-columna y arriostramientos, los cuales deben estar conectados con uniones calificadas previamente ensayadas, para que al ocurrir un evento sísmico se presente la falla en el arriostramiento o viga y no en el nodo de conexión viga-columna.

2.2 Rehabilitación de edificios con estructuras metálicas

Uno de los factores importantes de las estructuras metálicas, es su uso para la rehabilitación y reforzamiento estructural. Independientemente de ser una estructura en concreto reforzado o de acero, una de las formas de rehabilitar una edificación corresponde al uso de elementos metálicos, los cuales requieren de una conexión para ser adheridos a la estructura existente y así poder transmitir los esfuerzos eficientemente.

La rehabilitación de edificaciones hace referencia a la reconstrucción para reparar una estructura dañada y proveer el mismo nivel de funcionalidad para el cual fue diseñado inicialmente. En este caso se relaciona con el tema de estudio que corresponde al seguimiento y control técnico de conexiones precalificadas, ya que una de las formas más comunes para rehabilitar estructuras corresponde al uso de elementos de acero que mediante conexiones a los nodos de la estructura existente, ayudan a rigidizar el sistema estructural de la edificación. A

continuación, se relacionan algunas edificaciones de Colombia, en las que fue necesario rehabilitar estructuralmente con elementos de acero para asegurar su funcionalidad y vida útil.

2.2.1 Clínica Materno Infantil Los Farallones – Cali Valle del Cauca

La clínica Materno Infantil Los Farallones, es una edificación de 12 pisos que se vio afectado durante el evento sísmico ocurrido el día 15 de noviembre de 2004 en la ciudad de Cali. Según Gutiérrez J. (2018), los daños sufridos en la edificación Clínica Materno Infantil, fueron daños considerables puesto que, colapsaron gran cantidad de muros divisorios y exteriores sin afectar la estructura principal, ocasionando la evacuación de los ocupantes y pacientes por lo que para su rehabilitación fue necesario la demolición de todos los muros exteriores e interiores de división. Ver figura 2.

Figura 2

Clínica Materno Infantil los Farallones sin muros de mampostería



Nota: Tomado de Gutiérrez J. (2018).

La solución para rehabilitar la estructura del edificio Clínica Materno Infantil los Farallones, consistió en realizar una estructura adicional de acero para aumentar la rigidez de la edificación, mediante el uso de arriostramientos concéntricos en V y V invertida , el cual es un sistema de pórticos arriostrados concéntricos (PAC) que se conforma de cuatro diagonales que convergen en un mismo punto entre dos niveles de la estructura (para mayor comprensión del concepto ver el Capítulo 3 – Literal 3.2.3.2 del presente documento). Ver figura 3

Figura 3

Rehabilitación con arriostramientos concéntricos en Clínica Materno Infantil los Farallones



Nota: Tomado de Areiza & Garza (2021).

Como se puede apreciar en la figura 3, las conexiones de los arriostramientos concéntricos en V y V invertida conforman una X entre dos niveles, los cuales se encargan de soportar las cargas sísmicas y dejar que la estructura existente absorba solamente las cargas verticales. Para los muros interiores se utilizó estructuras livianas en Drywall, para compensar el peso adicional por los arriostramientos.

2.2.2 Edificio de la Gobernación del Quindío Armenia

Al igual que para el caso anterior, este edificio en Armenia, tuvo un reforzamiento con arriostramientos concéntricos, para aumentar la rigidez de la edificación. En este proceso constructivo, de acuerdo a la figura 4 margen izquierdo, se puede apreciar que el arrostramiento incluyo secciones de columnas y vigas para mejorar la adherencia y transferencia de esfuerzos entre la estructura de concreto existente y los elementos sobre impuestos. Las conexiones realizadas en esta edificación de tipo soldadas.

Figura 4

Rehabilitación con arriostramientos en edificio de la Gobernación en Armenia



Nota: Fuente: La fotografía de margen izquierdo es tomada de Alzate J. (2021). Y la fotografía de margen derecho es obtenida de Areiza & Garza (2021).

2.2.3 Edificio del Palacio de Justicia de Palmira

De acuerdo a la conferencia en línea realizada por el Ingeniero Gilberto Areiza y Luis Garza el 13 de septiembre de 2021, en relación al reforzamiento del Edificio del Palacio de Justicia de Palmira – Valle del Cauca el cual fue realizado por la empresa GAP Ingeniería SAS, en donde se refuerza la estructura con arriostramientos en V invertida, y reforzamiento de columnas mediante cajones metálicos para lograr una mejor adherencia entre la estructura existente y los arriostramientos. Ver figura 5.

Figura 5

Rehabilitación con arriostramientos en V invertida Edificio Palacio de Justicia de Palmira.



Nota: Tomado de Areiza & Garza (2021).

De acuerdo a la figura 5, se puede apreciar que los arriostramientos en V invertida se encuentran debidamente conectados al sistema de vigas y columnas. Para el caso de las columnas, inicialmente son columnas en concreto que gracias al cajo metálicos trabajan como columnas compuestas y permiten mayor facilidad en la conexión del arrostramiento a los nodos.

2.2.4 Clínica el Parque Armenia - Quindío

Ubicada en Armenia Quindío, la clínica el Parque corresponde a una edificación con más de 20 años, en donde en el año 2002, por motivos de ampliación del hospital fue necesario el reforzamiento estructural, el cual se realizó con un sistema de arriostramiento completo sobre impuesto sobre la estructura existente. Ver figura 6.

Figura 6

Reforzamiento con arriostramientos Clínica el Parque Armenia



Nota: Fuente: La figura de margen Izq. es obtenida de Edición Web (2019), y la figura de margen Der. es tomado de Areiza & Garza (2021).

2.2.5 Edificio Hospital de Caldas – Manizales

En esta edificación se realiza un arrostramiento concéntrico con elementos tubulares, externos o sobre impuestos en la estructura, tal como se aprecia en la figura 7.

Figura 7

Reforzamiento con arriostramientos Edificio Hospital de Caldas



Nota: Tomado de Rendón J. (2016)

2.2.6 Edificio Hospital San Juan de Dios de Armenia – Quindío

En esta edificación se realiza un reforzamiento con arriostramientos concéntricos y disipadores de fricción tipo PALL. Ver figura 8.

Figura 8

Reforzamiento con arriostramientos Edificio Hospital San Juan de Dios Armenia



Nota: Tomado de Rendón J. (2016)

De acuerdo al reforzamiento realizado en el Edificio San Juan de Dios de Armenia, se observa el uso de conexiones pernadas y platinas soldadas que aumentan la rigidez del nodo en lada estructura. Ver figura 9.

Figura 9

Sistema de arriostramiento Edificio Hospital San Juan de Dios Armenia



Nota: Tomado de Oviedo J. (2015)

De acuerdo a los tipos de reforzamiento con la implementación de elementos de acero, también existen otros tipos de reforzamientos no mencionados, como el uso de platinas para el confinamiento de vigas y columnas. En todo caso con relación al tema de estudio, se resalta que es de gran importancia el tipo y calidad de la conexión cuando se realizan rehabilitación o reforzamientos con la utilización de elementos sobre impuestos a la estructura existente, como lo son los arriostramientos.

2.3 Conexiones para estructuras de acero calificadas en Colombia

El uso de conexiones precalificadas para estructuras metálicas, comienza luego de los eventos sísmicos de Northridge 1994 en el sur de los Ángeles California EEUU, en donde muchas estructuras de acero presentaron fallas frágiles en los nodos, lo cual fue motivo de investigaciones para la precalificación de conexiones en estructuras metálicas ensayadas previamente en laboratorio.

Para el caso de Colombia, existen conexiones precalificadas que están avaladas por la norma sismorresistente NSR-10, además existen innumerables investigaciones con relación a la calificación de distintos tipos de conexiones viga-columna para estructuras metálicas. A continuación, en la siguiente tabla 2 se pueden apreciar algunas de las investigaciones que se han realizado en distintos laboratorios del territorio colombiano.

Tabla 2

Conexiones precalificadas en Colombia

Conexión	Sistema	Año	Autor	Director	Laboratorio
Viga I a PTE Rectangular sin refuerzo	NO	2004	D. Cano, A. Mazo	L. Garza	UN Medellín
Tubo LDF a LDF pernada	DMO	2004	A. Gallo, J. Narváez	C. Bermúdez, L. Garza	UN Medellín
Viga I a PTE Rectangular con refuerzo	DES	2004	J. Posada, C. Pabón	L. Garza	UN Medellín
Viga I a I soldada con cubre placas	DES	2006	H. Acero, P. Guerrero	L. Garza	UniValle
Tubo LDF A LDF soldada	DMI	2006	E. López	G. Valencia	ECI
Tubo LDF a LDF soldada	DMO	2007	S. Villar	G. Valencia	ECI
Viga I a PTE relleno pernada	DES	2009	M. Uribe	G. Valencia	ECI
Viga I reducida a I soldada con sección	DES	2011	C. Cerón	G. Areiza	UniValle

Tabla 2 Continuación

Conexión	Sistema	Año	Autor	Director	Laboratorio
Viga I expandida a I soldada	DMO	2011	E. Ramírez	G. Areiza	UniValle
Viga I a I embebida	DES	2012	C. Torres	R. Cruz, L. Garza	UIS
Viga I a PTE circular relleno	DES	2016	A. Bustamante	L. Garza	EIA
Viga I armada a I armada pernada	DES	2019	M. Suárez	G. Areiza	UniValle
Viga I a PTE circular relleno con diafragma	DES	2019	C. Ramírez	G. Areiza	UniValle

Nota: La tabla muestra algunas investigaciones sobre la calificación de conexiones en Colombia en donde se aprecia el autor y año de cada investigación. Fuente: Tomado del Congreso Internacional de la construcción con acero, ponente Garza Vásquez L. (2019).

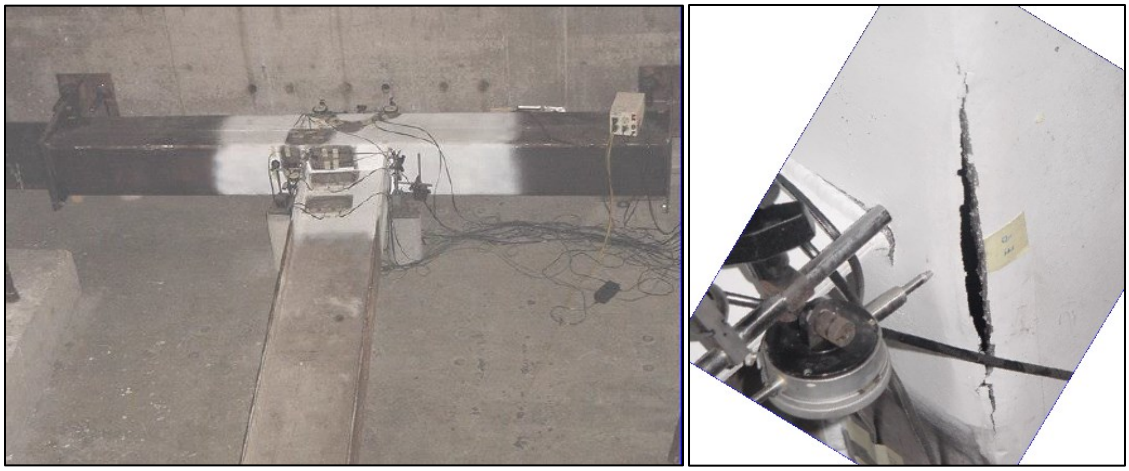
En base a la información recopilada en la tabla 2, a continuación, se relacionan parcialmente las investigaciones en donde se detallan los resultados de los ensayos realizados para conexiones precalificadas en Colombia.

2.3.1 Conexión Viga I a PTE Rectangular sin refuerzo

Esta conexión viga I a Perfil Tubular Estructural (PTE) rectangular sin refuerzo, se llevó a cabo los laboratorios de la Universidad Nacional de Medellín por los estudiantes Darline Cano y Adriana Mazo (2004), el cual fue dirigido por el profesor Luis Garza. Para el ensayo de laboratorio de este tipo de conexión se utilizo una columna de tubo armado con medidas de 300x300x8mm, y una viga VP400, totalmente soldada en campo. Ver figura 10.

Figura 10

Ensayo Conexión soldada viga I a PTE rectangular sin refuerzo



Nota: Tomado de Garza L. (2021).

De acuerdo a la figura 10, se observa que el resultado del ensayo arroja una fractura frágil en la columna de tubo armado 300x300x8mm, concluyendo que, este tipo de conexión es descalificada para cualquier sistema estructural.

2.3.2 Conexión Tubo LDF a LDF pernada

Este tipo de conexión se realizó en el año 2004, por Adriana Gallo y Juliana Narváez. El ensayo se hizo a escala real en el laboratorio de la Universidad Nacional de Medellín empleando columnas CC305x80x2, 2.5 Y 3 mm. Las vigas empleadas CC220x80x2 mm y conexiones pernadas. El sistema de conexión consistió en añadir platinas laterales soldadas a la columna y pernadas a la viga, para aumentar la rigidez en el empotramiento del nodo. Como resultado de la investigación se obtuvo como resultado que la conexión califico para sistemas de demanda

sísmica moderados e intermedios. El mecanismo de rotula se presentó en la viga, aproximo a la conexión como se puede apreciar en la figura 11.

Figura 11

Ensayo Conexión Tubo LDF a LDF pernada



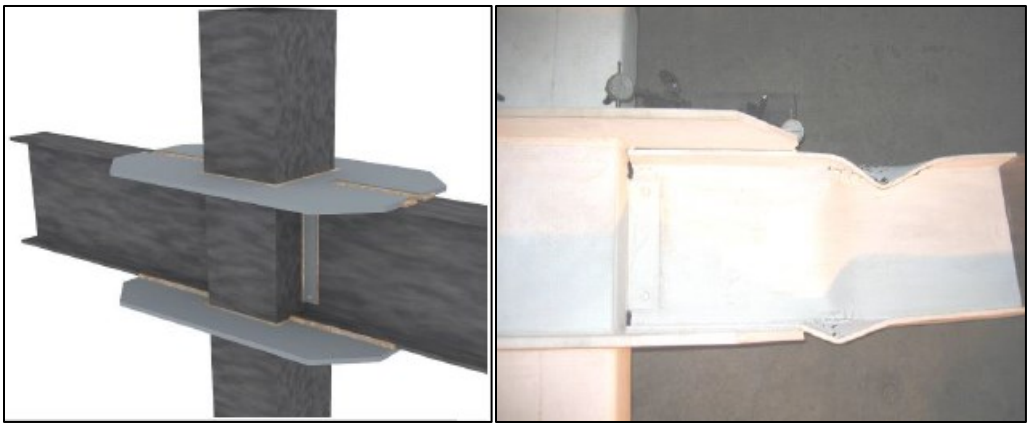
Nota: Tomado de Garza L. (2021)

2.3.3 Conexión Viga I a PTE Rectangular con refuerzo

Este tipo de conexión se realizo por los estudiantes Juan Posada y Camilo Pabón en el año 2004, bajo la dirección del profesor Luis Garza, en los laboratorios de la Universidad Nacional de Medellín, en donde se evalúa a escala real, la conexión de una viga VP400, con una columna de tubo armado de 300x300x8mm reforzada con platinas (ver figura 12). La conexión esta compuesta totalmente de soldadura en campo, y de acuerdo a los resultados se obtiene una conexión precalificada para sistemas estructurales con capacidad especial de disipación de energía en el rango inelástico (DES). Ver figura 12.

Figura 12

Conexión Viga I a PTE Rectangular con refuerzo



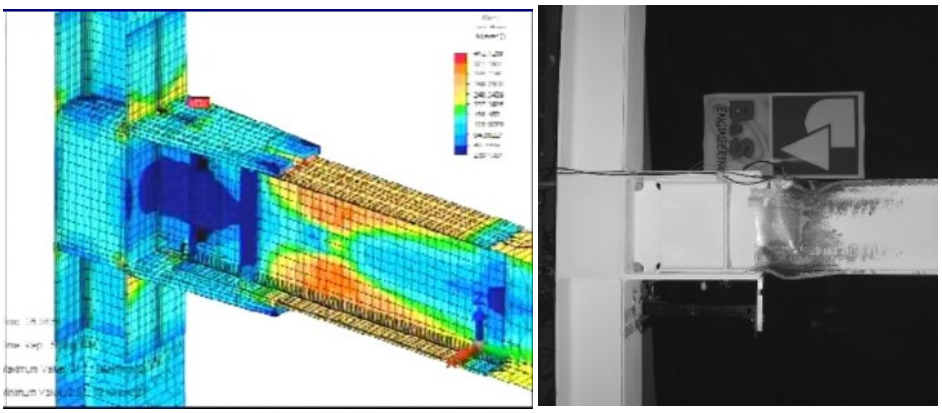
Nota: Tomado de Garza L. (2021)

2.3.4 Conexión Viga I a Columna I soldada con cubre placas

Los resultados de esta investigación se obtienen de la Revista Ingeniería y Competitividad, en su artículo Titulado "Precalificación de una conexión a momento viga-columna para aplicaciones en edificios metálicos" en donde su autor Acero y Guerrero (2006), realizan un ensayo a escala real de una unión viga-columna tipo I usando un perfil HEA300 para la columna y perfil IPE400 para la viga, soldadas, con cubre placas para la viga. Ver figura 13.

Figura 13

Conexión Viga I a Columna I soldada con cubre placas



Nota: Tomado de Acero y Guerrero (2006).

De acuerdo a la figura 13 imagen izquierda, se puede apreciar de color amarillo y anaranjado la falla o rotula plástica en la viga y no en la conexión viga-columna, lo que arroja como resultado de la investigación un impacto positivo ante esta metodología de conexión precalificada, ya que se obtienen los resultados esperados.

2.3.5 Conexión Tubo LDF A LDF soldada

Este tipo de conexión se realizó por Enrique López en el año 2006, en donde se precalifico una conexión viga-columna totalmente soldada en campo usado perfiles CCP12-12 y P8-12 con y sin atizadores para la columna y perfiles P12-16 y P8-14 CAJON e I para la viga, obteniendo una conexión precalificada para sistemas estructurales con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (DMI). Ver figura 14.

Figura 14

Conexión Tubo LDF A LDF soldada



Nota: Tomado de Garza L. (2021)

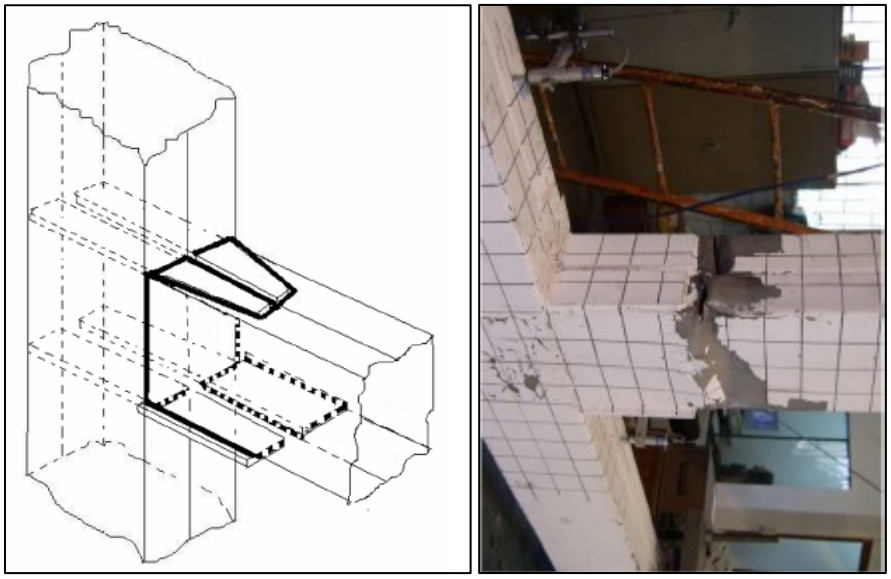
De acuerdo a la figura 14, se observa que la falla no ocurrió en la conexión soldada tanto para el perfil tipo cajón como también el perfil tipo I, lo cual indica que la investigación arroja resultados positivos.

2.3.6 Conexión Tubo LDF a LDF soldada

Esta investigación realizada por Sergio Villar en el año (2007), llevada a cabo en los laboratorios de la Universidad Nacional de Bogota, en donde se prueba una conexión de viga-columna totalmente soldada en campo utilizando perfil tipo cajón para columna CC305x80x2.5 y para viga CC305x80x2, con platinas de refuerzo, tal como se aprecia en la figura 15; se obtiene como resultado de la investigación una conexión precalificada para sistemas estructurales con capacidad mínima y moderada de disipación de energía en el rango inelástico (DMI y DMO).

Figura 15

Conexión Tubo LDF a LDF soldada



Nota: Tomado de Garza L. (2021)

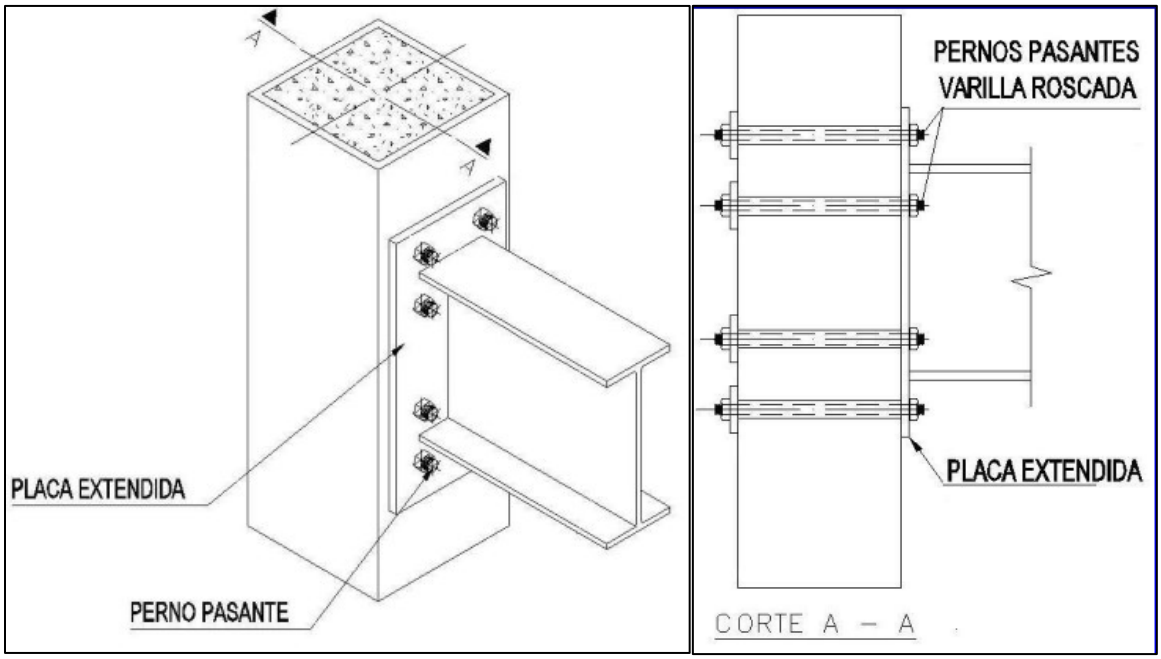
2.3.7 Conexión Viga I a PTE relleno pernada

En este caso se hace referencia a una conexión rígida de pórtico resistente a momento PRM, en donde se emplean placa soldada a la viga unido a la columna rectangular rellena de

concreto mediante pernos pasantes. Esta investigación fue desarrollada en los laboratorios Escuela de Ingeniería de la Universidad Nacional de Bogota por Uribe y Valencia (2009), en donde se utilizó de columna tubo armado A36 200 a 310x300x5, 6 y 8 mm, más concreto f'c de 21 Mpa. Para las vigas se utilizó perfil IPE 360. En la siguiente figura 16, se puede apreciar la geometría de la conexión.

Figura 16

Conexión Viga I a PTE relleno pernada



Nota: Tomado de: Uribe y Valencia (2009).

Según Uribe y Valencia (2009), concluyen que la conexión ensayada se puede considerar como rígida totalmente restringida, ya que se presentaron deformaciones inelásticas notables en las caras externas e internas de las aletas de la viga, la cual se vio reflejado por el desprendimiento de la pintura aplicada. Ver figura 17.

Figura 17

Deformación en Conexión Viga I a PTE relleno pernada



Nota: Tomado de Uribe y Valencia (2009).

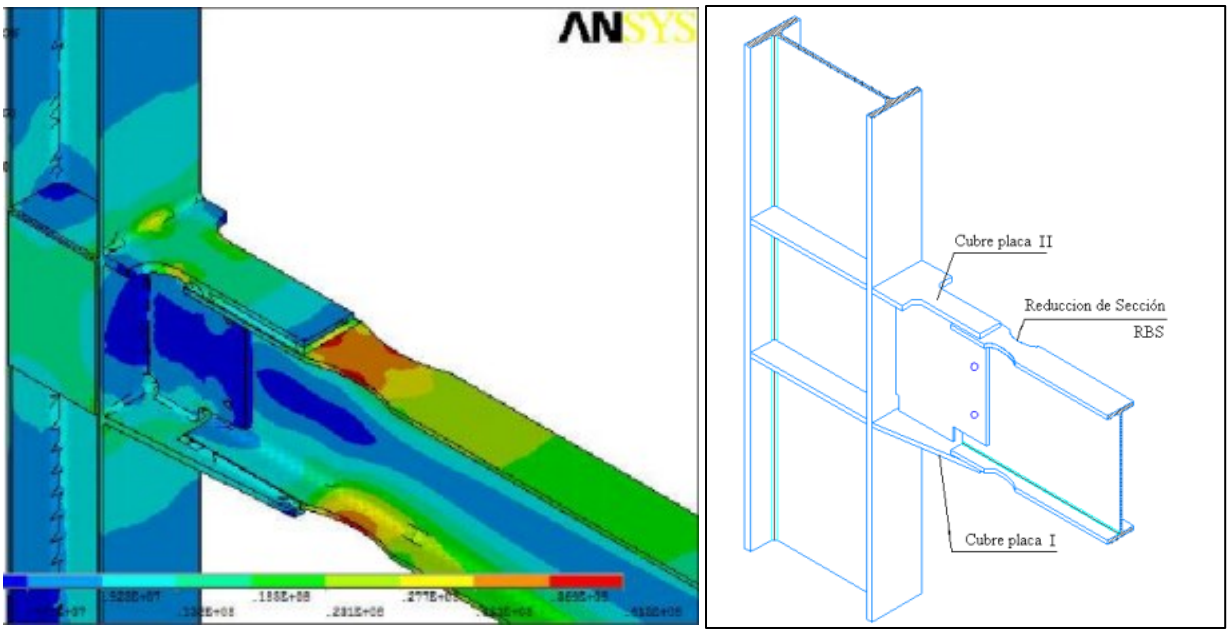
2.3.8 Conexión Viga I reducida a I soldada con sección

Este tipo de conexión es evaluada en los laboratorios de la Universidad del Valle Cali, por el Ingeniero Cesar Augusto Cerón en el año en el año 2011, En donde se realizó la precalificación de una conexión soldada en campo a momento viga-columna usando un perfil HEA300 para la columna y un perfil IPE400 para la viga, con una reducción de sección en la viga, obteniendo como resultado una conexión precalificada para sistemas estructurales con capacidad especial de disipación de energía en el rango inelástico (DES). Ver figura 18.

De acuerdo al autor Cerón C. (2011), concluye que "El procedimiento de diseño y el detallado de la conexión fueron exitosamente validados por el ensayo experimental de precalificación cíclica a escala real, y para la simulación del ensayo en elementos finitos, siguiendo los lineamientos del AISC2005". Ver figura 18.

Figura 18

Conexión Viga I reducida a I soldada con sección



Nota: Tomado de Cerón C. (2011).

2.3.9 Conexión Viga I expandida a I soldada

Este tipo de conexión fue precalificada por el ingeniero Efrén Alberto Ramírez Montoya en el año 2011, como parte de la Tesis de Maestría Titulada "Ductilidad de una conexión a momento empleando vigas de alma expandida", la cual consiste en la evaluación de una conexión viga-columna usado un perfil HEA340 para la columna y un perfil IPE400 de alma expandida para la viga.

Las vigas de alma expandida son perfiles metálicos de sección I que pueden ser de alma llena o vigas armadas que, al realizarles un corte en el alma, zigzagueante o circular, desplazarlos y soldarlos en el alma dan como resultado perfiles de mayor altura y rigidez. (Ramírez E., 2011)

En la figura 19 se puede apreciar el procedimiento de fabricación para conformar la viga de alma expandida utilizada en la Investigación de Ramírez E. (2011).

Figura 19

Elaboración viga de alma expandida



Nota: Tomado de Ramírez E. (2011), modificado por autores.

Figura 20

Conexión viga I expandida a I soldada



Nota: Tomado de Ramírez E. (2011),

De acuerdo a la figura 20, se puede apreciar el resultado de ensayo de la conexión viga I expandida a I soldada, en donde se observa el pandeo entre perforaciones de la viga. Según Ramírez E. (2011) concluye como resultado de la investigación que, las perforaciones en la viga se comportan como un fusible protegiendo la conexión, la cual es precalificada para sistemas estructurales con capacidad moderada de disipación de energía en el rango inelástico (DMO).

2.3.10 Conexión Viga I a columna compuesta con I embebida

Este tipo de conexión se utiliza para columnas compuestas con perfil de acero de sección I embebida dentro de la columna de concreto conectada a viga I. Según su autor Torres C. (2012), para el ensayo se utilizó una columna compuesta revestida de 450 x 450 mm, y una viga

W16x36, con conexión pernada, tal como se aprecia en la figura 21, en donde como resultado de la investigación se obtiene una falla por fracturamiento del concreto de la columna compuesta sin presentar falla en la conexión pernada viga-columna. Esta conexión precalifica para sistemas estructurales con capacidad especial de disipación de energía en el rango inelástico (DES).

Figura 21

Conexión Viga I a columna compuesta con I embebida



Nota: Tomado de Garza L. (2021).

2.3.11 Conexión Viga I a PTE circular relleno

La calificación para la conexión Viga I a PTE (Perfil Tubular estructural) relleno de concreto, se realizó en los laboratorios de la Universidad de EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia), durante la tesis de pregrado de Bustamante A. (2016) Titulada "Calificación de una conexión PRM tubular compuesta", en donde se realiza el ensayo de un espécimen a escala real de conexión viga-columna, empleando una viga IPE 500 y una columna PTE Ø508Cx22mm pernada. Ver figura 22.

Figura 22

Conexión Viga I a PTE circular relleno



Nota: Tomado de Bustamante A. (2016).

De acuerdo a la figura 22, la conexión no es totalmente rígida, ya que presenta desprendimiento de la pintura en la zona de la conexión pernada. La resistencia a la flexión de la conexión en la cara de la columna supera ampliamente el 80% del momento plástico (Mp), lo

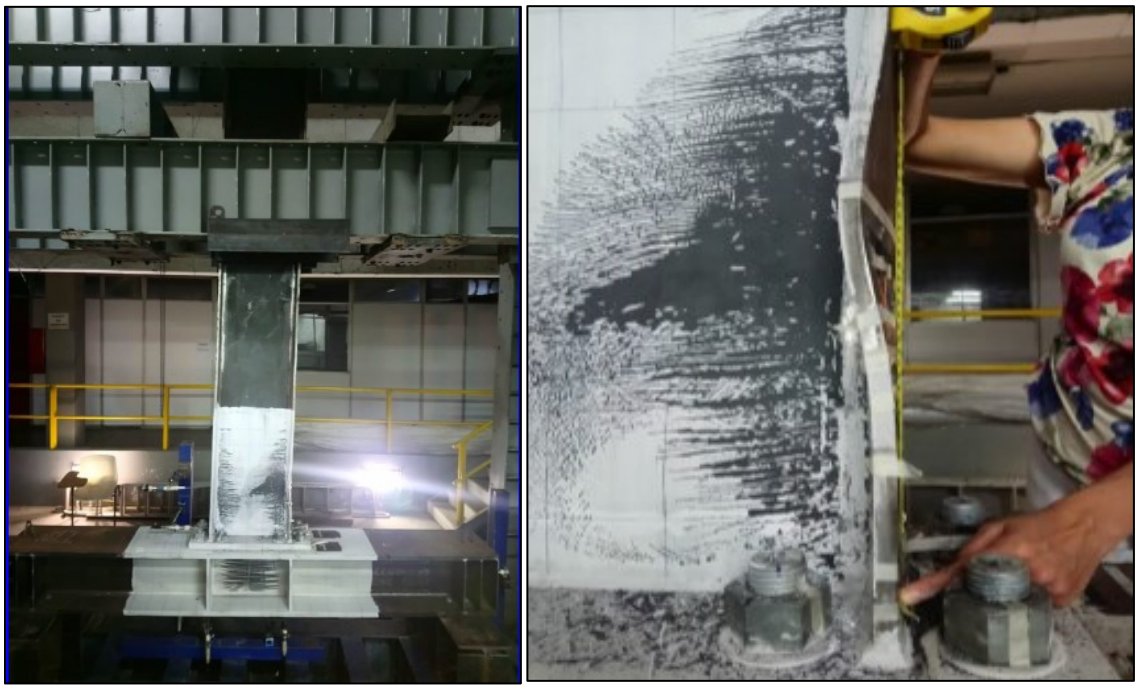
cual satisface el requerimiento de la NSR-10 para la calificación de conexiones pertenecientes a pórticos resistentes a momento con disipación de energía especial (DES). (Bustamante A., 2016).

2.3.12 Conexión Viga I armada a I armada pernada

Este tipo de conexión es evaluada por Mónica María Suarez en el año 2019, en los laboratorios de la Universidad del Valle, en donde se utilizó una viga I armada 510x15x200x12mm y una columna I armada 380x32x380x19, empleando una conexión pernada. Como resultado del ensayo de laboratorio se observa en la figura 23 que, la deformación se presenta en la zona de rotula plástica de la viga calificando la conexión para sistemas estructurales con capacidad especial de disipación de energía en el rango inelástico (DES).

Figura 23

Conexión Viga I armada a I armada pernada



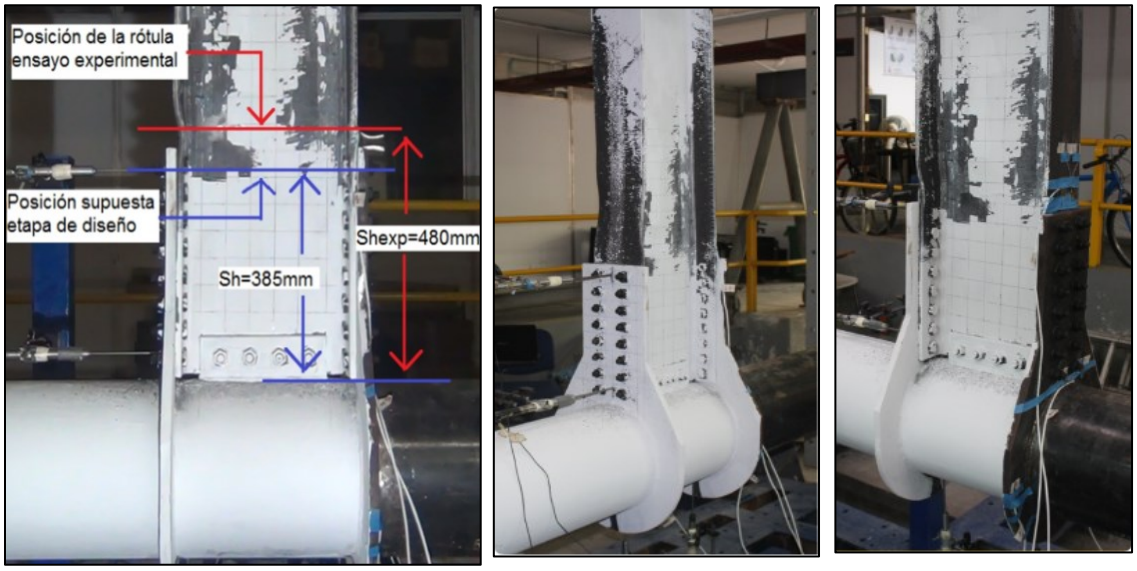
Nota: Tomado de Garza L. (2021).

2.3.13 Calificación Viga I a PTE circular relleno con diafragma

Este tipo de conexión fue calificada por el Ingeniero Cristhian Ramírez, en los laboratorios de la Universidad del Valle, y consiste en la conexión de una columna tubular circular rellena de diámetro 324x10 mm, y una viga IPE 360, conexiones pernadas y diafragmas adicionales soldados a la columna (Ramírez C., 2021). Los resultados obtenidos califican este tipo de conexión como apropiada ya que calificó para sistemas de disipación especial de energía (DES). En la figura 24, se observan los resultados de la muestra ensayada en laboratorio, en donde se evidencia la deformación en la zona donde se debe generar la rótula plástica de la viga.

Figura 24

Ensayo Conexión Viga I a PTE circular relleno con diafragma



Nota: Tomado de Ramírez C. (2021).

Con respecto a las diferentes metodologías de conexiones precalificadas evaluadas en el país, es importante resaltar que cada proyecto de edificación en estructuras metálicas requiere de un estudio de conexiones, ya que la conservación y estabilidad de la estructura no solo depende de sus elementos estructurales sino también de la calidad en sus conexiones.

Capítulo 3. Marco referencial

3.1 Antecedentes

La importancia de las conexiones precalificadas, tienen como antecedente el Sismo de Northridge de 1994 ocurrido en la ciudad de los Ángeles EEUU, en donde se presentaron gran cantidad de afectaciones a edificaciones y colapso de algunas estructuras, en especial en edificios en estructuras metálicas, los cuales presentaron fracturas frágiles en las uniones y soldaduras de viga-columna cuando se esperaba que, las estructuras de acero respondieran con un comportamiento apropiado en las zonas de articulaciones plásticas de las vigas y no en la conexión viga-columna, resultando en un desempeño sísmico muy diferente a los requisitos de diseño en los que se basaban estos sistemas (ANSI/AISC 358-05), por lo que después del sismo se tuvieron que comenzar a hacer investigaciones y pruebas reales comenzando con el uso de las conexiones precalificadas. (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-AC, 2014). Ver figura 25.

Figura 25

Fracturas típicas en estructuras de acero durante el sismo de Northridge 1994



Nota: Tomado de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-AC (2014).

Con respecto a las fallas estructurales presentes luego del sismo de Northridge 1994, Según Vargas P. (2017), en el mal comportamiento sísmico de las conexiones se debe a:

- Se construyen con aceros que otorgan una mayor resistencia, pero debilita su ductilidad, lo cual genera fallas repentinas o frágiles.
- No se conserva el criterio de columna fuerte- viga débil, en muchas ocasiones porque la zona de panel falla, antes que los demás elementos estructurales.
- Mal detallamiento de soldadura de placas de continuidad en columna produciendo rotura en las aletas y alma de columna tipo I.

Después del terremoto de Northridge se demostró que las conexiones utilizadas hasta ese momento no eran suficientes para las demandas por cargas sísmicas sísmicas, por lo que se realizan cambios en los códigos de construcción que reglamentan y restringen el uso de las conexiones para pórticos resistentes a momentos en estructuras metálicas, los cuales fueron calificadas a través de ensayos de prototipos a escala real. Bajo este criterio, el FEMA (Agencia Federal para el Manejo de Emergencia), de los EEUU, investigo y calificó un grupo de conexiones llamadas conexiones precalificadas, las cuales pueden ser diseñadas y construidas sin verificación teórica y analítica. (Cardoso & Quishpe, 2014).

3.2 Marco Conceptual

En este literal se relacionan los conceptos más relevantes que se deben tener presente para entender y comprender el desarrollo de la investigación.

3.2.1 Rotulas Plásticas

Las rotulas plásticas se definen como mecanismos localizados que permiten la disipación de energía en zonas específicas de elementos estructurales, logrando así un buen desempeño global de la estructura. Las rótulas plásticas aparecen en el instante en que el momento al que es sometido la sección sobrepasa el momento plástico de dicha sección. (García M., 2018). Ver figura 27.

3.2.2 Conexiones

En estructuras metálicas, una conexión es la unión de dos o más elementos conectados por pernos o soldadura. Según Arriaga J. (2018), el Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC, American Institute of Steel Construction) distingue en la norma de Diseño de tensión admisible (ASD, Allowable Stress Design) tres tipos de sistemas estructurales que son:

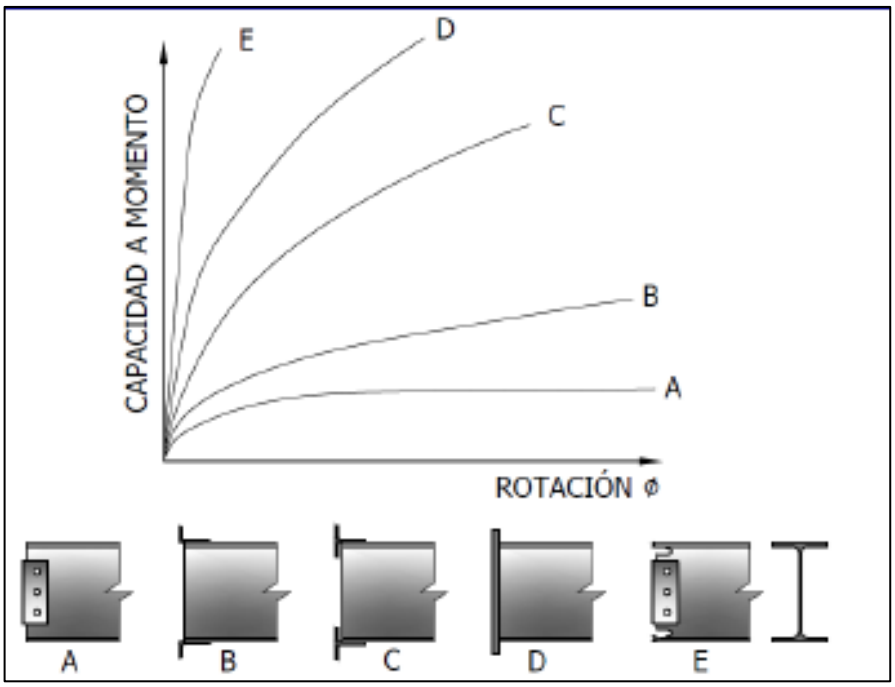
Estructuras de nudos rígidos. Hace referencia a los elementos que tienen una mayor resistencia a momentos en su conexión, por lo que ambos elementos mantienen ángulos invariables después de la deformación. (Conexión a momento)

Estructuras de nudos articulados. Las conexiones para estructuras con nodos articulados pueden transmitir el esfuerzo cortante, siendo despreciable el momento flector inducido en la viga, lo que permite el giro. (Conexión simple).

Estructuras de nudos semirrígidos. Las conexiones pueden transmitir el esfuerzo cortante y parte del momento flector. (Arriaga J., 2018). Ver figura 26.

Figura 26

Tipos de conexiones



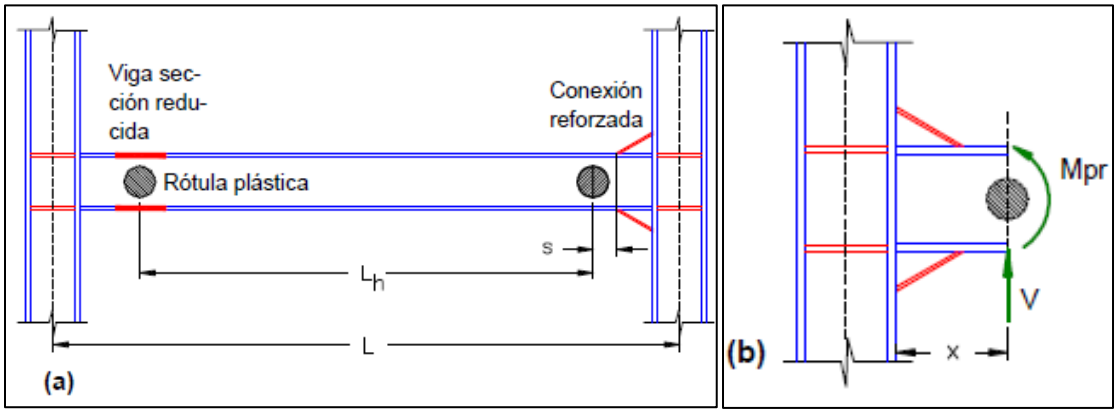
Nota: Tomado de Garza L. (2021)

De acuerdo a la figura 26, el esquema A, corresponde a una conexión simple la cual tiene algo de rigidez, el esquema B y C, a una conexión semirrígida y el esquema D y E a una conexión rígida a momento totalmente restringida.

Teniendo en cuenta lo anterior y con relación al uso de conexiones precalificadas para unión viga-columna en edificios de acero, es importante mencionar que este tipo de conexiones por lo general obedecen a conexiones rígidas, que transmiten los esfuerzos sísmicos reubicando las rotulas platicas en las vigas alejándolas de la cara de las columnas (Crisafulli et al., 2018). Ver figura 27, en donde se aprecia el símbolo “Mpr” que significa momento probable, y el símbolo “V”, el cual hace referencia a la fuerza cortante.

Figura 27

Ubicación de rotulas platicas en vigas



Nota: Tomado de Crisafulli et al. (2018).

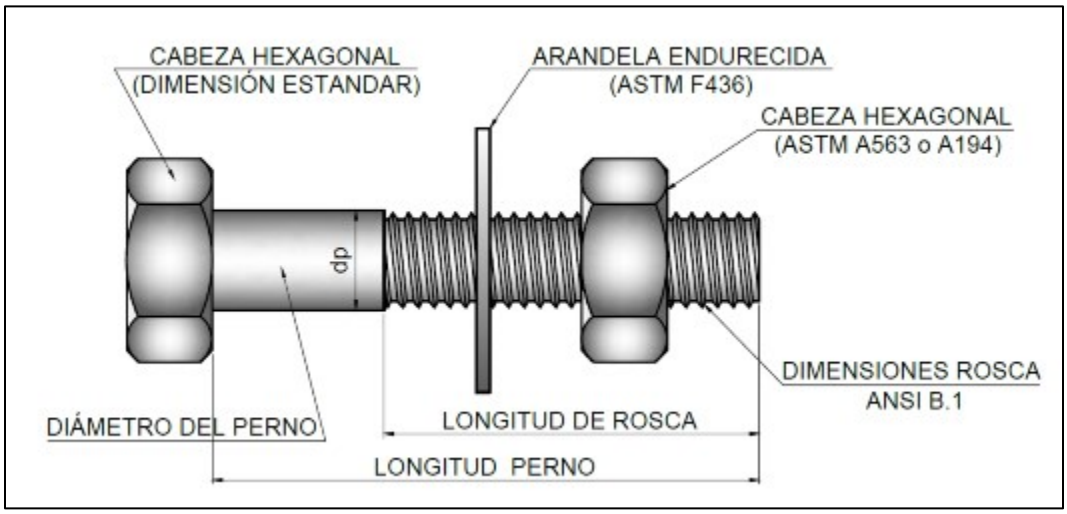
Teniendo en cuenta que una conexión precalificada es una conexión que ha sido probada en ensayo de laboratorio calificada para cierta capacidad de demanda sísmica sea DMO, DMI o DES, con respecto a la forma en que se realizan las conexiones existen dos tipos de uniones que corresponden a conexiones pernadas o conexiones soldadas.

3.2.2.1 Conexiones Pernadas. Las conexiones pernadas pueden ser de dos tipos según la resistencia de los pernos, la cual puede ser de baja y alta resistencia.

Según Peralta M. (2015), los pernos de baja resistencia son pernos A307 (acero al carbono) y los aceros de alta resistencia según la norma colombiana NSR-10 literal F.2.10.3.1, admite el uso de pernos A325, A325M, A490, A490M y A449M. Los pernos A325 y A490 son accesibles comercialmente en los tamaños ½” a 1 ½”. Los más utilizados en construcción son A325. Ver características de los pernos en la figura 28.

Figura 28

Características geométricas de un perno según la ASTM



Nota: Tomado de Peralta M. (2015).

Las conexiones pernadas se pueden utilizar para todo tipo de conexiones, tanto para uniones viga-columna, como también para uniones de arrostramientos y vigas.

3.2.2.2 Conexiones soldadas. Hacen referencia a la unión de dos elementos metálicos por medio el calentamiento de sus superficies, llevándolas a fluir con o sin la adición de otro material fundido. Los procedimientos para calificar soldaduras, se deben realizar según lo establecido en la Norma NSR-10 Literal F.2.10.2. Las clases de soldadura más utilizados son:

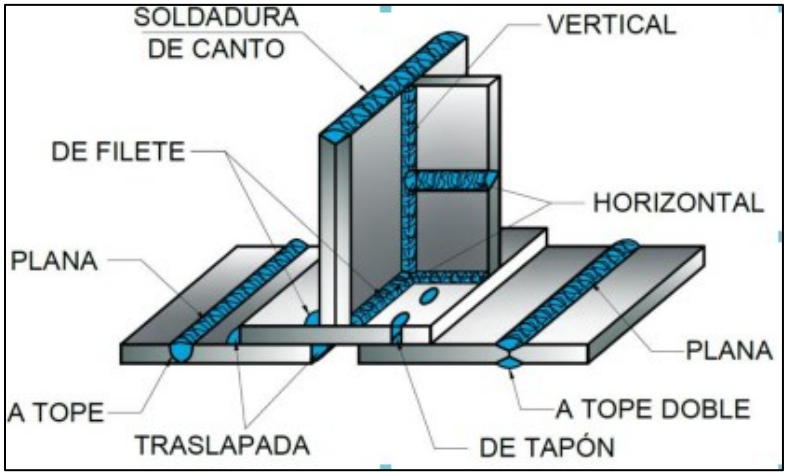
Soldadura a tope. Es un tipo de soldadura utilizado cuando las piezas a unir están colocadas de forma alineada en un mismo plano y requieren de un encaje perfecto, por lo general se usa en ensambles de columnas y en conexiones de patines de vigas a patines de columnas. (Peralta M., 2015). Ver figura 29.

Soldadura de filete. Se utiliza para conectar elementos estructurales y es de fácil fabricación. La forma de este tipo de soldadura corresponde a un triángulo rectángulo. La dimensión del filete de soldadura se delimita por la longitud de los catetos. Ver figura 29.

Soldadura de tapón y ranura. Este tipo de soldadura se utiliza para transmitir cargas a cortante en uniones traslapadas, en especial cuando el tamaño de la conexión limita la longitud disponible para poder realizar la soldadura. Esta soldadura consiste en pequeñas ranuras de forma circular o alargada en una de las piezas a unir, con el fin de permitir que luego se llenen total o parcialmente con soldadura. (Peralta M., 2015). Ver figura 29.

Figura 29

Clasificación de soldaduras y posiciones



Nota: Tomado de: Peralta M. (2015).

Teniendo en cuenta que existen distintos tipos de soldadura con el que se realizan conexiones en estructuras de acero, según Capa V. (2009), se describe así:

Soldadura de arco eléctrico. Se realiza utilizando un electrodo que se funde dentro de la junta por medio del calor intenso desarrollado por un arco eléctrico.

Soldadura pro gas u oxiacetilénica. En este tipo de soldadura se utiliza una barra metálica conocida como llenador o barra de soldar que se funde cuando se acerca la boquilla de un soplete que quema una mezcla de oxígeno con ayuda de un gas combustible en este caso el acetileno.

Soldadura de arco sumergido. Se realiza utilizando un electrodo metálico continuo y sin recubrimiento, en donde el arco se produce entre el alambre y la pieza bajo una capa de fundente granular que se va depositando delante del arco.

Soldadura de resistencia. Esta soldadura de resistencia, consiste un grupo de procesos de soldadura, donde el calentamiento es producido por el paso de la corriente eléctrica a través de la unión de dos piezas. (Capa V., 2009).

Teniendo en cuenta la incertidumbre que representa una soldadura, es importante realizar una serie de controles de calidad para verificar la correcta fabricación de una conexión soldada, como lo es la realización de ensayos de ultrasonido, rayos X, líquidos penetrantes; y la inspección y observación visual antes durante y después de la soldadura. Para el caso de Colombia como parte del control de calidad en soldaduras, se deben seguir los lineamientos y parámetros establecidos en la norma NSR-10 Titulo F.2.14.5.4. En el capítulo 4.2 del presente documento se puede apreciar a detalle los controles técnicos para la inspección y verificación de soldaduras establecido por la norma NSR-10.

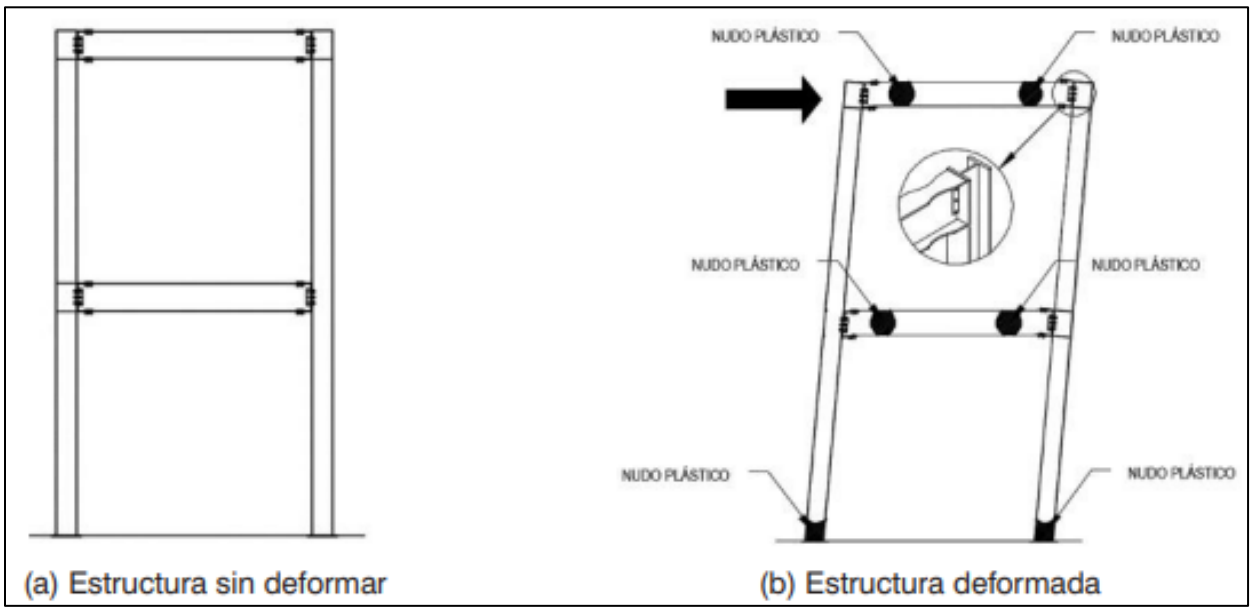
3.2.3 Tipos de sistemas sismorresistentes usados en edificios de acero

Los sistemas de resistencia a carga sísmica utilizados en el diseño de estructuras de acero, por lo general los más comunes corresponden a:

3.2.3.1 Pórticos Resistentes a momento PRM. Este tipo de pórticos tiene un comportamiento de resistencia y estabilidad en la rigidez que proveen las uniones ortogonales de viga columna. Estas uniones puede ser pernadas o soldadas, primordialmente usando conexiones precalificadas. (Torres C., 2019). La resistencia a cargas sísmicas en este sistema se presenta por flexión y cortante en vigas y columnas, la principal fuente de ductilidad proviene de la formación de rotulas plásticas en las vigas. Tal como se aprecia la siguiente figura 30.

Figura 30

Comportamiento de un pórtico resistente a momento sometido a carga sísmica

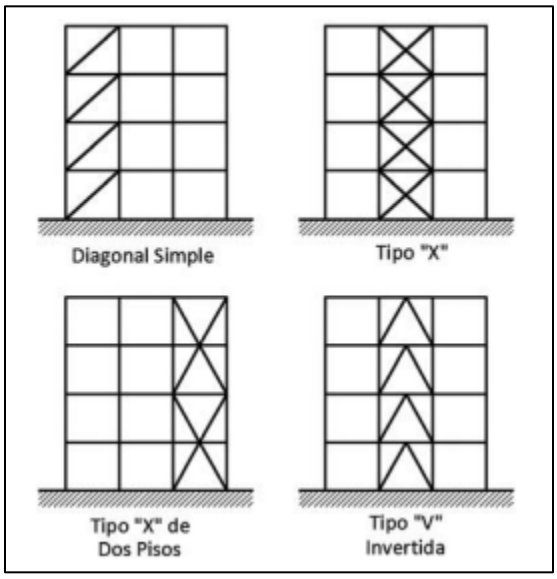


Nota: Tomado de Portón et al. (2016).

3.2.3.2 Pórticos arriostrados concéntricos PAC. Son estructuras en donde los elementos diagonales proporcionan la resistencia necesaria para resistir las cargas sísmicas, en otras palabras, funcionan como fusibles en una edificación a la hora de ocurrir un evento sísmico, ya que absorben las cargas laterales produciendo la ductilidad y deformación en los elementos diagonales del arriostramiento. Es importante mencionar que la conexión del arriostramiento debe garantizar que la falla se generara en la rótula plástica del arriostramiento y no en el nudo o conexión. Los sistemas de arriostramientos concéntricos se aprecian en la figura 31.

Figura 31

Tipos de pórticos con arriostramientos concéntricos



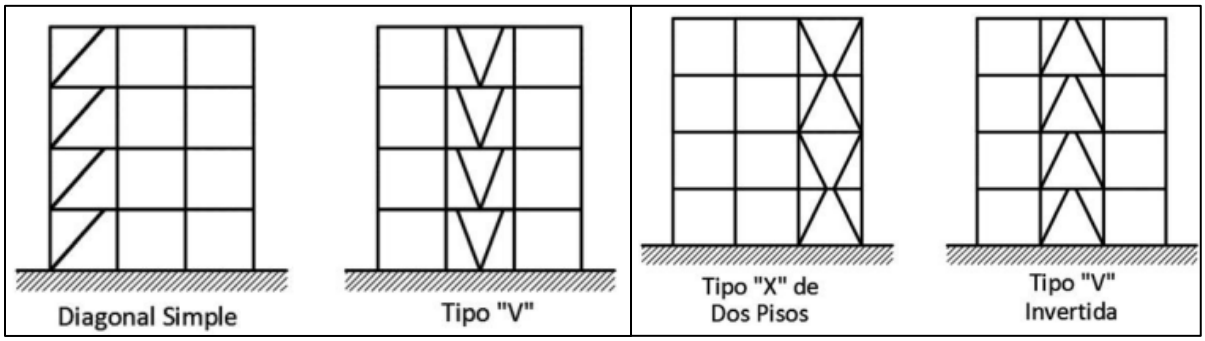
Nota: Tomado de Portón et al. (2016).

De acuerdo a la figura 31, se puede apreciar el pórtico en diagonal simple conformado por un solo elemento en diagonal; pórtico tipo X conformado por 4 diagonales que convergen en un mismo punto; pórtico tipo V invertida conformado por dos diagonales; pórtico X de dos pisos o también conocido como pórtico en V y V invertida los cuales conforman un X entre dos pisos.

3.2.3.3 Pórticos arriostrados excéntricos PAE. Este tipo de sistema tiene una particularidad y es que las líneas de eje entre arriostramientos, vigas y columnas no se interceptan. Este tipo de sistema estructural es recomendado para edificios altos y esbeltos, donde la disipación de energía se produce por fluencia del acero mediante la excentricidad que se genera en la viga. (Borbor & Panchana, 2020). Ver figura 32

Figura 32

Tipos de pórticos con arriostramientos excéntricos



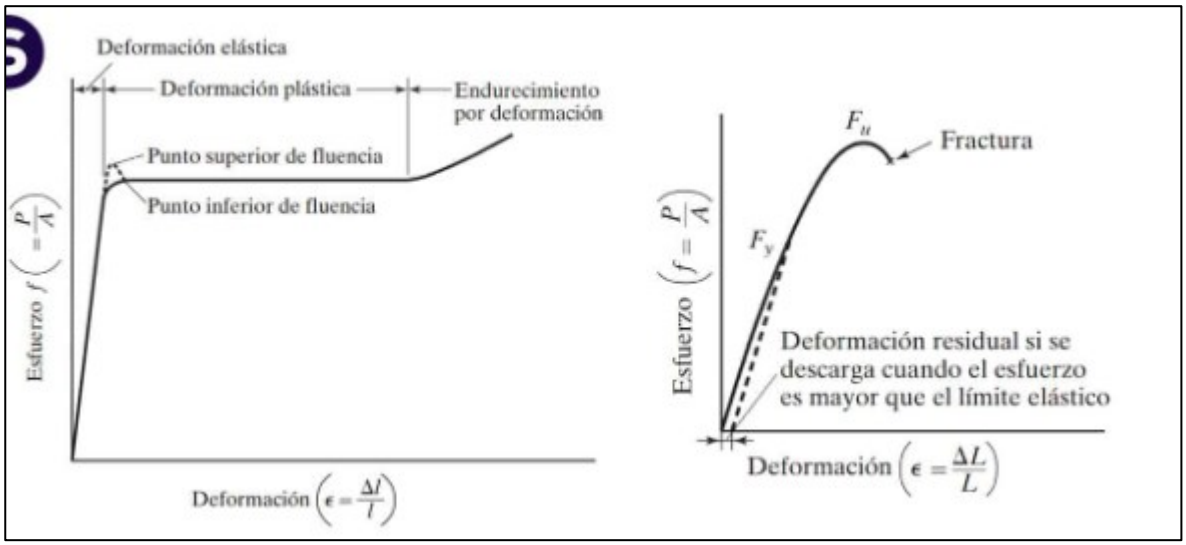
Nota: Tomado de Portón et al. (2016).

3.2.4 Ductilidad

La ductilidad es una característica que tienen los elementos para deformarse una vez superado el límite elástico antes de llegar a la ruptura. De acuerdo a la definición de McCormac (Cormac, 1999), la ductilidad hace referencia al comportamiento de las estructuras el cual indica la cantidad de energía sísmica que puede ser disipada a través de deformaciones controladas en el rango inelástico. (López H., 2018). El rango inelástico hace referencia a la deformación plástica, tal como se puede apreciar en la figura 33, en donde se aprecia el diagrama de esfuerzo deformación para un elemento.

Figura 33

Diagrama de esfuerzo - deformación



Nota: Obtenido de Spectra Ingenieria (s.f.)

3.2.5 Conexión Precalificada

Según Manrique A. (2018), las conexiones precalificadas consisten en uniones que han pasado por un proceso de análisis y estudios previos que garantizan el desplazamiento de la falla que ocurre en la conexión hacia la viga que conforma el pórtico (esta viga se conoce como elemento fusible).

3.3 Marco Teórico

En este literal se relaciona en teoría cual es la función de las conexiones precalificadas en las edificaciones de estructuras metálicas, como también se relacionan algunas conexiones precalificadas aprobadas por la norma AISC 358-16. El objetivo principal del diseño y uso de las

conexiones precalificadas es evitar la falla frágil en las conexiones y transmitir las cargas laterales a las zonas localizadas de rotulas plásticas, con el fin de resistir las cargas sísmicas sin presentar el colapso de la estructura, prevenir daños, mantener la funcionalidad y permitir reparaciones fáciles.

A pesar de que se requiere de un diseño estructural para definir la rigidez y estabilidad de una edificación, el uso de las conexiones precalificadas contribuye a forzar deformaciones inelásticas en elementos dúctiles específicamente en las zonas de articulaciones plásticas de vigas y arriostramientos, evitando que se presenten fallas frágiles, ya que puede ocasionar inestabilidad global y fracturas en las uniones.

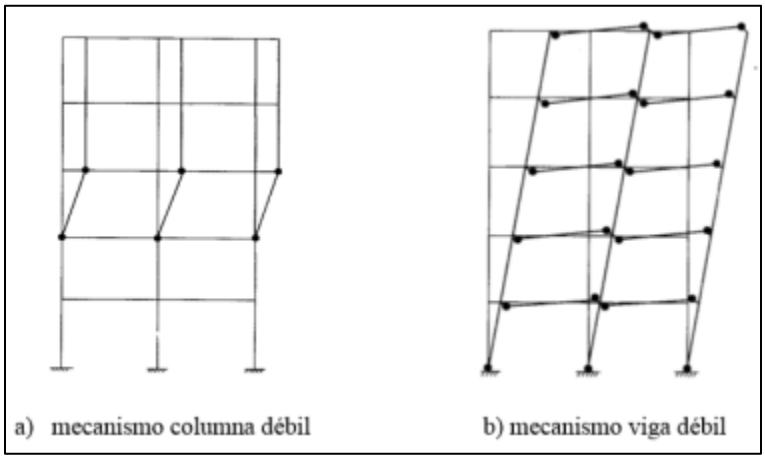
De acuerdo al párrafo anterior es importante aclarar que cuando se habla de deformaciones inelásticas o comportamiento inelástico de la estructura hace referencia que, una vez presentada la deformación en un elemento, este no vuelve a su posición inicial, en cambio cuando se habla de comportamiento elástico significa que el elemento si se devuelve a su posición inicial. Según Escartín M. (2014), cuando se habla de un diseño elástico, se basa en aplicar ciertas cargas sobre una estructura sin que ningún punto de la misma sobrepase el límite elástico del material del que está compuesto y por lo tanto la retirada de las cargas conlleva a que la estructura vuelva a su estado inicial indeformable, en el momento en que se sobrepasa dicho limite elástico, se producen fenómenos de fluencia plástica y por último el colapso.

Según Barreto y Samayani (2017). El mecanismo de comportamiento no lineal de una estructura depende del número de secciones que sobrepasan la etapa lineal. Mientras mayor sea

el número de secciones que participen de la deformación no lineal y mientras más dúctil sea el comportamiento de estas secciones, mayor ductilidad tendrá el sistema. (Bazan & Meli, 2004). Para el caso de edificaciones de acero se diseñan mediante el mecanismo de viga débil columna fuerte, empleando conexiones precalificadas para garantizar el equilibrio del sistema y que todas las rotulas plásticas ocurran en las vigas y no en las columnas. Ver figura 34.

Figura 34

Mecanismos de falla de un sistema estructural



Nota: Tomado de Barreto y Samayani (2017).

De acuerdo a la figura 34, se aprecia que el mecanismo de columna débil hace referencia a plastificación de las columnas y por lo tanto al colapso, ya que cuando ocurre la plastificación significa que las columnas deformadas no se devuelven a su estado inicial indeformable, motivo por el cual, en el diseño de edificaciones en acero, se debe incluir el sistema de falla viga débil columna fuerte, para que el sistema sea más dúctil y así evitar la falla frágil en las conexiones. En casos cuando las vigas no ofrecen la ductilidad necesaria para resistir las cargas sísmicas es necesario la incorporación de arriostramientos según lo indique el diseño estructural.

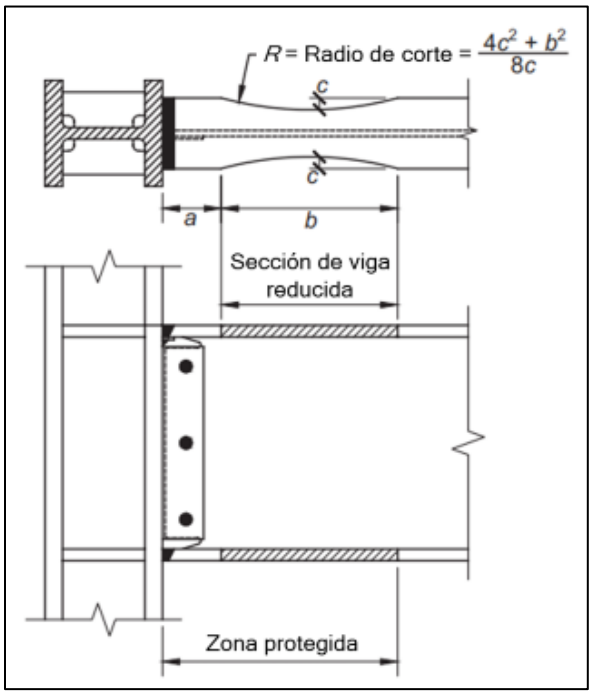
En conclusión, el uso de conexiones precalificadas, garantiza que no se presenten fallas en las conexiones viga-columna de pórticos resistentes a momentos. Logrando controlar los esfuerzos transmitiéndolos a las articulaciones plásticas de los elementos más dúctiles como las vigas o arriostramientos. De acuerdo a las disposiciones de la norma AISC 358-16, a continuación, se relacionan las conexiones precalificadas más usadas.

3.3.1 Conexión a momento de sección reducida (Reduced beam section, RBS)

Según la norma AISC 358-16, en su capítulo 5, este tipo de conexión consiste en cortar y reducir las aletas de la viga en la región contigua a la conexión viga-columna, con la finalidad de que se genere la rótula plástica dentro de la sección reducida de la viga. Ver figura 35.

Figura 35

Conexión de sección con viga reducida



Nota: Fuente: Tomado de Norma AISC 358-16.

De acuerdo a la figura 35, este tipo de conexión es aplicable para pórticos resistentes a momentos en sistemas estructurales con capacidad moderada y especial de disipación de energía en el rango inelástico (DMO-DES). Para la conexión con viga reducida, según la norma AISC 358-16, se deben tener en cuenta las siguientes limitaciones:

-Las vigas deben ser piezas laminadas de aleta ancha o elementos ensamblados de sección tipo I que cumplan con los requerimientos de la Sección 2.3 de la norma AISC 358.

-El peralte de la viga se restringirá como máximo al de un perfil W920 (W36) para perfiles laminados. En caso de secciones ensambladas, el peralte no podrá exceder el peralte permisible para perfiles laminados de aleta ancha.

-El peso máximo que puede tener una viga reducida no podrá ser superior al valor de 447 kgf/m (302 lb/ft) y el espesor para la aleta de la viga no podrá ser superior al de 44 mm (1¾ in.).

Para el caso de las columnas en este tipo de conexión precalificada con viga reducida, según la norma AISC 358-16 se deben tener en cuenta las siguientes limitaciones:

-Las columnas deben estar entre los perfiles laminados o piezas ensambladas permitidos en la Sección 2.3 de la norma AISC 358. La viga reducida, se debe conectar a la aleta de la columna.

-El peralte de la sección transversal de la columna laminada se restringirá como máximo al de un perfil W920 (W36). El peralte de una columna ensamblada de aleta ancha no excederá el ancho correspondiente a una sección laminada.

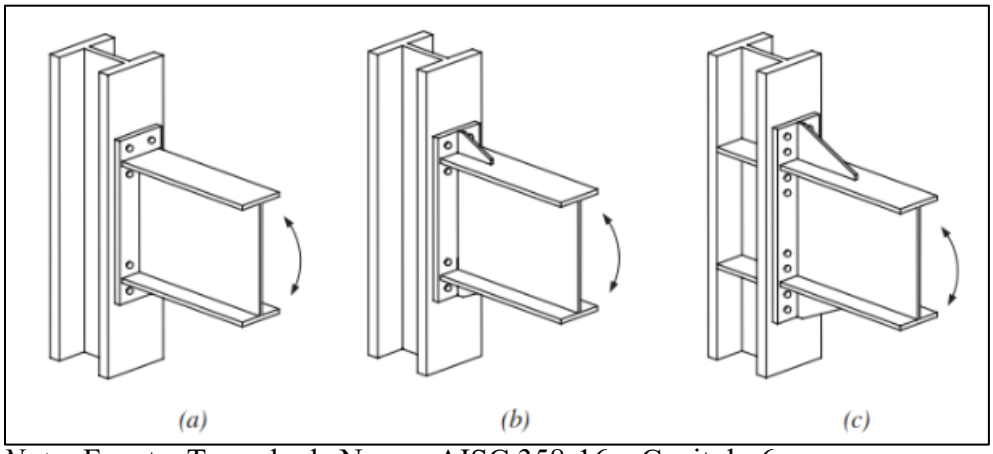
-Con relación a las restricciones del peso de las columnas no hay limitaciones para las columnas, al igual que no hay requerimientos especiales para el espesor de las aletas.

3.3.2 Conexión a momento de placa de extremo rigidizada o no rigidizada

Este tipo de conexión se ensambla soldando la viga tipo I, a una placa de extremo que a su vez se conecta con pernos a la aleta de la columna (AISC 358-16). Como se aprecia en la figura 36 la imagen a) corresponde a una conexión sin rigidizadores de 4 pernos, la imagen b) conexión de 4 pernos con rigidizadores y la imagen c) de 8 pernos con rigidizadores.

Figura 36

Conexión a momento de placa de extremo rigidizada o no rigidizada



Nota: Fuente: Tomado de Norma AISC 358-16 – Capitulo 6.

De acuerdo a la figura 36, la principal ventaja de la conexión es que no es necesario realizar soldadura de campo, por lo que el montaje es más rápido. De acuerdo a la Norma AISC 358-16, a continuación, se relacionan algunas limitaciones para vigas y columnas con este tipo de conexión:

Limitaciones para vigas: -Las vigas deben ser elementos laminados de aleta ancha o piezas ensambladas para conformar la sección tipo I, que cumpla con los requerimientos de la Sección 2.3 de la norma AISC 358-16. -Para la conexión viga-columna, cuando se utilicen vigas ensambladas, el alma y las aletas de la viga deberán unirse usando soldadura acanalada de penetración completa (CJP) o un par de soldaduras de filete que tengan cada una un tamaño del 75% del espesor del alma de la viga, pero no menos de 6 mm (¼ in.). -Con relación al peso por unidad de longitud No hay limitaciones para las vigas.

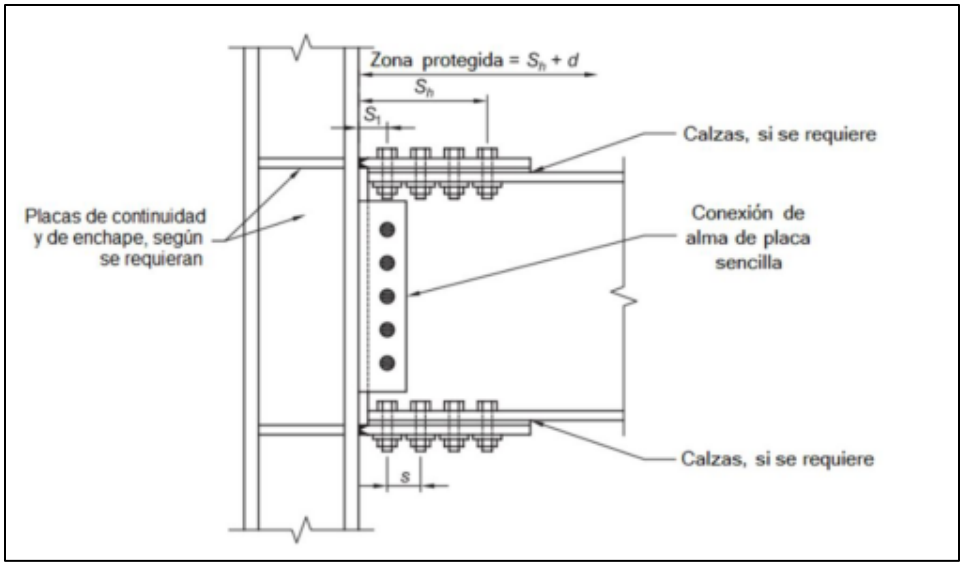
Limitaciones para columnas: -Las columnas que se pueden emplear para este tipo de conexión, puede ser cualquiera de los perfiles laminados o ensamblados permitidos por la sección 2.3 de la norma AISC 358-16. – Con relación a la placa de extremo se debe conectar a la aleta de la columna. El peralte de la sección transversal de una columna laminada se restringirá como máximo al de un perfil W920 (W36). El peralte de una columna ensamblada de aleta ancha no debe ser superior al peralte de una sección laminada.

3.3.3 Conexión a momento de placas pernadas a las aletas (BFP)

Este tipo de conexión utiliza placas soldadas a la aleta de la columna empleando soldadura acanalada (CJP) y pernos de alta resistencia para unir las placas a las aletas de la viga, tal como se aprecia en la figura 37. La conexión viga-columna empleando placas pernadas a las aletas de la viga utiliza dos placas superior e inferior exactamente iguales y el alma de la viga se conecta a la aleta de la columna usando una placa a cortante pernada. Norma AISC 358-16). Ver figura 37.

Figura 37

Conexión a momento de placas pernadas a las aletas



Nota: Tomado de Norma AISC 358-16 – Capitulo 7.

De acuerdo a la figura 37, este tipo de conexión viga-columna utilizando placas pernadas a la viga, tiene una serie de limitaciones establecidas en la norma AISC 358-16, las cuales se aprecian a continuación:

Limitaciones para vigas: Las vigas deberán ser elementos laminados de aleta ancha o ensamblados de sección tipo I que cumplan los requerimientos de la Sección 2.3 de la norma AISC 358-16. -El peralte máximo de la viga no debe ser superior al de un perfil W920 (W36) para elementos laminados. Para elementos ensambladas el peralte no deberá ser superior al permitido para perfiles laminados de aleta ancha. El peso de la viga no debe ser superior 223 kg/m (150 lb/ft) y el espesor de la aleta de la viga deberá tener un valor un máximo de 25.4 mm

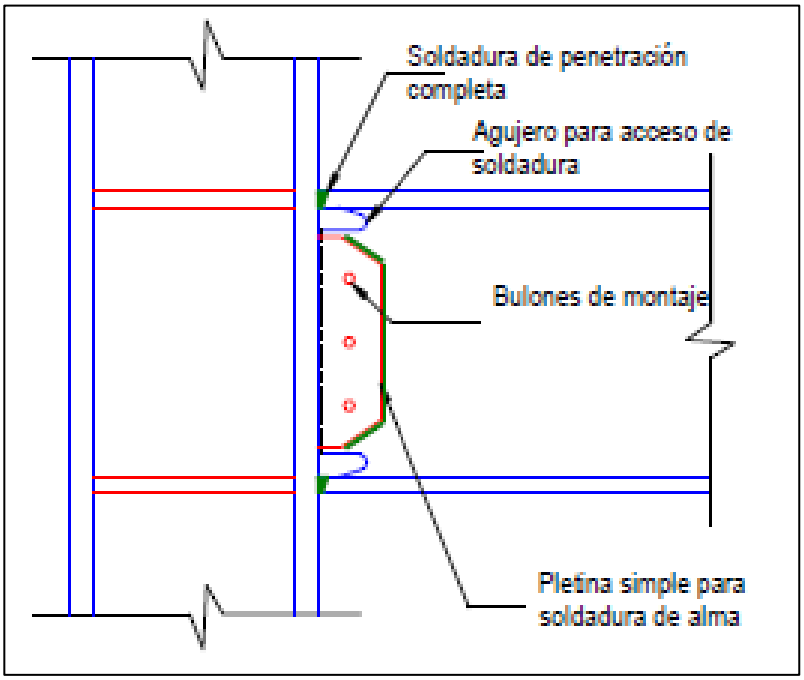
Limitaciones para columnas: Para el caso de las columnas se pueden utilizar perfiles laminados o secciones ensambladas permitidos según la Sección 2.3 de la norma AISC 358-16. El peralte de la columna en perfil laminado no debe ser mayor al de un perfil W920 mm (W36) cuando se tenga una losa estructural de concreto. Cuando no se tenga una losa estructural de concreto, el peralte de la columna en perfil laminado debe ser máximo un perfil W360 (W14).

3.3.4 conexión de aletas no reforzadas soldadas-alma soldada

Este tipo de conexión según la Norma AISC 358-16, está precalificada para su uso en sistemas estructurales con capacidad moderada y especial de disipación de energía en el rango inelástico (DMO-DES). En la figura 38 se puede apreciar la geometría de la conexión.

Figura 38

Conexión de aletas no reforzadas soldadas-alma soldada



Nota: Tomado de Norma AISC 358-16 – Capitulo 8.

De acuerdo a la figura 27, según la Norma AISC 358-16, los límites de la precalificación para viga y columna corresponden a:

Limitaciones para vigas: Las vigas deben ser elementos laminados de aleta ancha o ensamblados para conformar sección tipo I cumpliendo con los parámetros de la Sección 2.3 de la norma AISC 358-16. El peralte máximo de la viga no debe ser superior al de un perfil W920 (W36) para elementos laminados. Para el caso de elementos ensamblados, el peralte no debe ser mayor que el permitido para perfiles laminados de aleta ancha. El peso máximo de la viga debe ser de 224 kg/m (150 lb/ft). El máximo espesor de la aleta de la viga no debe sobrepasar los 25.4 mm.

Limitaciones para columnas: Para las columnas se permite el uso de perfiles laminados o ensamblados según lo establecido en la sección 2.3 de la norma AISC 358-16.

El peralte máximo para columnas en perfiles laminados, no debe ser mayor que el de un perfil W920 (W36). Para columnas ensambladas el peralte máximo no debe superar lo permitido para secciones laminadas.

De acuerdo a las conexiones precalificadas descritas, se clara que solo reflejan parcialmente algunos métodos de conexiones precalificadas para viga-columna tomados de la Norma AISC 358-16. De la misma forma las limitaciones para cada conexión precalificada descrita, no representa la totalidad de las limitaciones que pueden ser propia del material o del diseño de la conexión.

3.4 Marco Legal

Las disposiciones normativas referentes al uso de conexiones precalificadas para estructuras en acero, comenzaron con los resultados de la Investigación de la Agencia Federal para el manejo de emergencias FEMA, los cuales consideraron la necesidad de cambiar los requerimientos tanto en las especificaciones AISCC (American Institute of Steel Construction) como también en AWS (American Welding Society)

Dentro de los resultados de la investigación de FEMA, se pueden apreciar las siguiente:

FEMA 350 – Recomienda criterios para el Diseño Sísmico en edificios nuevos para el uso de estructuras o pórticos resistentes a momento. (FEMA 2000a).

FEMA 351 – Consiste en los criterios recomendados para la evaluación Sísmica de edificios existentes en estructuras metálicas resistentes a momento. (FEMA, 2000b).

FEMA 352 – Consiste en los parámetros y criterios de evaluación para edificios existentes posterior a la ocurrencia de un terremoto. También incluye criterios de reparación para estructuras con pórticos resistentes a momento de acero soldado (FEMA 2000c).

FEMA 353 – Contempla especificaciones recomendadas para el control de calidad para la construcción de estructuras metálicas con pórticos resistentes a momento sometido a cargas sísmicas. (FEMA 2000d)

Otras disposiciones normativas a nivel mundial que se relacionan con el uso de conexiones precalificadas corresponden a:

ANSI/AISC 360-10 Especificaciones para estructuras de edificios en acero.

ANSI/AISC 341-10/358-10 Disposiciones sísmicas de conexiones precalificadas.

ANSI/AISC 358-16 Diseño de conexiones precalificadas de pórticos resistentes a momento.

AISC 327 – 12A Manual de diseño sísmico segunda edición.

AWS D1.1/D1.1M Código de soldadura estructural – Acero.

AWS D1.8/D1.8M Código de soldadura estructural – Suplemento sísmico.

Con respecto a las normas aplicables en el territorio colombiano, con respecto al uso de conexiones precalificadas en Colombia se puede hacer referencia al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, en donde se resalta lo siguiente:

Titulo NSR-10 Capitulo- F-2. Hace referencia a las estructuras que no tienen sismo.

Titulo NSR-10 Capitulo F-3. Consiste en el aseguramiento sísmico para estructuras de acero con perfiles laminados, armados y tubería estructural. En este capítulo de la norma con respecto al control de calidad de conexiones precalificadas, se resaltan los siguientes literales:

NSR-10 Literal F.3.1.5 – Planos y especificaciones de diseño estructural, en donde se relacionan todos los requerimientos para la entrega de planos y especificaciones técnicas en estructuras de acero.

NSR-10 Literal F.3.5 – Pórticos resistentes a Momentos (PRM), en donde se relacionan todos los requerimientos con relación a la conexión viga-columna, soldadura y demás disposiciones que hacen parte de los PRM.

NSR-10 Literal F.3.9 – Fabricación y montaje, en donde se disponen de requerimientos para la disposición y montaje de uniones pernadas y soldadas.

NSR-10 Literal F.3.10 – Control de calidad y supervisión técnica para estructuras del sistema de resistencia sísmica, en este literal se disponen de procedimientos y requerimientos normativos para la inspección visual y verificación antes y después de realizar actividades como conexiones soldadas y pernadas.

Norma Técnica Colombiana ICONTEC- Código de Prácticas Estándar para Estructuras Metálicas NTC 5832

Capítulo 4. Generalidades del seguimiento y control técnico en conexiones metálicas precalificadas de viga-columna empleadas en la construcción de edificaciones verticales

Para el seguimiento y control técnico de conexiones precalificadas en la construcción de edificios de acero, inicialmente se deben identificar en planos el tipo de conexiones precalificadas que lleva la estructura verificando que se encuentre previamente calificada en base a las conexiones dispuestas por la Norma AISC 358-16, o también según las disposiciones establecidas en la norma NSR-10 Capitulo F.

Como parte del seguimiento y control que se debe realizar para la fabricación de una conexione precalificada, vale la pena resaltar la importancia que representa la inspección y verificación de soldaduras y pernos, ya que son las dos formas de unir una conexión precalificada.

4.1 Inspección y Verificación de materiales

Con relación a la calidad de los materiales, se debe verificar que el acero recibido en obra, cumpla con las especificaciones técnicas de acuerdo a los estudios previos del proyecto, para lo cual es importante solicitar al encargado de entregar el material, la ficha técnica de especificación del material, en donde se debe revisar el estado de fluencia del material, el espesor la longitud y que no venga con abolladuras o deformaciones. Se debe verificar además que la designación del acero se encuentre en la Norma NSR-10 Literal F.2.1.5.1.

Con relación al almacenamiento del material, se debe verificar que, si el izaje de la estructura requiere del almacenamiento del material, este se debe disponer en un lugar libre de humedad y cubiertos con plástico, en caso de estar expuesto a la intemperie, esto con el fin de evitar la corrosión del material. Se recomienda adicionalmente dependiendo de la magnitud de los materiales, realizar un cerramiento con dispositivos de seguridad como conos y cinta.

De acuerdo a los lineamientos normativos para la inspección y verificación de materiales, es importante tener en cuenta los requisitos generales y las normas técnicas de calidad establecidas por la norma NSR-10, en donde para el caso de estructuras metálicas se relacionan a continuación en la tabla 3 y tabla 4:

Tabla 3

Requisitos de control de materiales para estructuras metálicas

Material o elemento estructural	Referencia Norma NSR-10
Especificaciones, códigos y estándares de referencia	F.2.1.4
Acero estructural	F.2.1.5, F.3.5, F.4.1.1, F.4.7.2 y F.4.8.2
Fundición y piezas forjadas de acero	F.2.1.5.2, F.4.8.3
Pernos, arandelas y tuercas	F.2.1.5.3
Pernos de anclaje y barras roscadas	F.2.1.5.4, F.2.10.3
Metal de aporte y fundente para soldadura	F.2.1.5.5, F.2.10.2
Conectores de cortante tipo espigo	F.2.1.5.6
Concreto-secciones compuestas	F.2.9.1.1, F.3.1.4.5 y F.4.7.5.3
Incendio- Resistencia de los materiales a altas temperaturas	F.2.18.2.3
Estructuras existentes – Propiedades del material	F.2.19.2
Acero del sistema de resistencia sísmica	F.3.1.4
Consumibles de soldadura	F.2.10.2 y F.3.1.4.4
Acero en miembros formados en frío	F.4.1.2, F.4.7.2
Aluminio	F.5

Nota: Tomado de la Tabla I.2.4-1 Capitulo I.2 de la norma NSR-10.

De acuerdo a la tabla 3, se observan las referencias normativas que detallan los controles necesarios para la verificación de materiales en estructuras metálicas basados en el Reglamento de construcción sismo resistente NSR-10.

Tabla 4

Ensayos de control de calidad para estructuras metálicas

Material o elemento estructural	Referencia Norma NSR-10
Acero estructural	F.2.1.5
Planos y especificaciones del diseño estructural	F.2.1.6
Soldaduras y pernos	F.2.10.2, F.3.1.6, F.4.5.3
Planos de taller y montaje	F.2.13.1
Control de calidad y aseguramiento de la calidad	F.2.14
Planos y especificaciones de diseño estructural, planos de taller y planos de construcción	F.3.4
Ensayos especiales	F.4.6

Nota: Tomado de la Tabla I.2.4-2 Capitulo I.2 de la norma NSR-10.

Según lo descrito en la tabla 4, se observan la referencia normativa para el control de ensayos de calidad de materiales exigidos querer idos para estructuras metálicas de acuerdo al Capitulo I.2.4 de la norma NSR-10, que hace referencia a la supervisión técnica.

Como parte de la inspección y verificación de materiales, se debe tener en cuenta la disponibilidad de documentos del fabricante y el montador de estructuras metálicas, por lo que antes de recibir el material se debe verificar la documentación previa correspondiente a planos de taller, ensayos de laboratorio, especificaciones de procedimientos de soldadura, certificados de calidad, entre otros requisitos que se pueden apreciar detalladamente en el Literal F.2.14.3 del Capitulo F de la Norma NSR-10.

4.2 Inspección y verificación de soldaduras

Antes de comenzar la inspección al 100% se deben revisar los planos y la simbología de la soldadura que representan detalles de diseño, posteriormente se debe verificar que antes de comenzar las actividades que el personal cuente con todos los elementos de protección personal EPP.

Para llevar a cabo el control de calidad con respecto al uso del electrodo, se debe tener claro que los requisitos para la selección de electrodos, están definidos por la Norma NSR-10, en el Titulo F, Literal F.2.10.2.6 en donde según Código de la Sociedad Americana de Soldadura, AWS D1.1, se contempla el uso recomendado de electrodos de acuerdo a la descripción. A continuación, en la siguiente tabla 5, se puede apreciar algunos de los usos recomendados de electrodos.

Tabla 5

Especificaciones de electrodos según AWS D1.1

Especificación	Descripción
A36 t ≤ 19.1 mm	Electrodos 60 & 70 ksi
A36 t > 19.1 mm A572 (Gr. 50 & 55) A913 (Gr. 50) A588* A992 A1011 A1018	SMAW: E7015, E7016, E7018, E7028 Otros procesos: Electrodos 70 ksi
A913 (Gr. 60 & 65)	Electrodos 80 ksi

Nota: Tomado de la norma NSR-10 F.2.10.2-6

De acuerdo a la tabla 5, la columna de “Especificación”, corresponde a la clasificación técnica de aceros según la Sociedad Americana para Ensayes y Materiales (ASTM), y la columna de “Descripción”, corresponde a la resistencia de los electrodos. A continuación, se describen algunos conceptos importantes para comprender la nomenclatura descrita de la tabla 5.

A913 (Gr 60 & 65): A913 hace referencia a la clasificación del acero que, para este caso corresponde a acero de alta resistencia y baja aleación, de calidad estructural, producidos por un proceso de tratamiento térmico especial; Gr 60 & 65 significa grado 60 y grado 65 que corresponde al límite elástico o ductilidad del material.

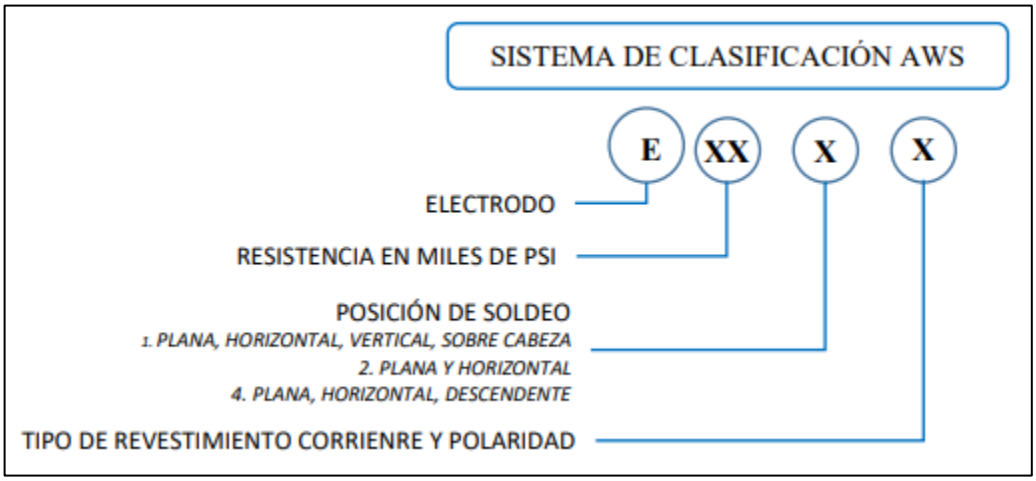
Electrodos 60 & 70 ksi: Hace referencia a la soldadura de arco con electrodo, en donde el valor de 60 ksi y 70 ksi corresponde al límite de fluencia de la soldadura en unidad de medida ksi igual a (lb/in2).

SMAW: E7015.: Las siglas SMAW significan Soldadura de Arco con Electrodo Revestido y el valor de E7015 corresponde a las características del electrodo en donde la letra “E” se refiere al electrodo; los dos primeros dígitos “70” se refiere al Límite de fluencia en ksi; el tercer digito “1” corresponde a la posición del electrodo que en este caso significa que es acto para soldar en cualquier posición; el cuarto digito “5” hace referencia al tipo de revestimiento del electrodo, polaridad y corriente eléctrica que debe utilizarse. Ver figura 39.

A continuación, en la siguiente figura 39, se puede observar el sistema de clasificación para electrodos.

Figura 39

Sistema de clasificación para electrodos



Nota: Tomado de Devera, F. A. y Ortiz D. C. (2019).

De acuerdo al uso de electrodos para soldadura de conexiones, se debe verificar según las especificaciones técnicas y planos, la temperatura mínima de precalentamiento del material y del electrodo antes de comenzar con las actividades de soldadura, teniendo en cuenta lo dispuesto en el código de soldadura AWS D1.1/D1.1M 2020.

Con respecto a la inspección visual de soldaduras se pueden apreciar parámetros normativos contemplados en el Titulo F, literal F.2.14.5.4 de la norma NSR-10, en donde se relacionan las actividades mínimas necesarias para la inspección y observación antes, durante y después de realizado una soldadura.

A continuación, en las siguientes figuras 40, 41 y 42, se pueden apreciar las actividades de inspección necesarias para el control de calidad de elementos soldados antes, durante y después de realzada la soldadura.

Figura 40

Actividades de inspección antes de comenzar la soldadura

Tabla F.2.14.5-1
Actividades de Inspección Previas a la Soldadura

Actividades de Inspección previas a la soldadura	Control de Calidad	Supervisión Técnica
Disponibilidad de los procedimientos de soldadura (WPS)	P	P
Disponibilidad de los certificados del productor para los consumibles de soldadura	P	P
Identificación del material	O	O
Sistema de identificación de los soldadores (trazabilidad)	O	O
Ajuste de las soldaduras acanaladas (Incluyendo la geometría) - Preparación de la junta - Dimensiones (alineación, abertura de raíz, cara de la raíz, bisel) - Limpieza (condición de las superficies de acero) - Punteado (calidad y localización de los puntos de soldadura) - Tipo y ajuste de las platinas de respaldo	O	O
Configuración y acabado de los agujeros de acceso	O	O
Ajuste de las soldaduras de filete - Dimensiones (alineación, separación en la raíz) - Limpieza (condición de las superficies de acero) - Punteado (calidad y localización de los puntos de soldadura)	O	O
Revisión de los equipos de soldadura	O	-

Nota: Fuente: Tomado de la Norma NSR-10 Titulo F, Literal F.2.14.5.4.

De acuerdo a la figura 40, se observa la tabla F.2.14.5-1 de la norma NSR-10, la cual contiene las actividades de inspección previas a la soldadura, en donde se clasifican para el control de calidad y para la supervisión técnica determinado por una “O” y una “P”, que significan:

“O” – Significa Observar de manera aleatoria. Las operaciones no se deben retrasar por estar pendientes estas inspecciones.

“P” – Practicar estas tareas sobre cada junta soldada o miembro.

En la figura 41, se pueden apreciar las actividades de inspección que se deben realizar durante el proceso de la soldadura, clasificando tanto el control de calidad como la supervisión técnica con la letra “O”, que corresponde a una observación de manera aleatoria.

Figura 41

Actividades de inspección durante el proceso de soldadura

Tabla F.2.14.5-2
Actividades de Inspección Durante la Soldadura

Actividades de Inspección Durante la Soldadura	Control de Calidad	Supervisión Técnica
Empleo de soldadores calificados	O	O
Control y manipulación de los consumibles de soldadura - Empaque - Control de exposición	O	O
Control para evitar soldaduras sobre puntos de soldadura agrietados	O	O
Condiciones ambientales - Velocidad del viento por debajo del límite - Precipitación y temperatura	O	O
Cumplimiento de los procedimientos de soldadura (WPS) - Selección de parámetros en el equipo de soldadura - Velocidad de avance - Uso de los materiales de soldadura seleccionados - Tipo y rata de flujo del gas - Precalentamiento - Mantenimiento de la temperatura entre pases (min/máx) - Posición adecuada	O	O
Técnicas de soldadura - Limpieza entre pases y limpieza final - Ajuste a las dimensiones del perfil en cada pase - Cumplimiento de los requerimientos de calidad en cada pase	O	O

Nota: Fuente: Tomado de la Norma NSR-10 Titulo F, Literal F.2.14.5.4.

De acuerdo a la figura 41, se relaciona la tabla F.2.14.5-2 de la norma NSR-10, en donde se observa que lo primero que se debe verificar en campo durante la soldadura, es la experiencia del oficial de soldadura, el uso y almacenamiento de electrodos, las condiciones climáticas, los parámetros de cumplimiento de los procesos y las técnicas de soldadura.

Con relación a los controles de calidad de inspección y verificación de soldaduras luego de finalizado el proceso, se relaciona la figura 42, que contine la tabla F.2.14.5-3 de la norma NSR-10, en donde reglamenta las actividades de control de calidad y supervisión técnica. En la figura 41 se observan todas las actividades necesarias para la verificación de calidad de las soldaduras realizadas. Solo la verificación de la Limpieza en la soldadura realizada es lo único que requiere una observación aleatoria “O”, las demás actividades de supervisión son requeridas para cada junta soldada o miembro “P”.

Figura 42

Actividades de inspección después del proceso de soldadura

Tabla F.2.14.5-3
Actividades de Inspección sobre la Soldadura Terminada

Actividades de Inspección sobre la Soldadura Terminada	Control de Calidad	Supervisión Técnica
Limpieza	O	O
Tamaño, longitud y localización de las soldaduras	P	P
Criterios visuales de aceptación - grietas - fusión soldadura - metal base - perfiles de soldadura - tamaño de la soldadura - socavación - porosidad	P	P
Golpes de arco	P	P
Soldaduras en la "zona k" (cuando las soldaduras de placas de enchape, platinas de continuidad o rigidizadores involucren la "zona k", el alma en esta zona debe inspeccionarse visualmente hasta una distancia de 75 mm desde la soldadura para detectar la presencia de grietas)	P	P
Remoción de las platinas de respaldo y puntos de soldadura, cuando se requiera	P	P
Actividades de reparación	P	P
Documentación de la aceptación o rechazo de la junta o miembro	P	P

Nota: Fuente: Tomado de la Norma NSR-10 Titulo F, Literal F.2.14.5.4.

Teniendo en cuenta la inspección visual que se le debe realizar a la soldadura de conexiones antes, durante y después de ejecutada, es necesario dar a conocer cuáles son las fallas típicas de una soldadura. A continuación, en la figura 43 se relacionan las más relevantes.

Figura 43

Fallas típicas de soldadura



Nota: Tomado de Narváez & Ruiz (2021)

Con relación a las fallas típicas de soldaduras observadas en la figura 43, de acuerdo a los defectos que se pueden presentar en la soldadura de campo, es importante conocer cuáles son sus causas y su corrección, por lo que en la siguiente tabla 6 se aprecian los defectos de soldaduras, sus causas y sus correcciones.

Tabla 6

Defectos y correcciones en soldadura

Defecto	Causa	Corrección
Salpicaduras y Chisporroteo	1. Desviación del arco. 2. Amperaje demasiado alto. 3. Arco demasiado largo. 4. Electrodo defectuoso.	1. Asegúrese de una buena conexión a tierra. 2. Ajuste el amperaje según la necesidad. 3. Ajuste el arco a la longitud adecuada. 4. Emplee el electrodo adecuado. 5. Emplee polaridad adecuada. 6. Seque el metal base.
Inclusiones de Escoria	1. Electrodo de mala calidad. 2. Inapropiado uso del electrodo. 3. Sobrecalentamiento. 4. Arco alto; amperaje y voltaje elevados.	1. Emplear electrodos garantizados. 2. Emplear técnica recomendada. 3. Evitar sobrecalentamiento. 4. Emplear altura correcta del arco amperajes y voltajes adecuados, los recomendados por el fabricante. 5. Emplear movimientos uniformes.
Porosidad	1. Arco corto, excepto con electrodos inoxidables o de bajo hidrógeno. 2. Tiempo insuficiente de fusión. 3. Demasiado amperaje. 4. Material base sucio. 5. Revestimiento húmedo. 6. Avance rápido.	1. Mantener el arco más largo. 2. Dé suficiente tiempo a la fusión, para que los gases se escapen. 3. Amperaje adecuado. 4. Limpiar bien la superficie. 5. Secar el electrodo. 6. Velocidad adecuada al avance.
Penetración y Fusión incompleta	1. Mucha velocidad de avance. 2. Electrodo muy grueso. 3. Amperaje muy bajo. 4. Penetración defectuosa	1. Deje suficiente campo libre en el fondo. 2. Seleccione el electrodo adecuado. 3. Use suficiente amperaje para obtener la penetración deseada. 4. Calcule correctamente penetración del electrodo. 5. Corregir velocidad de avance. 6. Limpiar junta de materias extrañas.

Nota: Tomado de Murillo A. (2010)

Según la Tabla 6, cuando se presentan defectos o fallas en la soldadura también se pueden realizar ensayos destructivos y no destructivos para determinar la intensidad de la falla o defecto en la soldadura. De acuerdo a las disposiciones de la norma NSR-10 en u literal F.2.14.5.4. A continuación, en la tabla 7 se resumen los ensayos aplicables a soldaduras.

Tabla 7

Clasificación de ensayos para soldaduras

Clasificación	Tipos de ensayos	Descripción
Ensayos no destructivos	Ensayo visual	Consiste en la inspección detallada para determinar defectos en la soldadura. Se realiza con lupa, flexómetro, linterna.
	Ensayo con líquidos penetrantes	Consiste en aplicar un líquido fluorescente que penetra por capilaridad y al limpiar los excesos refleja las imperfecciones como poros y fisuras.
	Ensayo con ultrasonidos	Este ensayo se realiza utilizando un haz de sonido de alta frecuencia que detecta la presencia y localiza discontinuidades.
	Inspección con partículas magnéticas	Consiste en un flujo magnético que fluye a través de la pieza y al encontrar imperfecciones forma un campo de fuga que atrae el polvo de hierro.
	Inspección por radiografía	Consiste en una radiación electromagnética penetrante, en donde los defectos de la soldadura absorben la radiación generando una decoloración en donde se localicen las imperfecciones.
Ensayos destructivos	Ensayo de tracción	Ensayo de laboratorio que consiste en someter una muestra a un esfuerzo axial de tracción.
	Ensayo de compresión	Consiste en someter un material a cargas de compresión hasta que la muestra llegue a su falla.
	Ensayo de cizalladura	Consiste en someter el material a esfuerzo cortante hasta que llegue a su falla
	Ensayo de flexión	Consiste en someter un material a una deformación plástica.
	Ensayo de Pandeo	Consiste en aplicar cargas opuestas entre si en línea recta, para un elemento esbelto.
	Ensayo de Torción	Consiste en la aplicación de cargas de giro para determinar el comportamiento del material.

Nota: Fuente: Devera, F. A. y Ortiz D. C. (2019),

Con respecto a la clasificación de ensayos para soldaduras que se aprecia en la tabla 7, es importante mencionar que el desglose de ensayos destructivos y no destructivos descrito, no representa la totalidad de los ensayos aplicables para el control de calidad de soldaduras.

4.3 Inspección y verificación de pernos

Para la inspección y verificación de pernos, es importante identificar qué tipo de pernos se pueden usar para la unión de elementos en estructura metálicas teniendo en cuenta lo dispuesto por la Norma NSR-10 Capitulo F. Literal F.2.10.3, en donde se dan a conocer los pernos de alta resistencia agrupados en dos grupos, según la resistencia del material, dichos grupos corresponden a:

Grupo A – ASTM A325, A325M, F1852, A354 Grado BC y A449

Grupo B – ASTM 490, A490M, F2280 y A354 Grado BD

Es importante aclarar que la norma NSR-10, solo divide en dos grupos las tipologías de pernos recomendados y hace referencia a la norma ASTM, en donde el tipo de grado corresponde a la resistencia a tracción, configuración y aplicación del material. Para entender mejor el concepto del tipo de grado en pernos, vale la pena mencionar la Norma Técnica Colombiana NTC 4034 que contempla las especificaciones, requisitos químicos y mecánicos para tres grados de tornillos y pernos de acero al carbono. En siguiente tabla 8, se pueden apreciar los tres tipos de grados para pernos según la NTC 4034.

Tabla 8

Clasificación de grado para pernos según la NTC4034

Grado	Descripción
Grado A	Tornillos y pernos que tienen una resistencia mínima a la tracción de 60 ksi y están previstos para uso general
Grado B	Tornillos y pernos que tienen una resistencia a la tracción de 60 ksi a 100 ksi y están previstos para juntas bridadas en sistemas de tuberías con bridas de hierro fundido.
Grado C	Remplazado por el Grado 36 de la Especificación ASTM F1554

Nota: Tomado de la Norma Técnica Colombiana NTC 4034

De acuerdo a la tabla 8, a pesar de que la Norma NTC 4034 solo menciona tres tipos de grado, también hace referencia a la norma ASTM A563, para pernos y tornillos con especificaciones de mayor grado. En la tabla 9, se puede apreciar la clasificación del grado para pernos, de acuerdo a la norma ASTM A563.

Tabla 9

Clasificación del grado para pernos según la norma ASTM A563

Grado	Material
A	Acero al carbono, hexagonal o hexagonal pesado
B	Acero al carbono, hexagonal o hexagonal pesado
C	Acero al carbono, templado, hexagonal pesado
C3	Acero resistente a la intemperie, templado, hexágono pesado
D	Acero al carbono, templado, hexagonal pesado
DH	Acero al carbono, templado, hexagonal pesado
DH3	Acero resistente a la intemperie, templado, hexágono pesado

Nota: Tomado de *norma ASTM A563*

Con relación a inspección para la instalación de pernos, se debe realizar una verificación de acuerdo a lo establecido en el capítulo F.3.10.3, del título F de la norma NSR-10, en donde se debe verificar como mínimo lo siguiente:

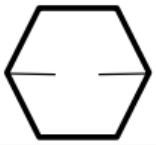
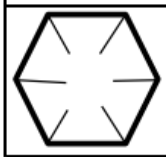
4.3.1 Inspección antes de comenzar la instalación de pernos

(a) Elección correcta de pernos: Uno de los parámetros fundamentales corresponde a la verificación del tipo de perno a utilizar, el cual debe corresponder a lo estipulado en las especificaciones técnicas de diseño de la conexión. Por lo cual para el uso de pernos en una conexión se debe verificar la ficha técnica del material del que están hechos los pernos.

Es importante mencionar que se debe tener mucha precaución con la identificación del tipo de perno a utilizar, ya que se debe verificar en campo su resistencia de acuerdo a la ficha técnica del material. A continuación, en la figura 44 se aprecian algunos tipos de pernos.

Figura 44

Tipos de pernos según su resistencia

CONVENCION	DESIGNACION SAE	DESIGNACION ASTM	RESISTENCIA A TENSION	RESISTENCIA A CORTANTE
	GRADO 2	A307	310 MPa	188 MPa
	GRADO 5	A325	620 MPa	370 MPa
	GRADO 8	A490	780 MPa	460 MPa

Nota: Tomado de Medina M. (2015)

Según la figura 44, se observan algunos tipos de pernos que se pueden presentar en obra de acuerdo a su resistencia, los cuales se debe comparar y corroborar con los parámetros de resistencia establecidos por el diseño de la conexión. En todo caso se debe verificar que la referencia de los pernos esté acorde a los criterios establecidos en la norma NSR-10 F.2.10.3-2. Ver figura 45.

Figura 45

Resistencia Nominal para Pernos y Piezas Roscadas, MPa

Descripción de los conectores	Resistencia Nominal a tensión F_{nt} (MPa)	Resistencia Nominal a Cortante en Conexiones Tipo Aplastamiento F_{nv} (MPa)[a]
Pernos A307	310[b]	188[b][c]
Pernos Grupo A (tipo A325), con roscas incluidas en los planos de corte	620	372
Pernos Grupo A (tipo A325), cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	620	457
Pernos Grupo B (tipo A490), con roscas incluidas en los planos de corte	780	457
Pernos Grupo B (tipo A490), cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	780	579
Piezas roscadas que satisfacen los requisitos del numeral F.2.1.3.4, con roscas incluidas en los planos de corte	$0.75F_u$	$0.450F_u$
Piezas roscadas que satisfacen los requisitos del numeral F.2.1.3.4, cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	$0.75F_u$	$0.563F_u$

(a) Para conexiones de extremo que tengan un patrón de perforaciones con una longitud mayor que 965 mm, F_{nv} se reducirá a un 83.3% de los valores tabulados. La longitud del patrón de perforaciones es la máxima distancia paralela a la línea de la fuerza medida sobre la línea de centros de los pernos.
(b) Para pernos A307, los valores tabulados se reducirán en un 1 por ciento por cada 1.6 mm por encima de los 5 diámetros de longitud en el agarre.
(c) Se aceptan roscas en los planos de corte.

Nota: Tomado de la Norma NSR-10 F.2.10.3-2.

(b) Elección del proceso adecuado para la unión de piezas con pernos: De acuerdo al tipo de junta a unir con pernos, dependiendo de la resistencia que se debe alcanzar en el apriete del perno, se hace necesario el uso de herramientas especializadas para la instalación de pernos. Los métodos más comunes para el proceso de apriete de pernos corresponden a:

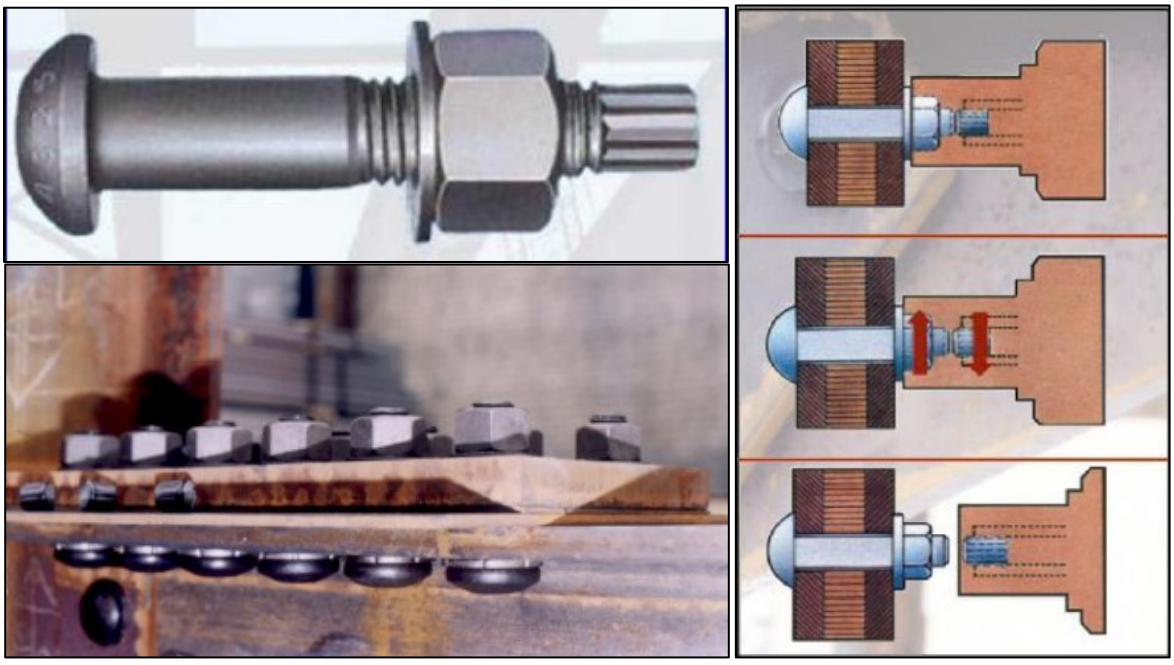
Torquímetro: Consiste en una llave con capacidad de medir la tensión determinada por el torque generado al apriete de un perno. Es uno de los métodos mas precisos para el apriete de pernos, y existen dientes tipos de torquímetros, entre lo que se destacan taquímetros análogos, Torquímetro multiplicador de torque, torquímetro electrónico, torquímetro multitorque los cuales hace referencia a los torquímetros neumáticos y torquímetros pres-ajustados.

Llave dinamométrica de Clic: La cual consiste en aplicar un torque usando una llave dinamométrica que al momento de llegar al apriete deseado la llave proporciona un aviso mecánico o clic, que indica que se llegó a la resistencia deseada.

Teniendo en cuenta los métodos más comunes para el apriete de pernos, también existen otras alternativas como lo es el uso de pernos de tensión controlada. Ver figura 46.

Figura 46

Pernos de tensión controlada



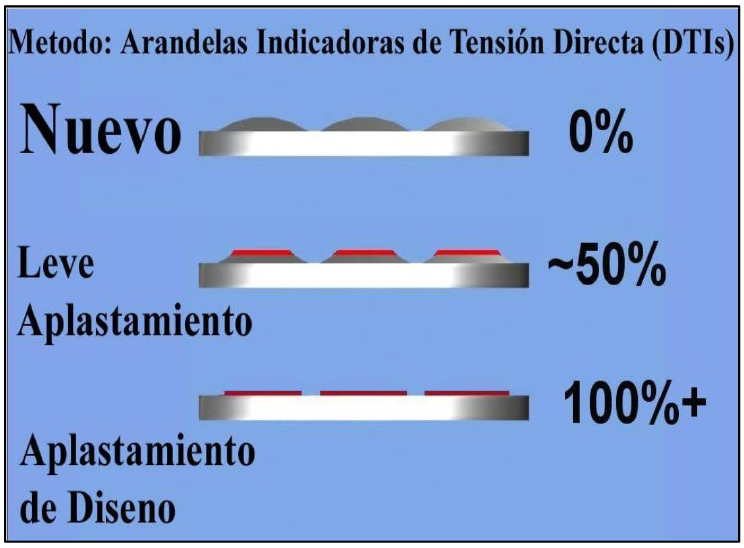
Nota: Recuperado de Garza L. (2021)

De acuerdo a la figura 46, los pernos te tensión controlada consisten en un perno de cabeza redonde que cuenta con un dispositivo indicador de tensión al final de la rosca del perno, el cual al llegar al nivel te tensión controlado, se desprende del perno, tal como se aprecia en la figura 46.

Otro método para el control de calidad en la tensión aplicada al apriete de un perno, corresponde al uso de Arandelas Indicadoras de Tensión Directa, las cuales están diseñadas con una serie de protuberancias que permiten conocer la tensión directa a medida que se produce un aplastamiento cuando están siendo sometidas al apriete del perno. En la siguiente figura 47 se puede apreciar el sistema de Arandela Indicadora de Tensión Directa, en donde un leve aplastamiento hace referencia al 50% de la tensión controlada y un aplastamiento completo hace referencia a la tensión para la cual fue diseñada.

Figura 47

Arandelas indicadoras de tensión directa



Nota: Tomado de Construcciones y aceros s.a. (S.f.)

(c) Piezas de conexión adecuadas: Antes de realizar la unión con pernos es necesario verificar e inspeccionar las piezas o elementos a unir, las cuales deben de estar libre de imperfecciones en su superficie. Se debe verificar además la correcta fabricación de las conexiones antes de ser unidas con pernos.

(d) Almacenamiento de materiales: Es importante verificar la recepción de materiales en obra, ya que los materiales recibidos, deben ser almacenados en un lugar libre de humedad, y suciedad, que no exista riesgo de producirse corrosión, además deben contar con la documentación del fabricante como lo es la ficha técnica y especificaciones.

De acuerdo a los parámetros recomendados para la inspección de pernos antes de comenzar la soldadura, es importante mencionar lo relacionado en el Literal F.2.14.5.6 de la Norma NSR, que resume las actividades mínimas para la inspección antes de comenzar la instalación de pernos. En la siguiente figura 48 se puede apreciar dichas actividades.

Figura 48

Actividades de inspección antes de comenzar la instalación de pernos

Tabla F.2.14.5-4
Actividades de Inspección Previas a la Instalación de los Pernos

Actividades de Inspección previas a la instalación de los pernos	Control de Calidad	Aseguramiento de calidad
Disponibilidad de los certificados del productor de los pernos, tuercas y arandelas	O	P
Marcado de los pernos de acuerdo con las normas ASTM	O	O
Adecuada selección de los pernos para el detalle de la junta (grado, tipo, longitud adecuada cuando las roscas deben quedar excluidas del plano de corte)	O	O
Selección adecuada del procedimiento de instalación para el detalle de la junta	O	O
Revisión de los elementos de conexión, incluyendo la adecuada preparación de las superficies de contacto, cuando se requiera	O	O
Ensayos de calibración y verificación previos a la instalación, por el personal de instalación, para los conjuntos de pernos y tuercas y los métodos a utilizarse, observados y documentados	P	O
Adecuado almacenamiento de los pernos, tuercas, arandelas y otros componentes	O	O

Nota: Tomado de la norma NSR-10, Capitulo F, Literal F.2.14.5.6.

4.3.2 Inspección durante el proceso de pernado

(a) Colocación de pernos: Una vez comenzado con el proceso de instalación de pernos, dependiendo de la magnitud de la construcción es necesario verificar la correcta instalación de pernos, en donde se debe inspeccionar detalladamente que los diámetros y tipos de pernos correspondan a los establecidos para cada conexión de acuerdo al diseño estructural de la conexión.

Con respecto al uso de arandelas en pernos, se recomiendan cuando los agujeros son alargados, la superficie es inclinada, si el método de apriete es con torquímetro y si se usan pernos A490 se requiere arandela en ambas caras si se aplica sobre acero A36.

.

(b) Apriete inicial de pernos: Consiste en el apriete inicial hasta que el perno alcanza el tope del metal o material de la conexión a unir. En este proceso no es necesario el uso de herramienta especializada.

(c) Garantía de no rotación del perno: Una vez instalado el apriete inicial del perno, se debe garantizar que no exista rotación, por lo que es necesario el uso de una llave de tuercas para impedir que el perno se rote junto con la tuerca.

(d) Tensionamiento de pernos: Consiste en la verificación del pretensionamiento de pernos para cumplir con lo especificado en F.2.10.3.1, de acuerdo con el método de tensionamiento utilizado. En la figura 49 se detalla el tensionamiento mínimo para la instalación

de pernos especificados según su tamaño y resistencia, de acuerdo a los lineamientos de la norma NSR-10. Literal F.2.10.3.1.

Con respecto al tensionamiento de pernos, se recomienda el uso de torquímetro, ya que cuentan con buena precisión en la lectura del tensionamiento deseado, de igual forma es importante verificar que la mínima tensión aplicada a los pernos durante el apriete sea mayor a los requerimientos mínimos de tensión de instalación según el tamaño del perno de acuerdo a la Norma NSR-10. Ver figura 49.

Figura 49

Mínima Tensión de Instalación de los Pernos, en kN

Tamaño del perno mm (pulgadas)	Grupo A Pernos ASTM A325, ASTM F1852	Grupo B Pernos ASTM A490, ASTM F2280
12.7 (1/2")	53	67
15.9 (5/8")	84	107
19.1 (3/4")	125	156
22.2 (7/8")	173	218
25.4 (1")	227	285
28.6 (1 1/8")	249	356
31.8 (1 ¼")	316	454
34.9 (1 3/8")	378	538
38.1 (1 ½")	458	658

* Igual a 0.70 veces la resistencia mínima a tensión de los pernos, redondeada al kN más cercano, como se establece en las especificaciones ASTM para pernos A325 y A490 con roscas UNC.

Nota: Tomado de la Norma NSR-10 F.2.10.3-1

Con relación a la perforación para pernos, la distancia del centro de una perforación estándar a cualquier borde de la pieza conectada, no podrá ser inferior a lo establecido en la norma NSR-10 F.2.10.3-4. Ver figura 50.

Figura 50

Distancia mínima del centro de una perforación al borde de la parte conectada

Diámetro del Perno mm (pulgadas)	Distancia mínima al borde mm
12.7 (½")	19.1
15.9 (5/8")	22.2
19.1 (¾)	25.4
22.2 (7/8")	28.6
25.4 (1")	31.8
28.6 (1 1/8")	38.1
31.8 (1 ¼")	41.3
mayor que 31.8 (1 ¼")	1.25 x d

a) Se permiten distancias al borde menores que las dadas en esta tabla si se satisfacen las provisiones aplicables de los numerales F.2.10.3.10 y F.2.10.4, sin embargo no se permiten distancias menores que (1) diámetro del perno sin aprobación del diseñador estructural.

b) Para perforaciones agrandadas o de ranura, véase la tabla F.2.10.3-5.

Nota: Tomado de la Norma NSR-10 F.2.10.3-1

Durante la instalación de pernos, en una conexión viga-columna uno de los factores a tener en cuenta es que los orificios no deben ser extremadamente alargados, ya que ese alargamiento, puede ocasionar que el perno o el elemento se desplace cuando se encuentre sometido a cargas en el mismo sentido del alargamiento. Es por esto que se debe tener en cuenta las medidas recomendadas para oficios según el Literal F.2.10.3.2. NSR-10. Ver figura 51.

Figura 51

Dimensiones de perforaciones

Dimensiones Nominales de las Perforaciones
Pernos con diámetro en mm

Diámetro del Perno mm	Dimensiones de las Perforaciones			
	Perforación estándar mm	Perforación agrandada mm	Ranura corta (Ancho x largo) mm	Ranura Larga (Ancho x largo) mm
16	18	20	18 x 22	18 x 40
20	22	24	22 x 26	22 x 50
22	24	28	24 x 30	24 x 55
24	27	30	27 x 32	27 x 60
27	30	35	30 x 37	30 x 67
30	33	38	33 x 40	33 x 75
≥36	d + 3	d + 8	(d + 3) x (d + 10)	(d + 3) x 2.5d

Nota: Tomado de la Norma NSR-10 F.2.10.2

De acuerdo a la figura 51, se puede observar que se establecen las recomendaciones para las dimensiones de los orificios estándar y agrandados y alargados de ranura corta y ranura larga, en función del diámetro del perno en mm.

Teniendo en cuenta las recomendaciones descritas para la inspección durante el proceso de instalación de pernos, según el literal F.2.14.5 de la norma NSR-10, relaciona las actividades de inspección durante la instalación de pernos, las cuales se aprecian en la siguiente figura 52.

Figura 52

Actividades de inspección durante el proceso de pernado

Tabla F.2.14.5-5
Actividades de Inspección Durante la Instalación de los Pernos

Actividades de Inspección Durante la Instalación de los Pernos	Control de Calidad	Aseguramiento de calidad
Conjuntos de pernos y tuercas en condiciones adecuadas, instalados en todas las perforaciones y posicionados según se requiere	O	O
Junta llevada a la condición de apriete ajustado antes del pretensionado	O	O
Restricción de la rotación del componente del conector al que no se aplica giro	O	O
Pernos pretensionados de acuerdo con un método aprobado por el RCSC, y avanzando progresivamente desde el punto más rígido hacia los bordes libres	O	O

Nota: Tomado de la Norma NSR-10 literal F.2.14.5.

4.3.3 Inspección luego de finalizado la instalación de pernos

De acuerdo a lo dispuesto en el literal F.2.14.5.de la norma NSR-10, consiste en la revisión y reporte de aceptación o rechazo de las juntas pernadas. Una vez terminado las actividades de pernado, se debe verificar que los pernos previamente apretados, sobresalgan de la rosca de la tuerca, de igual forma se debe verificar que se encuentre instalado el tipo de perno correcto de acuerdo a la referencia establecida en el diseño.

Capítulo 5. Controles técnicos y normativos para la verificación en obra de conexiones metálicas precalificadas de viga-columna en Colombia

Con relación a los controles técnicos y normativos necesarios para el seguimiento y control en la ejecución de conexiones metálicas precalificadas de viga-columna en Colombia; en este capítulo, se resume el resultado de la investigación en donde se establecen algunos parámetros para la supervisión durante y después de la ejecución de este tipo de proyectos. A continuación, mediante tablas se aprecian los controles de verificación consolidados.

Tabla 10

Controles técnicos para la inspección y verificación de materiales en estructuras de acero

Descripción	Verificación	Cumple	
		SI	NO
Recibo de material en obra	Verificar la existencia de documentos del fabricante como: 1. Ficha técnica 2. Especificaciones técnicas 3. Ensayos de laboratorio En caso de no existir, se recomienda solicitar al fabricante una ficha técnica de cada elemento de acero recibido en obra.		
Registro del material recibido en obra	Registrar en obra la fecha del recibo de material en obra. Se debe verificar la existencia de formatos para el control del material recibido en obra.		
Revisión de dimensiones y geometría	Verificar que las dimensiones y espesores del material concuerden con lo estipulado en planos. Además, verificar que la designación del acero se encuentre de acuerdo a lo establecido en la NSR-10 Literal F.2.1.5.1.		
Inspección visual del material	Verificar que el material recibido en obra no presente fisuraciones, deformaciones y corrosión.		
Almacenamiento del material	Verificar que la zona o área de almacenamiento del material se encuentre libre de humedades, en caso de estar a la intemperie cubrir con plástico y señalizar.		

Nota: La tabla muestra los controles técnicos necesarios para el recibo de material en obra.

Tabla 11

Controles técnicos para la inspección y verificación de Soldaduras

Descripción	Verificación	Cumple	
		SI	NO
Inspección visual antes de soldar	-Verificar que las superficies a soldar se encuentren totalmente libre de suciedades e impurezas que puedan afectar la soldadura.		
Revisión de conexión precalificada	-Verificar de acuerdo a la Norma AISC 358-16 y a las especificaciones establecidas para el proyecto, que las conexiones a realizarse cuenten con respaldo de precalificación.		
Elementos de seguridad	-Verificar el uso de elementos de protección personal, de acuerdo a la actividad que realice		
Operarios de soldaduras	-Verificar que el operario cuente con certificados de calificación y experiencia para la actividad a realzar. -Verificar afiliación de prestaciones sociales y riesgos.		
Uso de electrodos	-Verificar que la referencia del electrodo concuerde con lo establecido en las especificaciones técnicas. Se recomienda para conexiones usar electrodo E7018. -Verificar que el almacenamiento de electrodos se encuentre libre de humedad.		
Inspección visual durante la soldadura	-Verificar que el amperaje del equipo de soldadura corresponda según especificaciones técnicas. -Verificar el precalentamiento aplicado. -Verificar la velocidad de avance de soldadura.		
Condiciones ambientales	-Verificar la velocidad del viento. -No se recomienda realizar trabajos de soldadura si se presentan lluvias ya que puede afectar la calidad de la soldadura.		
Técnicas de soldadura	-Verificar la posición del electrodo según especificaciones técnicas o tipo de soldadura a realizar. -Verificar que el cordón o filete de soldadura se lleve a cabo uniformemente. -Verificar atentamente y recomendarle al operario que en el caso donde tenga que rellenar espacios considerables con soldadura, no añadir desperdicios de acero para rellenar la soldadura ya que esto es un error grave que puede repercutir en una fractura frágil de la conexión soldada.		
Placas de respaldo	-Para conexiones en donde se tenga planeado colocar soldadura de penetración completa, se debe colocar una placa de soporte para que no se presente concavidad externa de la soldadura o falta de relleno.		

Tabla 11 Continuación

Descripción	Verificación	Cumple	
		SI	NO
Inspección visual después de la soldadura	-Dejar constancia o trazabilidad del operario que realizó la soldadura. -Verificación del tamaño, longitud y localización de la soldadura.		
Criterios de aceptación	-Verificar que no existan fisuras -Verificar fusión adecuada entre soldadura y metal base. -Verificar la existencia y tamaño de cráteres. -Verificar la porosidad de la soldadura -Verificar la socavación de la soldadura.		
Especificaciones de la soldadura	-Verificar el perfil de las soldaduras. -Verificar el tamaño y espesor de las soldaduras, que coincida de acuerdo a especificaciones técnicas.		
Retiro de placas de respaldo	-Verificar que se retiren las placas de respaldo, en caso de ser necesario su uso.		
Ensayos de calidad	-Verificar el uso de ensayos no destructivos para el control de calidad: - Ensayo visual - Ensayo con líquidos penetrantes - Ensayo con ultrasonidos - Inspección con partículas magnéticas - Inspección por radiografía		
Reporte de aceptación o rechazo	Como parte del seguimiento y control al proceso de soldadura para conexiones precalificadas, se debe realizar un reporte de aceptación o rechazo de las conexiones soldadas.		

Nota: La tabla muestra los controles técnicos necesarios para la inspección y verificación de soldaduras en conexiones precalificadas.

Tabla 12

Controles técnicos para la inspección y verificación de pernos

Descripción	Verificación	Cumple	
		SI	NO
Inspección antes de empernado	-Verificar que los pernos recibidos en obra cuenten con certificado de calidad de materiales o en su defecto ficha técnica.		
Geometría del perno	-Verificar que la longitud y diámetro del perno recibido en obra, corresponda a los parámetros geométricos establecidos en las especificaciones técnicas y planos.		
Almacenamiento	-Verificar que el sitio de almacenamiento de pernos esté libre de humedades y recubierto en caso de estar a la intemperie.		
Montaje de la estructura	-Antes de instalar los pernos, se debe verificar que el izaje de la estructura se encuentre totalmente aplomado y colocado en su ubicación.		
Resistencia de pernos	-Verificar que los pernos recibidos en obra cuenten con la resistencia de acuerdo a especificaciones técnicas y de acuerdo a lo establecido en la Norma NSR-10 F.2.10.3-2.		
Orificios alargados	-Verificar en obra que los orificios para la colocación de pernos sean alargados o no, deben cumplir con lo establecido en el Literal F.2.10.3.2		
Inspección durante el empernado	-Verificar la correcta instalación de pernos. -Verificar el apriete inicial de los pernos. -Verificar que coincida el tipo de perno en obra con relación a especificaciones técnicas e diseño.		
Pretensionamiento de pernos	-Verificar el uso de torquímetro para el pretensionamiento de pernos. -Verificar que se cumpla con la tensión mínima de pernos de acuerdo a lo establecido en la Norma NSR-10 F.2.10.3-1. -Verificar que todos los pernos se encuentren totalmente pretensionados.		
Instalación de pernos	-Verificar que los pernos sean apretados desde el punto de mayor rigidez de la junta hacia los bordes libres.		
Inspección después del empernado	-Dejar constancia o trazabilidad del personal encargado de la instalación y pretensionamiento de pernos. -Realizar un reporte de aceptación o rechazo de las conexiones pernadas.		

Nota: La tabla muestra los controles técnicos necesarios para la inspección y verificación de pernos en conexiones precalificadas.

Conclusiones

Con relación al uso de las conexiones precalificadas en el territorio colombiano, se pudo evidenciar que desde el siglo pasado se han realizado importantes proyectos con estructuras metálicas, y que luego de lo ocurrido por el sismo de Northridge, en Colombia también se comenzaron a realizar investigaciones para precalificar conexiones y de esta forma garantizar que no ocurra falla frágil en las conexiones en donde se espera ductilidad. En total se logró evidenciar dieciséis tipos de conexiones precalificadas que fueron ensayadas en distintas universidades del país, entre la que se destacan la Universidad del Valle en Cali, y la universidad Nacional de Colombia sede Bogota.

Con relación al marco referencial sobre las conexiones precalificadas en edificaciones de acero, se concluye que dichas conexiones son empleadas primordialmente para pórticos resistentes a momentos PRM, en donde siempre se busca rigidizar la conexión viga-columna y transmitir las cargas laterales provenientes de sismos, a las zonas de disipación en los elementos más dúctiles como corresponde a las rótulas plásticas localizadas en las vigas.

Con respecto al seguimiento y control técnico que se puede aplicar a una conexión precalificada durante su proceso constructivo, se concluye que se debe tener una ardua experiencia en la inspección visual de conexiones soldadas para saber identificar defectos rápidamente sin que el operario del soldador trate de subsanar la falla. En este caso es importante que se capacite muy bien al personal y se incurra sobre los riesgos y peligros que representa

realizar la actividad de forma incorrecta o rellenar con materiales externos las conexiones que deben ser totalmente soldadas.

En conclusión, los controles establecidos para el seguimiento y control de conexiones precalificadas teniendo en cuenta parámetros normativos de la norma colombiana NSR-10 Titulo F, se basan en las actividades para la recepción del material en obra, y actividades de inspección y verificación de soldaduras y pernos, antes, durante y después de realizada la conexión.

Referencias

Acero y Guerrero (2006). Precalificación de una conexión soldada a momento viga-columna para aplicaciones en edificios metálicos. *Ingeniería y Competitividad,* 08(02), 64-79. https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323467007.pdf

Alzate J. (2021, 14 de julio). *20 imágenes Fotográficas de Armenia, Quindío, que Usted no Conocía.* FincasQuindioYa. https://fincasquindioya.com/imagenes-fotograficas-armenia/

Areiza & Garza (2021). *Webinar-020 Reforzamiento de edificios con estructura de acero* [Video en línea]. ICCA-Colombia. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=putddLI6Wvg

Arriaga J. (2018). *Comportamiento de conexiones mixtas de viga metálica a columna de concreto en una estructura a base de marcos.* [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional. https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/7293/754018T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Barreto y Samayani (2017). *Análisis elástico e inelástico y verificación por desempeño para el reforzamiento estructural de la facultad de ingeniería civil – UNSA.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De San Agustín, Perú]. Repositorio UNSA. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2946

Borbor & Panchana (2020). *Estudio comparativo entre sistemas estructurales de pórticos especiales arriostrados concéntricos y excéntricos, y pórticos sin arriostramientos para edificaciones con estructuras de acero.* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador]. Repositorio Dspace. https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/5404

Bustamante A. (2016). *Calificación de una conexión PRM tubular Compuesta.* [Tesis de pregrado, Universidad EIA]. Repositorio Institucional. https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2020

Capa V. (2009). *Diseño de Conexiones soldadas.* [Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional Quito, Ecuador]. bibdigital.epn. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8497/3/CD-2066.pdf

Capistran & Arrieta (2010). *Control de calidad y problemas de fabricación y montaje en la construcción de estructuras metálicas.* [Tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional de México]. Repositorio Dspace. https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/25298

Cardoso y Quishpe (2014). *Diseño de conexiones precalificadas bajo AISC para pórticos resistentes a momento.* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador]. dspace.espoch.edu. http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/3531/1/15T00574.pdf

Cerón C. (2011). *Precalificación de dos conexiones soldadas a momento viga-columna con reducción de sección en la viga y con cubreplaca para edificios metálicos bajo la acción de carga dinámica.* jornadasaie.org.ar. https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-anteriores/2010/contenidos/trabajos/tema-j/082.pdf

Castro H. (2009). *Cámara de Comercio dice que falta información sobre obras de Transmilenio.* Radio Santa Fe. https://www.radiosantafe.com/2009/10/21/camara-de-comercio-dice-que-falta-informacion-sobre-obras-de-transmilenio/

Construcciones y aceros s.a. (S.f.). *Indicadores directos de tensión.* http://www.construccionesyaceros.com/idts.php

Crisafulli et al. (2018). Diseño sismorresistente de construcciones de acero. *Alacero* 5 ed. https://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/publicacion/diseno_sismorresistente_de_construcciones_de_acero-5ta_ed.pdf

Devera, F. A. y Ortiz D. C. (2019). *Guía para el control de calidad en la construcción de estructuras metálicas.* [Tesis de posgrado, Universidad Santo Tomas. Bucaramanga]. Repositorio Institucional usta.edu. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18447/2019OrtizDenise.pdf?sequence=4

Delgado C. (2017). *Conexiones precalificadas en Colombia.* [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS.

http://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/publicacion/anexo_luis_garza_conexiones_precalificadas_en_colombia_1.pdf

Edición Web (2019). *Suspenden cirugías estéticas en la clínica El Parque de Armenia, tras muerte de mujer por estos procedimientos.* El Quindiano. https://www.elquindiano.com/noticia/11941/suspenden-cirugias-esteticas-en-la-clinica-el-parque-de-armenia-tras-muerte-de-mujer-por-estos-procedimientos

Enderica P. (2018). *Análisis de conexiones metálicas soldadas no precalificadas bajo la acción de cargas dinámicas a escala real y reducida mediante simulación por computadora".* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica de Ecuador]. core.ac.uk. https://core.ac.uk/download/pdf/157803021.pdf

Escartín M. (2014). *Comparativa entre el análisis elástico lineal y análisis plástico de un pórtico rígido plano.* [Tesis de pregrado, Universidad Zaragoza]. core.ac.uk. https://core.ac.uk/download/pdf/289979249.pdf

García M. (2018). *Estudio sobre la efectividad del factor de sobre resistencia del criterio columna fuerte-viga débil en el diseño sísmico de pórticos de hormigón mediante el análisis dinámico no lineal.* [Tesis de posgrado, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona]. core.ac.uk. https://core.ac.uk/download/pdf/159237527.pdf

Garza L. (2021). *Diseño Sísmico 2-PRM NSR-20.* Scribd. https://es.scribd.com/document/533830132/Diseno-Sismico-2-PRM-NSR-20

Garza Vásquez L. (2019, 19-21 de Junio). *Actualización En El Diseño De Conexiones PRM.* Congreso Internacional de la Construcción con acero. Medellín, Colombia. https://icca.com.co/wp-content/uploads/2021/12/LUIS_GARZA.pdf

Guerrero y Angarita (2019). *Creación de una herramienta de chequeo de conexiones precalificadas con verificación de la norma vigente.* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Udistrital. https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22332/GuerreroSergioAngaritaCarolina2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gutiérrez J. (2018). *Vulnerabilidad sísmica en estructuras de edificaciones indispensables en Santiago de Cali.* [Ensayo de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional.https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17952/GutierrezAcostaJaime2018.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Historia Fotográfica de Bogotá y Colombia [@HistoriaFotBog], (2020, 02 de octubre). *Banco de la República en Construcción (Avenida Jiménez con carrera séptima). Bogotá año 1957*. [Tweet]. Twitter. https://twitter.com/historiafotbog/status/1312120528107237376

Imágenes Corner (2020). Banco De Bogota Imágenes. *Blogspot.com. https://ohthatssmart.blogspot.com/2020/10/banco-de-bogota-imagenes.html*

Legis SA (2013). *Edificio Pedro A. López, inicios del modernismo en la arquitectura colombiana* https://issuu.com/legissa/docs/metalica_14_legado_58a62

López H. (2018). *Diseño preliminar de una conexión con solicitación a momento de acero estructural.* [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá]. Repositorio Institucional. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1388&context=ing_civil

Manrique A. (2018). *¿En que consisten las conexiones precalificadas?* LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/en-que-consisten-las-conexiones-precalificadas-angel-manrique/?originalSubdomain=es

Medina M. (2015). *Cartilla guía de clase para diseño de estructuras metálicas*. uniagraria.edu. https://www.uniagraria.edu.co/wp-content/uploads/2021/07/Serie-Guia-de-Clase-Dise%C3%B1o-de-Estructura-Metalicas.pdf

Murillo A. (2010). *Análisis de defectos y como evitarlos en soldaduras de arco SMAW y SAW longitudinales y circunferenciales en ductos de transporte de hidrocarburos.* [Tesis de posgrado, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales]. Repositorio Institucional. https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/269/1/MONO-ETSI-MURILLO.SIGERO%20%283%29.pdf

Narváez & Ruiz (2021). *Guia técnica para la supervisión de la construcción de edificios de estructuras metálicas.* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional. https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/26629/NarvaezPolaniaTatianaVictoria2021Guia.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-AC (2014). *Estructuras de acero.* Portoviejo Digital. https://online.portoviejo.gob.ec/docs/nec3.pdf

Portón et al. (2016). *Guia practica para el diseño de estructuras de acero de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015.* habitatyvivienda.gob. https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/10/GUIA-3-ACERO.pdf

Oviedo J. (2015). *Protección Sísmica y Reforzamiento de Edificaciones a través de Sistemas no Convencionales.* Docplayer. http://docplayer.es/93291818-Proteccion-sismica-y-reforzamiento-de-edificaciones-a-traves-de-sistemas-no-convencionales-juan-andres-oviedo-a-ph-d.html

Peralta M. (2015). *Diseño de conexiones de estructuras de acero actualizado al reglamento de construcción sismo resistente NSR-10.* [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Scribd. https://es.scribd.com/document/420960862/Diseno-de-Conexiones-Miguel

Ramírez C. (2021). *Conexión viga/columna circular compuesta implementando diafragmas*. LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/conexi%C3%B3n-vigacolumna-circular-compuesta-implementando-ram%C3%ADrez/

Ramírez E. (2011). *Ductilidad de una conexión a momento empleando vigas de alma expandida*. [Tesis de Maestría, Universidad del Valle]. Repositorio Institucional. https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/15224

Rendón J. (2016). *Reforzamiento y Actualización Sísmica de Estructuras*. https://cicp-ec.com/documentos/Conferencia_Jorge_Rend%C3%B3n_SIKA.pdf

Spectra Ingenieria (s.f.). *Estructuras Metálicas Ductilidad.* https://www.spectrainge.com/blog/ductilidad-en-estructuras-metalicas/

Tapia y Tena (2001). *Comparación de los efectos observados en estructuras con marcos de acero durante los sismos de México (1985), Northridge (1994) y Kobe (1995) y su impacto en las normas de diseño para estructuras metálicas del RCDF-2001.* https://www.researchgate.net/publication/259487656_Comparacion_de_los_efectos_observados_en_estructuras_con_marcos_de_acero_estructural_durante_los_sismos_de_Mexico_1985_Northridge_1994_y_Kobe_1995_y_su_impacto_en_las_normas_de_diseno_para_estructuras

Torres C. (2012). *Calificación de una conexión metálica rígida viga I – Columna compuesta.* [Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander]. Scribd. https://es.scribd.com/document/480784856/COMPLETO-TESIS-CALIFICACION-DE-UNA-CONEXION

Torres C. (2019). *Comparación técnico – económica de un edificio de acero utilizando pórticos resistentes a momento (PRM), riostras concéntricas (PAC) y excéntricas (PAE).* [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional.

Uribe y Valencia (2009). Calificación de una conexión rígida de una viga I y una columna tubular rellena de concreto bajo la acción de cargas dinámicas. *Revista Ingeniería e Investigación,* 9 (1), 24-34. https://www.researchgate.net/publication/242633194_Calificacion_de_una_conexion_rigida_de_una_viga_I_y_una_columna_tubular_rellena_de_concreto_bajo_la_accion_de_cargas_dinamicas_Evaluating_a_steel_beam's_rigid_connection_to_a_concrete_filled_tubular_c

Vargas H. (2006). La industria del acero en Colombia. Comité Siderúrgico Colombiano. *Historia y proceso siderúrgico.* (pp. 11-360). Cámara Andi-Fedemetal. https://issuu.com/marcoo/docs/construccion_metalica_colombia2

Vargas H. (2007). Proyectos Metálicos. *Revista de Construcción Metálica Ed. 3.* https://issuu.com/legissa2010/docs/metalica_3/70

Vargas P. (2017). *Análisis comparativo de un edificio residencial, irregular de 5 pisos realizado mediante 2 tipos de conexiones precalificadas por el AISC 358-10: conexión de plancha de ala empernada (BFP) y sección de viga reducida (RBS)*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador]. Repositorio Institucional. https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26498/1/Tesis%201164%20-%20Vargas%20Sanguil%20Pablo%20Andr%C3%A9s.pdf