

**HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

**Herramienta cualitativa de verificación y control de calidad de conexiones precalificadas a momento para la inspección y construcción de edificios en estructura metálica para**

**DES-DMO**

**Laidy Johana Guerrero Villota, Mauricio Fernando Fuel Vallejos**

**Proyecto de grado para optar el título de Maestría en ingeniería civil énfasis estructuras**

**Director**

**Raphael Andrés Luna Tezna**

**I.C Mgtr. Ingeniería Estructural**

**Universidad Javeriana, Cali**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Maestría en ingeniería civil**

**2025**

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### **Dedicatoria**

A Dios, por la sabiduría, la fortaleza y la luz que guiaron cada paso de este proceso formativo; a mi hijo, inspiración profunda de mis esfuerzos y motivo esencial de cada logro; a mis padres, por su respaldo permanente y por haber sembrado en mí la disciplina que sustenta este nuevo nivel académico; a Ing. Mauricio, compañero de trabajo de grado, por su compromiso y aporte riguroso; a quienes han acompañado mi crecimiento personal y profesional con confianza y generosidad. La culminación de este trabajo de maestría representa un hito trascendente en mi trayectoria, alcanzado con dedicación, constancia y profundo agradecimiento.

Laidy Guerrero

A Dios, fuente de fortaleza y luz en cada paso de mi vida; a mi esposa, compañera incondicional de cada paso que doy, cuyo amor, paciencia y fortaleza han sido mi mayor impulso; a mis hijas, cuya luz, alegría y ternura dan sentido a todo lo que hago; a mis padres, por los valores, la disciplina y la fortaleza que han guiado mi camino; a mi compañera Ing. Laidy, por su respaldo, colaboración y compromiso en cada etapa de este proceso.

Mauricio Fuel

# **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

## **Agradecimientos**

Al Ingeniero Raphael Andrés Luna Tezna, director de este trabajo de grado, por su guía experta, tiempo y apoyo constante, que hicieron posible la realización de este proyecto y enriquecieron profundamente nuestra formación académica y profesional; a los docentes de la maestría, quienes con su conocimiento, ejemplo y dedicación se han convertido en referentes inspiradores, fomentando la excelencia y la pasión por el aprendizaje continuo.

De igual manera, agradecemos al Ingeniero Oscar Jaramillo por su disposición y valiosos aportes académicos y técnicos, cuya cercanía académica y permanente intercambio, aun a la distancia, enriquecieron de manera significativa el desarrollo y la calidad del presente estudio.

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 15 |
| 1. Justificación.....   | 17 |
| 2. Objetivos.....   | 19 |
| 2.1 Objetivo general .....  | 19 |
| 2.2 Objetivos específicos.....  | 19 |
| 3. Marco referencial.....   | 20 |
| 3.1 Antecedentes .....  | 20 |
| 3.2 Marco conceptual .....  | 22 |
| 3.3 Marco teórico .....   | 29 |
| 3.4 Marco legal.....  | 32 |
| 3.4.1 Norma Sismo Resistente NSR-10 .....   | 32 |
| 3.4.2 Norma Técnica Colombiana NTC 5832.....  | 33 |
| 3.4.3 Guías Técnicas del Instituto Colombiano de la Construcción en Acero (ICCA)..... | 34 |
| 3.4.4 Normas internacionales complementarias .....                                    | 35 |
| 3.4.5 Integración normativa en el contexto nacional.....                              | 36 |
| 4. Metodología .....  | 37 |
| 4.1 Enfoque metodológico .....  | 37 |
| 4.2 Etapas de desarrollo .....  | 38 |
| 4.3 Resultados esperados.....   | 39 |
| 5. Desarrollo de herramienta.....   | 40 |
| 5.1.1 Normativa internacional y nacional aplicable .....                              | 42 |

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

*Fuente: Elaboración propia con base en FEMA (2000), AISC (2022), AWS (2021), NSR-10*

|  |    |
|--|----|
| <i>(2010) e ICCA (2019).</i> .....   | 43 |
| 5.1.2 Conexiones objeto de estudio.....  | 43 |
| 5.2 Requisitos técnicos y documentales mínimos para la verificación .....  | 47 |
| 5.2.1 Documentación técnica mínima requerida .....   | 47 |
| 5.2.2 Condiciones técnicas observables durante la inspección .....   | 49 |
| 5.3 Variables de control y criterios de evaluación .....   | 51 |
| 5.3.1 Clasificación general de variables .....   | 51 |
| 5.3.2 Criterios de evaluación y desempeño estructural .....  | 52 |
| 5.3.3 Variables específicas aplicadas a conexiones BSEEP, BFP y RBS .....  | 53 |
| 5.3.4 Aplicación práctica de los criterios .....   | 54 |
| 5.4 Herramienta cualitativa de verificación técnica para conexiones precalificadas .....                         | 55 |
| 5.4.2 Lista de verificación para la conexión BFP Bolted Flange Plate (Placa de ala<br>empernada) .....           | 57 |
| 5.4.3 Lista de verificación para la conexión RBS Reduced Beam Section (Reducción de<br>sección en la viga) ..... | 58 |
| 5.4.4 Aplicación y trazabilidad de la herramienta - Caso de revisión Construcción Particular<br>.....            | 59 |
| <b>6.0 Conclusiones</b> .....  | 68 |
| <b>7.0 Recomendaciones</b> .....   | 69 |
| <b>Referencias</b> .....   | 70 |
| Normas y especificaciones técnicas .....   | 70 |

**HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

Libros y textos especializados ..... 71

Artículos y documentos académicos ..... 72

Fuentes complementarias ..... 72

**HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

**Lista de apéndices**

**Apéndice A-** *Ficha de control\_CPM\_BSEEP\_BFP\_RBS*

*Nota:* véase archivo en fuente externa

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.0</b> Normas internacionales complementarias aplicables a la inspección de estructuras metálicas. Fuente: Elaboración propia con base en AISC (2022), AWS (2021), FEMA (2000) e IIW (2019).....                         | 35 |
| <b>Tabla 2.0</b> Normas y documentos técnicos aplicables a la verificación de conexiones precalificadas. Fuente: Elaboración propia con base en FEMA (2000), AISC (2022), AWS (2021), NSR-10 (2010) e ICCA (2019).....             | 42 |
| <b>Tabla 3.0</b> Documentación técnica mínima requerida para la verificación de conexiones precalificadas. Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10 (2010), AISC 358-22, AWS D1.8 (2021) e ICCA (2019). ....                  | 48 |
| <b>Tabla 4.0</b> Condiciones técnicas observables durante la verificación de conexiones precalificadas. Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), NSR-10 (2010) e ICCA (2019).....                      | 49 |
| <b>Tabla 5.0</b> Clasificación de variables de control para la verificación de conexiones precalificadas. Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10 (2010), AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), FEMA 355D (2000) e ICCA (2019). .... | 51 |
| <b>Tabla 6.0</b> Variables de control y criterios de evaluación por tipo de conexión precalificada. Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), FEMA 355D (2000), NSR-10 (2010) e ICCA (2019).....        | 53 |
| <b>Tabla 7.0</b> Lista de verificación cualitativa para la conexión BSEEP. Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), AISC 360-22, FEMA 355D (2000) y NSR-10 (2010).<br>.....                            | 55 |

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

**Tabla 8.0** *Lista de verificación cualitativa para la conexión BFP. Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), AISC 360-22, FEMA 355D (2000) y NSR-10 (2010). 57*

**Tabla 9.0** *Lista de verificación cualitativa para la conexión RBS. Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), FEMA 355D (2000), AISC 360-22 y NSR-10 (2010). 58*

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> <i>Limpieza de perfilería con grata y preparación de material.</i> .....  | 59 |
| <b>Figura 2.</b> <i>Mesa de corte por arco, tipo automatizado, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”</i> .....                       | 60 |
| <b>Figura 3.</b> <i>Platinas de conexiones, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”</i> .....  | 60 |
| <b>Figura 4.</b> <i>Soldadura por arco, tipo automatizado, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”</i> .....                           | 60 |
| <b>Figura 5.</b> <i>Pruebas de tinta en taller para estructura metálica en taller, , Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”</i> ..... | 61 |
| <b>Figura 6.</b> <i>Vigas armadas en taller para montaje</i> .....   | 61 |
| <b>Figura 7.</b> <i>Estructura parcialmente instalada</i> .....  | 62 |
| <b>Figura 8.</b> <i>Otros parámetros de inspección – Espesores de pintura</i> .....  | 62 |
| <b>Figura 9.</b> <i>Medición en sitio de platinas y controles en taller</i> .....  | 63 |

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## Índice de ilustraciones

|   |    |
|---|----|
| <i>Ilustración 1.0. Vista lateral - Frontal Conexión BSEEP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)</i> ..... | 44 |
| <i>Ilustración 2.0. Vista superior – 3D Conexión BSEEP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)</i> .....     | 44 |
| <i>Ilustración 3.0. Vista lateral - Frontal Conexión BFP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)</i> .....   | 45 |
| <i>Ilustración 4.0. Vista superior – 3D Conexión BFP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)</i> .....       | 45 |
| <i>Ilustración 5.0. Vista lateral - Frontal Conexión RBS (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)</i> .....   | 46 |
| <i>Ilustración 6.0. Vista superior – 3D Conexión RBS (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)</i> .....       | 46 |

# **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

## **Resumen**

El uso de conexiones precalificadas en estructuras de acero ha marcado un avance significativo en el diseño sísmico moderno, al permitir un comportamiento más predecible y una disipación eficiente de energía durante eventos extremos. Sin embargo, la correcta ejecución de estas uniones no depende únicamente del diseño, sino también de la capacidad para verificar su estado real en obra, identificar desviaciones y asegurar que el comportamiento obtenido en laboratorio se conserve en la práctica.

En el contexto colombiano, donde la NSR-10, la NTC 5832 y las guías ICCA establecen lineamientos generales para el control de calidad en estructuras metálicas, aún existe una brecha en cuanto a herramientas aplicables específicamente a la evaluación técnica postconstructiva de conexiones a momento tipo BSEEP, BFP y RBS. Esta investigación desarrolla una herramienta cualitativa de verificación, basada en criterios geométricos, visuales y normativos derivados de la AISC 358, AISC 341, AWS D1.8, FEMA 355D y estándares internacionales de inspección.

La herramienta propone listas de chequeo detalladas que permiten evaluar las conexiones ya ejecutadas mediante observación directa, mediciones en sitio y ensayos no destructivos (NDT), garantizando trazabilidad documental y criterios de aceptación claros. Su aplicación facilita el diagnóstico de conformidad normativa, identifica riesgos asociados a defectos constructivos y fortalece los procesos de supervisión técnica, interventoría y mantenimiento estructural en proyectos de acero.

Este trabajo aporta un instrumento práctico, aplicable y reproducible que mejora los procesos de control estructural en campo y contribuye a la gestión de la seguridad y el desempeño de las edificaciones metálicas en Colombia.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

*Palabras clave:* conexiones precalificadas, inspección estructural, AISC 358, supervisión técnica, verificación cualitativa, estructuras metálicas, RBS, BSEEP, BFP.

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## Abstract

The use of prequalified moment connections in steel structures has significantly advanced modern seismic design by enabling predictable behavior and efficient energy dissipation during extreme events. However, ensuring the intended ductile performance requires not only correct design, but also the ability to evaluate the actual condition of the constructed connection, detect deviations, and confirm that field performance aligns with laboratory-validated behavior.

In Colombia, where NSR-10, NTC 5832, and ICCA technical guides provide general criteria for quality control in steel construction, there remains a gap regarding practical tools specifically focused on the post-construction evaluation of prequalified moment connections such as BSEEP, BFP, and RBS. This study develops a qualitative verification tool based on geometric, visual, and normative criteria derived from AISC 358, AISC 341, AWS D1.8, FEMA 355D, and international inspection guidelines.

The proposed tool includes detailed checklists that allow the evaluation of already constructed connections through direct observation, on-site measurements, and nondestructive testing (NDT), ensuring documentary traceability and clear acceptance criteria. Its implementation facilitates the diagnosis of regulatory compliance, identifies risks associated with construction defects, and strengthens structural supervision and maintenance processes in steel projects.

This work provides a practical, applicable, and reproducible instrument that enhances field-level structural control and contributes to the safety and performance management of steel buildings in Colombia.

**Keywords:** prequalified connections, structural inspection, AISC 358, technical supervision, qualitative verification, steel structures, RBS, BSEEP, BFP.

# **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

## **Introducción**

La construcción de edificaciones en estructuras de acero ha ganado popularidad y confianza en Colombia, consolidándose como una alternativa eficiente y ligeramente económica frente a los sistemas constructivos tradicionales, debido a su notable resistencia y durabilidad [1]. En Colombia este tipo de edificaciones ha tenido un crecimiento considerable en los últimos años. Según Camacol (2023), el 25% de las nuevas construcciones en el país incorporaron estructuras metálicas, lo que representa un incremento del 15% en comparación con el año 2020[2]. Este avance se debe a los múltiples beneficios que ofrece el acero estructural, tales como su costo competitivo, rapidez en el montaje, adaptabilidad, mejor desempeño ante eventos sísmicos y su contribución a la sostenibilidad. Además, el futuro de las estructuras metálicas y los prefabricados de hormigón es prometedor, ya que la necesidad de edificaciones rápidas y eficientes impulsa su adopción como soluciones funcionales.

Varias son las ventajas que tienen las estructuras metálicas, entre ellas su capacidad de cubrir mayores luces sin necesidad de columnas intermedias [3], lo que permite crear espacios más amplios y funcionales. Es una característica especialmente beneficiosa para estructura tales como naves industriales, locales comerciales y edificios de gran altura, donde aprovechar espacios arquitectónicos de gran envergadura es fundamental. Sin embargo, este tipo de beneficios en muchas ocasiones son desperdiciados debido a la falta de conocimiento sobre el acero estructural, lo que se convierte en un reto para el sector de la construcción. Muchos ingenieros y trabajadores de obra aún enfrentan dificultades para comprender aspectos fundamentales, e incluso básicos, tales como su comportamiento ante fuerzas sísmicas [4], procesos de fabricación, montaje y control de calidad [5]. Aunque normativas como la NSR-10, la AISC y la NTC proporcionan

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

lineamientos técnicos, y entidades como la IMCA, el ICCA, y normas como la ANSI/AISC. 358-16 (Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames) han desarrollado documentos de apoyo, en la práctica sigue habiendo vacíos en la inspección en obra y en la correcta aplicación de estos criterios. Ante esta necesidad, vemos fundamental contar con un manual técnico que compile de manera clara y accesible los requisitos esenciales para la instrucción de estructuras metálicas. Un manual bien estructurado no solo facilitaría la aplicación de la normativa, sino que contribuiría a garantizar estándares de calidad más altos y a consolidar el acero estructural como una opción confiable y eficiente para la construcción moderna.

La herramienta cualitativa de verificación nace con un propósito; ser un documento práctico y comprensible para ingenieros inspectores y constructores que trabajan con estructuras metálicas.

Aquí se encontrarán los requisitos esenciales para la inspección, junto con métodos de control de calidad y tolerancias permitidas. Se ha procurado de presentarlo de una manera sencilla y aplicada, y de esta manera utilizarlo en tu trabajo diario.

# **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

## **1. Justificación**

Las conexiones a momento en estructuras de acero representan elementos determinantes para el desempeño sísmico de una edificación, pues en ellas se concentra la capacidad de disipación de energía y la formación controlada de rótulas plásticas. Aunque la AISC 358, AISC 341, AWS D1.8, la NSR-10 y la NTC 5832 definen los requisitos de diseño, ejecución y control de calidad para conexiones precalificadas, el ejercicio profesional en Colombia evidencia la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar de manera clara, sistemática y verificable el estado real de una conexión precalificada ejecutada en obra.

En la práctica, gran parte de los procesos de inspección estructural se orientan principalmente al control general del montaje o al cumplimiento documental, sin ofrecer instrumentos metodológicos que guíen la verificación cualitativa postconstructiva de conexiones como BSEEP, BFP y RBS, cuyo adecuado desempeño depende directamente de su geometría, detalles constructivos y calidad de ejecución. Esta ausencia de metodologías operativas y adaptadas al contexto nacional dificultan identificar desviaciones en obra que, aun cuando sean pequeñas, pueden comprometer la ductilidad y el comportamiento sísmico esperado.

En este contexto, el presente trabajo desarrolla una herramienta cualitativa de verificación técnica, orientada a evaluar las conexiones precalificadas ya ejecutadas mediante inspección visual, mediciones en sitio y ensayos no destructivos. La herramienta integra criterios derivados de la normativa internacional y nacional vigente, y los organiza en listas de chequeo claras, aplicables y trazables, diseñadas para fortalecer la labor de ingenieros estructurales, supervisores técnicos, interventores y entidades de control.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

Además de su utilidad inmediata en procesos de inspección, la herramienta aporta un mecanismo confiable para la gestión del mantenimiento estructural, lo que permite registrar el estado de cada conexión a lo largo del ciclo de vida de la edificación. Con ello, se contribuye al mejoramiento continuo de la calidad en las obras de acero y al incremento de la seguridad estructural en proyectos desarrollados en Colombia.

# **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Elaborar una herramienta cualitativa de verificación técnica para la inspección de conexiones precalificadas en estructuras de acero, específicamente para la placa de extremo extendida empernada con rigidizador (BSEEP), la placa de ala empernada (BFP) y la reducción de sección en la viga (RBS), estableciendo criterios verificables que garanticen su correcta implementación en proyectos de construcción.

### **2.2 Objetivos específicos**

Identificar los requisitos técnicos, documentos mínimos, normativas (NSR-10, ICCA, AWS y AISC) a cumplir en el desarrollo de proyectos de construcción de acero.

Definir las variables de control posterior en la construcción de acero mediante la revisión bibliográfica de normativas.

Verificar e implementar en proyecto obra, la herramienta cualitativa o lista de chequeo para uno de los tres tipos de conexiones, documentando los procedimientos, de tal manera que sirva como referencia práctica para la inspección de conexiones precalificadas a momento.

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## 3. Marco referencial

### 3.1 Antecedentes

El control de calidad y la verificación técnica en estructuras metálicas han evolucionado de manera significativa durante las últimas tres décadas, especialmente después de los eventos sísmicos que evidenciaron fallas frágiles en uniones viga–columna de acero. Los sismos de Northridge (1994) en Estados Unidos y Kobe (1995) en Japón marcaron un punto de inflexión en el diseño y la inspección de las conexiones estructurales, al demostrarse que muchas uniones soldadas que cumplían con las normas vigentes fallaron prematuramente por falta de ductilidad y control de ejecución (FEMA, 2000).

Como respuesta, la Federal Emergency Management Agency (FEMA) y el SAC Steel Project desarrollaron un programa integral de investigación que dio origen a la serie de documentos FEMA 350–355D, donde se establecieron los criterios de comportamiento, modos de falla y mecanismos de disipación de energía de las conexiones a momento. Estos estudios sentaron las bases para el concepto de conexión precalificada, que posteriormente fue formalizado en la norma AISC 358, documento que consolidó las configuraciones más confiables y reproducibles bajo demanda sísmica controlada.

Desde entonces, la tendencia mundial se ha orientado hacia la creación de sistemas de inspección y verificación estandarizados, que permitan asegurar que las conexiones en acero no solo se diseñen correctamente, sino que se ejecuten conforme a los parámetros definidos en los ensayos experimentales y las normas internacionales (AISC, 2022). Esta evolución impulsó también el desarrollo de normas complementarias como la AWS D1.8 (Suplemento sísmico para la AWS D1.1), la cual especifica los requisitos de calificación de

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

procedimientos de soldadura, personal y criterios de aceptación en estructuras sometidas a acciones sísmicas.

En América Latina, países como Chile, México y Perú han adoptado estándares basados en las especificaciones AISC 341, AISC 358 y AWS D1.8, buscando alinear sus reglamentos con los criterios de desempeño sísmico empleados en Norteamérica. En Colombia, este proceso de armonización normativa se consolidó con la expedición de la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), que en sus Títulos F e I autoriza el uso de estructuras metálicas y regula la supervisión técnica en función del nivel de complejidad y ocupación de la edificación.

No obstante, la NSR-10 aborda los controles de inspección de manera general, sin detallar procedimientos específicos para la verificación de conexiones precalificadas a momento, lo que genera vacíos técnicos en la aplicación práctica. Frente a ello, instituciones como el Instituto Colombiano de la Construcción en Acero (ICCA) han desarrollado guías que adaptan las disposiciones internacionales a las condiciones locales, proponiendo metodologías de control visual, dimensional y documental, junto con listas de chequeo aplicables a estructuras metálicas (ICCA, 2019).

Por su parte, la Norma Técnica Colombiana NTC 5832 (ICONTEC, 2021) refuerza este enfoque al exigir que todas las estructuras de acero cuenten con un Plan de Aseguramiento de la Calidad (PAC), donde se especifiquen los procedimientos de inspección, ensayos no destructivos y trazabilidad de materiales. Sin embargo, estas herramientas siguen enfocadas en la verificación general del sistema estructural y no profundizan en la evaluación cualitativa del estado de las

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

conexiones precalificadas, aspecto que representa una necesidad actual en los procesos de supervisión estructural del país.

A nivel internacional, la European Convention for Constructional Steelwork (ECCS, 2020) y el International Institute of Welding (IIW, 2019) han promovido la creación de sistemas de gestión de calidad basados en evidencia medible y trazabilidad documental, donde la inspección se considera una fase continua del proceso constructivo. Estos lineamientos, junto con los estándares AISC, AWS y FEMA, constituyen hoy la referencia técnica para el desarrollo de metodologías de verificación y control cualitativo aplicadas a la construcción en acero.

En este contexto, el presente trabajo se enmarca en la necesidad de adaptar dichos criterios al ámbito colombiano, proponiendo una herramienta cualitativa de verificación técnica orientada a la inspección de conexiones precalificadas a momento tipo BSEEP, BFP y RBS, que permita estandarizar los procesos de revisión en obra y fortalecer la gestión de calidad estructural.

### **3.2 Marco conceptual**

El presente apartado establece las definiciones conceptuales fundamentales que sirven de base para el desarrollo de la herramienta cualitativa de verificación técnica propuesta.

Los conceptos aquí descritos provienen de normas técnicas internacionales (AISC, AWS, FEMA, IIW) y nacionales (NSR-10, ICCA, NTC 5832), y se relacionan con el proceso de diseño, ejecución e inspección de estructuras de acero estructural.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### ***3.2.1 Conexión estructural***

Es la unión entre dos o más elementos de acero (vigas, columnas, rigidizadores, placas, entre otros) que permite la transmisión de fuerzas axiales, cortantes o de momento entre ellos.

Según la AISC 360-22, las conexiones deben diseñarse para resistir las solicitaciones actuantes, garantizar la continuidad estructural y mantener la ductilidad requerida por el sistema resistente.

En el contexto de la inspección, la conexión estructural constituye el punto crítico de control donde se concentra la revisión dimensional, la calidad de los materiales, la ejecución de soldaduras y el apriete de pernos.

### ***3.2.2 Conexión precalificada a momento***

De acuerdo con la AISC 358-22, una conexión precalificada es aquella cuya geometría, materiales y comportamiento estructural han sido validados mediante ensayos experimentales bajo cargas cíclicas.

Estas conexiones son reconocidas oficialmente por la AISC y pueden emplearse sin necesidad de realizar nuevos ensayos, siempre que se cumplan las condiciones y límites de aplicación definidos en la norma.

Entre las más utilizadas se encuentran la Bolted Stiffened Extended End-Plate (BSEEP), la Bolted Flange Plate (BFP) y la Reduced Beam Section (RBS).

Su desempeño se basa en desarrollar una rotación plástica controlada en la viga, garantizando que la energía sísmica se disipe de forma estable y sin pérdida significativa de capacidad resistente (FEMA, 2000).

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### ***3.2.3 Disipación Moderada de Energía (DMO)***

La NSR-10 (Título F) clasifica los sistemas estructurales de acero según su capacidad de disipar energía durante un sismo.

Un sistema de Disipación Moderada de Energía (DMO) corresponde a estructuras diseñadas con un factor de sobre-resistencia R intermedio, que presentan un comportamiento predominantemente elástico, pero con ciertas zonas diseñadas para desarrollar rótulas plásticas controladas.

En este tipo de sistemas, las conexiones precalificadas cumplen un papel esencial, ya que su correcta ejecución determina el grado de ductilidad y la seguridad global del sistema.

### ***3.2.4 Disipación Especial de Energía (DES)***

La Disipación Especial de Energía (DES) corresponde al nivel más alto de capacidad de disipación sísmica definido por la NSR-10 (Título F) y la AISC 341-22. Los sistemas estructurales clasificados como DES están diseñados para incursionar plenamente en el rango inelástico, desarrollando grandes rotaciones plásticas controladas sin pérdida significativa de resistencia.

Estos sistemas deben garantizar un comportamiento altamente dúctil, de modo que la energía generada por el sismo se disipe principalmente en las zonas de rótula plástica predefinidas.

En el caso de estructuras de acero, el cumplimiento de este nivel de desempeño se logra mediante el uso de conexiones precalificadas a momento cuyas geometrías, materiales y detalles constructivos han sido validados experimentalmente.

La AISC 358-22 y la FEMA 350–355D establecen que las conexiones tipo RBS (Reduced Beam

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

Section), BFP (Bolted Flange Plate) y BSEEP (Bolted Stiffened Extended End-Plate) pueden emplearse en sistemas DES, siempre que se respeten los límites de aplicación definidos en cada precalificación, incluyendo la resistencia de los materiales, los espesores mínimos de las placas y la relación entre la viga y la columna.

En comparación con los sistemas DMO, los sistemas DES requieren un control más estricto en la fabricación, montaje e inspección, ya que la confiabilidad del comportamiento sísmico depende directamente de la calidad y exactitud de las conexiones. Por ello, las normas AWS D1.8 y ICCA (2019) recomiendan la aplicación de inspecciones continuas, ensayos no destructivos (NDT) en las zonas críticas y la validación documental de todos los procedimientos de soldadura y montaje.

### ***3.2.5 Inspección estructural***

La inspección estructural comprende la observación, medición y documentación sistemática de los elementos constructivos con el fin de verificar su conformidad con las especificaciones del diseño y las normas aplicables.

Según las Guías ICCA (2019), la inspección debe realizarse en todas las fases del proyecto: fabricación, montaje y postmontaje, empleando registros fotográficos, planillas de verificación y actas de conformidad.

En el caso de estructuras metálicas, las inspecciones se enfocan en el control de dimensiones, soldaduras, pernos, recubrimientos y alineación, mediante métodos visuales y ensayos no destructivos (NDT).

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### ***3.2.6 Supervisión técnica***

De acuerdo con la NSR-10 (Título I), la supervisión técnica es la labor realizada por un profesional calificado que se encarga de verificar que la construcción cumpla con los planos aprobados, las normas y las especificaciones técnicas.

Existen tres grados de supervisión, definidos según la importancia y complejidad de la estructura.

En proyectos con estructuras metálicas o con sistemas DMO o DES, se requiere el Grado 3, que implica inspecciones continuas, control de calidad y la participación de profesionales especializados en estructuras.

El supervisor técnico es, por tanto, el responsable de emitir las actas de conformidad y los informes de control estructural.

### ***3.2.7 Control de calidad***

El control de calidad en estructuras metálicas, según el International Institute of Welding (IIW, 2019) y la NTC 5832, consiste en la planificación, ejecución y registro de procedimientos destinados a asegurar que los materiales, procesos y productos cumplan con los requisitos del diseño.

Incluye la revisión de certificados de materiales, la calificación de procedimientos de soldadura (WPS/PQR), el control dimensional y los ensayos de verificación en taller y obra.

Un control de calidad efectivo garantiza la trazabilidad y conformidad de cada elemento estructural, reduciendo riesgos de falla y no conformidades en obra.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### ***3.2.8 Ensayos no destructivos (NDT)***

Son procedimientos de inspección que permiten evaluar la integridad de los materiales y uniones sin afectar su funcionalidad.

De acuerdo con la AWS D1.8-21 y la práctica recomendada ASNT SNT-TC-1A, los métodos más empleados en estructuras de acero son:

Inspección visual (VT): detección de discontinuidades superficiales.

Partículas magnéticas (MT) y líquidos penetrantes (PT): detección de grietas superficiales en soldaduras o cortes.

Ultrasonido (UT): detección de discontinuidades internas.

La aplicación de estos métodos es obligatoria en zonas críticas de conexiones a momento, de acuerdo con el plan de inspección definido por el supervisor técnico.

### ***3.2.9 Trazabilidad documental***

La trazabilidad consiste en la capacidad de identificar y seguir el historial de un elemento estructural desde su fabricación hasta su montaje final.

Incluye la documentación de certificados de acero, pernos, electrodos, informes de ensayo, registros de inspección y planos as-built.

La NTC 5832 y las Guías ICCA establecen que toda estructura metálica debe contar con un sistema de trazabilidad que permita relacionar cada componente con su lote de fabricación, certificación de calidad y punto de instalación.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### ***3.2.10 Lista de chequeo (checklists)***

Es una herramienta de control que permite verificar de forma sistemática el cumplimiento de los requisitos técnicos y normativos de un proceso.

En inspección estructural, las listas de chequeo se emplean para registrar observaciones sobre dimensiones, materiales, soldaduras, pernos, alineación y documentación técnica (ICCA, 2019).

Estas listas constituyen la base de la herramienta cualitativa de verificación técnica propuesta en este trabajo, orientada a evaluar el estado real de las conexiones precalificadas durante la ejecución del proyecto.

### ***3.2.11 Conexiones BSEEP, BFP y RBS***

Las tres conexiones objeto de estudio representan configuraciones reconocidas internacionalmente por su desempeño sísmico y ductilidad (AISC 358-22; FEMA 350).

BSEEP (Bolted Stiffened Extended End-Plate): conexión emperrada con placa de extremo extendida y rigidizadores longitudinales que controlan la deformación local.

BFP (Bolted Flange Plate): conexión emperrada mediante placas soldadas o atornilladas a las alas de la viga, que permiten transmitir momento y cortante de forma eficiente.

RBS (Reduced Beam Section): conexión soldada con reducción controlada del ala de la viga, que concentra la rotación plástica lejos del alma de la columna.

Cada una cuenta con parámetros de precalificación específicos, establecidos en la AISC 358, que deben verificarse mediante inspección para garantizar su comportamiento adecuado.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### **3.3 Marco teórico**

El acero estructural constituye uno de los materiales más utilizados en la ingeniería moderna debido a su comportamiento dúctil, alta resistencia específica y facilidad de control durante los procesos constructivos.

Según el American Institute of Steel Construction (AISC, 2022), el acero permite la ejecución de estructuras con un alto grado de precisión y repetitividad, gracias a la posibilidad de fabricar componentes bajo condiciones controladas de taller y ensamblarlos posteriormente mediante procesos atornillados o soldados.

Esta condición reduce la variabilidad en el desempeño estructural y facilita la implementación de métodos de inspección visual, dimensional y no destructiva (NDT) que garantizan la conformidad con los requisitos normativos.

El European Convention for Constructional Steelwork (ECCS, 2020) señala que la eficiencia del acero no solo depende de su resistencia mecánica, sino también de la capacidad de inspeccionarlo y mantenerlo.

Una estructura metálica correctamente controlada puede conservar sus propiedades durante toda su vida útil mediante programas de mantenimiento preventivo, ensayos periódicos y evaluaciones de uniones críticas, como las conexiones viga–columna que concentran las mayores demandas de momento.

De acuerdo con el Instituto Colombiano de la Construcción en Acero (ICCA, 2019), el éxito de una estructura metálica no radica únicamente en el cumplimiento de los criterios de diseño, sino en la gestión integral de la calidad durante todas las etapas: suministro, fabricación, montaje y supervisión.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

Para ello, las guías ICCA proponen el uso de listas de chequeo técnicas que permiten documentar el estado de los elementos, los resultados de inspección y la trazabilidad de los materiales utilizados, promoviendo un enfoque preventivo más que correctivo.

En el ámbito internacional, los criterios de precalificación y control de conexiones a momento están definidos en la norma AISC 358-22, complementada por la AISC 341-22 y la AISC 360-22.

Estas disposiciones establecen los límites geométricos, las propiedades de los materiales y los procedimientos de calificación de las uniones sometidas a demandas sísmicas.

Asimismo, la AWS D1.8-2021, que actúa como suplemento sísmico de la AWS D1.1, especifica los requisitos de soldadura, inspección visual, calificación de personal y aceptación de discontinuidades, integrando la inspección como parte esencial del proceso constructivo y no como una etapa posterior.

En cuanto a la fundamentación experimental, los estudios desarrollados por la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2000) tras los sismos de Northridge y Kobe permitieron establecer el comportamiento sísmico real de las conexiones de acero.

A través de la serie de documentos FEMA 350 a FEMA 355E, se definieron los modos de falla, las curvas de rotación plástica y los criterios de desempeño dúctil, que posteriormente sirvieron de base para la precalificación formal en la AISC 358.

Estos aportes consolidaron el concepto de conexión precalificada, entendida como aquella unión cuya geometría, materiales y comportamiento han sido validados experimentalmente, eliminando la necesidad de ensayos adicionales cuando se cumplen sus límites de aplicación.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

En el contexto colombiano, la Norma Sismo Resistente NSR-10 (MVCT, 2010), en sus Títulos F e I, autoriza el empleo de estructuras metálicas y de aluminio bajo condiciones de diseño y supervisión controladas.

El Título F define las disposiciones generales para el diseño de estructuras de acero, mientras que el Título I establece las obligaciones del supervisor técnico, los grados de supervisión (1, 2 y 3) y los requisitos mínimos de seguimiento en función de la complejidad estructural.

Sin embargo, la NSR-10 no detalla los procedimientos específicos de inspección en taller o en campo, por lo que su aplicación práctica requiere del apoyo de normas complementarias como la NTC 5832 y las Guías ICCA, las cuales proporcionan criterios para la verificación de soldaduras, pernos y componentes ensamblados.

Las estructuras con Disipación Moderada de Energía (DMO) exigen especial atención en la revisión de sus conexiones resistentes a momento, ya que el cumplimiento del rango de precalificación y de las tolerancias constructivas determina la capacidad de la estructura para disipar energía sin pérdida significativa de resistencia.

En este contexto, las inspecciones deben enfocarse en variables críticas como la geometría de la unión, la calidad de las soldaduras, el pretensado de los pernos, la alineación viga–columna y la presencia de defectos superficiales o discontinuidades internas.

El control de calidad en estructuras de acero, según el International Institute of Welding (IIW, 2019), debe implementarse a través de una metodología basada en criterios observables, evidencias medibles y trazabilidad completa del proceso.

Dicho enfoque, aplicado a la verificación de conexiones precalificadas como la Bolted Stiffened Extended End-Plate (BSEEP), la Bolted Flange Plate (BFP) y la Reduced Beam Section

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

(RBS), permite validar el desempeño estructural mediante procedimientos normalizados y listas de verificación estructuradas.

Finalmente, el proceso de supervisión técnica constituye la última línea de defensa frente a posibles fallas estructurales.

Como señalan las guías ICCA (2019) y ECCS (2020), el éxito de una estructura metálica no depende solo del diseño, sino de la capacidad del sistema de inspección para detectar, registrar y corregir desviaciones antes de que comprometan la integridad estructural.

Una supervisión sistemática y documentada no solo fortalece la seguridad del proyecto, sino que garantiza el cumplimiento de las normas y la durabilidad de la estructura en servicio.

### **3.4 Marco legal**

El marco legal que regula el diseño, la fabricación y la verificación de estructuras metálicas en Colombia se apoya en un conjunto de normas nacionales e internacionales que buscan garantizar la seguridad, calidad y desempeño estructural de las edificaciones. Estas disposiciones constituyen la base normativa para la inspección y el control de calidad en obras que utilizan conexiones precalificadas a momento, como las BSEEP, BFP y RBS, objeto del presente trabajo.

#### ***3.4.1 Norma Sismo Resistente NSR-10***

La Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), adoptada mediante el Decreto 926 de 2010, es el reglamento principal que define los criterios de diseño, ejecución y

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

supervisión técnica de las edificaciones en el país.

En el caso de las estructuras de acero, los Títulos F e I son los que aplican directamente:

- El Título F se refiere a las estructuras de acero y aluminio estructural. Allí se definen los requisitos generales de diseño, propiedades de los materiales, procedimientos de soldadura y uniones empernadas, además de las provisiones sísmicas para sistemas de disipación de energía moderada o especial. Este título establece la obligatoriedad de emplear materiales certificados, uniones verificables y controles de calidad durante la fabricación y el montaje.
- El Título I aborda la supervisión técnica, los grados de control (1, 2 y 3) y las responsabilidades del supervisor o interventor estructural, quien debe verificar el cumplimiento de los planos, especificaciones y registros de obra. Además, exige conservar la trazabilidad documental y los reportes de inspección, ensayos y materiales utilizados durante la ejecución.

Aunque la NSR-10 sienta las bases del diseño y la supervisión, no define de manera detallada los procedimientos específicos para inspección de conexiones, tolerancias y control de montaje, por lo que se complementa con normas técnicas como la NTC 5832 y las guías ICCA, que desarrollan estos aspectos con mayor profundidad.

### ***3.4.2 Norma Técnica Colombiana NTC 5832***

La NTC 5832 (ICONTEC, 2021) es la norma que reglamenta los requisitos técnicos y de calidad para estructuras de acero estructural. Su aplicación es obligatoria en proyectos que empleen

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

componentes metálicos soldados o empernados, y sirve como guía para establecer los controles de inspección en taller y obra.

Esta norma indica que cada proyecto debe contar con un plan de aseguramiento de la calidad (PAC) que contemple:

- Procedimientos de soldadura calificados (WPS/PQR).
- Certificación de materiales y consumibles.
- Ensayos no destructivos (VT, MT, UT o PT) en elementos críticos.
- Registros de torque en uniones empernadas.
- Planos as-built firmados y actas de conformidad técnica.

La NTC 5832 también reconoce como referencia internacional los estándares AISC 360, AISC 358, AWS D1.1/D1.8 y las guías ICCA, garantizando la compatibilidad con las normas norteamericanas utilizadas en diseño y control estructural.

### ***3.4.3 Guías Técnicas del Instituto Colombiano de la Construcción en Acero (ICCA)***

El ICCA (2019) ha desarrollado guías de inspección y control de calidad que se aplican tanto en la fabricación en taller como en el montaje en obra. Estas guías complementan lo dispuesto en la NSR-10 y la NTC 5832, proporcionando formatos, listas de chequeo y procedimientos de verificación que orientan al supervisor técnico o al interventor durante el control del proceso constructivo.

Entre los aspectos más relevantes se destacan:

- La revisión previa de la documentación técnica antes del inicio de obra.
- La verificación dimensional de elementos soldados o empernados.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

- La revisión visual del estado superficial, continuidad de soldaduras y torque aplicado en pernos.
- El registro sistemático de hallazgos y la aplicación de acciones correctivas cuando sea necesario.

Estas guías se han convertido en una herramienta práctica para la supervisión estructural, ya que permiten documentar y evidenciar el cumplimiento normativo de cada conexión, asegurando la trazabilidad del control de calidad.

### 3.4.4 Normas internacionales complementarias

El marco legal colombiano se apoya en normas internacionales que sirven como referencia para el diseño, la fabricación y la inspección de estructuras metálicas, especialmente en sistemas de conexiones resistentes a momento:

*Tabla 1.0 Normas internacionales complementarias aplicables a la inspección de estructuras metálicas.*

| <b>Norma / Documento</b>  | <b>Organismo emisor</b>                  | <b>Aplicación en la inspección y control de calidad</b>                                      |
|---|--|--|
| <b>AISC 360-22 – <i>Specification for Structural Steel Buildings</i></b>      | American Institute of Steel Construction | Criterios generales de diseño, resistencia y tolerancias de fabricación y montaje.           |
| <b>AISC 341-22 – <i>Seismic Provisions for Structural Steel Buildings</i></b> | AISC                                     | Define los requisitos sísmicos, ductilidad y desempeño esperado de las conexiones a momento. |
| <b>AISC 358-22 – <i>Prequalified Connections for Seismic Applications</i></b> | AISC                                     | Regula la geometría, materiales y límites de aplicación de conexiones                        |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|  |                                     |   |
|--|-------------------------------------|---|
|  |                                     | precalificadas (BSEEP, BFP, RBS).   |
| <b>AWS D1.1 (2020) / AWS D1.8 (2021)</b>                               | American Welding Society            | Especifica los requisitos de ejecución, inspección visual y ensayos no destructivos en soldaduras estructurales y sísmicas. |
| <b>FEMA 350–355D (2000)</b>  | Federal Emergency Management Agency | Proporciona los fundamentos experimentales para el comportamiento sísmico de conexiones dúctiles y precalificadas.          |
| <b>IIW (2019) – <i>Guidelines on Quality Management in Welding</i></b> | International Institute of Welding  | Define los principios de gestión de calidad, calificación del personal y registro de resultados en soldadura estructural.   |

*Fuente: Elaboración propia con base en AISC (2022), AWS (2021), FEMA (2000) e IIW (2019).*

### 3.4.5 Integración normativa en el contexto nacional

La articulación entre la NSR-10, la NTC 5832 y las Guías ICCA, junto con los estándares internacionales AISC, AWS y FEMA, permite consolidar un sistema integral de control y verificación para estructuras metálicas.

Cada documento cumple un papel específico dentro del ciclo de vida de la obra:

- La NSR-10 establece la obligatoriedad legal y los niveles de supervisión técnica.
- La NTC 5832 define los procedimientos de inspección y los requisitos mínimos de documentación.
- Las Guías ICCA operacionalizan los controles mediante formatos y fichas de campo.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

- Y las normas AISC, AWS y FEMA proporcionan el respaldo técnico y experimental sobre el cual se validan las geometrías, materiales y criterios de aceptación de las conexiones precalificadas.

De esta manera, el marco legal colombiano incorpora los avances normativos internacionales y garantiza que las estructuras de acero con conexiones a momento se diseñen, ejecuten y verifiquen bajo los más altos estándares de calidad estructural y seguridad sísmica.

### **4. Metodología**

La metodología desarrollada para esta investigación busca establecer un conjunto de parámetros técnicos, normativos y documentales que sirvan como base para la inspección y control de calidad en proyectos de estructuras metálicas durante su construcción. El enfoque metodológico es de tipo descriptivo y analítico, ya que se fundamenta en la revisión de información técnica, normativa y bibliográfica para definir criterios, clasificar procesos y proponer un instrumento práctico de control.

#### **4.1 Enfoque metodológico**

El estudio parte de la necesidad de sistematizar los procedimientos de revisión técnica aplicables a estructuras de acero en Colombia, integrando los lineamientos establecidos por la NSR-10 (Títulos F e I), la AISC 360/358, los documentos técnicos del ICCA, y demás referencias internacionales como la AWS D1.1/D1.8 y la FEMA 350. La investigación combina el análisis documental con la estructuración de fichas de control que permitan una aplicación práctica en obra, fortaleciendo los procesos de supervisión.

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## 4.2 Etapas de desarrollo

El proceso metodológico se desarrolla en tres fases principales: identificación, comparación y estructuración de los parámetros de inspección.

### Fase 1. Identificación de requisitos técnicos y documentales

En esta primera etapa se busca reconocer los requisitos mínimos exigidos en la inspección de estructuras metálicas, tanto desde el punto de vista técnico como normativo. Las actividades específicas incluyen:

- Revisión de bibliografía, artículos y manuales relacionados con el diseño, fabricación y montaje de acero estructural.
- Identificación de los parámetros de inspección más relevantes según el tipo y grado de supervisión técnica definido en la NSR-10.
- Selección de los aspectos más representativos e indispensables para la verificación de calidad durante la construcción.
- Recopilación de información sobre formatos y fichas de control empleados en proyectos metálicos conforme a la NSR-10, AISC, IMCA y documentos del ICCA.

### Fase 2. Clasificación y análisis comparativo de criterios de control

En esta fase se establecen niveles de prioridad e importancia de los procesos constructivos y normativos que deben verificarse en obra. Las actividades contempladas son:

- Análisis comparativo entre diferentes formatos guía de inspección y control de calidad aplicados en proyectos de acero estructural.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

- Evaluación de su correspondencia con las exigencias mínimas normativas nacionales e internacionales.

- Selección y adaptación de los modelos más adecuados que aseguren la trazabilidad y el cumplimiento de los parámetros técnicos requeridos.

El objetivo de esta etapa es definir una estructura de ficha de control unificada, que permita documentar los aspectos más críticos de la construcción metálica de manera sistemática.

Fase 3. Elaboración del documento y establecimiento de parámetros de inspección

En la última fase se consolida la información obtenida para generar un documento técnico de apoyo a la inspección de obras metálicas, el cual servirá como guía práctica para interventores, supervisores y residentes de obra. Las actividades incluyen:

- Análisis de las especificaciones técnicas y normas aplicables a edificaciones de acero estructural.

- Revisión y ajuste continuo del documento durante su elaboración, con base en la retroalimentación bibliográfica y normativa.

- Definición de los parámetros finales de inspección, considerando criterios de diseño, fabricación, soldadura, montaje, control dimensional y documentación de calidad.

- Elaboración del formato definitivo de ficha o lista de verificación técnica, que integre los requerimientos establecidos por la NSR-10, NTC 5832, AISC, AWS y guías ICCA.

### **4.3 Resultados esperados**

Como resultado de la aplicación de esta metodología, se espera obtener:

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

- Un documento guía estructurado que compile los requisitos técnicos y normativos mínimos para la inspección de estructuras metálicas.
- Una ficha de control estandarizada, adaptable a distintos tipos de proyectos de acero estructural.
- Un aporte técnico que contribuya al fortalecimiento de los procesos de supervisión, interventoría y aseguramiento de calidad en la construcción metálica en Colombia.

### **5. Desarrollo de herramienta**

El presente capítulo se desarrolla en torno a la creación de una herramienta cualitativa de verificación técnica orientada a la inspección del estado y cumplimiento normativo de conexiones precalificadas a momento en estructuras de acero estructural.

Esta herramienta busca proporcionar al supervisor, interventor o inspector una guía sistemática que le permita comprobar si la conexión construida cumple con los parámetros geométricos, materiales y constructivos establecidos por la normativa vigente y las recomendaciones internacionales.

La base conceptual de las conexiones precalificadas a momento proviene de los estudios experimentales realizados tras los sismos de Northridge (1994) y Kobe (1995), los cuales revelaron fallas frágiles en las uniones soldadas viga–columna de marcos resistentes a momento.

A raíz de ello, la Federal Emergency Management Agency (FEMA) financió el SAC Steel Project, un programa de investigación exhaustivo destinado a redefinir los criterios de diseño y comportamiento sísmico de dichas conexiones.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

Los resultados de este programa se recopilaron en una serie de documentos técnicos que hoy constituyen la base del diseño moderno de conexiones a momento:

FEMA 350 (2000) – *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, que presenta los criterios de diseño sísmico recomendados para estructuras nuevas.

FEMA 351 (2000) – *Evaluation and Repair Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings*, centrado en la evaluación y reparación de conexiones existentes.

FEMA 355D (2000) – *State of the Art Report on Connection Performance*, que documenta los ensayos experimentales realizados sobre conexiones soldadas, empernadas y con reducción de sección.

FEMA 355E (2000) – *State of the Art Report on Performance Prediction and Evaluation of Steel Moment-Frame Buildings*, que aborda el desempeño global de los pórticos a momento.

El conocimiento generado por la serie FEMA 350–355D dio origen al actual estándar AISC 358, el cual formalizó las conexiones precalificadas más confiables y reproducibles en condiciones sísmicas controladas.

Entre ellas, se destacan tres tipologías de aplicación amplia en edificios con disipación de energía moderada o especial (DMO / DES):

- **Bolted Stiffened Extended End-Plate (BSEEP)**
- **Bolted Flange Plate (BFP)**
- **Reduced Beam Section (RBS)**

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

Estas configuraciones garantizan un comportamiento dúctil, controlando el desarrollo de rótulas plásticas en zonas predefinidas y reduciendo la probabilidad de falla frágil en la soldadura o la unión empernada.

### 5.1.1 Normativa internacional y nacional aplicable

El marco normativo que respalda la aplicación de conexiones precalificadas combina disposiciones internacionales (AISC, AWS, FEMA) y nacionales (NSR-10, ICCA), las cuales actúan de forma complementaria en el proceso de diseño, fabricación, inspección y montaje.

*Tabla 2.0 Normas y documentos técnicos aplicables a la verificación de conexiones precalificadas.*

| <b>Norma / Documento</b>    | <b>Enfoque principal</b>                                  | <b>Aspectos de aplicación en la herramienta</b>  |
|-----------------------------|---|--|
| <b>FEMA 350–355D (2000)</b> | Fundamento experimental de las conexiones precalificadas. | Define los criterios de rotación plástica, disipación de energía y validación experimental de las conexiones BSEEP, BFP y RBS. |
| <b>AISC 358-22</b>          | Conexiones precalificadas a momento.                      | Establece geometrías, límites de aplicación, materiales y criterios de aceptación para BSEEP, BFP y RBS.                       |
| <b>AISC 360-22</b>          | Especificaciones para el diseño estructural en acero.     | Define los requisitos de resistencia, estabilidad, control de montaje y tolerancias dimensionales.                             |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|  |  |  |
|--|--|--|
| <b>AISC 341-22</b>                       | Provisiones sísmicas para estructuras de acero.                | Regula la ductilidad, capacidad de rotación y comportamiento histerético de las conexiones.                                    |
| <b>AWS D1.1 (2020) / AWS D1.8 (2021)</b> | Ejecución e inspección de soldaduras estructurales.            | Proporciona los criterios de calificación de procedimientos (WPS/PQR), aceptación visual (VT) y ensayos no destructivos (NDT). |
| <b>NSR-10 (2010)</b>                     | Reglamento colombiano de construcción sísmico resistente.      | Títulos F e I: define los requisitos para estructuras metálicas y la supervisión técnica.                                      |
| <b>ICCA (2019)</b>                       | Guías de inspección y control de calidad en acero estructural. | Ofrece listas de chequeo, tolerancias y recomendaciones para inspección en taller y obra.                                      |

*Fuente: Elaboración propia con base en FEMA (2000), AISC (2022), AWS (2021), NSR-10 (2010) e ICCA (2019).*

### 5.1.2 Conexiones objeto de estudio

Las conexiones seleccionadas se analizan en esta herramienta cualitativa por su frecuencia de uso en proyectos de edificación en acero estructural y por su validación experimental dentro de la norma AISC 358.

Cada una cumple una función particular en la disipación de energía y el control de deformaciones:

**BSEEP (Bolted Stiffened Extended End-Plate):** conexión emperrada con placa de extremo extendida y rigidizadores longitudinales, diseñada para concentrar la rotación plástica en la viga y minimizar la demanda sobre la columna.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

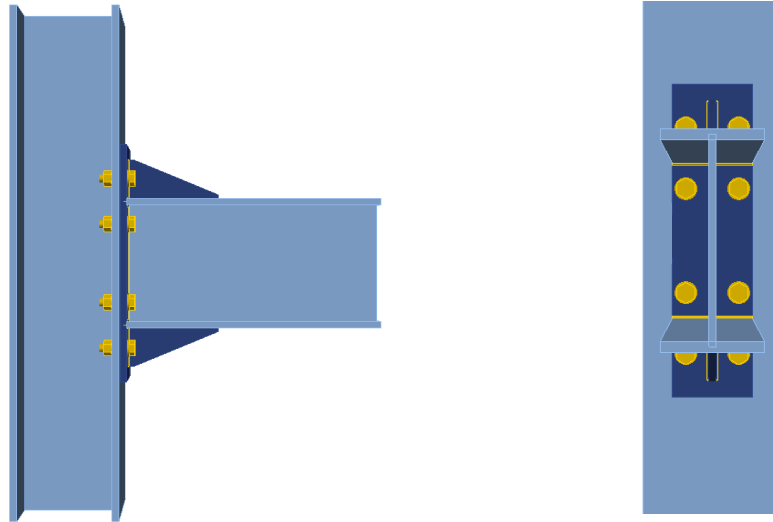


Ilustración 1.0. Vista lateral - Frontal Conexión BSEEP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)



Ilustración 2.0. Vista superior - 3D Conexión BSEEP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)

**BFP (Bolted Flange Plate):** unión emperrada mediante placas de ala que transmiten momento y cortante de manera eficiente, permitiendo construcción en seco y control dimensional en campo.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

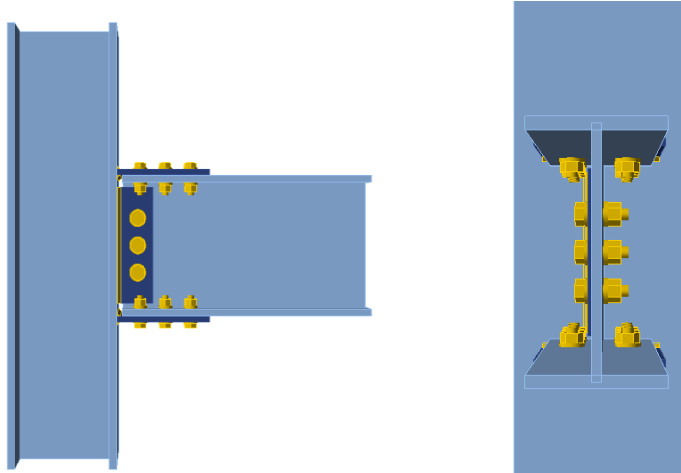


Ilustración 3.0. Vista lateral - Frontal Conexión BFP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)

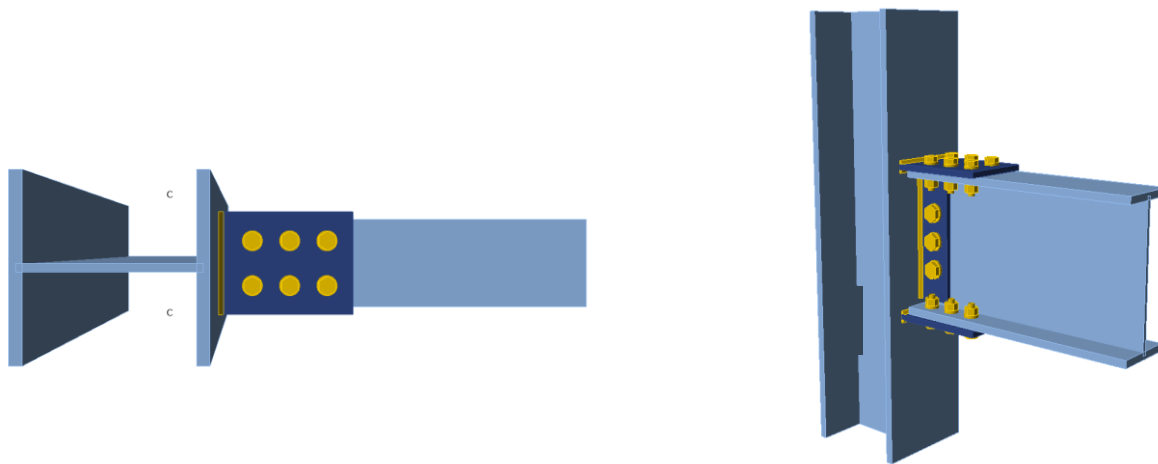


Ilustración 4.0. Vista superior – 3D Conexión BFP (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)

**RBS (Reduced Beam Section):** conexión soldada que reduce el área efectiva del ala de la viga mediante cortes semicirculares o elípticos, favoreciendo la formación de rótulas plásticas alejadas del alma de la columna.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS



Ilustración 5.0. Vista lateral - Frontal Conexión RBS (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)

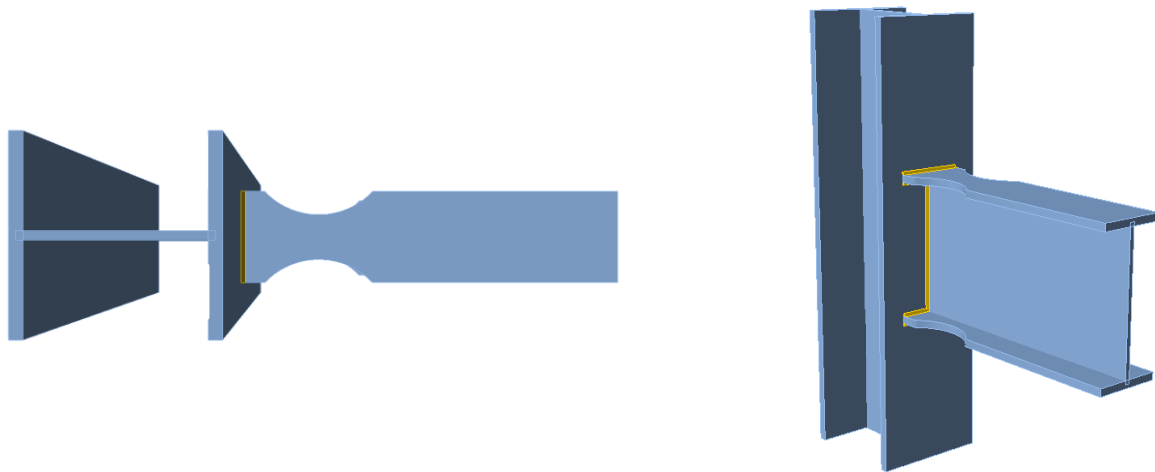


Ilustración 6.0. Vista superior - 3D Conexión RBS (Fuente propia mediante aplicación Idea Statica)

Estas configuraciones fueron evaluadas a través de ensayos cíclicos en el programa FEMA/SAC, donde demostraron comportamientos de rotación plástica superiores a 0.04 radianes

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

sin pérdida significativa de capacidad resistente, cumpliendo con los criterios de ductilidad establecidos en la AISC 341.

### **5.2 Requisitos técnicos y documentales mínimos para la verificación**

La verificación del estado de las conexiones precalificadas en estructuras de acero requiere de un proceso sistemático de revisión documental y técnica que asegure la trazabilidad del diseño, la fabricación y el montaje de cada elemento inspeccionado.

El cumplimiento de estos requisitos constituye la base para la aplicación de la herramienta cualitativa y garantiza que los criterios de inspección se fundamenten en evidencia técnica verificable.

De acuerdo con los Títulos F e I de la NSR-10 (2010) y los lineamientos establecidos por la AISC 358-22, la inspección de conexiones a momento debe contar con una documentación técnica completa y una revisión visual y dimensional que respalde la conformidad de la conexión con la geometría precalificada.

Complementariamente, la AWS D1.8-21 y las Guías ICCA (2019) establecen que los registros de inspección, certificados de materiales y procedimientos de soldadura forman parte integral del control de calidad estructural.

#### ***5.2.1 Documentación técnica mínima requerida***

En la tabla siguiente se listan los documentos y registros indispensables que deben estar disponibles antes, durante y después de la ejecución de la conexión.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

Estos documentos son los insumos de referencia para aplicar la herramienta de verificación cualitativa.

*Tabla 3.0 Documentación técnica mínima requerida para la verificación de conexiones precalificadas.*

| Documento / Registro                         | Descripción del contenido  | Norma de referencia              |
|--|--|----------------------------------|
| Planos estructurales aprobados               | Identifican el tipo de conexión (BSEEP, BFP o RBS), espesores, distancias y detalles constructivos aprobados por el diseñador estructural. | NSR-10 A.1.3.7; AISC 358-22 §2   |
| <b>Memoria de cálculo y hoja de diseño</b>   | Acredita que la conexión se encuentra dentro del rango de precalificación y satisface las demandas de momento y rotación del proyecto.     | AISC 358-22 §3; AISC 341-22 §K3  |
| <b>Certificados de materiales</b>            | Garantizan la trazabilidad y las propiedades mecánicas de aceros, pernos, electrodos y consumibles de soldadura.                           | NSR-10 F.2.1.5.1; AWS D1.1 §4    |
| <b>Procedimientos de soldadura (WPS/PQR)</b> | Registros calificados que validan el proceso y los parámetros de soldadura empleados.  | AWS D1.1/D1.8 §6; ICCA (2019)    |
| <b>Plan de inspección y ensayos (ITP)</b>    | Define la secuencia de inspecciones visuales, dimensionales y NDT durante la fabricación y montaje.  | AISC 341-22 §K3.2; NSR-10 F.2.14 |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|   |   |                              |
|---|---|------------------------------|
| <b>Registros de torque de pernos</b>              | Evidencian el método de pretensado utilizado y los resultados obtenidos en campo.             | AISC 360-22 §J3; ICCA (2019) |
| <b>Informes de inspección visual (VT) y NDT</b>   | Resultados de inspección por líquidos penetrantes, ultrasonido o partículas magnéticas.       | AWS D1.8 §6.18; ASNT CP-189  |
| <b>Planos “as-built” y acta de cierre técnico</b> | Representan el estado final de la conexión ejecutada e incluyen observaciones de conformidad. | NSR-10 I.2.2.1; ICCA (2019)  |

*Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10 (2010), AISC 358-22, AWS D1.8 (2021) e ICCA (2019).*

### 5.2.2 Condiciones técnicas observables durante la inspección

Además de la verificación documental, la revisión física de las conexiones debe centrarse en los aspectos observables y medibles que definen su correcta ejecución.

El inspector técnico debe registrar los resultados de cada observación y contrastarlos con los criterios de aceptación establecidos por las normas aplicables.

**Tabla 4.0** *Condiciones técnicas observables durante la verificación de conexiones precalificadas.*

| <b>Aspecto para verificar</b>           | <b>Condición o criterio de aceptación</b>   | <b>Referencia normativa</b>   |
|---|---|-------------------------------|
| <b>Geometría general de la conexión</b> | Longitudes, espesores y separaciones dentro de los límites establecidos por la precalificación correspondiente. | AISC 358-22 §4; NSR-10 F.2.14 |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|  |   |                                  |
|--|---|----------------------------------|
| <b>Alineación viga–columna</b>             | Desviación angular $\leq$ 1/1000 radián o dentro del rango especificado por el proyecto.  | AISC 360-22 §M; ICCA (2019)      |
| <b>Estado de los pernos</b>                | Sin daño superficial, óxido o deformación; pretensado validado mediante método calibrado. | AISC 360-22 §N; NSR-10 I.4.3.7   |
| <b>Superficies de contacto</b>             | Limpias, sin rebabas ni recubrimientos en áreas de fricción.                              | AWS D1.1 §5.14; ICCA (2019)      |
| <b>Soldaduras visibles</b>                 | Cordones uniformes, sin poros, socavaciones ni fisuras superficiales.                     | AWS D1.1 Tabla 6.1; AWS D1.8 §6  |
| <b>Corte RBS o rigidizador (si aplica)</b> | Radios suaves, profundidad controlada y sin entallas visibles.                            | AISC 358-22 §7.3; AWS D1.8 §6.18 |
| <b>Ensayos no destructivos (NDT)</b>       | Resultados dentro de límites de aceptación para el método aplicado (UT, MT o PT).         | AWS D1.8 §6.18; ASNT CP-189      |
| <b>Protección superficial final</b>        | Aplicada únicamente después de la inspección y aceptación de la conexión.                 | NSR-10 I.4.3.7; ICCA (2019)      |

*Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), NSR-10 (2010) e ICCA (2019).*

La recopilación de esta información permite establecer una línea base de evaluación para la herramienta cualitativa.

El cumplimiento simultáneo de los requisitos técnicos y documentales garantiza que las observaciones realizadas sobre la conexión correspondan a una condición verificable, trazable y conforme con las normas aplicables.

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## 5.3 Variables de control y criterios de evaluación

La herramienta cualitativa de verificación se basa en la identificación de variables de control que permiten evaluar el cumplimiento técnico, geométrico y documental de las conexiones precalificadas a momento.

Estas variables se establecen considerando la trazabilidad del proceso constructivo, la conformidad con las normas aplicables y la condición actual observada en la conexión inspeccionada.

Cada variable se asocia a un criterio de evaluación verificable, permitiendo clasificar los resultados bajo tres categorías cualitativas:

- C (Cumple): el requisito se satisface completamente.
- NC (No cumple): se evidencia desviación o incumplimiento crítico.
- NA (No aplica): el requisito no corresponde al tipo de conexión o condición observada.

### 5.3.1 Clasificación general de variables

Las variables consideradas en la herramienta se agrupan en cinco categorías principales, de acuerdo con su naturaleza y etapa de aplicación en el proceso constructivo:

**Tabla 5.0** Clasificación de variables de control para la verificación de conexiones precalificadas.

| <b>Categoría de variable</b> | <b>Descripción</b>  | <b>Etapa de aplicación</b> |
|------------------------------|---|----------------------------|
| <b>Geométrica</b>            | Controla la conformidad dimensional de la conexión con los límites de la precalificación: espesores, longitudes, posiciones y patrones de pernos. | Fabricación /<br>Montaje   |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|                     |  |                                |
|---------------------|--|--------------------------------|
| <b>Material</b>     | Verifica la calidad, trazabilidad y certificación de los aceros, pernos y consumibles de soldadura utilizados.                                 | Suministro / Taller            |
| <b>Constructiva</b> | Evalúa el proceso de unión, incluyendo soldaduras, pernos, rigidizadores, cortes, accesos y tolerancias en obra.                               | Fabricación / Obra             |
| <b>Documental</b>   | Asegura la existencia y vigencia de la documentación técnica que respalda el proceso: planos, WPS/PQR, certificados y registros de inspección. | Todas las etapas               |
| <b>De desempeño</b> | Mide el comportamiento observable tras la instalación, como deformaciones, fisuras, continuidad de soldaduras y estabilidad general.           | Postmontaje / Inspección final |

*Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10 (2010), AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), FEMA 355D (2000) e ICCA (2019).*

### 5.3.2 Criterios de evaluación y desempeño estructural

Los criterios asociados a cada variable se derivan de los límites normativos y de los parámetros experimentales definidos por las guías FEMA/SAC y la AISC 358.

De acuerdo con FEMA 355D, las conexiones precalificadas deben exhibir un comportamiento predominantemente dúctil, con rotaciones plásticas de al menos 0.04 radianes, sin pérdida significativa de resistencia.

Por tanto, las variables de inspección no solo consideran la geometría y los materiales, sino también la evidencia de que la conexión mantiene las condiciones que le permiten comportarse de manera estable ante cargas cíclicas.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

### 5.3.3 Variables específicas aplicadas a conexiones BSEEP, BFP y RBS

**Tabla 6.0** Variables de control y criterios de evaluación por tipo de conexión precalificada.

| Tipo de conexión | Variable de control              | Criterio verificable / Condición esperada                                    | Referencia normativa              |
|------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| <b>BSEEP</b>     | Geometría de la placa de extremo | Longitud de extensión y espesor conforme al rango de la AISC 358 §5.3.       | AISC 358-22 §5; NSR-10 F.2.14     |
|                  | Rigidizador longitudinal         | Presencia, espesor y soldadura continua, sin discontinuidades.               | AISC 358-22 Fig. 5.8; AWS D1.8 §6 |
|                  | Pernos de alta resistencia       | Pretensado dentro del rango permitido; sin daño o corrosión.                 | AISC 360-22 §N; NSR-10 I.4.3.7    |
|                  | Superficie de contacto           | Limpia, sin pintura ni rebabas en zona de fricción.                          | AWS D1.1 §5.14; ICCA (2019)       |
| <b>BFP</b>       | Espesor de placas de ala         | Igual o superior al mínimo especificado; sin laminaciones visibles.          | AISC 358-22 §6.2; NSR-10 F.2.14   |
|                  | Patrón de pernos                 | Distribución y diámetro dentro de tolerancia $\pm 1$ mm respecto al detalle. | AISC 360-22 §M; ICCA (2019)       |
|                  | Torque aplicado                  | Verificado mediante llave calibrada o indicador directo.                     | AISC 360-22 §J3; NSR-10 I.4.3.7   |
|                  | Alineación del conjunto          | Sin desviaciones mayores a 3 mm en eje horizontal o vertical                 | AISC 341-22 §K3.2                 |
| <b>RBS</b>       | Geometría del recorte            | Longitud, profundidad y radio conforme a la forma tipo “dogbone”.            | AISC 358-22 §7.3; FEMA 355D §5    |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|                                  |  |                                    |
|----------------------------------|--|------------------------------------|
| Acabado superficial              | Transiciones suaves, sin muescas o entallas.               | AWS D1.1 §5.14; ICCA (2019)        |
| Soldaduras de alma y ala         | Cordones uniformes y continuos; sin poros ni socavaciones. | AWS D1.1 Tabla 6.1; AWS D1.8 §6.18 |
| Evidencia de fisuras postmontaje | No se observan grietas o desprendimientos visibles.        | NSR-10 I.4.3.7; FEMA 355D §7       |

*Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), FEMA 355D (2000), NSR-10 (2010) e ICCA (2019)*

### 5.3.4 Aplicación práctica de los criterios

Durante la inspección, cada variable se evalúa mediante observación directa, medición o revisión documental.

Los resultados se consignan en las listas de verificación de la sección siguiente (4.4), permitiendo determinar el grado de cumplimiento global de la conexión y generar trazabilidad técnica del proceso.

La interpretación de los resultados cualitativos se realiza según la siguiente escala:

- **Cumple (C):** el ítem inspeccionado cumple el requisito sin observaciones.
- **No cumple (NC):** se detectan desviaciones que afectan el desempeño estructural o la conformidad normativa.
- **No aplica (NA):** el requisito no corresponde al tipo de conexión o etapa de revisión.

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## 5.4 Herramienta cualitativa de verificación técnica para conexiones precalificadas

La herramienta cualitativa desarrollada consolida los parámetros definidos en las secciones anteriores y permite evaluar la conformidad técnica, geométrica y documental de las conexiones precalificadas a momento durante la inspección en obra o taller.

Su aplicación contribuye a garantizar la correcta implementación de las uniones tipo BSEEP, BFP y RBS, favoreciendo el cumplimiento de las normas nacionales e internacionales, así como los criterios de comportamiento sísmico establecidos por la AISC 358 y la FEMA 350–355D.

Cada lista de verificación incluye columnas que permiten documentar el resultado de cada ítem, la evidencia utilizada y la norma de referencia.

El objetivo no es únicamente constatar el cumplimiento dimensional o documental, sino también verificar que la conexión conserve las condiciones que garantizan su desempeño dúctil y estable ante sollicitaciones cíclicas.

*Tabla 7.0 Lista de verificación cualitativa para la conexión BSEEP.*

| <b>Ítem / Elemento inspeccionado</b> | <b>Criterio verificable / Requisito técnico</b>                      | <b>Evidencia o método de comprobación</b> | <b>Referencia normativa</b>       | <b>Resultado (C/NC/NA)</b> |
|--------------------------------------|--|---|-----------------------------------|----------------------------|
| <b>Placa de extremo</b>              | Espesor y longitud de extensión dentro del rango de precalificación. | Medición directa / plano aprobado.        | AISC 358-22 §5.3; NSR-10 F.2.14   |                            |
| <b>Rigidizador longitudinal</b>      | Presencia y espesor mínimo   | Inspección visual y medición de espesor.  | AISC 358-22 Fig. 5.8; AWS D1.8 §6 |                            |

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

|   |  |   |                                       |   |                   |
|---|--|---|---------------------------------------|---|-------------------|
|   |  | especificado;<br>soldadura<br>continua sin<br>defectos<br>visibles.   |                                       |   |                   |
| <b>Taladros y pernos</b>                      |  | Diámetro, separación y edge distance dentro de tolerancia $\pm 1$ mm. | Galgas y plantillas y calibradas.     | AISC 360-22<br>§M; NSR-10<br>F.2.14.5.6 |                   |
| <b>Pretensado de pernos</b>                   |  | Torque conforme a tabla J3.1 y método calibrado.                      | Llave calibrada / registro de torque. | AISC 360-22<br>§J3; ICCA<br>(2019)      |                   |
| <b>Superficie de contacto</b>                 |  | Limpia, pintura rebabas.  | sin ni registro fotográfico.          | Inspección visual / registro            | AWS D1.1<br>§5.14 |
| <b>Alineación viga-columna</b>                |  | Desviación $\leq 3$ mm o $1/1000$ rad.                                | Teodolito / nivel óptico.             | AISC 341-22<br>§K3.2                    |                   |
| <b>Soldaduras del rigidizador (si aplica)</b> |  | Cordones continuos, sin poros ni socavaciones.                        | VT + informe NDT.                     | AWS D1.8<br>§6.18                       |                   |
| <b>Documentación final</b>                    |  | As-built y acta de conformidad firmada.                               | Carpeta técnica.                      | NSR-10<br>I.2.2.1                       |                   |

*Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), AISC 360-22, FEMA 355D (2000) y NSR-10 (2010).*

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

### 5.4.2 Lista de verificación para la conexión BFP Bolted Flange Plate (Placa de ala empernada)

**Tabla 8.0** Lista de verificación cualitativa para la conexión BFP.

| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Criterio verificable / Requisito técnico                       | Evidencia o método de comprobación           | Referencia normativa            | Resultado (C/NC/NA) |
|---|--|--|---------------------------------|---------------------|
| <b>Placas de ala</b>                          | Espesor $\geq$ mínimo especificado; acero conforme a la norma. | Certificados de material y medición directa. | AISC 358-22 §6.2; NSR-10 F.2.14 |                     |
| <b>Taladros y separación</b>                  | Distribución y diámetro dentro de tolerancia $\pm 1$ mm.       | Galga calibrada / plantilla / plano.         | AISC 360-22 §M; ICCA (2019)     |                     |
| <b>Pernos de alta resistencia</b>             | Tipo ASTM A325/A490; pretensado verificado.                    | Registro de torque / llave calibrada.        | AISC 360-22 §N; NSR-10 I.4.3.7  |                     |
| <b>Contacto placa–ala</b>                     | Superficie limpia, sin irregularidades.                        | Inspección visual / registro fotográfico.    | AWS D1.1 §5.14                  |                     |
| <b>Secuencia de apriete</b>                   | Patrón cruzado y verificación de relajación.                   | Observación directa / planilla de torque.    | AISC 360-22 §J3; ICCA (2019)    |                     |
| <b>Alineación viga–columna</b>                | Desviación $\leq 3$ mm.  | Nivel óptico / teodolito.                    | AISC 341-22 §K3.2               |                     |
| <b>Soldaduras complementarias (si aplica)</b> | Cordones uniformes, sin discontinuidades.                      | VT + informe NDT                             | AWS D1.8 §6                     |                     |
| <b>Documentación final</b>                    | Registro fotográfico y firma del supervisor técnico.           | Carpeta técnica.                             | NSR-10 I.2.2.1                  |                     |

*Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), AISC 360-22, FEMA*

*355D (2000) y NSR-10 (2010).*

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

### 5.4.3 Lista de verificación para la conexión RBS Reduced Beam Section (Reducción de sección en la viga)

**Tabla 9.0** Lista de verificación cualitativa para la conexión RBS.

| Ítem / Elemento inspeccionado               | Criterio verificable / Requisito técnico                          | Evidencia o método de comprobación             | Referencia normativa               | Resultado (C/NC/NA) |
|---|---|--|------------------------------------|---------------------|
| <b>Geometría del recorte</b>                | Longitud, profundidad y radio conforme a la forma tipo “dogbone”. | Medición directa / plantilla / plano aprobado. | AISC 358-22 §7.3; FEMA 355D §5     |                     |
| <b>Acabado superficial</b>                  | Transiciones suaves y sin muescas visibles.                       | Inspección visual y galgas de radio.           | AWS D1.1 §5.14; ICCA (2019)        |                     |
| <b>Bordes y esmerilado</b>                  | Desbaste continuo sin aristas o discontinuidades.                 | VT / registro fotográfico.                     | AWS D1.8 §6.18                     |                     |
| <b>Soldaduras alma y ala</b>                | Cordones uniformes, sin socavaciones ni poros.                    | VT + informe NDT (UT o MT).                    | AWS D1.1 Tabla 6.1; NSR-10 I.4.3.7 |                     |
| <b>Evidencia de fisuras y deformaciones</b> | Sin grietas ni desplazamientos visibles.                          | Inspección visual directa / fotografías.       | NSR-10 I.4.3.7; FEMA 355D §7       |                     |
| <b>Documentación final</b>                  | Informe de inspección y planos as-built actualizados.             | Carpeta técnica / acta de cierre.              | NSR-10 I.2.2.1; ICCA (2019)        |                     |

*Fuente: Elaboración propia con base en AISC 358-22, AWS D1.8 (2021), FEMA 355D (2000), AISC 360-22 y NSR-10 (2010).*

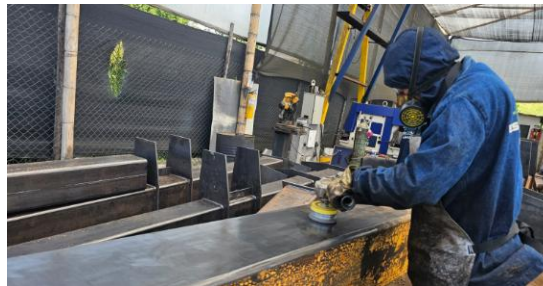
## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

### 5.4.4 Aplicación y trazabilidad de la herramienta - Caso de revisión Construcción Particular

Como complemento y a manera de sustentación, a continuación, se adjunta registro de proyecto de tipo particular “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ” dónde se hizo llegar ficha de inspección y profesional de montaje, con el fin de hacer inspección controlando parámetros a conexión “END PLATE”, que la obra considera, en algunas de sus conexiones. El proyecto fue ubicado en la vereda Fontibón, municipio de Rionegro, Antioquia. El control se realizó en las instalaciones del taller metalúrgico; para comenzar se solicitó la documentación referente a las generalidades del proyecto (en caso de existencia de planos aprobados o de taller). Con ellos se pudo partir para las inspecciones iniciales.

Posteriormente, se realizaron verificaciones de parámetros a inspeccionar según herramienta, según aplique; para este caso conexión tipo BESSEP – “End Plate”, de conexión de vigas a columnas 220x220, según información de Ingeniero de Montaje.

**Figura 1.** Limpieza de perfilería con grata y preparación de material.



*Fuente: Taller ESTRUCERO A.S*

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

**Figura 2.** Mesa de corte por arco, tipo automatizado, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”



*Fuente: Taller ESTRUCERO A.S*

**Figura 3.** Platinas de conexiones, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”



*Fuente: Taller ESTRUCERO A.S*

**Figura 4.** Soldadura por arco, tipo automatizado, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”



*Fuente: Taller ESTRUCERO A.S*

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

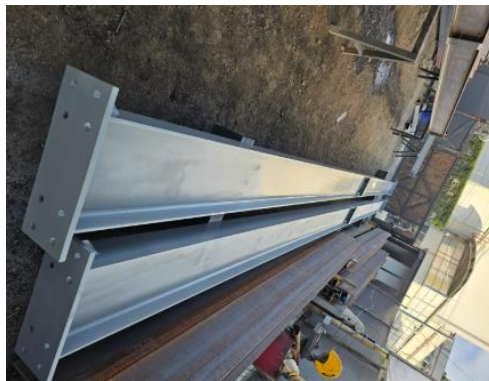
**Figura 5.** Pruebas de tinta en taller para estructura metálica en taller, Proyecto “CONSTRUCCIÓN BODEGA SAN JOSÉ”



*Fuente: Taller ESTRUACERO A.S*

En las anteriores imágenes se puede evidenciar el procedimiento de prueba o test de tintas que en taller se hace con la finalidad de ir validando la calidad de soldadura. El anterior registro fue suministrado por ESTRUACERO A.S, de la actual obra que se encuentran ejecutando en bodega San José.

**Figura 6.** Vigas armadas en taller para montaje



*Fuente: Taller ESTRUACERO A.S*

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

**Figura 7.** Estructura parcialmente instalada



*Fuente. ESTRUACERO A.S*

En la siguiente figura, ESTRUACERO A.S, nos realizó en sitio validación de espesores de pintura a perfilería tipo tubular estructural rectangular, en una de las zonas de bodega, en zona administrativa; fase que ya se encontraba casi culminada, puesto que la instalación de conexiones tipo “End Plate”, para el momento aún no está en etapa final; parcialmente en taller se sigue en 7. fabricación y en sitio se ha iniciado de manera parcial el montaje como se indicó en anterior figura.

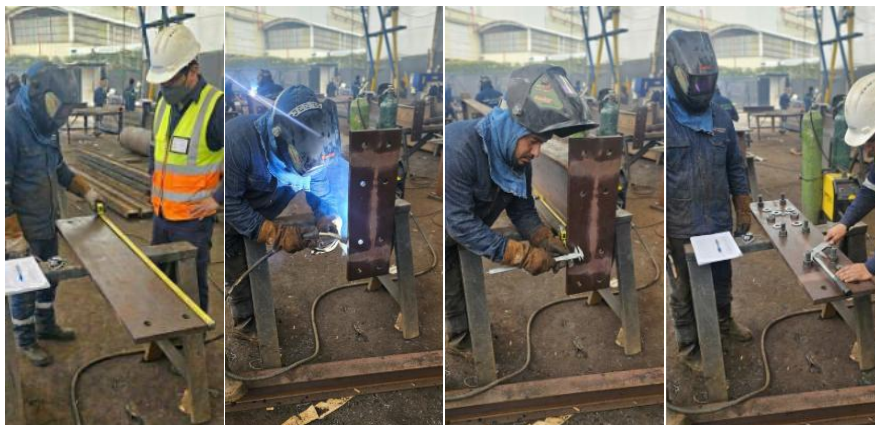
**Figura 8.** Otros parámetros de inspección – Espesores de pintura



*Fuente. ESTRUACERO A.S*

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

**Figura 9.** *Medición en sitio de platinas y controles en taller*



*Fuente. ESTRUACERO A.S*

En las anteriores imágenes se puede evidenciar que, para la fabricación de conexión, se hizo control de verificación de medidas de platinas, medición de torno (huecos – orificios para pernos), soldadura y prueba de pernos.

La aplicación práctica de la herramienta cualitativa de verificación técnica se plantea como un proceso de evaluación postconstructiva, orientado a determinar el grado de conformidad normativa, geométrica y material de las conexiones precalificadas a momento ya ejecutadas en una estructura de acero.

Este enfoque permite identificar desviaciones, deterioros o incumplimientos que puedan comprometer el desempeño estructural esperado según los lineamientos de la AISC 358-22, la AWS D1.8-21, la NTC 5832 y las Guías ICCA (2019).

A diferencia del control de calidad aplicado durante la fabricación o montaje, esta herramienta se emplea en obra terminada o en estructuras existentes, funcionando como un instrumento de verificación técnica y diagnóstico del estado real de las uniones tipo BSEEP, BFP y RBS.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

La aplicación se organiza en fases secuenciales que garantizan la trazabilidad de la información y la objetividad de los resultados.

### **5.4.5 Fases de aplicación en conexión existente:**

**5.4.5.1. Recolección de información técnica disponible.** En esta etapa se recopilan todos los documentos técnicos que puedan servir como referencia para la evaluación:

Planos estructurales aprobados, memorias de diseño, fichas de materiales, registros de soldadura o montaje, y cualquier evidencia documental existente.

En ausencia de información específica del proyecto, se adoptan los valores normativos de referencia definidos por la AISC 358-22 y la AWS D1.8-21 para comparar la condición observada con la condición estándar de una conexión precalificada.

**5.4.5.2. Inspección visual y dimensional de la conexión.** Se realiza una revisión directa del elemento en campo, verificando:

Geometría de la conexión: dimensiones generales, longitudes de placas, espesores, radios de recorte o extensión.

Estado superficial: corrosión, fisuras visibles, desprendimiento de recubrimientos, deformaciones locales o abolladuras.

Componentes de unión: pernos, tuercas, arandelas, soldaduras o rigidizadores.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

La información se documenta mediante fotografías, mediciones con instrumentos calibrados y observaciones técnicas, identificando cada punto con un código único para su trazabilidad.

**5.4.5.3. Aplicación de ensayos no destructivos (NDT).** En conexiones soldadas o zonas críticas se recomienda realizar ensayos ultrasónicos (UT), de partículas magnéticas (MT) o de líquidos penetrantes (PT), conforme a la ASNT SNT-TC-1A y la AWS D1.8-21.

Estos métodos permiten detectar discontinuidades internas o superficiales que no son perceptibles visualmente, brindando una evaluación más completa de la integridad estructural.

**5.4.5.4. Evaluación cualitativa mediante la herramienta.** Con los resultados obtenidos en campo, se diligencia la lista de verificación correspondiente al tipo de conexión (BSEEP, BFP o RBS).

Cada ítem se evalúa según su condición observada, marcando:

- C (Cumple): el parámetro se encuentra dentro de los límites normativos o geométricos.
- NC (No cumple): se detecta desviación o deterioro.
- NA (No aplica): el ítem no corresponde al tipo de conexión inspeccionada.
- Toda observación debe acompañarse de evidencia fotográfica o registro de medición.

**5.4.5.5. Elaboración del informe técnico de inspección.** Finalmente, se consolidan los resultados en un informe de evaluación, que incluye:

- Tablas de verificación diligenciadas.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

- Registro de observaciones y fotografías.
- Resultados de ensayos NDT (si aplican).
- Análisis cualitativo y conclusiones sobre el estado de conservación y cumplimiento normativo.

El informe debe archivararse junto con los documentos del proyecto o del mantenimiento estructural, constituyendo la evidencia de trazabilidad de la conexión inspeccionada.

**5.4.5.6. Gestión de no conformidades (NCR).** Si durante la evaluación se identifican elementos que no cumplen con los requisitos de las normas o con la geometría de precalificación, el inspector debe registrar una No Conformidad (NCR), describiendo el hallazgo, su ubicación, la norma asociada y la acción correctiva recomendada. El procedimiento general comprende cuatro pasos:

1. Identificación: descripción clara del defecto o desviación detectada.
2. Contención: señalización y restricción del área afectada.
3. Corrección: ejecución del procedimiento aprobado para reparación o sustitución.
4. Verificación: reinspección posterior y cierre formal de la NCR.

Todas las NCR y sus registros de cierre deben anexarse al informe de inspección para mantener la trazabilidad documental.

**5.4.5.7. Trazabilidad de la información y control documental.** Toda la información recolectada mediante la herramienta debe integrarse en un sistema de control documental que garantice su trazabilidad y disponibilidad futura.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

Siguiendo las recomendaciones de la NTC 5832 y las Guías ICCA (2019), la trazabilidad debe asegurar:

- Identificación inequívoca de cada conexión inspeccionada (etiqueta, plano o coordenada).
- Relación directa entre la evidencia (fotografías, mediciones, resultados NDT) y el ítem de inspección.
- Archivo digital y físico del informe técnico con fecha, firma y cargo del responsable.
- Acceso controlado a los documentos para auditorías, mantenimiento o intervenciones futuras.

La aplicación de estos principios convierte la herramienta en un instrumento útil no solo para la inspección puntual, sino también para el seguimiento y control de la condición estructural en el tiempo.

**5.4.5.8. Criterios de aceptación y diagnóstico.** La conexión se considera conforme cuando el 100 % de los ítems críticos verificados obtiene calificación C (Cumple).

Cuando se presentan desviaciones menores o deterioros no estructurales, la conexión puede clasificarse como “Apta con observaciones”, recomendando su seguimiento periódico.

Las conexiones que presenten defectos estructurales, daños en soldaduras, pérdida de pretensado o corrosión avanzada deberán catalogarse como “No conformes”, requiriendo intervención o refuerzo según el procedimiento técnico aprobado.

Este enfoque diagnóstico permite determinar la condición actual y el nivel de seguridad funcional de las conexiones inspeccionadas, generando información útil para la toma de decisiones en mantenimiento estructural, rehabilitación o refuerzo.

# **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

## **6.0 Conclusiones**

A través de la revisión bibliográfica, se han identificado los requisitos técnicos y documentos mínimos para elaborar una herramienta cualitativa de verificación técnica para la inspección de conexiones precalificadas en estructuras de acero, específicamente para la placa de extremo extendida empernada con rigidizador (BSEEP), la placa de ala empernada (BFP) y la reducción de sección en la viga (RBS), estableciendo criterios verificables que garanticen su correcta implementación en proyectos de construcción.

Mediante el presente documento, se logró identificar los requisitos técnicos y documentos mínimos, normativas (NSR-10, ICCA, AWS, AISC) a cumplir en el desarrollo de proyectos de construcción de acero. Además de definir las variables de control posterior en obras de acero estructural a partir de la revisión bibliográfica.

Se verificó e implementar en proyecto obra, la herramienta cualitativa o lista de chequeo para una de las conexiones en estudio, específicamente para la placa de extremo extendida empernada con rigidizador (BSEEP), documentando los procedimientos y sirviendo como referencia practica para la inspección de conexiones precalificadas a momento.

## **HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS**

### **7.0 Recomendaciones**

Reconocer de manera idóneo las bondades y características del acero estructural y la practicidad de las conexiones en la unión de elementos que conforman una estructura, generará durabilidad y resistencia a la misma obra, desde las buenas prácticas de ingeniería metalúrgica y posteriormente con el debido mantenimiento que se le dé será mucho más duraderas las conexiones precalificadas a momento que se implementen en variedad de obras.

La supervisión siempre debe llevar a cabo revisiones de todo el detallamiento que se registre en planos estructurales, validar planos de taller y hacer antes, durante y después de instalación de conexiones medidas de verificación.

Realizar de manera periódica inspección y como medida de control y calidad, medición de espesores, "pull tests" para pruebas de pernos, pruebas de tinta para verificar las soldaduras y uniones de conexiones, con el fin de garantizar unión y adherencia con la estructura; pruebas de soldadura más especializadas tipo ultrasonido, ya que se puede ampliar los métodos de control y calidad; pruebas de integridad estructural posteriores a la instalación o montaje, en caso de requerirse. Y en general este estudio da pie a qué se pueda ampliar el control, con pruebas no destructivas que aún en el medio, en el País y región no contamos, pero que a medida que la infraestructura metálica ha ido cogiendo acogida, irá requiriendo y es prudente considerar.

Con el fin de mantener y preservar la calidad de las estructuras metálicas; específicamente las conexiones, el alcance del presente estudio, se genera ficha esencial a implementar en obras de estructura metálica, dónde se opta por contar con conexiones precalificadas a momento de diferentes características. (Ver. Apéndice. A, anexo.).

# HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

## Referencias

### *Normas y especificaciones técnicas*

American Institute of Steel Construction. (2022). *AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL: AISC.

American Institute of Steel Construction. (2022). *AISC 341-22: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL: AISC.

American Institute of Steel Construction. (2022). *AISC 358-22: Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. Chicago, IL: AISC.

American Welding Society. (2020). *AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel*. Miami, FL: AWS.

American Welding Society. (2021). *AWS D1.8/D1.8M: Structural Welding Code – Seismic Supplement*. Miami, FL: AWS.

American Society for Nondestructive Testing. (2016). *SNT-TC-1A: Recommended Practice for Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing*. Columbus, OH: ASNT.

ASNT. (2020). *Nondestructive Testing Handbook* (3rd ed.). Columbus, OH: ASNT.

FEMA. (2000). *FEMA 350: Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. Washington, D.C.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

FEMA. (2000). *FEMA 355D: State of the Art Report on Connection Performance*. Washington, D.C.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *NTC 5832: Construcciones sismo resistentes en acero – Requisitos*. ICONTEC, Bogotá.

Instituto Colombiano de la Construcción en Acero (ICCA). (2019). *Guía de inspección para estructuras metálicas*. Bogotá: ICCA.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10*. Bogotá, Colombia.

SSPC. (2007). *Surface Preparation Specification No. 6: Commercial Blast Cleaning (SP6)*. Pittsburgh, PA.

### ***Libros y textos especializados***

Brotons, V. (2010). *Patología y durabilidad de estructuras metálicas*. Madrid: Editorial Bellisco.

McCormac, J. C., & Csernak, S. M. (2013). *Structural Steel Design* (5th ed.). Pearson.

Seguí, W. T. (2013). *Steel Design* (5th ed.). Cengage Learning.

Salmon, C., Johnson, J., & Malhas, F. (2009). *Steel Structures: Design and Behavior* (5th ed.). Pearson.

## HERRAMIENTA CUALITATIVA DE VERIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE CONEXIONES PRECALIFICADAS

### *Artículos y documentos académicos*

González-Cárdenas, D., & Agudelo-Rojas, M. A. (2020). *Aplicación del acero estructural en edificaciones modernas: Ventajas y desafíos constructivos*. Revista Ingeniería y Competitividad, 22(1), 45–56.

Narváez-Polanía, L., & Ruiz-Prieto, S. (2021). *Lineamientos para la inspección y supervisión de estructuras metálicas en Colombia*. Revista Cuadernos de Ingeniería, 9(2), 33–48.

Torres, J. (2019). *Supervisión técnica de obras civiles: Enfoque normativo y aplicación práctica*. Revista de Construcción y Gestión, 11(4), 55–72.

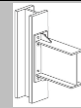
### *Fuentes complementarias*

AISC. (2023). *Steel Construction Manual* (16th ed.). Chicago, IL: AISC.

ICCA. (2020). *Manual de construcción en acero para edificaciones*. Bogotá: ICCA.

CSI. (2022). *SAP2000 Structural Analysis Reference Manual*. Computers and Structures, Inc.

**Conexión emperrada con placa de extremo extendida y rigidizadores longitudinales que controlan la deformación local.**



| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación VISUAL (V) / Medición (M)                          |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
|---|--|---|------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------|
| Identificación y tipo de conexión             | Confirmar que la conexión corresponde a una Bolted Stiffened Extended End-Plate (BSEEP), de acuerdo con la geometría definida en la AISC 358-22, Cap. 6. La placa debe extenderse más allá del ala de la viga y tener rigidizadores longitudinales.  | V   | M                | AISC 358-22 §6.2                  |                     |               |
| Placa de extremo                              | Espesor y longitud de extensión dentro del rango de precalificación. Verificar que el espesor de la placa sea el especificado en planos o igual o mayor al mínimo indicado en la AISC 358 §6.3.3, que exige rigidez suficiente para transmitir el momento plástico sin pandeo local.   | V   | M                | AISC 358-22 §5.3; NSR-10 F.2.14   |                     |               |
| Rigidizador longitudinal                      | Presencia y espesor $\geq$ mínimo especificado; soldadura continua sin defectos visibles. Verificar que los rigidizadores estén instalados en la posición indicada y con soldadura continua en ambos lados. La AISC 358 §6.6 indica que los rigidizadores deben soldarse al alma y a las alas de la viga para evitar pandeo local. | V   | M                | AISC 358-22 Fig. 5.8; AWS D1.8 §6 |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación DIAMETRO (D) / SEPARACIÓN (S)                      |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Taladros y pernos                             | Diámetro, separación y edge distance dentro de tolerancia $\pm 1$ mm.  | D   | S                | AISC 360-22 §M; NSR-10 F.2.14.5.6 |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación CALIBRACIÓN LLAVE (C_LL) / REGISTRO TORQUE (RT)    |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Pretensado de pernos                          | Torque conforme a tabla J3.8 y método calibrado. Revisar el pretensado de los pernos según la AISC 360 §J3.8, que exige una tensión mínima equivalente al 70 % de la carga de fluencia del perno. El apriete debe realizarse en cruz y sin daños en tuercas o arandelas.   | C_LL  | RT               | AISC 360-22 §J3; ICCA (2019)      |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación VISUAL (V) / PRUEBA (P)                            |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Superficie de contacto                        | Limpia, sin pintura ni rebabas. Confirmar que exista contacto total y uniforme entre la placa y la superficie de la columna. Según la NTC 5832 §8.2.3, no se permiten holguras visibles ni irregularidades mayores a 1 mm.   | V   | P                | AWS D1.1 §5.14                    |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación TEODOLITO (T) / NIVEL OPTICO (N_O)                 |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Alineación viga-columna                       | Desviación $\leq 3$ mm o $1/1000$ rad. Revisar que la alineación del eje de la viga con la columna no presente desviaciones mayores a $\pm 3$ mm, conforme a las Guías ICCA (2019).  | T   | N_O              | AISC 341-22 §K3.2                 |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación VISUAL (V) / ENSAYO_MEDICIÓN (M)                   |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Soldaduras del rigidizador (si aplica)        | Cordones continuos, sin poros ni socavaciones. Confirmar que las soldaduras sean continuas, sin poros, socavaciones ni interrupciones, con garganta efectiva según la AWS D1.8 §8.3. No se permiten discontinuidades mayores a 10 mm en zonas sísmicas.  | V   | M                | AWS D1.8 §6.18                    |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado                 | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)   | Evidencia o método de comprobación ULTRASONIDO (U) / OTRO ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END) |                  | Referencia normativa              | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Soldadura de penetración completa (si aplica) | En uniones soldadas al alma o al ala de la columna, verificar que exista penetración total del cordón y ausencia de defectos internos según la AWS D1.1 §6.9.1.  | U   | END              | AWS D1.1-20 §6.9.1                |                     |               |
| Documentación final                           | Acta de conformidad firmada.   |   | Carpeta técnica. | NSR-10 1.2.2.1                    |                     |               |

Instrucciones de uso:

Marcar C (Cumple), NC (No Cumple) o NA (No Aplica) en cada fila.

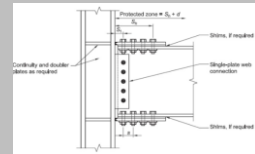
Registrar observaciones y fotografías de respaldo.

Cuando aplique ensayo NDT, adjuntar número de informe y resultado.

Al finalizar, calcular el porcentaje de ítems conformes  $\rightarrow (C + \text{Total evaluados} \times 100)$ .

Una conexión con 100 % de ítems críticos "C" se considera aceptada; con observaciones leves, "Apta con observaciones"; y con defectos estructurales, "No conforme".

## CONEXIÓN EMPERNADA MEDIANTE PLACAS SOLDADAS O ATORNILLADAS A LAS ALAS DE LA VIGA



| Ítem / Elemento inspeccionado         | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)  | Evidencia o método de comprobación VISUAL (V) / Medición (M)         |                                  | Referencia normativa            | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
|---------------------------------------|---|--|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------|
|                                       |   | V  | M                                |                                 |                     |               |
| Identificación y tipo de conexión     | Confirmar que la unión corresponde a una Bolted Flange Plate (BFP), según la configuración descrita en la AISC 358-22, Cap. 8. La conexión debe presentar dos placas de ala unidas por pernos de alta resistencia y soldadas a la viga.   | V  | M                                | AISC 358-22 §8.2                |                     |               |
| Placas de ala                         | Espesor $\geq$ mínimo especificado; acero conforme a la norma. Verificar que las placas de ala tengan espesor y longitud iguales o superiores a los mínimos establecidos por la AISC 358 §8.4.1, que exige suficiente rigidez para transmitir el momento plástico sin pandeo local. | V  | M                                | AISC 358-22 §6.2; NSR-10 F.2.14 |                     |               |
| Ubicación y número de pernos          | Confirmar que el número, diámetro y distribución de pernos coincidan con los planos estructurales o con los límites mínimos (separación $\geq 3d$ , borde $\geq 1.5d$ ).  | V  | M                                | AISC 358-22 §8.5.2              |                     |               |
| Ítem / Elemento inspeccionado         | Descripción / Criterio técnico (resumen normativo)  | Evidencia o método de comprobación VISUAL (V) / REGISTRO TORQUE (RT) |                                  | Referencia normativa            | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
| Torque de pernos                      | Verificar que los pernos estén pretensados según la AISC 360 §J3.8, que establece una tensión mínima del 70 % de la carga de fluencia. No deben observarse pernos oxidados, doblados ni gítorios.   | V  | RT                               |                                 |                     |               |
| Alineación y contacto de placas       | Comprobar que las placas de ala estén completamente apoyadas y alineadas con las alas de la viga y la columna. La NTC 5832 §8.2.3 limita la falta de contacto a 1 mm como máximo.   | Inspección visual  | Nivel de precisión.              | NTC 5832:2021 §8.2.3            |                     |               |
| Soldadura entre placa y viga          | Verificar que la soldadura de filete o penetración completa sea continua, sin socavaciones ni poros. La AWS D1.8 §8.3 exige continuidad estructural sin interrupciones mayores a 10 mm en zonas sísmicas.   | Inspección visual  | Ensayos No Destructivos          | AWS D1.8-21 §8.3                |                     |               |
| Planitud de las placas                | Revisar que las placas no presenten alabeo o deformaciones visibles mayores a L/1000. Según las Guías ICCA (2019), la desviación máxima permitida no debe afectar el contacto ni el torque de los pernos.   | Inspección visual  | Nivel de precisión.              | ICCA (2019) Guía de Inspección  |                     |               |
| Soldadura en alma de viga (si aplica) | Confirmar que la unión soldada al alma esté completa y sin defectos internos. La AWS D1.1 §6.9.1 exige penetración total para transferir esfuerzos cortantes.   | Ultrasonidos   | Ensayos No Destructivos          | AWS D1.1-20 §6.9.1              |                     |               |
| Pernos de alta resistencia            | Tipo ASTM A325/A490; pretensado verificado.   | Llave calibrada  | Registro de torque.              | AISC 360-22 §N; NSR-10 I.4.3.7  |                     |               |
| Espaciado entre placas de ala         | Verificar que el espacio entre las dos placas de ala permita libre deformación de la viga, sin interferencias con el alma. Según la AISC 358 §8.5.3, debe existir una separación mínima de 6 mm.  | Inspección visual  | Medición directa con calibrador. | AISC 358-22 §8.5.3              |                     |               |
| Secuencia de apriete                  | Patrón cruzado y verificación de relajación.  | Llave calibrada  | Registro de torque.              | AISC 360-22 §J3; ICCA (2019)    |                     |               |
| Alineación viga-columna               | Desviación $\leq 3$ mm. Desviación $\leq 3$ mm o 1/1000 rad. Revisar que la alineación del eje de la viga con la columna no presente desviaciones mayores a $\pm 3$ mm, conforme a las Guías ICCA (2019).   | Teodolito  | Nivel óptico.                    | AISC 341-22 §K3.2               |                     |               |
| Documentación final                   | Registro fotográfico y firma del supervisor técnico.  |  | Carpeta técnica.                 | NSR-10 I.2.2.1                  |                     |               |

Instrucciones de uso:

Marcar C (Cumple), NC (No Cumple) o NA (No Aplica) en cada fila.

Registrar observaciones y fotografías de respaldo.

Cuando aplique ensayo NDT, adjuntar número de informe y resultado.

Al finalizar, calcular el porcentaje de ítems conformes  $\rightarrow (C + \text{Total evaluados} \times 100)$ .

Una conexión con 100 % de ítems críticos "C" se considera aceptada; con observaciones leves, "Apta con observaciones"; y con defectos estructurales, "No conforme".

## CONEXIÓN SOLDADA CON REDUCCIÓN CONTROLADA DEL ALA DE LA VIGA, QUE CONCENTRA LA ROTACIÓN PLÁSTICA LEJOS DEL ALMA DE LA COLUMNA



| Ítem / Elemento inspeccionado          | Criterio verificable / Requisito técnico  | Evidencia o método de comprobación |                                   | Referencia normativa               | Resultado (C/NC/NA) | Observaciones |
|--|---|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------|
| Identificación del tipo de conexión    | Confirmar que la conexión corresponde a una Reduced Beam Section (RBS), según lo definido por la AISC 358-22, Cap. 9, que describe una reducción controlada del ala de la viga con transición suave hacia el alma.  | Inspección visual                  | verificación geométrica.          | AISC 358-22 §9.2                   |                     |               |
| Geometría del recorte                  | Longitud, profundidad y radio conforme a la forma tipo "dogbone". Medir la longitud (a), profundidad (b) y radio (r) del recorte. Según la AISC 358 §9.4.1, los límites deben cumplir: $0.50d \leq a \leq 0.75d$ , $0.10b \leq r \leq 0.25b$ , y la reducción del ala no mayor al 0.25 de su ancho. | Inspección visual                  | Medición con flexómetro           |                                    |                     |               |
| Transición y acabado del recorte       | Confirmar que la zona de transición entre el recorte y el ala sea suave y libre de concentraciones de esfuerzos. La norma exige radios uniformes y sin cambios abruptos.  | Inspección visual                  | Medición con flexómetro           | AISC 358-22 §9.4.2                 |                     |               |
| Condición superficial del recorte      | Revisar que las superficies mecanizadas estén libres de rebabas, fisuras o marcas profundas. Según la AISC 358 §9.4.3, no se permiten discontinuidades mayores a 0.8 mm.  | Inspección visual                  |                                   | AISC 358-22 §9.4.3                 |                     |               |
| Soldaduras en la unión viga-columna    | Verificar que las soldaduras sean continuas, sin poros ni socavaciones, y cumplan con las exigencias de penetración total (CJP) según la AWS D1.8 §8.3.3, garantizando la transmisión completa del momento.   | Ultrasonidos                       | Ensayos No Destructivos           | AWS D1.8-21 §8.3.3                 |                     |               |
| Alineación de la viga con la columna   | Confirmar que no existan desviaciones angulares ni desplazamientos mayores a ±3 mm entre ejes. Las Guías ICCA (2019) y la NTC 5832 §8.2.3 establecen tolerancias máximas para montaje final.  | Teodolito                          | Nivel óptico.                     | ICCA (2019) / NTC 5832:2021 §8.2.3 |                     |               |
| Protección superficial y recubrimiento | Revisar que las zonas de recorte y soldadura estén protegidas contra la corrosión, sin escoria ni restos de soldadura. La NTC 5832 §8.4.2 exige limpieza grado SSPC-SP6 antes del recubrimiento.  | Inspección visual                  |                                   | NTC 5832:2021 §8.4.2 / SSPC-SP6    |                     |               |
| Ensayos no destructivos (NDT)          | Verificar que se hayan aplicado ensayos UT o MT en las zonas de soldadura y recorte, según la ASNT SNT-TC-1A, para descartar fisuras internas o discontinuidades.   | Ultrasonidos                       | Ensayos No Destructivos           | ASNT SNT-TC-1A:2016                |                     |               |
| Soldaduras del alma y ala              | Cordones uniformes, sin socavaciones ni poros.  | Ultrasonidos                       | Ensayos No Destructivos           | AWS D1.1 Tabla 6.1; NSR-10 I.4.3.7 |                     |               |
| Evidencia de fisuras o deformaciones   | Sin grietas ni desplazamientos visibles.  | Inspección visual                  |                                   | NSR-10 I.4.3.7; FEMA 355D §7       |                     |               |
| Documentación final                    | Informe de inspección y planos as-built actualizados.   |                                    | Carpeta técnica / acta de cierre. | NSR-10 I.2.2.1; ICCA (2019)        |                     |               |

Instrucciones de uso:

Marcar C (Cumple), NC (No Cumple) o NA (No Aplica) en cada fila.

Registrar observaciones y fotografías de respaldo.

Cuando aplique ensayo NDT, adjuntar número de informe y resultado.

Al finalizar, calcular el porcentaje de ítems conformes  $\rightarrow (C + \text{Total evaluados} \times 100)$ .

Una conexión con 100% de ítems críticos "C" se considera aceptada; con observaciones leves, "Apta con observaciones"; y con defectos estructurales, "No conforme".