RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Said Fernando Barbosa Sánchez Kairy Angulo Ochoa
FACULTAD	Facultad de ingeniería
PLAN DE ESTUDIOS	Especialización en Interventoría de Obras Civiles
DIRECTOR	Esp. Jesús David Márquez Montejo
TÍTULO DE LA TESIS	Criterios de seguimiento y control técnico para la inspección de requisitos mínimos en edificaciones con estructura metálica en Colombia.
TITULO EN INGLES	Technical monitoring and control criteria for the inspection of minimum requirements for buildings with metal structures in Colombia.

RESUMEN
(70 palabras)

Para empezar, la construcción con estructuras metálicas ha sido un pilar en el desarrollo de la ingeniería civil moderna, debido a su alta resistencia, rapidez de montaje y eficiencia estructural. De hecho, su aplicación ha sido clave en edificaciones de gran altura, industriales y comerciales, optimizando tiempos de construcción y garantizando estabilidad estructural.

RESUMEN EN INGLES

To begin with, construction with metal structures has been a cornerstone of modern civil engineering due to their high strength, rapid assembly, and structural efficiency. In fact, their application has been key in high-rise, industrial, and commercial buildings, optimizing construction times and ensuring structural stability.

PALABRAS CLAVES	Supervisión, Interventoría, Técnica, Construcción, Viviendas.
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Supervision, Supervision, Technical, Construction, Housing.

CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 145	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:

Criterios de seguimiento y control técnico para la inspección de requisitos mínimos en edificaciones con estructura metálica en Colombia.

Said Fernando Barbosa

Kairy Angulo Ochoa

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Especialización en Interventoría de Obras Civiles

Esp. Jesús David Márquez Montejo

Agosto, 2025

Índice

Capítulo 1.Criterios de seguimiento y control técnico para la inspección de requisitos mínimos en edificaciones con estructura metálica en Colombia. 7

1.1. Elección del tema 7

1.2. Delimitación del tema 9

1.3. Desarrollo del argumento 11

1.4. Metodología 14

Capítulo 2. Requisitos técnicos y documentos mínimos en proyectos de estructuras metálicas 17

2.1 Requisitos técnicos en proyectos de estructuras metálicas en Colombia 17

2.1.1 Diseño estructural de estructuras metálicas 18

2.1.2 Materiales estructurales y productos de acero 21

2.1.3 Uniones estructurales: conexiones soldadas y atornilladas 24

2.1.4 Control de calidad y ensayos 27

2.2 Documentos mínimos en la planificación, diseño, ejecución y control de obras metálicas 32

2.2.1 Documentos en la fase de planificación 33

2.2.2 Documentos en la fase de diseño 36

2.2.3 Documentos en la fase de ejecución (fabricación y montaje) 42

2.2.4 Documentos en la fase de control de obra y post-construcción 48

2.3 Análisis comparativo de normativas nacionales e internacionales..... 52

2.3.1 Normativas nacionales aplicables en Colombia 53

2.3.2 Normativas internacionales relevantes 57

2.3.3 Cuadro comparativo de normativas (Colombia vs. internacionales)..... 62

2.4 Enfoque en los requisitos específicos del NSR-10 Título F (Colombia) 72

Capítulo 3. Parámetros de inspección para la ejecución de proyectos de estructuras metálicas 79

3.1 Introducción y marco normativo 79

3.1.1 Normativa colombiana aplicable (NSR-10 Título F) 80

3.1.2 Estándares internacionales (AISC 360-16, AWS D1.1 y otros)..... 81

3.1.3 Edificaciones industriales, residenciales e institucionales: enfoque integral . 83

3.2 Control de materiales y productos 85

3.3 Verificación e inspección de soldaduras 89

3.3.1 Inspección previa a la soldadura (WPS, preparación y personal) 89

3.3.2 Inspección durante la soldadura (supervisión del proceso) 93

3.3.3 Inspección posterior a la soldadura (aceptación visual y END) 96

3.4 Inspección de conexiones pernadas (atornilladas)..... 100

3.4.1 Recepción y control de pernos de alta resistencia 100

3.5 Ensayos no destructivos (END) en estructuras metálicas 103

3.6 Protocolos de montaje y secuencia constructiva 108

3.7 Inspección de empotramientos y cimentaciones 112

Capítulo 4. Variables de control posterior en la construcción de estructuras metálicas 118

4.1 Inspección de soldaduras 118

4.2 Verificación de conexiones pernadas 121

4.3 Control dimensional y geométrico de la estructura 126

4.4 Criterios de aceptación y no conformidades estructurales 130

5. Conclusiones..... 138

Referencias 140

Lista de tablas

Tabla 1. Documentos mínimos en cada fase del proyecto de estructuras metálicas..... 47

Tabla 2. Comparación de normativas de diseño estructural en acero – Colombia vs. USA vs. Europa)..... 63

Tabla 3. Comparación de normativas de fabricación, soldadura y montaje – ICONTEC/AISC vs. AWS D1.1 vs. EN 1090..... 67

Tabla 4. Lista básica de verificación previa a la soldadura 93

Lista de figuras

Figura 1. Unión viga–columna soldada (ejemplo de “unión articulada” según AISC 360). 77

Figura 2. Ensayo no destructivo por partículas magnéticas en un pasador de acero bajo luz UV 136

Capítulo 1. Criterios de seguimiento y control técnico para la inspección de requisitos mínimos en edificaciones con estructura metálica en Colombia.

1.1. Elección del tema

Para empezar, la construcción con estructuras metálicas ha sido un pilar en el desarrollo de la ingeniería civil moderna, debido a su alta resistencia, rapidez de montaje y eficiencia estructural. De hecho, su aplicación ha sido clave en edificaciones de gran altura, industriales y comerciales, optimizando tiempos de construcción y garantizando estabilidad estructural. No obstante, se requiere que se establezcan criterios específicos de supervisión que permitan asegurar la calidad de las estructuras metálicas y su adecuado desempeño en el tiempo.

En segundo lugar, es importante señalar que el control técnico y seguimiento en la construcción de estructuras metálicas deben alinearse con los estándares normativos vigentes en Colombia. La Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Título F) establece lineamientos específicos para garantizar la seguridad de las edificaciones metálicas ante eventos sísmicos, incluyendo requisitos mínimos en el diseño, inspección de materiales, soldaduras y conexiones estructurales (NSR-10, 2010). Adicionalmente, el Reglamento Técnico de Construcción (RITE)

y normativas internacionales como la AISC 360-16 y la AWS D1.1/D1.1M aportan guías sobre los procedimientos óptimos para la supervisión de estos sistemas constructivos.

Podemos incluir, además, que el uso de estructuras metálicas en Colombia ha aumentado significativamente en edificaciones residenciales, comerciales e institucionales, lo que genera una necesidad urgente de establecer protocolos de inspección que aborden aspectos como la verificación de materiales, control de uniones soldadas y pernadas, inspección de montaje y supervisión de procesos constructivos (Quiroga, 2023).

A lo largo del tiempo, los errores en la supervisión han resultado en fallas estructurales críticas, muchas de las cuales han sido documentadas en estudios previos sobre patologías en estructuras metálicas. Como resultado, se han identificado problemas comunes como grietas en soldaduras, defectos en conexiones pernadas, corrosión prematura y desalineaciones geométricas (Lobo & Sandoval, 2022). Es por ello que la correcta inspección y control técnico es necesaria para evitar estos inconvenientes.

Por otra parte, a diferencia de las construcciones tradicionales en concreto, las estructuras metálicas presentan desafíos específicos en su supervisión, debido a la necesidad de evaluaciones precisas de las uniones, verificación de cargas y control de deformaciones (Hernández, 2017).

Así mismo, la implementación de pruebas de carga y ensayos no destructivos son importantes para que se garantice la integridad de la estructura en su etapa final de construcción.

Como consecuencia, este trabajo tiene como finalidad identificar las mejores prácticas de supervisión e interventoría en obras civiles, con el fin de reducir fallas estructurales y optimizar los procedimientos de inspección de estructuras metálicas en Colombia. A propósito de ello, se propondrá una metodología basada en normativas nacionales e internacionales, estudios de casos y experiencias de interventoría en proyectos reales.

1.2. Delimitación del tema

Este estudio se enfoca en los criterios de seguimiento y control técnico para la inspección de edificaciones con estructuras metálicas en Colombia, delimitado en los siguientes aspectos:

1. Delimitación Geográfica

El estudio se centrará en Colombia, específicamente en edificaciones residenciales, comerciales e institucionales con estructuras metálicas, reguladas por la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Título F). No se incluirán edificaciones de infraestructura pesada o proyectos industriales.

2. Delimitación Conceptual

El enfoque principal será el análisis de los criterios técnicos de inspección y control de estructuras metálicas. Esto incluye:

- La normativa vigente (NSR-10, AISC 360-16, AWS D1.1/D1.1M).
- Los procedimientos de inspección de materiales, conexiones, anclajes y alineaciones.
- Metodologías de control, como pruebas no destructivas y herramientas de monitoreo en tiempo real.

3. Delimitación Operativa

El estudio se enfocará en los protocolos de inspección y control técnico durante la construcción de las edificaciones metálicas. Se desarrollarán recomendaciones para optimizar los procesos de supervisión mediante el uso de tecnologías digitales y se propondrán estrategias para mejorar la calidad y seguridad estructural en obra.

4. Delimitación Temporal

El proyecto se llevará a cabo en tres meses, distribuidos de la siguiente forma:

- Mes 1: Revisión de normativas y estudios previos.
- Mes 2: Recolección y análisis de datos de proyectos con estructuras metálicas.
- Mes 3: Desarrollo de lineamientos técnicos y recomendaciones, y elaboración del informe final.

En este sentido, la monografía se limita a estructuras metálicas en Colombia y tiene como objetivo establecer criterios de control y supervisión técnica aplicables en el sector de la construcción, con un enfoque práctico y dentro de un plazo de tres meses.

1.3. Desarrollo del argumento

Las estructuras metálicas han demostrado ser una alternativa eficiente en la construcción de edificaciones debido a su rapidez de ensamblaje, alta resistencia y flexibilidad estructural (Herrera Gómez, 2023). Fundamentalmente, su adecuado desempeño depende del cumplimiento de los criterios técnicos de inspección y supervisión en obra, los cuales deben garantizar la calidad y seguridad estructural a lo largo del ciclo de vida de la edificación.

Para empezar, la normativa vigente en Colombia establece lineamientos específicos para la construcción con estructuras metálicas. La Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Título F) regula los materiales, conexiones y procedimientos de inspección que deben aplicarse en este tipo de edificaciones. Asimismo, la AISC 360-16 y la AWS D1.1/D1.1M ofrecen estándares internacionales de referencia para el diseño y supervisión de soldaduras en acero estructural (Galindo Montañez & Pacheco Bonilla, 2023).

Podemos incluir que la inspección técnica en estructuras metálicas se centra en diferentes aspectos clave:

1. Evaluación de materiales y especificaciones técnicas: Se verifica la resistencia y calidad de los aceros utilizados, conforme a normas ASTM y ensayos de laboratorio.
2. Verificación de conexiones soldadas y pernadas: Se revisan los procedimientos de soldadura, control de calidad mediante inspección visual y ensayos no destructivos (ultrasonido, líquidos penetrantes y radiografía).
3. Control de anclajes y empotramientos en cimentaciones: Se examina la correcta integración entre estructura y cimentación, asegurando estabilidad y distribución de cargas.

4. Inspección de alineaciones estructurales y pruebas de carga: Se evalúan deformaciones, nivelaciones y cumplimiento geométrico en el montaje de la estructura (Peral, Vignon-Whaley, & Cardona, 2024).

Ahora bien, a diferencia de las estructuras de concreto, las construcciones en acero presentan retos específicos en su supervisión. En un estudio reciente sobre control técnico en interventoría de infraestructura metálica en Colombia, se evidenció que la falta de inspección rigurosa en obra es una de las principales causas de defectos en soldaduras y fallas estructurales (Herrera Gómez, 2023).

Podemos señalar que los principales problemas detectados en la supervisión incluyen:

- Defectos en soldaduras: Fusión incompleta, grietas y penetración deficiente, lo que compromete la integridad estructural.
- Problemas en conexiones pernadas: Falta de ajuste adecuado, corrosión prematura y fallas en el torque de apriete.
- Desviaciones geométricas y errores en montaje: Mal alineamiento de elementos estructurales, afectando la estabilidad de la edificación (Galindo Montañez & Pacheco Bonilla, 2023).

En consecuencia, la monografía se enfoca en lineamientos técnicos para mejorar la supervisión de edificaciones con estructura metálica en Colombia, incluyendo:

1. Protocolos de inspección y listas de chequeo: Desarrollo de metodologías para evaluar calidad en obra.
2. Estrategias para optimizar la supervisión técnica en obra: Implementación de herramientas digitales y procedimientos automatizados de inspección.
3. Recomendaciones para la aplicación de controles de calidad en estructuras metálicas: Establecimiento de normativas más estrictas en interventoría y formación especializada en supervisión de estructuras en acero (Peral et al., 2024).

Finalmente, este estudio permitirá la generación de criterios estandarizados para mejorar los procedimientos de seguimiento y control en la supervisión de edificaciones con estructura metálica, asegurando el cumplimiento normativo y la seguridad estructural en el sector de la construcción en Colombia.

1.4. Metodología

La metodología de este estudio se enfoca en el análisis y desarrollo de criterios para la inspección técnica de estructuras metálicas en edificaciones en Colombia. En primer lugar, se realizará una revisión detallada de las normativas y estándares técnicos que regulan las estructuras metálicas, particularmente la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Título F), que establece los requisitos de diseño y seguridad en estructuras metálicas. Además, se analizarán los estándares internacionales como el AISC 360-16 y el AWS D1.1/D1.1M, que proporcionan guías sobre el diseño, la inspección y el control de calidad de las construcciones metálicas.

En segundo lugar, se llevará a cabo un análisis de proyectos recientes de edificaciones con estructuras metálicas en Colombia, con el fin de identificar los principales problemas que se presentan durante la inspección y supervisión de estas construcciones. Se revisarán los informes de interventoría de obras y los casos de fallas comunes, tales como problemas en las soldaduras, conexiones pernadas mal ajustadas y desviaciones geométricas.

A continuación, se desarrollarán protocolos de inspección que incluirán aspectos esenciales como la verificación de la calidad de las soldaduras, la inspección de las conexiones pernadas y el control de los anclajes y empotramientos. Los protocolos se basarán en las normativas nacionales e internacionales, y se incorporarán herramientas de monitoreo digital, así

como pruebas no destructivas como el ultrasonido, líquidos penetrantes y radiografía, con el objetivo de asegurar la precisión y efectividad de la supervisión

Finalmente, se propondrán estrategias para mejorar los procedimientos de supervisión y control técnico en obra. Estas estrategias incluirán el uso de herramientas que faciliten el seguimiento en tiempo real de los procesos constructivos y la optimización de la capacitación para los equipos de inspección. La propuesta de monografía también tiene recomendaciones prácticas basadas en los hallazgos obtenidos durante el análisis de los proyectos y la revisión de las normativas, con el fin de garantizar una mejor calidad y seguridad en las edificaciones con estructuras metálicas en Colombia.

Capítulo 2. Requisitos técnicos y documentos mínimos en proyectos de estructuras metálicas

En el presente capítulo se describen los requisitos técnicos aplicables a los proyectos de estructuras metálicas en Colombia, así como los documentos mínimos exigidos en las distintas fases de dichos proyectos. Se realiza además un análisis comparativo de las normativas nacionales (p. ej., NSR-10, RITE, normas técnicas ICONTEC) frente a estándares internacionales relevantes (AISC 360-16, AWS D1.1, Eurocódigo 3, ISO 1090, entre otros). Asimismo, se hace especial énfasis en los requisitos específicos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título F, por ser la norma reina o fundamental en el diseño sismo-resistente de estructuras de acero en Colombia.

2.1 Requisitos técnicos en proyectos de estructuras metálicas en Colombia

En primera instancia, se requiere delinear cuáles son los requisitos técnicos que deben cumplir las estructuras metálicas en el contexto colombiano. Estos requisitos comprenden los aspectos de diseño estructural, las especificaciones de materiales, los criterios para uniones (atornilladas y soldadas), así como las exigencias de control de calidad y ensayos. A

continuación, se detallan estos elementos, con base en la normativa nacional vigente (Colombia) y en concordancia con estándares internacionales reconocidos.

2.1.1 Diseño estructural de estructuras metálicas

El diseño estructural de proyectos en acero debe ceñirse a los criterios establecidos en la normativa colombiana, principalmente el Título F de la NSR-10 (AIS, 2010). Este título define procedimientos de cálculo por estados límite que garantizan la seguridad frente a cargas últimas y de servicio. En efecto, la NSR-10 adopta un enfoque de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés), similar al utilizado por la especificación ANSI/AISC 360-16 (AISC, 2016). Así, por ejemplo, se establece que la resistencia de diseño ($\varphi \cdot R_n$) de cada elemento o conexión debe ser mayor o igual a la resistencia requerida (U) bajo las combinaciones de carga aplicables. Este enfoque de estados límite de resistencia asegura un margen adecuado frente a la falla estructural último; además, la norma exige verificar los estados límite de servicio (deformaciones, vibraciones, etc.) para garantizar el desempeño funcional de la estructura.

Por otro lado, en cuanto a las cargas y combinaciones de carga, el diseño en Colombia sigue las especificaciones del Título A de la NSR-10 (criterios generales de cargas). Esto incluye considerar cargas muertas, vivas, de viento y, muy significativamente, cargas sísmicas dado el

carácter sismo-resistente obligatorio de las edificaciones en el país. En consecuencia, todo proyecto de estructura metálica en Colombia debe diseñarse para resistir sismos de acuerdo con la zonificación sísmica y espectros definidos en la NSR-10 (Título A, Capítulo A.2) y cumplir con las disposiciones especiales de ductilidad del Título F, Capítulo F.3 cuando la estructura se encuentre en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta. De hecho, la NSR-10 Título F incorpora un capítulo completo de “Provisiones sísmicas para estructuras de acero”, en el cual se establecen requisitos adicionales de diseño para asegurar capacidad de disipación de energía en sistemas estructurales dúctiles. Por ejemplo, se clasifican las zonas del país en baja, media y alta amenaza sísmica y se exige un determinado nivel de detallado sismorresistente (capacidad de deformación inelástica) acorde con cada zona y la importancia de la edificación (categoría de uso) (AIS, 2010).

Además, el diseñador debe seguir las especificaciones de diseño de conexiones que indica la normativa. La NSR-10 Título F exige que el diseño de las uniones estructurales sea consistente con las hipótesis de análisis y los modelos de cálculo. Por ejemplo, si una conexión viga-columna se considera rígida en el modelo, debe detallarse como conexión a momento totalmente restringido (TR); si se modela semirrígida, se la clasifica como conexión parcialmente restringida (PR). Este criterio proviene de la filosofía AISC, donde las conexiones se categorizan según su rigidez y capacidad de transmitir momentos. Cabe destacar que la propia NSR-10

remite a especificaciones internacionales para el diseño detallado de ciertas conexiones especiales: en estructuras de alta sismicidad, por ejemplo, se permiten conexiones precalificadas basadas en la norma ANSI/AISC 358 (prequalified connections for seismic applications) o se requiere la realización de ensayos cíclicos de calificación cuando se emplean conexiones no precalificadas. Esto significa que, bajo demandas sísmicas severas, solo se aceptan detalles de conexión con comportamiento comprobado experimentalmente, lo que garantiza un nivel adecuado de seguridad para dichos sistemas.

En este sentido, el diseño estructural en acero en Colombia combina los lineamientos nacionales impartidos por la NSR-10 con criterios de códigos internacionales ampliamente validados. Por ejemplo, la NSR-10 Título F está basada en gran medida en las especificaciones AISC (diseño de acero estructural) y en las disposiciones de la American Institute of Steel Construction para diseño sismorresistente (AISC 341 y 358), adaptadas al contexto nacional. Al mismo tiempo, se alinea con conceptos del Eurocódigo 3 en cuanto a estados límite últimos y de servicio, aunque con factores de seguridad y métodos de carga específicos del medio colombiano. Por lo tanto, cumplir con la NSR-10 en el diseño es cumplir con un nivel de exigencia técnica equiparable a estándares internacionales, asegurando que la estructura metálica tenga la resistencia, rigidez y ductilidad necesarias frente a las solicitaciones previstas.

2.1.2 Materiales estructurales y productos de acero

El desempeño de una estructura metálica está directamente vinculado a las propiedades de sus materiales constituyentes, por lo cual la normativa técnica impone requisitos estrictos sobre los aceros y demás productos utilizados. En Colombia, el Título F de la NSR-10 especifica que únicamente pueden emplearse aceros estructurales que cumplan con normas reconocidas internacionalmente, particularmente las normas ASTM (American Society for Testing and Materials). En efecto, la NSR-10 enumera una serie de especificaciones ASTM aceptadas para perfiles laminados, placas, barras y tuberías de acero.

Por ejemplo, se permite el uso de aceros ASTM A36, A572 Gr.50, A588, A992, entre otros, los cuales garantizan ciertas resistencias mínimas y propiedades de ductilidad adecuadas (AIS, 2010). De igual manera, se listan las normas ASTM aplicables a tuberías estructurales (p. ej., ASTM A500, A53 Gr.B) y a placas de acero (ASTM A36, A514, etc.), de modo que todos los elementos principales de la estructura estén fabricados con materiales normalizados. Adicionalmente, la NSR-10 permite, con restricciones, el uso de "acero sin identificar" únicamente para miembros secundarios no críticos, siempre que estén libres de defectos y con aprobación de la interventoría. Esta disposición reconoce la posibilidad de usar elementos cuyo

certificado no esté disponible, pero bajo responsabilidad y solo en casos en que una falla no comprometa la integridad global.

En cuanto a los pernos, conectores y soldaduras, la normativa también establece requisitos de material. Los pernos estructurales deben cumplir especificaciones como ASTM A325 (perno de alta resistencia) o ASTM A490, entre otras designaciones equivalentes. De hecho, el Reglamento Colombiano aprueba explícitamente el uso de pernos A325 (métrico e imperial), A490, así como pernos ASTM A307 (menor resistencia) para uniones no pretensadas, e incluso pernos especiales como ASTM F1852 y F2280 (pernos TCB de tensión controlada). En el caso de tuercas y arandelas, se listan igualmente estándares ASTM (A563, F436, etc.) que deben cumplir estos elementos. Estos requerimientos están en línea con las especificaciones del RCSC (Research Council on Structural Connections, 2014) usadas internacionalmente para uniones atornilladas de alta resistencia, garantizando así que las uniones pernadas alcancen los coeficientes de fricción o pretensado necesarios sin fallar por calidad deficiente de los tornillos.

Para las uniones soldadas y conectores soldados, la NSR-10 remite a normas de soldadura de reconocimiento internacional. Específicamente, el Título F exige que los metales de aporte (electrodos, alambres) y fundentes para soldadura cumplan con las series AWS A5.x de la American Welding Society. Los certificados de los fabricantes de electrodos se aceptan como

evidencia de conformidad con dichas normas AWS. Asimismo, los conectores tipo espárrago (studs) de acero de cabeza soldable, empleados por ejemplo para conectores de losas colaborantes, deben cumplir con el Código AWS D1.1 (Structural Welding Code – Steel). Esto implica que tanto el diseño como la ejecución de las soldaduras estructurales se regirán por los criterios de AWS, incluyendo la clasificación de los metales de aporte, requisitos de procedimiento y niveles de aceptación de discontinuidades. Por ejemplo, AWS D1.1 establece límites de tamaño y tipo de porosidad o fisuras admisibles en un cordón de soldadura, y la NSR-10 al adoptar este código asegura que las soldaduras en estructuras metálicas colombianas tengan una calidad equivalente a la exigida en Estados Unidos (AWS, 2015).

Además de las normas ASTM y AWS incorporadas en el Reglamento, Colombia cuenta con Normas Técnicas Colombianas (NTC) emitidas por ICONTEC que complementan estos requisitos de materiales. Por ejemplo, la NTC 5738 adopta especificaciones de ASTM A6 para las tolerancias y dimensiones de perfiles laminados; la NTC 6147:2021 define las propiedades de los perfiles estructurales de acero laminados en caliente (similares a ASTM A6); y la NTC 2374:2021 especifica las características de tubos estructurales de acero al carbono. Estas normas nacionales, concordantes con estándares ASTM/ASME, facilitan la disponibilidad de materiales certificados en el mercado local. En suma, el cumplimiento de los requisitos de materiales implica que todos los componentes (perfiles, placas, pernos, soldaduras, conectores) tengan

trazabilidad y calidad normalizada. Esto redunda en estructuras más seguras, pues se minimiza la incertidumbre sobre el comportamiento real del acero empleado, asegurando que las resistencias y ductilidades de diseño se alcancen efectivamente en la construcción.

2.1.3 Uniones estructurales: conexiones soldadas y atornilladas

Los detalles de unión en una estructura metálica son puntos críticos que deben ser diseñados y ejecutados con sumo cuidado, ya que concentran esfuerzos y su falla puede significar el colapso parcial o total de la estructura. En consecuencia, la normativa técnica impone requisitos tanto de diseño como de construcción para las conexiones soldadas y atornilladas.

En lo que respecta al diseño de conexiones, la NSR-10 indica que se debe seguir el Capítulo F.2.2.3.5 del Título F, que trata específicamente de los criterios de diseño para conexiones simples (articuladas) y conexiones a momento (rígidas o semirrígidas). Como se mencionó, las conexiones a momento se clasifican en totalmente restringidas (TR) o parcialmente restringidas (PR) según su capacidad rotacional , lo cual debe ser coherente con el análisis estructural asumido. Adicionalmente, para estructuras en zonas sísmicas, las conexiones que formen parte del sistema sismoresistente deben cumplir las provisiones especiales del Capítulo F.3. Por ejemplo, en pórticos resistentes a momento para alta sismicidad (categoría de

diseño sísmico D, E o F según la clasificación de la NSR-10), solo se permiten conexiones tipo SMF (Special Moment Frames) cuya geometría y detalles estén precalificados o hayan sido ensayados para garantizar una rotación inelástica mínima (p. ej., 0.04 radianes) sin pérdida significativa de resistencia. Esto alinea el diseño colombiano con las exigencias de AISC 341 para pórticos dúctiles, y con los criterios del Eurocódigo 8 (que define clases de ductilidad para estructuras de acero).

En conexiones atornilladas, el diseñador debe especificar el tipo de unión (simplemente apoyada, deslizante, pretensada, etc.) y el grado de calidad del perno. La NSR-10, a través de las referencias ASTM antes mencionadas, permite uniones atornilladas de alta resistencia ya sea en condición de apriete sencillo (snug-tight) o pretensado. Para uniones sometidas a fuerzas cíclicas significativas (ej. sismo, fatiga) o deslizamiento crítico, se suelen emplear pernos pretensados A325 o A490 en agujeros estándar o alargados, siguiendo los lineamientos del RCSC (2014). Por ejemplo, si se diseña una conexión viga-columna con placas de corte y pernos, y se requiere que no ocurra deslizamiento bajo cargas de servicio, la especificación deberá indicar un tipo de unión deslizante crítica (Slip-Critical) con pernos pretensados al 70% de su resistencia a tracción mínima, conforme al procedimiento estándar RCSC (AWS, 2015). Aunque la NSR-10 no reproduce integralmente el texto del RCSC, en la práctica los proyectistas colombianos aplican este estándar para dimensionar las placas de conexión (considerando el coeficiente de fricción

faying surface clasificada como Clase A o B) y para definir el torque de apriete o método de tensionado de los pernos (calibrador, giro de tuerca, etc.).

Respecto a las conexiones soldadas, es obligatorio regirse por el Código de Soldadura Estructural AWS D1.1 (AWS, 2015) tal como lo exige la NSR-10. Esto abarca tanto el diseño de la junta (preparación de biseles, dimensiones mínimas de filetes, arreglos de soldadura) como la ejecución y calidad de las soldaduras. La AWS D1.1 proporciona, por ejemplo, resistencias nominales para cordones de soldadura de filete en función del material de aporte y la geometría, las cuales deben ser usadas en el cálculo de la capacidad de la conexión soldada. También define las soldaduras “precalificadas”, que son aquellos detalles (uniones a tope, con ciertos ángulos de bisel y procedimientos) que se consideran adecuados sin requerir un procedimiento de soldadura calificado mediante prueba. La NSR-10 reconoce esta categoría al aceptar las WPS precalificadas por AWS D1.1 en lugar de exigir calificaciones adicionales (AIS, 2010). Sin embargo, si se propone un detalle de soldadura no contemplado como precalificado, se debe realizar una calificación de procedimiento (PQR) de acuerdo con AWS, lo cual implica soldar cupones de prueba y ensayarlos (p. ej., mediante ultrasonido, rayos X o pruebas destructivas) hasta verificar que cumplen los criterios de resistencia y ductilidad. Este proceso de calificación, aunque es laborioso, garantiza que las soldaduras ejecutadas en obra tendrán el desempeño esperado.

Otro aspecto relevante son los cordones de soldadura de filete intermitente o las conexiones soldadas en elementos esbeltos. La norma indica que se deben evitar detalles que puedan provocar fisuras por fatiga o por retracción. Por ello, se limitan, por ejemplo, las soldaduras discontinuas en elementos sometidos a tensiones variables, y se exigen acabados adecuados en terminaciones de cordón para prevenir concentraciones de esfuerzo. Todos estos detalles están contemplados en AWS D1.1 y son por ende parte de las exigencias en Colombia.

Se puede afirmar que, las uniones de las estructuras metálicas deben ser proyectadas conforme a los mejores estándares: uniones atornilladas conforme a normas ASTM/AISC (y práctica RCSC) para garantizar su resistencia al deslizamiento y rotura, y uniones soldadas conforme a AWS D1.1 para asegurar su calidad y capacidad portante. La NSR-10 actúa como marco integrador que remite a dichas normas técnicas y además añade consideraciones sismorresistentes particulares (por ejemplo, requerimientos de soldaduras de continuidad en conexiones a momento, rigidez de uniones de bases de columnas, etc., ver Cap. F.3). De este modo, se logra que la confiabilidad de cada conexión contribuye a la seguridad global de la estructura metálica.

2.1.4 Control de calidad y ensayos

La calidad en fabricación y montaje de las estructuras metálicas es un aspecto crítico regulado exhaustivamente en la normativa colombiana. A diferencia de algunos códigos extranjeros donde estos aspectos quedan delegados a las “buenas prácticas”, el Título F de la NSR-10 establece requisitos mínimos obligatorios para el control de calidad (QC) del fabricante y del montador, así como para la supervisión técnica independiente (QA) en obra (AIS, 2010).

En primer lugar, la NSR-10 exige un “Programa de Control de Calidad” por parte de fabricante y montador de la estructura. Esto implica que tanto el taller que fabrica los elementos de acero (columnas, vigas, cerchas, etc.) como la empresa que realiza el montaje en el sitio deben documentar e implementar procedimientos de control que garanticen que el trabajo se ejecuta conforme al diseño aprobado y a las normas aplicables. Por ejemplo, el fabricante debe tener procedimientos para verificar las propiedades de los materiales que recibe (inspección de certificados de laminación, identificación de calidades de acero – trazabilidad). Igualmente, debe controlar procesos como el corte y preparación de materiales, el precalentamiento y soldadura en taller, el control dimensional de las piezas fabricadas, y la aplicación de recubrimientos (pintura) cuando corresponda.

Por su parte, el montador en campo debe inspeccionar aspectos como la correcta instalación de los pernos de alta resistencia (verificando pretesado cuando aplique), la ejecución de soldaduras de campo conforme al WPS, la colocación de conectores y tableros metálicos (por ejemplo, láminas de entrepiso tipo deck) de acuerdo con las especificaciones, y las tolerancias de alineación y nivelación durante el montaje. En esencia, la norma busca que cada etapa del proceso esté bajo vigilancia sistemática de personal calificado, de forma que se detecten y corrijan desviaciones antes de que comprometan la seguridad estructural.

La NSR-10 Título F define también los Documentos de calidad que deben generarse y mantenerse durante la obra. En el numeral F.2.14.3 se listan, por ejemplo, los documentos que el fabricante/ montador debe remitir al diseñador estructural o su interventor antes de iniciar actividades relevantes. Entre estos documentos previos se cuentan los Planos de taller y Planos de montaje (detallados, indicando soldaduras, pernos, dimensiones, procedimientos), siempre que no hayan sido proporcionados por otro (p. ej., algunas veces el diseñador también suministra planos de taller, pero si no, es obligación del fabricante generarlos y someterlos a aprobación) . Adicionalmente, la norma indica que se deben tener disponibles para revisión una serie de certificados y registros de calidad, tales como: certificados de ensayos de materiales (por ejemplo resultados de pruebas de tracción y doblado de las partidas de acero, según F.2.1.3.1), certificados de conformidad de pernos de alta resistencia y barras de anclaje , certificados de

fabricante de los consumibles de soldadura (electrodos, flux) , hojas técnicas de productos (p. ej. de conectores soldados de cortante), las Especificaciones de Procedimiento de Soldadura (WPS) calificadas o precalificadas, los Registros de calificación de procedimientos (PQR) si se usaron procedimientos no precalificados , los Registros de calificación de soldadores (WPQ) y su vigencia, y el Manual de control de calidad del fabricante/montador que detalle sus procedimientos de inspección interna, manejo de no conformidades, etc.. Esta lista muestra la amplitud documental requerida: cada lote de material y cada proceso clave debe estar respaldado por documentación que evidencie su conformidad. Ello no solo sirve para controles en el momento, sino que permite trazabilidad a futuro, facilitando inspecciones o mantenimientos posteriores al quedar archivado qué material y qué procedimiento se usó en cada elemento.

Otro aspecto fundamental del control de calidad son los ensayos no destructivos (END). La normativa colombiana obliga a realizar END en ciertas uniones soldadas críticas, sobre todo en estructuras sismorresistentes de mayor importancia. Por ejemplo, para estructuras que pertenezcan al Sistema de Resistencia Sísmica de categoría especial (pórticos dúctiles en zona sísmica alta, edificios importantes), la NSR-10 exige ejecutar ensayos por ultrasonido al 100% de las juntas soldadas a tope de penetración completa en materiales de espesor ≥ 7.9 mm. Esta inspección mediante ultrasonido permite detectar defectos internos (como inclusiones o falta de fusión) que no serían visibles externamente, asegurando así la confiabilidad de las soldaduras

más exigidas. En estructuras de menor requerimiento sísmico, la exigencia se relaja, pudiendo requerirse ultrasonido al 10% de las juntas al azar como control estadístico. Otros END incluidos en la supervisión técnica son el líquido penetrante o partículas magnéticas para detectar discontinuidades superficiales en soldaduras (por ejemplo, grietas pequeñas), y eventualmente rayos X si se considera necesario en elementos de gran espesor. La frecuencia y tipo de ensayo depende de la categoría sísmica y de uso de la estructura, tal como se detalla en la NSR-10 F.2.14.5.1 (Control de calidad) y F.2.14.5.2 (Supervisión técnica) (AIS, 2010).

Cabe mencionar que la NSR-10 también demanda calificaciones mínimas para el personal encargado de la inspección. Los inspectores de soldadura de control de calidad deben estar calificados de acuerdo con programas reconocidos (por ejemplo, como Inspector de Soldadura Certificado CWI por AWS, o esquema equivalente) . Igualmente, quienes inspeccionen los pernos deben tener entrenamiento y experiencia documentada en inspección de conexiones atornilladas. Estas disposiciones aseguran que las personas que verifican la obra tengan las competencias necesarias, reduciendo la probabilidad de que se escapen errores.

En conclusión, el control de calidad y los ensayos son componentes inseparables de un proyecto de estructura metálica exitoso. La normativa colombiana, especialmente el Título F de la NSR-10, ha institucionalizado un sistema en el cual el fabricante y montador ejercen un

control interno (QC) documentado, y por encima de ellos puede haber una supervisión externa (interventoría) que verifica de manera independiente (QA). Los ensayos no destructivos complementan este esquema aportando información objetiva sobre la integridad de las uniones. Por lo tanto, cumplir con estos requisitos de calidad no es un mero trámite, sino una garantía de que la estructura metálica entregada cumple con las especificaciones de diseño y las exigencias normativas, reduciendo significativamente el riesgo de fallas durante la construcción y la vida útil de la edificación.

2.2 Documentos mínimos en la planificación, diseño, ejecución y control de obras metálicas

El desarrollo de un proyecto de estructura metálica conlleva la generación y gestión de numerosos documentos técnicos, indispensables para asegurar la correcta planificación, el adecuado diseño, la ejecución conforme a planos y especificaciones, y el control efectivo de la obra. A continuación, se describen los documentos mínimos más importantes en cada fase del proyecto, planificación, diseño, ejecución y control, conforme a las exigencias normativas y las buenas prácticas en Colombia. Es importante destacar que muchos de estos documentos están interrelacionados; por ejemplo, los resultados de la fase de planificación (estudios base, criterios)

nutren el diseño, y los documentos de diseño (planos, especificaciones) sirven a su vez de insumo para la ejecución y el control de calidad.

2.2.1 Documentos en la fase de planificación

En la fase inicial de planificación de un proyecto estructural, se sientan las bases que guiarán el diseño posterior. Los documentos mínimos en esta etapa suelen incluir:

- Estudios previos del sitio: particularmente, el Estudio Geotécnico del terreno, que, aunque se enfoca en cimentaciones, es indispensable para definir las cargas admisibles y así condicionar el diseño de la subestructura. La NSR-10 en su Título J exige un estudio de suelos para cualquier edificación, y este documento debe estar disponible idealmente desde la planificación para prever necesidades de la estructura metálica (por ejemplo, profundidades de cimentación que afecten la longitud de columnas, presencia de agua subterránea que pueda requerir protecciones, etc.).

- Programa arquitectónico y funcionalidades: aunque es un insumo más arquitectónico, define luces, espacios y requerimientos que la estructura metálica deberá satisfacer. Este

programa y los planos arquitectónicos preliminares son documentos de partida para el ingeniero estructural.

- Criterios de diseño preliminares: Un documento en el que el ingeniero estructurador plasma las hipótesis de diseño que usará. Por ejemplo, normativas aplicables (confirmando que se usará NSR-10 para lo estructural, RITE para aspectos térmicos si aplica, reglamentos eléctricos – RETIE– si hubiera instalaciones electromecánicas asociadas, etc.), factores de importancia sísmica (categoría de diseño sísmico del proyecto según el uso, I=1.0, 1.25, etc.), vida útil de diseño (usualmente 50 años para edificaciones corrientes) y otros parámetros. Este documento de criterios suele incluir también las cargas de diseño asumidas (cargas vivas por ocupación según NSR-10, cargas de techo, cargas de equipos especiales si el proyecto los tiene, etc.). Establecer estos criterios por escrito temprano ayuda a evitar cambios posteriores; además, sirve como hoja de ruta para los calculistas y es un referente para la revisión independiente si la hubiese.

- Términos de referencia o pliego de condiciones: en caso de proyectos sometidos a licitación o contratación, se elabora un documento que compila las especificaciones técnicas generales y condiciones que los oferentes o contratistas deberán cumplir. En

estructuras metálicas, un pliego de condiciones bien hecho incluirá las normas aplicables (p. ej., exigir cumplimiento de NSR-10, NTC-ICONTEC, AWS D1.1, etc.), calificaciones del personal (por ejemplo, que el soldador esté certificado AWS), y requerimientos mínimos de calidad. Según recomendaciones profesionales, es altamente recomendable contar en esta etapa con la asesoría de ingenieros estructurales experimentados, para formular especificaciones claras y completas. Un error común en la planificación es reutilizar pliegos de otros proyectos sin adaptarlos, lo que puede dejar vacíos o ambigüedades; por ello el pliego debe redactarse de forma específica indicando, por ejemplo, "procedimientos de soldadura según AWS D1.1, inspección 100% visual y 10% ultrasonido", en lugar de frases genéricas como "el contratista hará lo necesario para garantizar la calidad". En suma, el pliego de condiciones y las especificaciones técnicas preliminares son documentos esenciales para que todos los actores conozcan desde el inicio las reglas del juego técnicas y normativas. (ANKER S.A.S., 2021).

- Plan de trabajo y cronograma inicial: aunque de carácter más gerencial, es importante incluirlo ya que condiciona entregables técnicos. Por ejemplo, un cronograma debe prever tiempos para la elaboración de planos, para la fabricación de elementos en taller, para inspecciones, etc. Si la planificación es realista con estos tiempos y documentos, el proyecto fluye mejor en etapas posteriores.

- Estimativo de cantidades y presupuesto preliminar: listado de cantidades de acero estructural estimadas (toneladas de perfilería, m² de entrepiso metálico, kg de soldadura, número de pernos, etc.) y costos aproximados. Este documento no incide en los cálculos directamente, pero sí es base para gestionar la aprobación y asegurar recursos. Por ejemplo, un presupuesto muy ajustado puede alertar sobre la necesidad de optimizar el diseño para economizar material.

En síntesis, la fase de planificación produce documentos base que guiarán todo el proyecto. Aunque esta etapa es anterior al diseño detallado, su correcta documentación (estudios, criterios y términos de referencia claros) es importante para el éxito de la estructura metálica, pues cualquier omisión puede resultar en retrasos o reprocesos más adelante.

2.2.2 Documentos en la fase de diseño

Durante la fase de diseño estructural, se desarrollan los documentos técnicos que definen la solución estructural en acero con suficiente detalle para su construcción. Los documentos mínimos e imprescindibles en esta etapa incluyen:

- Memoria de cálculo estructural: documento descriptivo y justificativo del diseño, donde el ingeniero estructural presenta las bases de diseño, metodologías, resultados de análisis y verificaciones realizadas. En la memoria de cálculo se consignan las cargas consideradas, combinaciones según NSR-10, los modelos de análisis utilizados (p. ej., modelo tridimensional en software con conexiones articuladas/rígidas según corresponda), los resultados de solicitaciones (diagramas de momento, fuerzas, deformadas), y el dimensionamiento de cada elemento (perfilería seleccionada y su verificación a flexión, compresión, etc., conforme a NSR-10 Título F). También se incluyen los cálculos de uniones (por ejemplo, diseño de soldaduras y pernos con sus factores de seguridad) y cualquier cálculo especial (diseño por fuego si aplica, chequeo de fatiga, etc.). La memoria debe referenciar la normativa aplicada (NSR-10, AISC, etc.) y justificar cualquier desviación o criterio particular adoptado. Aunque la NSR-10 no estipula un formato específico de memoria, en la práctica las Curadurías Urbanas y revisores estructurales en Colombia exigen la presentación de la memoria de cálculo para tramitar la licencia de construcción, por lo cual es un documento contractual y técnicamente relevante.

- Planos de diseño estructural (planos estructurales): son los planos oficiales de la estructura, generalmente identificados como planos de la serie “E” (estructuras), firmados y sellados por el ingeniero estructural responsable. Estos planos, típicamente en escala arquitectónica (1:50, 1:100), muestran la disposición de los elementos estructurales: plantas de columnas y vigas, elevaciones o cortes mostrando pórticos, y detalles típicos de conexiones. Es imprescindible que los planos estructurales cumplan con los requisitos establecidos en el Código de Prácticas Estándar para Estructuras de Acero (NTC 5832), tal como lo exige la NSR-10. En otras palabras, deben presentar la información de manera completa y normalizada: ejes de referencia, cotas, secciones de perfiles (por ejemplo, “H200x200x5.5x8 mm” si se usan perfiles europeos, o “W12x58” si se usan perfiles ASTM), especificación de soldaduras (símbolos de soldadura según AWS en los detalles), especificación de pernos (diámetro y calidad, p. ej. 7/8" A325), notas de diseño indicando las cargas de diseño y normas empleadas, etc. La NSR-10 recalca incluir en los planos ciertos requerimientos específicos derivados de sus provisiones, por ejemplo: si se usaron perfiles laminados pesados, se debe indicar en planos la exigencia de tenacidad (CVN) según F.2.1.5.1.3; si ciertas soldaduras demandan ensayos UT al 100%, debe anotarse; si conexiones deben ser precalificadas o ensayadas, también. Esto se resume en que los planos

estructurales son el principal medio de comunicación técnica entre el diseñador y el constructor, por lo que deben reflejar con claridad todos los requisitos normativos y de desempeño. (Figura 2.1 ilustra un extracto de un plano estructural de una nave industrial en acero, donde se aprecian perfiles, uniones atornilladas y notas de construcción).

- Especificaciones técnicas de diseño: a veces incorporadas dentro de los planos (en forma de notas) y a veces como documento separado, las especificaciones técnicas describen con texto las calidades, procesos y criterios de aceptación para la construcción. En proyectos de acero, las especificaciones suelen detallar los grados de acero a utilizar (p. ej., “todas las estructuras metálicas serán acero ASTM A572 Gr50 Fy=345 MPa”), los procesos de soldadura permitidos (Soldadura SMAW, FCAW, etc., con calificación AWS D1.1), los requisitos de precalentamiento y tratamiento posterior si aplican (por ejemplo, “precalentar a 100°C antes de soldar perfiles >19 mm espesor”), los requisitos de pintura o recubrimientos (si la estructura llevará pintura intumescente contra fuego, galvanizado, etc.), y tolerancias de montaje. Este documento complementa a los planos: mientras el plano muestra “qué” y “dónde”, la especificación dice “cómo” y con “qué calidad”. La NSR-10 Título F indica que las especificaciones de

diseño deben ser consistentes con el Código de Prácticas Estándar (NTC 5832) , lo que significa por ejemplo que deben incluir los criterios de identificación y trazabilidad de materiales, secuencia de soldadura, inspecciones requeridas, etc., tal como recomienda el estándar AISC 303 (General Conditions Code). De hecho, la NTC 5832:2021 –adopción modificada de AISC 303– sirve como guía para preparar especificaciones claras . Por ejemplo, dicha NTC enfatiza la importancia de definir la responsabilidad de diseño de conexiones (si el contratista las diseña o el ingeniero las provee), los procedimientos para revisión de planos de taller, y otras prácticas usuales de la industria del acero. Una buena especificación técnica, junto con planos completos, evita ambigüedades y previene discrepancias durante la construcción.

- Detalles y cálculos adicionales: en ocasiones, dependiendo de la complejidad, el ingeniero puede anexar documentos de verificación especial. Por ejemplo, resultados de un análisis dinámico si se hizo (vibración de un entrepiso metálico ante actividades rítmicas, p.ej. en gimnasios), o diseños de elementos no convencionales (diseño de cerchas espaciales, o uniones soldadas complejas que se salen de las tablas estándar y requieren modelación por elementos finitos).

Estos no son “obligatorios” en todo proyecto, pero se incluyen cuando pertinentes para documentar plenamente el diseño.

- Revisión y aprobación: aunque no es un “documento” creado por el diseñador, sí es parte de la documentación final de diseño el Acta de Revisión Estructural (cuando el proyecto lo requiere por ley). En Colombia, para edificaciones de ciertos tamaños y usos, un revisor estructural independiente debe revisar los cálculos y planos, y emitir un acta o carta indicando que el diseño cumple la NSR-10. Esa acta, junto con los planos y memoria, son entregados a la Curaduría para obtener la licencia. Nuevamente, esto subraya que el cumplimiento documental (memoria, planos, especificaciones) no es solo procedimiento interno sino requisito legal en la fase de diseño.

Es por esto que, la fase de diseño produce la documentación técnica central del proyecto de estructura metálica: lo que no esté correctamente plasmado en estos documentos difícilmente se logrará en obra. La inversión de tiempo y rigurosidad en esta etapa garantiza que la ejecución pueda realizarse sin contratiempos, pues constructores y supervisores contarán con planos y

especificaciones confiables para seguir. La claridad y completitud de la documentación de diseño es, por lo tanto, un pilar de la calidad en estructuras metálicas.

2.2.3 Documentos en la fase de ejecución (fabricación y montaje)

Durante la fase de ejecución, que comprende la fabricación en taller de los elementos de acero y el montaje en obra, se generan y utilizan una serie de documentos operativos y de control que aseguran que lo construido corresponde fielmente a lo diseñado. Entre los documentos mínimos de esta fase se encuentran:

- Planos de taller (shop drawings): Son planos derivados de los planos de diseño, elaborados usualmente por el contratista de estructura metálica o un detallista especializado. Contienen los detalles de fabricación de cada elemento: dimensiones exactas de corte, longitud de cada perfil, posición y longitud de soldaduras, número y posición de agujeros para pernos, identificaciones de piezas, listas de materiales (material take-off), etc. Cada elemento (viga, columna, placa de conexión) tiene un dibujo de taller propio, numerado para correlacionarlo con la posición en la estructura (por ejemplo, Columna C1, Viga V2-3, placa de unión P5, etc.). Los planos de taller también incluyen planos de conjunto o montaje indicando cómo ensamblan las piezas en obra, con marcas

de montaje. La NSR-10 Título F exige que el fabricante/ montador someta estos planos de taller y montaje al diseñador estructural para su revisión y aprobación antes de fabricar, a menos que dichos planos hayan sido provistos por el mismo diseñador. Esta práctica garantiza una doble comprobación: el ingeniero diseñador verifica que los detallados propuestos no alteren la intención estructural (por ejemplo, que una placa de menor espesor no comprometa la resistencia) y que cumplen las especificaciones. Los planos de taller, una vez aprobados, se convierten en la guía directa para el personal de fabricación.

- Procedimientos de Soldadura (WPS) y registros (PQR): Previo al inicio de las soldaduras, el contratista debe compilar los Welding Procedure Specifications (WPS) que va a utilizar, los cuales describen los parámetros de soldadura (proceso –SMAW, GMAW–, tipo de electrodo, amperaje, posiciones, precalentamiento, etc.). Si alguno de esos procedimientos no está precalificado por AWS D1.1, se deben adjuntar los registros de calificación (PQR) que demuestran mediante ensayos que el procedimiento es adecuado. Asimismo, se deben mantener al día los registros de calificación de soldadores (WPQ), evidenciando que cada soldador pasó pruebas (p. ej., probeta soldada y ensayo doblado) para el tipo de junta que realizará. Estos documentos son generalmente exigidos por el inspector de calidad antes de autorizar soldaduras críticas.

- Planes de inspección y ensayos: El contratista de montaje elabora un Plan de Inspección y Ensayos (ITP) donde lista qué verificaciones se harán en cada etapa. Por ejemplo: inspección visual de soldaduras 100%, ultrasonido en soldaduras críticas según lo especificado, pruebas de torque en pernos al 10% de las uniones pretensadas, etc. Este plan suele alinearse con las exigencias normativas y contractuales. Por ejemplo, si la especificación técnica pide 100% ultrasonido en soldaduras de momento, el ITP lo reflejará indicando responsable, alcance y criterio de aceptación (usualmente AWS D1.1).

- Registros de control de calidad de fabricación: Durante la manufactura en taller, se generan registros como: formatos de corte y armado, donde se apuntan dimensiones medidas vs. diseñadas (asegurando tolerancias); registros de soldadura, donde se anota quién soldó, con qué WPS, si hubo reparaciones; registros de inspección visual y END en taller (p. ej., resultado de ultrasonido a una junta y su aprobación o reparación). También, si alguna pieza sale no conforme (p.ej. un perfil llegó con defecto de laminación), se genera un registro de no conformidad y su resolución (cambio de material, reparación). Estos documentos pueden ser auditados por la supervisión.

- Registros de control de calidad de montaje: De modo similar, en campo se llevan bitácoras o formatos para: verificación de alineación y plomada de marcos, inspección de apriete de pernos (anotando con torquímetro los valores logrados o el método usado), checklists de soldaduras de campo (que no queden sin ejecutar las estipuladas, que se retiró el revestimiento en zona de soldadura, etc.). Adicionalmente, se debe documentar la recepción de materiales: por ejemplo, certificados de los pernos entregados en obra (los cuales ya mencionamos deben estar disponibles antes del montaje) , certificados de pintura o galvanizado si se proveen protegidos, etc.

- Informes periódicos de avance: Aunque más administrativos, suelen incluir aspectos técnicos. Un informe semanal de obra podría indicar “esta semana se montaron 20 toneladas de estructura en nave 1, con inspección visual al 100% y todos los pernos de marco A pretensados y verificados”. Estos informes, firmados por el residente y quizá visados por el interventor, documentan la trazabilidad del proceso constructivo.

- As-Built y planos de cambios: Si durante la ejecución se producen cambios aprobados (por ejemplo, se decide reforzar un perfil, o se modifica una conexión por dificultades de

montaje), estos deben quedar plasmados en planos de diseño actualizados (As-Built) al final. Los planos As-Built son parte de los entregables de la obra, mostrando la estructura tal como fue construida realmente, incluyendo desviaciones menores autorizadas. En estructuras metálicas, es común que casi todo siga el plano original, pero puede haber diferencias en conexiones o detalles. Entregar los As-Built al propietario es importante para el mantenimiento futuro.

- Libro de Obra: Documento legal en muchas obras colombianas, donde el director de obra e interventor asientan acontecimientos diarios o instrucciones. Si hubo instrucciones técnicas relevantes (p. ej., “el diseñador instruye añadir cordones de soldadura en tal unión por seguridad”), quedará en el libro, complementando los documentos formales.

En la Tabla se presenta un resumen de los principales documentos generados en cada etapa (planificación, diseño, ejecución y control), como referencia rápida. Cada uno de estos documentos cumple una función dentro del sistema global de aseguramiento de calidad del proyecto. En particular, en la fase de ejecución, la gran cantidad de documentos puede parecer abrumadora, pero cada uno tiene su razón de ser para garantizar que la estructura metálica se construya según lo planeado y con los estándares de calidad requeridos.

Tabla 1.

Documentos mínimos en cada fase del proyecto de estructuras metálicas

Fase del Proyecto	Documentos Mínimos Requeridos
Planificación	• Estudio geotécnico del sitio • Programa arquitectónico preliminar • Criterios de diseño (normativas, cargas) • Términos de referencia / Pliego técnico de condiciones• Cronograma y presupuesto inicial (estimativo de cantidades) • Análisis de factibilidad y estudios especiales iniciales (ej: vientos, si aplica)
Diseño	• Memoria de cálculo estructural completa • Planos estructurales de diseño (plantas, elevaciones, detalles) • Especificaciones técnicas estructurales (materiales, soldaduras, protecciones) • Detalles constructivos especiales (ej: juntas de dilatación, bases de columna) • Aprobación o acta de revisión estructural independiente (si aplica)
Ejecución (Fabricación/Montaje)	• • Planos de taller y planos de montaje aprobados • Procedimientos de soldadura (WPS) y calificaciones (PQR, WPQ) • Plan de inspección y ensayos (QC plan) del contratista• Registros de control de calidad de taller (inspección de materiales, corte, soldadura, pintura) • Registros de control de calidad de montaje (alineación, apriete de pernos, END en campo) • Informes periódicos de obra (avances, incidencias) • Libro de obra (anotaciones diarias relevantes)

Fase del Proyecto	Documentos Mínimos Requeridos
Control y Cierre	• Informes de supervisión técnica / interventoría (observaciones y correcciones) • Resultados de ensayos no destructivos (UT, PT, MT) y pruebas de carga si se realizaron • Certificados de calidad finales (conformidad de materiales, soldaduras, tornillos utilizados) • Planos As-Built o planos de obra final actualizados • Acta de recepción final de la estructura (certificación de cumplimiento de normas, por el diseñador o revisor) • Documentación para archivo y mantenimiento (manual de uso si aplica, recomendaciones de inspección periódica)

Nota. Adaptado de diversas fuentes documentales

2.2.4 Documentos en la fase de control de obra y post-construcción

La fase de control de obra coincide en parte con la ejecución, pero aquí nos centramos en los documentos generados por la interventoría o supervisión técnica y en los documentos de cierre del proyecto estructural metálico.

Durante la obra, la supervisión técnica (que puede ser el mismo diseñador estructural u otro profesional nombrado como interventor) elabora documentos como:

- Informes de inspección: Son reportes puntuales tras visitas de inspección. Por ejemplo, un informe de supervisión podría indicar “revisión de soldaduras de placas base el día X:

se encontró porosidad excesiva en 2 de 10 soldaduras inspeccionadas, se ordenó corregir y se verificó nuevamente satisfactoriamente". Estos informes suelen referenciar normas: "la aceptación se hizo según criterios AWS D1.1" por ejemplo. También se emiten informes de no conformidades si algo grave se halla, indicando la disposición (p. ej., reemplazar elemento deformado, recalibrar pernos, etc.).

- Actas de reunión de obra: No técnicas en sí, pero muchas veces en las reuniones de obra se discuten temas estructurales (como secuencia de montaje, medidas de seguridad, etc.) y quedan minutas escritas con acuerdos y responsabilidades.

- Reporte fotográfico: Aunque no obligatorio por norma, hoy es muy común documentar con fotografías las etapas de montaje, las particularidades de conexiones, etc. Esto acompaña a los informes y sirve de evidencia visual de la calidad.

Al finalizar la construcción de la estructura metálica, se deben recopilar y entregar ciertos documentos de cierre:

- Certificado de cumplimiento estructural: En muchos casos, el ingeniero estructural debe emitir un certificado indicando que la estructura fue construida bajo su supervisión (o la de un delegado) y que cumple con el diseño y la NSR-10. Este documento es requerido para fines de habitabilidad y seguros, y va dirigido al propietario y autoridades. En él, el ingeniero puede listar las normas con las que se cumplió y cualquier desviación aceptada.

- Memoria de calidad de obra: Algunos proyectos consolidan un documento final que resume todos los controles realizados, resultados de ensayos (ej. resistencias de soldadura, resultados de ultrasonidos, torques medidos en pernos), y certifica que todo está conforme a especificaciones. Viene a ser un "informe final de calidad" elaborado por el contratista y avalado por la interventoría, que es archivado por el cliente para referencia futura.

- As-Built estructural: Como indicado, los planos finales actualizados que reflejan la obra construida se entregan tanto en físico como en archivos digitales. Son importantes para cualquier modificación o ampliación futura, o para evaluaciones estructurales (por

ejemplo, si años más tarde se quiere revisar la capacidad de la estructura para cargas adicionales, estos planos serán la base).

- Manual de mantenimiento: Si la estructura tiene componentes que requieren mantenimiento (recubrimientos anticorrosivos, elementos pretensados que deban retensionarse, etc.), puede incluirse un manual o al menos recomendaciones (ej.: repintar cada 5 años, inspeccionar soldaduras cada 2 años en ciertas zonas de fatiga, etc.). No es común en estructuras convencionales, pero en infraestructuras industriales sí suele haber un plan de mantenimiento entregable.

- Acta de entrega y recepción: Finalmente, se firma un acta entre constructor, interventor y propietario donde se recibe la estructura a satisfacción, constatando que se entregaron todos los documentos y que la construcción se realizó según lo contratado. En dicha acta se deja constancia del cumplimiento normativo.

Todos estos documentos de la etapa de control y cierre constituyen el legado documental del proyecto. No solo sirven para formalidades de entrega, sino que pueden ser críticos en caso de auditorías, reclamos o incidentes futuros. Por ejemplo, si años después ocurriera una falla en la

estructura, los primeros documentos que se revisarán serán los certificados de calidad de los materiales y soldaduras para investigar posibles causas. De allí la importancia de que durante la obra se haya recopilado todo cuidadosamente y al cierre se organice dicha información.

En conclusión, a lo largo de las cuatro fases (planificación, diseño, ejecución y control) se genera un conjunto muy amplio de documentos. Estos no son trámites burocráticos, sino elementos integrales del sistema de aseguramiento de la calidad y cumplimiento normativo en proyectos de estructuras metálicas. La correcta gestión documental asegura transparencia en el proceso constructivo y brinda confianza tanto a propietarios como a autoridades de que la estructura metálica fue concebida y edificada siguiendo rigurosamente las exigencias técnicas y normativas aplicables.

2.3 Análisis comparativo de normativas nacionales e internacionales

A continuación, se presenta un análisis comparativo entre las principales normativas nacionales colombianas aplicables a estructuras metálicas y algunos de los códigos internacionales más utilizados en diseño y construcción de estructuras de acero. Este análisis se centra en las similitudes y diferencias en alcance, enfoque de diseño, requisitos de materiales, uniones y control de calidad. Las normativas consideradas en el ámbito nacional incluyen el

Reglamento NSR-10 (Título F, estructuras metálicas), el RITE colombiano (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificaciones) y las Normas

Técnicas Colombianas (NTC) de ICONTEC relacionadas. En el contexto internacional, se abordan la Especificación AISC 360-16 (diseño de acero estructural en Estados Unidos), el Código de Soldadura AWS D1.1 (soldadura estructural en acero), el Eurocódigo 3 (EN 1993) de la Unión Europea, y el estándar EN/ISO 1090 para ejecución y marcado CE de estructuras metálicas.

Es importante señalar que, aunque persiguen un objetivo común de seguridad y buen comportamiento estructural, estas normativas provienen de distintas escuelas de ingeniería, lo que se traduce en diferencias en filosofía de diseño, factores de seguridad y procedimientos específicos. Sin embargo, también existen muchos puntos de convergencia gracias al intercambio técnico global y a la adopción de buenas prácticas universales. A continuación, se comparan primero las normativas nacionales entre sí, luego se contrasta con las internacionales, y finalmente se resume en tablas comparativas detalladas.

2.3.1 Normativas nacionales aplicables en Colombia

Reglamento NSR-10 (Título F): Es la norma de carácter legal obligatoria en Colombia para el diseño sismo-resistente de estructuras, incluyendo las de acero. Emitido inicialmente en 2010 (Decreto 926 de 2010) por el Gobierno colombiano, el NSR-10 compila requisitos para diversos materiales; en particular, el Título F elaborado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) cubre estructuras metálicas de acero y aluminio. La NSR-10 Título F abarca desde aspectos de diseño estructural(resistencia, estabilidad, conexiones, fatiga, incendio, corrosión) , hasta fabricación y montaje (tolerancias, procedimientos) y control de calidad, incluyendo provisiones sismorresistentes especiales (detallado dúctil) en su Capítulo F.3. Por su carácter integral y prescriptivo, el NSR-10 es la referencia principal para cualquier proyecto en Colombia; todos los demás estándares nacionales o internacionales suelen usarse en complemento o como referencia, pero no pueden contradecir las exigencias mínimas del NSR-10.

Reglamento RITE (Instalaciones Térmicas): El Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificaciones (RITE), si bien no se enfoca en estructuras portantes, es una normativa nacional relevante para proyectos de edificación en general. Su objetivo es establecer requisitos de eficiencia energética, confort térmico y seguridad en las instalaciones de climatización y ventilación de los edificios (CCEE, 2017). En el contexto de estructuras metálicas, el RITE influye indirectamente en aspectos como la necesidad de aislamientos térmicos en cubiertas

metálicas, ventilación de espacios bajo techo, etc., lo cual puede repercutir en decisiones de diseño (por ejemplo, cargas de aislamiento sobre la estructura, o disposiciones para soportar equipos de aire acondicionado). Además, el cumplimiento del RITE suele ser requerido en proyectos integrales para obtener certificaciones o aprobaciones en materia de energía. En contraste con la NSR-10, el RITE no tiene implicaciones resistentes, pero sí normativas complementarias que un proyectista debe tener en cuenta para que la edificación completa esté conforme a todas las reglamentaciones colombianas vigentes.

Normas Técnicas Colombianas (NTC ICONTEC): Colombia, a través de ICONTEC, dispone de una serie de normas técnicas sectoriales que desarrollan con mayor detalle ciertos aspectos no completamente cubiertos en el NSR o que sirven de guías especializadas. En el campo de las estructuras metálicas, destacan varias NTC del Comité 114 de Estructuras Metálicas, por ejemplo:

- NTC 5832 (2021) – Prácticas estándar para edificios y puentes de acero. Es una adopción modificada de la norma AISC 303-16 (Code of Standard Practice). Cubre lineamientos sobre responsabilidades en diseño, revisión de planos, tolerancias de fabricación y montaje, etc. La NSR-10 la cita como referencia obligatoria para la preparación de planos y especificaciones.

- NTC 3357 – Métodos de ensayo para materiales metálicos. Define ensayos mecánicos para productos de acero, garantizando que los elementos estructurales cumplan estándares de resistencia y ductilidad.

- NTC 3358 – (Posiblemente relacionada a estructuras de acero; sin embargo, existe ambigüedad en su contenido real). Algunas fuentes la señalan como una especificación de requisitos técnicos para estructuras de acero (diseño, fabricación, montaje), aunque otras referencias vinculan ese número con normas de tuberías plásticas. Es posible que haya habido una reinterpretación o actualización; en cualquier caso, ICONTEC cuenta con normas de requisitos para estructuras de acero que complementan la NSR.

- NTC 3849 – Directrices para el diseño y construcción de estructuras metálicas. Esta norma proporciona criterios adicionales para garantizar estabilidad y seguridad en estructuras de acero, posiblemente alineada con recomendaciones internacionales.

- Otras NTC relevantes incluyen especificaciones para perfiles conformados en frío, galvanizados, normas de protección anticorrosiva, etc., que se aplican si el proyecto lo amerita (por ejemplo, la NTC 5689 sobre galvanización en caliente de elementos de acero estructural).

Un aspecto importante es que las NTC de ICONTEC no son de cumplimiento legal obligatorio a menos que sean referenciadas por un reglamento (como la NSR) o incluidas en un contrato. Sin embargo, suelen adoptarse voluntariamente como buenas prácticas. Por ejemplo, un constructor serio seguirá NTC 5832 aunque no hubiese una "policía" que lo obligue, porque sabe que es la forma correcta de documentar y proceder en obra. En resumen, las normas técnicas colombianas son un complemento valioso: proporcionan el detalle fino y actualizado de estándares específicos, asegurando que el proyecto en acero se ejecute con las mismas buenas prácticas reconocidas internacionalmente adaptadas al medio local.

2.3.2 Normativas internacionales relevantes

Especificación AISC 360-16 (USA): Publicada por la American Institute of Steel Construction, es la especificación estándar para diseño de edificios de acero estructural en Estados Unidos (AISC, 2016). Este código cubre diseño en estado límite último y servicio,

ofreciendo dos métodos alternativos: LRFD (Load and Resistance Factor Design), que es equivalente al utilizado por la NSR-10, y ASD (Allowable Stress Design), basado en tensiones permisibles. La versión 360-16 incorpora consideraciones modernas como análisis de segunda orden, diseño por estabilidad (método directo), límites de esbeltez para pandeo local similares a los de NSR-10, interacción en miembros compuestos, etc. AISC 360 es una de las referencias más influyentes a nivel mundial; incluso la NSR-10 (2010) tomó mucha de su base de la edición AISC 360-05 y AISC 360-10. Por ende, existe una gran similitud en fórmulas de diseño (p. ej., la resistencia a flexión $\varphi \cdot M_n$ con $\varphi=0.9$ en acero, cálculo de pandeo crítico de columnas con la ecuación de Euler modificada, etc.). Una diferencia es que AISC 360 permite todavía el método ASD (útil en ciertas industrias), mientras NSR-10 solo adoptó LRFD. Además, AISC publica documentos complementarios: el AISC 341 (seismic provisions) para diseño sismorresistente, y guías como el Steel Construction Manual, que son ampliamente usados como apoyo en Colombia. En síntesis, AISC 360 es un código de diseño estructural robusto y completo; su uso internacional se debe a su claridad y a que está respaldado por la extensa investigación estadounidense en acero.

Código AWS D1.1 (Soldadura en acero): Este es el código universal de soldadura estructural en acero de la American Welding Society (AWS, 2015). Cubre tanto requisitos de diseño de soldaduras (grosores, tipo de junta, preparación) como de ejecución (calificación de

soldadores, procedimientos) y criterios de inspección. La NSR-10 lo adopta por referencia para todo lo relativo a soldaduras en estructuras metálicas, y de igual modo muchos códigos internacionales (p. ej., en Latinoamérica es común usar D1.1 por defecto). AWS D1.1 edita periódicamente nuevas versiones (2010, 2015, 2020); la esencia se mantiene, actualizando por ejemplo normas de consumibles o técnicas de inspección. Cabe destacar que AWS D1.1 se enfoca en acero al carbono de construcción; para aluminio existe AWS D1.2 y para acero inoxidable D1.6, etc., pero en estructuras edificadas el 99% es acero al carbono. En comparación con normas europeas, AWS D1.1 es más prescriptiva en cómo realizar la soldadura, mientras que en Europa se usan estándares EN que definen niveles de calidad (e.g. EN ISO 5817) y se requiere el cumplimiento de ISO 3834 en talleres (calidad en soldadura). Aun así, en términos de criterios de aceptación de soldaduras (poros, inclusiones, etc.) los resultados son equivalentes; simplemente difieren en la forma de presentación. En el contexto internacional, AWS D1.1 es sinónimo de confiabilidad en soldadura, por eso incluso proyectos diseñados con Eurocódigo a veces especifican “Soldadura según AWS D1.1” para aprovechar la familiaridad global con este estándar.

Eurocódigo 3 (EN 1993): Es la norma europea para diseño de estructuras de acero, parte de la familia de Eurocódigos desarrollados por el Comité Europeo de Normalización (CEN). La versión base fue aprobada en 2005-2006, con subsecuentes actualizaciones y Anejos Nacionales

por país. El Eurocódigo 3 (EC3) emplea el método de los estados límite con factores parciales de seguridad: las acciones (cargas) se incrementan por factores >1 (definidos en Eurocódigo 0 y 1), y las resistencias de los materiales se reducen por factores parciales γ_M. Típicamente, para acero estructural, γ_M0 = 1.0 (estado límite último de secciones) y γ_M1 = 1.0 o 1.1 (pandeo flexional u otros inestables), dependiendo del país. Esto resulta en que la filosofía final es similar a LRFD, con un nivel de seguridad equivalente (φ ~ 0.9 en AISC vs 1/γ_M ~ 0.91 en EC3, de forma simplificada). El Eurocódigo 3 se compone de múltiples partes especializadas: EN 1993-1-1 (reglas generales y edificios), EN 1993-1-8 (diseño de uniones), EN 1993-1-10 (tenacidad y fatiga), EN 1993-2 (puentes), etc. Una diferencia notable es que EC3 enfatiza la clasificación de secciones en 4 clases (1 plástico, 2 compacto, 3 semi- compacto, 4 esbelto), lo cual es análogo al concepto de secciones compactas/no compactas/esbeltas en AISC pero con un tratamiento matemático distinto. Además, para diseño sismorresistente, Europa utiliza el Eurocódigo 8, que en su Parte 1-1 define los requisitos de ductilidad para estructuras de acero (clases de ductilidad DCM, DCH equivalentes a diseños de ductilidad moderada y alta). En estos aspectos, la NSR-10 y AISC 341 tienen filosofías parecidas (asegurar jerarquía de resistencias, factores de comportamiento Q o R, etc.). En conclusión, el Eurocódigo 3 representa la visión unificada europea: es más general ya que debe adaptarse mediante Anejo Nacional a cada país (cada país establece ciertos valores, p. ej. sobre esfuerzos de fluencia del acero, si 235 MPa o 275 MPa base), pero garantiza un nivel común de seguridad. Su terminología y método difieren

ligeramente de la americana, pero ambos se basan en los mismos principios de mecánica y probabilidad.

Norma EN 1090 (ISO 1090): El estándar EN 1090 de la UE (partes 1, 2 y 3) aborda la ejecución de estructuras de acero y aluminio, incluyendo requisitos de control de producción en fábrica. La EN 1090-1 establece la necesidad de marcado CE de componentes estructurales metálicos; la EN 1090-2:2018 es la parte que contiene los requisitos técnicos de fabricación y montaje en acero (calidad de soldaduras, tolerancias, etc.). Esta norma está ligada a la ISO 3834 (sistema de calidad en soldadura) y clasifica las estructuras en clases de ejecución EXC1 a EXC4 según las consecuencias en caso de falla (por ejemplo, EXC4 para puentes grandes, EXC2 para edificios corrientes). Comparada con AWS/AISC, la EN 1090 es más exigente en el sentido de requerir que los fabricantes estén certificados (en Europa, un taller debe tener certificación EN 1090 para vender estructuras con marcado CE). Los requisitos técnicos en sí son similares: por ejemplo, define categorías de calidad de soldadura equivalentes a las de AWS (B, C correspondientes a niveles de exigencia de acabados), especifica la necesidad de personal cualificado (soldadores certificados ISO 9606, equivalentes a AWS), inspección de soldaduras según ISO 17637, etc. Para un proyecto colombiano, la EN 1090 no es aplicable legalmente, pero algunos inversionistas internacionales pueden pedir cumplimiento voluntario para asegurar calidad exportable. En el comparativo general, EN 1090 y AWS D1.1 buscan lo mismo (buenas

soldaduras y estructuras bien fabricadas), con diferencias principalmente en el modelo de aseguramiento (certificación obligatoria en Europa vs. certificación voluntaria tipo AISC/Fabricator's certification en EE.UU.).

Finalmente, existen otras normativas internacionales especializadas que a veces se consideran: por ejemplo, normas ISO para cargas de grúas sobre estructuras, guías de diseño de la CIDECT para estructuras tubulares, etc. No obstante, las analizadas arriba (AISC, AWS, Eurocódigo, EN 1090) son las de uso más extendido y cobertura más general.

2.3.3 Cuadro comparativo de normativas (Colombia vs. internacionales)

A continuación, se presentan tablas comparativas que resumen las características clave de las normativas nacionales vs. internacionales discutidas. La Tabla 2 compara los principales códigos de diseño estructural (NSR-10, AISC 360-16 y Eurocódigo 3), mientras que la Tabla 2.3 compara las normativas de fabricación y calidad (ICONTEC/AISC vs. AWS D1.1 vs. EN 1090) aplicables a estructuras metálicas. Estas tablas permiten visualizar de forma sintética las diferencias y similitudes en aspectos como ámbito de aplicación, filosofía de diseño, requisitos de materiales, consideraciones sísmicas y exigencias de control de calidad en cada normativa.

Tabla 2.

Comparación de normativas de diseño estructural en acero – Colombia vs. USA vs. Europa)

Aspecto	NSR-10 (Colombia)	AISC 360-16 (EE.UU.)	Eurocódigo 3 (Europa)
Organismo / Carácter	Reglamento legal nacional (MinVivienda, elaborado por AIS). Obligatorio por ley en edificaciones sismo-resistentes.	Especificación técnica privada (AISC). Adoptada voluntariamente o por referencia (ej. por código internacional o proyectos específicos).	Norma técnica europea (CEN). Adoptada por los países UE vía legislación; obligatorio para proyectos con marcado CE.
Edición vigente	NSR-10 del 2010 (Título F). *Nota:* Actualización en proceso (NSR-22 aún pendiente promulgación a 2025).	ANSI/AISC 360-16 (2016). Reemplaza ediciones previas (360-10, 360-05). Versión más nueva 360-22 (2022) disponible.	EN 1993-1-1:2005 (con Amend. 2015) y partes relacionadas (1-8 uniones, etc.). Revisión en marcha hacia Eurocódigo 3 segunda generación (~2025).
Filosofía de diseño	Estados Límite (últimos y servicio) con método LRFD principalmente. No contempla ASD. Resistencia de diseño $\varphi \cdot R_n \geq U$ (φ típicos 0.9 flexión, 0.75 corte, etc.). Incluye requisitos de *capacidad* para eventos sísmicos (diseño basado en capacidad).	Estados Límite Últimos y de Servicio. Ofrece LRFD (φ-factores) y ASD (tensiones admisibles) como alternativas. LRFD calibrado con φ similares a NSR (φ=0.9 flexión). En sismo requiere usar estándar separado	Estados Límite Últimos/Servicio con **factores parciales**. Cargas mayoradas ($\gamma_f \approx$ 1.35 DL, 1.5 LL, etc.), resistencias reducidas (γ_{M0} = 1.0, γ_{M1} = 1.0/1.1). Secciones clasificadas en 4 clases (plástico,

Aspecto	NSR-10 (Colombia)	AISC 360-16 (EE.UU.)	Eurocódigo 3 (Europa)
		(AISC 341) con diseño por capacidad.	compacto, no compacto, esbelto) para determinar método de cálculo. Diseño sísmico tratado en Eurocódigo 8 (ductilidad moderada/alta según disipación requerida).
Materiales y secciones	Basado en aceros ASTM (A36, A572 Gr50, A992, etc.). Fy típicos 248MPa, 345MPa. Secciones hot-rolled tipo W, HP, ángulos, tubulares ASTM. Permite aluminio (Cap. F.1) y cold-formed steel (Cap. F.4) con referencia a normas específicas.	Aceros ASTM (mismos que NSR). Fy 50 ksi ~345MPa común. Secciones W, M, S, HP, L, C estándar AISC. Incluye diseño de miembros compuestos acero-concreto. Tiene capítulo para cold-formed (remite a AISI).	Aceros EN 10025 (S235, S275, **S355** MPa más usado, S460 en puentes). Secciones IPE, HE, UPN, ángulos según EURONORM; tubos según EN 10210/10219. Incluye acero conformado en frío (parte 1-3) y acero inoxidable (1-4), aluminio cubierto en Eurocódigo 9 aparte.
Cargas y combinaciones	Título A NSR-10 define combinaciones (muy similar a ASCE 7 de EE.UU.). Ej: 1.4DL; 1.2DL+1.5LL+...+1.0EQ, etc. Considera reducción por participación sísmica (factor 0.9 en combinaciones de sismo con DL).	Referencia ASCE 7-16 para cargas y combinaciones. LRFD combos: 1.2D+1.6L, 1.2D+1.0E+0.5L, etc. ASD combos: (D+L, D+E, etc. con factores 0.6 en E).	Eurocódigo 0 y 1 establecen combinaciones: ej. 1.35G + 1.5Q (persistente); para sismo Eurocódigo 8 define ψ factors para carga viva. Combos típicos:

Aspecto	NSR-10 (Colombia)	AISC 360-16 (EE.UU.)	Eurocódigo 3 (Europa)
		Las combinaciones en sí no están dentro de AISC 360 sino en códigos de cargas.	1.0G+0.3Q±E (sísmico), etc., según criterios de combinación cuasi-permanente y frecuentes.
Diseño sísmico	Muy integrado: *Título F.3* con requisitos especiales para SMF, SCBF, EBF, etc. Coeficiente R dependiente del sistema (Tabla en Título A). Exige detallado ductil: zonas fusibles, soldaduras con CVN, restricciones geométricas (p.ej. esbeltez barras de arriostre) acordes con AISC 341/358. Supervisión técnica obligatoria en estructuras de cierta importancia.	AISC 360 por sí solo no cubre ductilidad sísmica; se complementa con **AISC 341** (Seismic Provisions) y AISC 358 (conexiones precalificadas) para proyectos en zonas sísmicas en EE.UU. Usa R (response modification factor) definido en ASCE 7. Requisitos de detallado ductil (p.ej. limitación de λpf miembros, continuidad de patines, soldaduras de alta tenacidad) están en AISC 341, similares a NSR-10.	Eurocódigo 3 se usa con **Eurocódigo 8** parte 1 para sismo. Define clases de ductilidad: DCL (baja, sin requisitos especiales), DCM (moderada) y DCH (alta ductilidad). Impone factores q (similar a R) y detalles como capacidad de rotación plástica en nudos, requisitos de sección llena en soldaduras, etc. Menor énfasis en calificación experimental de conexiones (no hay "prequalified", se aplican requisitos genéricos). Los países pueden elegir si aplicar DCH o no según su sismicidad.
Uniones (diseño)	Admite conexiones soldadas y atornilladas. Remite a	AISC 360 tiene capítulo J	EC3-1-8 cubre diseño de uniones:

Aspecto	NSR-10 (Colombia)	AISC 360-16 (EE.UU.)	Eurocódigo 3 (Europa)
	estándares: soldadura según AWS D1.1, pernos ASTM A325/A490 con montaje según RCSC. Incluye criterios para diseñar conexiones simples vs. rígidas y requiere que planos indiquen los casos especiales (ej. exigir CVN en soldaduras críticas, longitudes de desarrollo). Muchas provisiones derivan de AISC 360-05 Cap. J y AISC 341 (p.ej. soldaduras de continuidad, placas de refuerzo en nodos).	"Connections" con métodos de diseño (bloque de cortante en chapas, resistencia de tornillos por cortante y bearing, soldaduras de filete etc.). Emplea RCSC (Spec for Structural Joints) para pernos de alta resistencia. Conexiones a momento: capacidad según métodos factor de resistencia o mediante 358 si sísmico. Uso amplio de placas end plate, conexiones empernadas deslizantes, etc.	métodos de componente (component method) para conexiones atornilladas de momento (calculando rigidez y resistencia a partir de componentes como patín en tracción, alma al cortante, etc.). Tornillos a fricción (pretensados) clasificados según clases de comportamiento. Soldaduras: verificación por resistencias nominales similares (fillet weld: depende garganta y fu). Normativa europea tiende a mayor uso de tornillos pretensados vs. soldadura in situ.
Control de calidad	Muy exigente: F.2.14 NSR-10 obliga Plan de Calidad, inspectores calificados, ensayos no destructivos obligatorios (UT en soldaduras críticas, etc.). Fabricadores certificados	AISC 360 capítulo N habla de calidad e inspección: exige en proyectos con exigencia sísmica contratar un **Inspector Especial**	Eurocódigo delega a EN 1090 la parte de ejecución. Bajo EN 1090, para lograr el marcado CE, el fabricante debe implementar

Aspecto	NSR-10 (Colombia)	AISC 360-16 (EE.UU.)	Eurocódigo 3 (Europa)
	recomendados (no obligatorio legal, pero se menciona en NSR). Documentación exhaustiva de QC a entregar.	certificado (ICC Special Inspector). AISC y AWS tienen programas voluntarios de certificación de fabricantes (AISC Certified Fabricator) pero no es exigencia de código salvo que el dueño lo pida. Criterios de inspección visual y NDT están en AWS D1.1 para soldadura y en RCSC para pernos (prueba de torque).	**Control de Producción en Fábrica (FPC)** certificado por entidad externa. Dependiendo de la clase de ejecución (EXC), se definen niveles de inspección: por ejemplo, EXC3 requiere ciertos porcentajes de ultrasonido en soldaduras, similar a NSR. Inspectores de soldadura deben cumplir ISO 9712 (niveles II/III). En esencia, calidad de soldadura según ISO 3834.

Nota. Adaptado de diversas fuentes documentales

Tabla 3.

Comparación de normativas de fabricación, soldadura y montaje – ICONTEC/AISC vs. AWS D1.1 vs. EN 1090

Aspecto	Colombia/ICONTEC/AISC	AWS D1.1 (Internacional)	EN 1090 / ISO (Europa)
Alcance	Normas ICONTEC y prácticas AISC cubren: fabricación en taller (corte, armado, soldadura, agujereado), montaje en obra (erección, alineación, pernos). Ej: NTC 5832 "Prácticas estándar" da lineamientos generales de responsabilidades y tolerancias. NSR-10 especifica en F.2.13 requisitos de procesos (soldar con electrodos identificados, tolerancias angulares de columnas, etc.).	AWS D1.1 es un código de soldadura estructural: se centra en unión soldada (precalificación WPS, calificación soldadores, criterios inspección). No cubre pernos ni montaje (eso es RCSC/AISC). AISC 303 (Code of Standard Practice) complementa: responsabilidades en planos, tolerancias de plomada, etc.	EN 1090-2 abarca la **ejecución completa**: desde compras de acero, corte, armado, soldadura, tratamiento superficial, transporte y montaje. Incluye tolerancias de fabricación (alineación, angulación) y de montaje (desviaciones admisibles en luces, verticalidad). Es más holístico y obligatorio para CE.
Clasificación de calidad	NSR-10 no clasifica "clases" formales de ejecución, pero establece que para estructuras importantes se tomen medidas más estrictas (ej. más inspección). AISC 303 no impone clases; usualmente el propio contrato define si es "fractura crítica" o no (p.ej. puentes fractura crítica siguen AWS D1.5 con más requisitos).	AWS D1.1 define "categorías de servicio" en soldadura (por ejemplo, demanda crítica vs estática) para ajustar criterios (ej. mayor tenacidad CVN para demandas cíclicas). No hay clases globales, pero sí distinciones en función de uso de la unión.	EN 1090 establece **Clases de Ejecución EXC1 a EXC4**. Estructuras simples (EXC1: galpones pequeños), usual (EXC2: edificios), importante (EXC3: edificios públicos grandes, estructuras con alta solicitación), especial (EXC4: puentes atirantados, infraestructura crítica). Cada EXC escala las exigencias

Aspecto	Colombia/ICONTEC/AISC	AWS D1.1 (Internacional)	EN 1090 / ISO (Europa)
			de control (soldador ISO 9606 en EXC2+; inspector de soldadura externo en EXC3+; 100% UT en soldaduras a tope EXC3+ en ciertas zonas, etc.).
Soldadura – Procedimientos	Normativa local vía NSR/AWS: Se usan WPS conforme AWS D1.1. Procedimientos **precalificados** permitidos (si cumplen restricciones AWS). Otros requieren calificación (PQR). ICONTEC no tiene código propio de soldadura, se adopta AWS. AISC 303 sugiere que fabricante prepare WPS y el ingeniero puede revisarlos.	AWS D1.1 proporciona listado de WPS precalificados (por proceso, junta, material). Si se sigue al pie de la letra (ángulo bisel, gap, etc.), no se requiere PQR. Para soldaduras fuera de ese rango, debe realizarse PQR con pruebas mecánicas (tracción, doblado, etc.). Soldadores deben pasar pruebas según procedimiento estándar (p. ej. 3G/4G posiciones).	EN 1090/ISO: Refiere a normas ISO 15614-1 (calificación de procedimientos de soldeo) e ISO 9606-1 (calificación de soldadores). No hay "precalificados"; todos los WPS deben cualificarse vía PQR o basarse en una WPQR existente del fabricante. Requiere asimismo especificación de *"Plan de soldeo"* donde se detalla para cada junta: quién suelda, qué WPS, qué inspección.
Soldadura – Criterios de calidad	AWS D1.1 adoptado: criterios de aceptación de discontinuidades según tipo de junta y categoría (visual: poros < porción de área, fisuras prohibidas; UT:	AWS D1.1 clasifica discontinuidades en *reparables vs aceptables* según tablas. Fisuras siempre	EN ISO 5817 es el homólogo: define 3 **niveles de calidad de soldadura** (B = estricta, C = intermedia, D =

Aspecto	Colombia/ICONTEC/AISC	AWS D1.1 (Internacional)	EN 1090 / ISO (Europa)
	amplitud eco < límite tabulado dependiendo espesor y categoría). NSR-10 exige UT en porcentaje de juntas en estructuras sísmicas, usando criterios AWS para evaluar.	inaceptables, porosidad dispersa aceptable hasta cierto diámetro y frecuencia, etc. Criterios calibrados para estructuras estáticamente cargadas y dinámicamente cargadas (demanda crítica). Es un código muy práctico para inspección: muchas construcciones globalmente usan sus tablas.	baja). Para EXC2 suele pedirse nivel de calidad "C" (comparable a AWS D1.1 en exigencia); EXC3 a veces nivel B en soldaduras vitales. Los criterios son similares (tamaños de poro, garganta efectiva, etc.) pero presentados de otra forma. Inspector evalúa según ISO 5817 y 10042 (visual).
Pernos y uniones atornilladas	NSR-10 y AISC remiten a RCSC: pernos A325/A490, instalados snug-tight o pretensionados según categoría. Se exige calibración diaria de método de apriete (turn-of-nut, torque con tablón). Inspección: verificación por método del tensiómetro rotacional o torque en 10% aleatorio. ICONTEC tiene NTC para pernos basada en ASTM.	AWS D1.1 no cubre pernos (solo soldaduras). AISC 360 remite al RCSC "Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts" (últ. ed. 2014) que es la biblia en EE.UU. para montaje de pernos. Establece fuerzas de pretensado (p. ej. 7/8" A325 -> 146 kN), define agujeros estándar, holgados,	Eurocódigo 3-1-8: tornillos de alta resistencia clase 8.8 o 10.9 (similares a A325/A490) pueden usarse sin pretensar o pretensados en uniones de fricción (slip-resistant at service). EN 1090-2 indica calibrar método (similar turn-of-nut llamado "método de giro controlado"). Inspección: 100% visual marcar

Aspecto	Colombia/ICONTEC/AISC	AWS D1.1 (Internacional)	EN 1090 / ISO (Europa)
		sobredimensionados, y resistencias a cortante y bearing.	tornillos, y controles de torque aleatorios. La filosofía es equiparable, aunque la terminología difiere (cat. de agujero: normal, ampliado, agujero largo redondo u oblongo).
Protección anticorrosiva	NSR-10 Título F menciona que si estructura expuesta a ambiente agresivo, considerar corrosión en diseño. No dicta método, pero usual: galvanizado por inmersión (NTC ISO 1461 adoptada) o pinturas estándar. AISC 303 sugiere acuerdo contratista-propietario sobre pintar o no miembros (en interior seco a veces se deja sin pintar). ICONTEC: NTC 1333 (pinturas), NTC 3351 (galvanizado).	AWS D1.1 no toca este tema (solo soldadura). AISC y SSPC (Society for Protective Coatings) publican estándares: SSPC-SP para preparación de superficies (SP-6 cleaning, etc.), y especificaciones de pinturas. En EE.UU. típicamente se usa **shop primer** en taller y luego sistema de pintura en campo según especificación del proyecto. Galvanizado según ASTM A123.	EN 1090-2 sí dedica apartado a **protección de superficies**. Exige que, si no se define en proyecto, al menos se dé protección temporal para transporte. Define calidades de preparación (Sa 2½ por chorreado, etc.). Apunta a usar normas ISO 12944 de sistemas de pintura según categoría de corrosividad del ambiente (C3, C4, C5…). Galvanizado: EN ISO 1461 también. La UE insiste en durabilidad, llegando a pedir planes de

Aspecto	Colombia/ICONTEC/AISC	AWS D1.1 (Internacional)	EN 1090 / ISO (Europa)
			mantenimiento para ciertas estructuras.

Nota. Adaptado de diversas fuentes documentales

Como se aprecia en las tablas, Colombia, a través de la NSR-10 y normas ICONTEC, ha alineado sus requisitos con las prácticas internacionales, especialmente con la escuela americana (AISC/AWS). Las diferencias con el Eurocódigo son más de forma que de fondo, dado que ambos enfoques buscan niveles de seguridad semejantes. Un punto a destacar es que la NSR-10 incorpora en su reglamento algunos controles de calidad (por ejemplo, ultrasonidos obligatorios) que en otros lugares dependen más del criterio del proyectista o de normas complementarias; esto refleja la importancia dada en Colombia a la construcción sismo-resistente y a garantizar que la ejecución no quede rezagada respecto al diseño en términos de rigurosidad.

2.4 Enfoque en los requisitos específicos del NSR-10 Título F (Colombia)

Dado que el Reglamento Colombiano NSR-10 Título F es la piedra angular de la regulación de estructuras metálicas en el país, se profundiza a continuación en algunos de sus requisitos específicos y particulares, enfatizando cómo abordan la seguridad estructural en el contexto sismorresistente colombiano.

Alcance y aplicabilidad: El Título F se aplica a todas las estructuras de acero estructural en edificaciones u otras construcciones en Colombia, con excepción de aquellas cubiertas por normas especiales (por ejemplo, tanques, recipientes a presión, que tienen otros códigos). Incluye miembros conformados por perfiles laminados en caliente, perfiles soldados (armados) y tubería estructural. También abarca el diseño con aluminio estructural (Cap. F.1) y el diseño con acero conformado en frío (Cap. F.4), aunque el grueso del título se centra en el acero tradicional. Es decir, prácticamente cualquier proyecto que use acero como material resistente principal debe seguir Título F, desde un edificio de oficinas hasta una nave industrial o una pasarela peatonal.

Integración con diseño sísmico: Un aspecto sobresaliente del Título F es su integración total con la filosofía de diseño sismo-resistente del reglamento colombiano. A diferencia de algunos códigos donde las consideraciones sísmicas están separadas, en NSR-10 Título F las disposiciones sísmicas especiales están incluidas y son de cumplimiento obligatorio según la zona sísmica y la categoría de la estructura. Por ejemplo, para una estructura en zona de amenaza sísmica alta (zona 3 o 4, según NSR-10) y de uso importante (digamos un edificio hospitalario, categoría de importancia IV), no es opcional adoptar detalles ductiles: el Capítulo F.3 impone que se usen sistemas estructurales aprobados (pórticos resistentes a momento especiales, arriostres concéntricos especiales, etc.) con todos los requisitos de detallado. Entre estos

requisitos figuran: relaciones de resistencia mínimo 1.25 en conexiones de momento (sobrerresistencia en columnas para prevenir mecanismos de piso blando), enlaces en arriostres excéntricos dimensionados para deformarse inelásticamente (y el resto diseñado a sobre-resistencia), longitud de soldaduras y patines continuos a través de nodos, etc. Muchos de estos están inspirados en AISC 341, pero NSR-10 los ha adoptado con sus propios matices y en español, facilitando su aplicación local.

Calidad de materiales y tenacidad: La NSR-10 Título F introduce requisitos para asegurar la tenacidad del acero en condiciones demandantes, algo que no todos los códigos de otros países incluyen explícitamente. Por ejemplo, define qué se considera un “perfil laminado pesado” (flanges > 51 mm) y exige que, si se va a soldar a tope, ese perfil venga con garantía de tenacidad Charpy V-Notch (CVN) mínima de 27 J a 21°C. Esto proviene de lecciones de terremotos pasados (Northridge 1994, etc.), donde se halló que aceros muy gruesos sin suficiente tenacidad podían fisurarse en las conexiones. La NSR-10 plasmó ese requisito en F.2.1.5.1.3 y F.2.1.5.1.4, obligando a los proveedores a suministrar acero certificado con prueba Charpy en ciertos casos. Este nivel de detalle no es común en muchos reglamentos nacionales de otros países, y destaca la orientación de NSR-10 hacia garantizar ductilidad y prevenir fallas frágiles. Del mismo modo, se prohíbe usar soldaduras de penetración parcial en conexiones de momento a

menos que se justifique cuidadosamente, y se piden chaflanes y cordones de continuidad para "suavizar" transferencias de esfuerzo en nudos.

Requisitos de documentación y revisión: Como se discutió en secciones previas, la NSR-10 exige la presentación y revisión de planos de taller y documentos de calidad antes de su ejecución. Esta medida, contemplada en F.2.14.3, busca involucrar al diseñador estructural durante la fabricación/montaje, cerrando el círculo de diseño-ejecución. En otros países, una vez entregados los planos de diseño, el fabricante procede por su cuenta; en Colombia, al menos normativamente, se establece este paso intermedio de control de documentos. Si bien en la práctica puede variar el grado de involucramiento, el hecho de estar en la norma le da herramienta al diseñador para pedir cambios si detecta en los planos de taller algo inadecuado. Esto eleva la calidad final, evitando improvisaciones de taller que comprometieran la seguridad.

Supervisión técnica independiente: La NSR-10 introduce la figura de la supervisión técnica (además del control de calidad interno). Para ciertas construcciones (generalmente de gran tamaño o importancia, definidas en Título A y F), se requiere que haya un supervisor técnico distinto al constructor, encargado de velar por el cumplimiento del programa de calidad. Este supervisor se enfoca especialmente en la ejecución de ensayos no destructivos y en validar que el control de calidad del fabricante/montador es efectivo. Incluso, el numeral F.2.14.7

sugiere que fabricantes o montadores que cuenten con certificaciones reconocidas (por ejemplo certificado AISC o ISO) y demuestren amplia capacidad, podrían eventualmente asumir partes de la supervisión técnica ellos mismos, sujeto a aprobación del diseñador. Esto muestra cierta flexibilidad: se reconoce que un contratista altamente calificado puede autocontrolarse bien, pero se deja la puerta abierta a exigir supervisores externos en proyectos donde la vida humana o el patrimonio están seriamente en juego (p. ej. estadios, puentes urbanos concurridos, edificios esenciales).

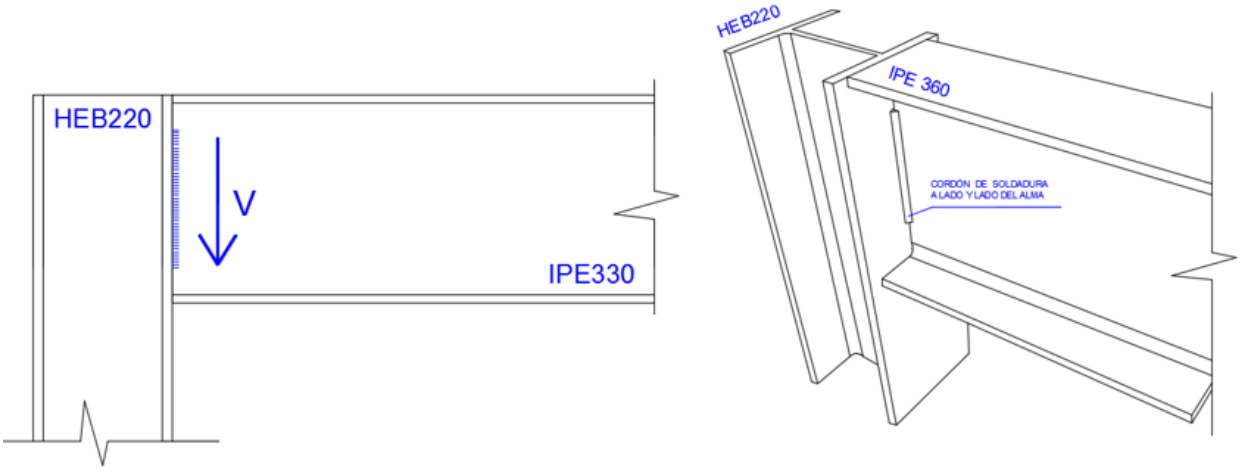
Compatibilidad con concreto (anclajes y construcción mixta): El Título F no olvida que muchas estructuras metálicas se funden con elementos de concreto (cimientos, losas de entrepiso colaborantes, etc.). Por ello, tiene apartados como F.2.2.3.13 para diseño de anclajes a concreto, remitiendo a ACI 318 App.D (norma de concreto) para cálculos de pernos de anclaje embebidos. También trata sobre conectores de cortante para losas compuestas (studs), exigiendo seguir fórmulas de capacidad y modos de falla (corte por vástago, aplastamiento en losa) y la distribución mínima por norma. Esta integración es vital en edificios donde la rigidez de diafragmas de concreto y la interacción acero-concreto definen el comportamiento sísmico.

Protección contra incendios: Aunque el Título J de NSR-10 cubre la seguridad contra incendios en edificaciones, el Título F menciona que, si se requiere resistencia al fuego, el diseño

debe considerar protecciones (pinturas intumescentes, enfoscados) y cargas térmicas. No da métodos (se suele usar el estándar internacional, p. ej. UL designs o Eurocódigo 3-1-2 para verificar miembros bajo fuego), pero alerta al diseñador que debe contemplarlo. En Colombia, edificios de gran altura en acero llevan protección pasiva contra fuego para cumplir las resistencias al fuego de la norma de incendios (2 horas típica para edificios altos), lo cual implica un peso extra y un espesor que se añade a las secciones de acero – información que debe aparecer en planos.

Figura 1.

Unión viga–columna soldada (ejemplo de “unión articulada” según AISC 360).



La figura muestra una unión soldada articulada entre una viga IPE330 y una columna HEB220, dimensionada según AISC 360 para transferir únicamente el cortante (V) mediante una placa/cordón de soldadura en el alma. Esta geometría constituye el punto de partida para comprender los requisitos técnicos y documentales descritos en el Capítulo 2: selección de materiales normalizados (aceros ASTM), elaboración de planos de detalle y WPS certificados (AWS D1.1) y verificación de soldaduras mediante inspección visual y ensayos no destructivos cuando corresponda (AIS, 2010; AISC, 2016; AWS, 2015).

Ahora bien, para que esta conexión cumpla las exigencias de un pórtico especial en zona sísmica alta conforme a la NSR-10 Título F, debe transformarse en una conexión a momento dúctil. Ello implica agregar: (i) soldaduras de penetración completa en los patines viga–columna, (ii) placas de continuidad (stiffeners) en el alma de la columna para confinar el panel de cortante y evitar pandeo local, (iii) control de tenacidad Charpy en perfiles gruesos, y (iv) documentación de calidad (planos aprobados, WPS/PQR/WPQ, registros END) que evidencie la jerarquía de resistencias y la capacidad de rotación inelástica requerida.

Capítulo 3. Parámetros de inspección para la ejecución de proyectos de estructuras metálicas

3.1 Introducción y marco normativo

En la construcción de estructuras metálicas en Colombia es fundamental establecer parámetros rigurosos de inspección durante la ejecución de proyectos, con el fin de garantizar la calidad y seguridad de las edificaciones industriales, residenciales e institucionales. La Norma Sismo Resistente NSR-10, particularmente en su Título F, proporciona los requisitos mínimos de diseño y construcción para estructuras de acero, incluyendo criterios de inspección y control de calidad. Adicionalmente, estándares internacionales como la Especificación AISC 360-16 (American Institute of Steel Construction) y el Código de Soldadura Estructural AWS D1.1/D1.1M (American Welding Society) complementan las directrices nacionales, alineando las prácticas locales con las mejores prácticas globales en fabricación y montaje de estructuras de acero. En este capítulo se aborda un enfoque integral de los parámetros de inspección, abarcando edificaciones industriales, residenciales e institucionales, enfatizando cómo las normativas aplicables y los criterios técnicos aseguran la calidad en cada tipo de proyecto.

3.1.1 Normativa colombiana aplicable (NSR-10 Título F)

La NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010) establece en el Título F: Estructuras Metálicas los lineamientos para diseño, construcción e inspección de estructuras de acero. Este título abarca aspectos desde las propiedades de los materiales hasta los procedimientos de construcción y criterios de aceptación en obra. En particular, el Capítulo F.2 de la NSR-10 incluye requisitos detallados sobre soldaduras, conexiones pernadas, montaje y calidad de materiales, junto con responsabilidades de los diferentes actores (diseñador, constructor, interventor, etc.). Es importante destacar que, según la NSR-10, la certificación de las estructuras metálicas es obligatoria, involucrando tanto el cumplimiento del diseño sismorresistente como la verificación técnica durante la construcción. Asimismo, la NSR-10 Título I (Supervisión Técnica) complementa al Título F al definir las competencias y obligaciones de la interventoría y la supervisión técnica para asegurar el cumplimiento normativo en proyectos metálicos.

Dentro de la NSR-10 Título F se especifica que las soldaduras deben realizarse conforme al código AWS D1.1, y las conexiones atornilladas deben seguir las Especificaciones RCSC para pernos de alta resistencia. El reglamento exige la implementación de un plan de inspección que cubra desde la recepción de materiales hasta la inspección final de la estructura terminada, todo

ello documentado y avalado por profesionales calificados. Por ejemplo, la norma demanda que antes de colocar el concreto, el supervisor técnico verifique los pernos de anclaje embebidos, comprobando diámetro, material, tipo y longitud según planos. Además, se establecen tablas de chequeo con tareas específicas que el inspector de calidad y el supervisor técnico deben realizar en distintas etapas (antes, durante y después de la soldadura; antes, durante y después de la instalación de pernos). Esta estructura normativa garantiza que cada actividad crítica tenga controles previos y posteriores, evitando desviaciones de calidad. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015; Research Council on Structural Connections, 2014).

3.1.2 Estándares internacionales (AISC 360-16, AWS D1.1 y otros)

Paralelamente a la normativa colombiana, los estándares internacionales brindan un marco de referencia para buenas prácticas en inspección de estructuras metálicas. La Especificación AISC 360-16 (ANSI/AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings) incluye el Capítulo N: Quality Control and Quality Assurance, donde se definen requerimientos mínimos de control de calidad (QC) por parte del constructor y aseguramiento de calidad (QA) por parte del propietario o su representante. Este capítulo establece tareas de inspección obligatorias, distinguiendo entre inspecciones de observación aleatoria y de ejecución en cada elemento, terminología equivalente a la usada en la NSR-10 (O = Observar aleatoriamente, P = Practicar en cada junta). En términos generales, AISC 360-16 exige que todos los soldadores

estén calificados, que el fabricante y el montador implementen programas documentados de calidad, y que se realicen inspecciones visuales y ensayos no destructivos de acuerdo con el riesgo del proyecto (por ejemplo, inspecciones más rigurosas para estructuras sísmicas de mayor importancia). Cabe resaltar que la AISC 360-16 remite a los criterios de inspección de AWS D1.1 para soldaduras y al RCSC (Research Council on Structural Connections) para pernos de alta resistencia, los mismos códigos que la NSR-10 adopta por referencia, lo cual demuestra la alineación entre la normativa colombiana y las prácticas internacionales.

El AWS D1.1/D1.1M – Structural Welding Code (Steel), por su parte, es la norma base para soldadura estructural. Estipula requisitos desde la calificación de procedimientos de soldadura (WPS) y soldadores, hasta los criterios de aceptación por inspección visual y métodos de ensayos no destructivos (END) para distintos tipos de juntas. La NSR-10 Título F exige que "todas las provisiones aplicables de AWS D1.1/D1.1M" sean cumplidas en estructuras de acero, incorporando incluso las tablas de inspección del código AWS. De igual forma, para las conexiones atornilladas, la norma internacional clave es la Especificación RCSC (2014) para el uso de pernos de alta resistencia, que define los métodos de instalación (por ejemplo, apriete por giro de tuerca, uso de tensores directos, calibración de llaves) y las inspecciones necesarias en cada caso. La NSR-10 integra estas directrices; por ejemplo, exime de ciertas inspecciones

cuando se usan métodos de apriete controlado por marcas o tensores directos, y las exige cuando se usan métodos con torquímetros calibrados.

3.1.3 Edificaciones industriales, residenciales e institucionales: enfoque integral

Si bien los criterios de inspección son, en esencia, los mismos (materiales, soldaduras, pernos, alineación, etc.) para cualquier estructura metálica, es relevante considerar las particularidades de diferentes tipos de edificaciones:

- En las edificaciones industriales, suelen emplearse estructuras de gran envergadura (naves, pórticos para grúas viajeras, tanques, entre otros) que implican solicitaciones elevadas y, a menudo, exposición a ambientes agresivos. Por tanto, las inspecciones ponen énfasis en el control de materiales (ej. aceros de alta resistencia, recubrimientos anticorrosivos) y en verificaciones especializadas como ensayos no destructivos en soldaduras críticas y control geométrico de grandes luces. Además, por el carácter de procesos industriales, es común requerir monitoreo continuo de ciertos elementos (vibraciones, deformaciones) durante la operación, integrando sensores para Structural Health Monitoring en etapas tempranas. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015; RS Imper, 2024).

- En las edificaciones residenciales y comerciales, las estructuras metálicas suelen ser aporticadas o de entramados más regulares. Aunque las cargas pueden ser menores que en entornos industriales, la seguridad sísmica es clave, dado que alojan personas. La NSR-10 clasifica los edificios residenciales y de oficinas generalmente en grupos de uso II o III, exigiendo inspecciones sismorresistentes acorde a su importancia. Aquí la inspección hace foco en la correcta ejecución de conexiones viga-columna (ya sean simples o a momento), el aseguramiento de calidad en soldaduras de elementos críticos (por ejemplo, placas de continuidad, soldaduras de momento), y en garantizar la verticalidad y alineación entre pisos. Asimismo, se presta atención al acabado y estética de las uniones soldadas o atornilladas expuestas, según las especificaciones arquitectónicas (pulido de cordones, tornillería oculta, etc.). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- En edificaciones institucionales (como hospitales, escuelas, edificios públicos), suele haber requisitos de desempeño sísmico y continuidad de servicio más estrictos (muchos son del grupo de uso IV, esencial para post-sismo). Esto conlleva inspecciones exhaustivas: todas las juntas de soldadura de penetración completa en elementos primarios pueden requerir ultrasonido al 100%, y los

pernos de anclaje y conexiones base deben ser verificados cuidadosamente dado que la funcionalidad post-evento de la estructura es crítica. Un ejemplo es la construcción de edificaciones educativas en zonas sísmicas: en el proyecto de la Institución Educativa Técnica Gustavo Jiménez (Sogamoso, Boyacá) se implementó un control de calidad intensivo, revisando los insumos de acero y la ejecución de la estructura metálica ya al 50% de avance, para asegurar el cumplimiento de estándares NSR-10 antes de continuar la obra. Este caso real evidenció la importancia de la supervisión técnica integral en todas las etapas, garantizando que cualquier deficiencia en materiales, soldaduras o montaje fuese detectada y corregida a tiempo, evitando comprometer la seguridad final del edificio. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015; Research Council on Structural Connections, 2014).

3.2 Control de materiales y productos

Un pilar fundamental en los parámetros de inspección es el control de calidad de los materiales que conforman la estructura metálica. Este control inicia desde la fabricación y recepción de materiales en obra e involucra verificar que todos los componentes cumplen con las especificaciones de diseño y las normas técnicas aplicables:

- Certificación del acero estructural: Cada lote de perfiles de acero (vigas, columnas, ángulos, tubos) debe venir acompañado de certificados de calidad del molino o proveedor, indicando su composición química, propiedades mecánicas (resistencia mínima, límite de fluencia) y cumplimiento de la norma ASTM correspondiente (por ejemplo, ASTM A36, A572 Gr50, etc.). La NSR-10 (Sección F.2.1.5) exige que el acero estructural utilizado esté identificado con designaciones ASTM reconocidas y prohíbe el uso de acero de origen desconocido sin pruebas adicionales. Durante la inspección, se comprueban estos certificados y se contrastan con los requerimientos del proyecto; el inspector técnico debe revisar los certificados de los materiales conforme a un listado normativo para asegurar que cada perfil, placa o barra roscada cumple las especificaciones de diseño. Si se detecta material fuera de norma (p.ej., resistencia menor a la especificada), este debe ser rechazado o sometido a ensayos de laboratorio para calificar su uso. (AIS, 2010).
- Identificación y trazabilidad: Es importante que cada elemento recibido pueda identificarse claramente con su certificado. En obra, las piezas suelen venir marcadas (con código o calorimetría) según planos de taller. El inspector de calidad verifica que la identificación del material coincida con lo aprobado (grado

de acero, espesor, etc.). Además, se corrobora que no se mezclen aceros de distintas especificaciones si ello puede comprometer la construcción (por ejemplo, no usar pernos ASTM A307 comunes en lugar de A325/A490 de alta resistencia). Una buena práctica es implementar un sistema de trazabilidad donde a cada perfil o placa se le asigna un número de lote y ubicación en la estructura, facilitando el seguimiento en caso de hallarse no conformidades posteriormente. (Research Council on Structural Connections, 2014).

- Condición física de los materiales: Durante la recepción, y antes del montaje, se realiza una inspección visual de cada elemento para detectar defectos o daños de transporte/fabricación. Se busca identificar deformaciones, fisuras, laminaciones, corrosión o daños en galvanizado, entre otros. La normativa indica rechazar componentes con discontinuidades inaceptables o remediarlos según procedimientos aprobados (por ejemplo, rectificar deformaciones con calor controlado si es factible, o pulir pequeñas grietas de borde bajo supervisión, etc.). Un caso particular son las laminaciones en placas base o alas de perfiles (escamas de laminación); la NSR-10 define estos defectos y exige su control para evitar problemas en soldaduras o conexiones. Todos los materiales también deben estar limpios de impurezas antes de entrar a proceso: sin aceites, pinturas indebidas,

óxido suelto o rebabas que afecten la calidad de las uniones. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Almacenamiento y manejo en obra: Aunque a veces subestimado, el almacenamiento adecuado es parte del control de calidad de materiales. Los perfiles y placas deben apilarse sobre apoyos para evitar el contacto con el suelo (previniendo corrosión o contaminación), y protegidos de la intemperie excesiva si van a tardar en usarse. La humedad puede inducir corrosión acelerada, y en materiales soldados puede causar hidrogenación diferida (fisuración en frío) si no se secan apropiadamente. Los electrodos y consumibles de soldadura, en particular, requieren condiciones controladas: los de tipo baja hidrogeno (como E7018) deben mantenerse en hornos a temperatura adecuada hasta su uso, conforme a AWS D1.1. El inspector revisa que existan procedimientos de almacenamiento de pernos, tuercas y consumibles, ya que el RCSC y AWS establecen que estos elementos deben conservarse secos, identificados y en su empaque original hasta su empleo. Por ejemplo, en una obra se debería evidenciar que los pernos de alta resistencia estén en contenedores cerrados y que se sigan prácticas FIFO (first in, first out) para usar primero los lotes más antiguos, asegurando que ninguno caduque (algunos elementos como esferas calibradoras o indicadores de tensionado tienen vencimiento).

3.3 Verificación e inspección de soldaduras

Las soldaduras son muchas veces el “punto neurálgico” de la integridad de una estructura metálica, pues en ellas se concentran esfuerzos y pueden generarse discontinuidades críticas si no son ejecutadas correctamente. Por ello, la inspección de soldaduras ocupa un lugar central dentro de los parámetros de inspección. Según la NSR-10, “la observación de las operaciones de soldadura y la inspección visual de soldaduras en proceso o completas constituirán el método básico” para asegurar conformidad con los documentos del proyecto. A continuación, se detallan los aspectos clave de esta verificación, estructurados en etapas: previa, durante y posterior a la ejecución de la soldadura, tal como recomiendan AWS D1.1 y la normativa colombiana.

3.3.1 Inspección previa a la soldadura (WPS, preparación y personal)

Antes de iniciar cualquier unión soldada, el inspector debe confirmar una serie de condiciones pre-soldadura esenciales:

- Procedimientos calificados (WPS) disponibles: Todo proceso de soldadura a emplear debe estar respaldado por un Welding Procedure Specification (WPS)

aprobado, el cual describe el método (proceso SMAW, GMAW, FCAW, etc.), la posición, los rangos de parámetros (amperaje, voltaje, velocidad de avance), tipo de electrodo o alambre, precalentamiento necesario, entre otros. Tanto el inspector de calidad de la empresa como el supervisor técnico deben verificar la disponibilidad y adecuación de los WPS para cada tipo de junta a ejecutar. Esto garantiza que el soldador seguirá un procedimiento calificado para lograr las propiedades mecánicas requeridas. En Colombia, estos WPS pueden ser calificados vía ensayos (PQR) o basarse en procedimientos precalificados de AWS D1.1 si aplican. No se debe permitir una soldadura estructural importante sin un WPS documentado (por ejemplo, si se requiere soldar una placa de anclaje a una columna, se debe contar con un WPS específico para unión a base, material A36 a A572, etc.). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Calificación de soldadores: Igual de crítico es asegurar que los operadores (soldadores) estén calificados/certificados para las tareas asignadas. AWS D1.1 estipula que los soldadores deben pasar pruebas (WPQT) en posiciones y tipos de junta equivalentes a las que realizarán en obra. La NSR-10 exige que el personal de soldadura tenga calificación vigente conforme a AWS D1.1, o incluso certificación por parte de organismos como la Asociación Colombiana de Soldadura (ACOSEND). Durante la inspección previa, se comprueba que cada

soldador posea su carné o registro de calificación para el proceso, posición y rango de espesores involucrados. Asimismo, cada soldador debe estar identificado en obra (mediante códigos estampados cerca de sus cordones o en registros diarios) para la trazabilidad de quién hizo cada soldadura. Una práctica común es asignar un número o símbolo a cada soldador y marcar junto a la junta soldada su identificación; el inspector verifica estas marcas antes de que se apliquen recubrimientos o acabados. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Inspección de la junta y ajuste (fit-up): Antes de soldar, la preparación de la junta debe ser inspeccionada en detalle. Esto incluye verificar la geometría del bisel o canal en soldaduras a tope (ángulo de bisel, root face, root opening) y la limpieza de las superficies a unir. Las superfícies deben estar libres de óxido, pintura, cascarilla de laminación o suciedad en la zona a soldar y adyacencias, típicamente en al menos 50 mm a cada lado de la junta, tal como requiere AWS D1.1. También se revisa el alineamiento y holgura (gap) adecuada en la raíz para soldaduras de filete; una separación incorrecta puede derivar en soldaduras defectuosas o con falta de raíz. La NSR-10 Tabla F.2.14.5-1 lista entre las tareas previas inspeccionar el ajuste de las soldaduras acanaladas y de filete, incluyendo alineación, abertura de raíz y punteado. El punteado (tack weld) merece mención: los puntos de soldadura provisionales que sostienen la junta deben ser de buena

calidad, libres de grietas, y hechos con el mismo procedimiento que la soldadura final; el inspector verifica su localización y calidad, ya que puntos agrietados no deben incorporarse en la soldadura final (de lo contrario, pueden generar defectos como grietas retenidas). En caso de usarse platinas de respaldo (backing bars) o cobre de respaldo, se inspecciona su tipo y ajuste. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Condiciones ambientales y equipos: Previo al inicio, se confirma que las condiciones ambientales cumplen lo establecido: no soldar bajo lluvia o con viento excesivo (a menos que se proteja la zona), y respetar temperaturas mínimas de base según el procedimiento. AWS D1.1 indica, por ejemplo, que si la temperatura ambiente o del material está por debajo de ~0°C, se debe precalentar independientemente del espesor. La inspección previa incluye verificar que los equipos de soldadura estén calibrados y en buen estado. El inspector de calidad de la empresa usualmente revisa la máquina (voltaje de circuito abierto, cables en buen estado, conectores firmes) antes de autorizar la producción de soldaduras importantes. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

Todas estas verificaciones previas se documentan en listados de chequeo o “checklists” pre-soldadura. La tabla 3, a continuación resume algunas actividades típicas de inspección previa

a la soldadura basadas en NSR-10 (Tabla F.2.14.5-1) y AWS D1.1: (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

Tabla 4.

Lista básica de verificación previa a la soldadura

Aspecto a inspeccionar (antes de soldar)	**Criterio / Norma de referencia**
Procedimiento de Soldadura (WPS) aprobado y vigente	WPS disponible en obra, acorde a AWS D1.1 (Secc. 5)
Calificación de soldadores adecuada	Soldadores con certificado vigente (AWS D1.1 Art.4; NSR F.2.14.4)
Material base y consumibles correctos	Verificar material según planos y consumibles con cert. AWS A5 (electrodos)
Preparación de juntas (bisel, limpieza, holguras)	Ángulos, raíces y superficies según WPS; limpio, sin óxido
Punteos de armado (tack welds)	De calidad, sin grietas, ubicados según diseño
Condiciones ambientales apropiadas	Sin humedad/viento excesivo; temperatura ≥ mín. requerida
Equipos de soldadura en buen estado	Máquina calibrada, cables y conexiones seguras
Identificación de soldador y junta	Sistema de trazabilidad implementado (marca de soldador)

Fuente: Elaboración propia con datos de AWS D1.1:2015 y NSR-10:2010. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

3.3.2 Inspección durante la soldadura (supervisión del proceso)

Mientras se ejecutan las soldaduras, la inspección continúa de forma periódica y aleatoria para verificar que el procedimiento se siga correctamente. De acuerdo con las tablas de la NSR-10 y AWS, muchas de estas tareas son de tipo “O” (observar aleatoriamente) porque no es práctico inspeccionar cada punto en tiempo real, pero se debe hacer en intervalos regulares. Los focos principales durante la soldadura son:

- Técnica del soldador y cumplimiento del WPS: El inspector observa que el soldador aplique la técnica adecuada: por ejemplo, cordones rectos o con oscilación permitida, limpieza de la escoria entre pases, control de la velocidad de avance y ángulo del electrodo. Se corrobora el ajuste continuo a los parámetros del WPS: amperaje dentro del rango, uso del diámetro de electrodo correcto, secuencia de paseos adecuada, etc.. Un aspecto clave es el precalentamiento y temperatura entre pases: en piezas gruesas o acero aleado, puede requerirse un precalentamiento mínimo (p. ej. 100°C) y mantener la junta por encima de cierta temperatura entre capas; el inspector usa frecuentemente crayones térmicos o pirómetros para verificar esto. De igual modo, si el WPS exige gas de protección (en MIG/MAG o FCAW), se checa que el flujo de gas sea el adecuado y que no haya interrupciones.

- Control de consumibles y materiales: Durante el proceso, se vigila que los consumibles de soldadura se manipulen correctamente: que los electrodos se saquen del horno solo en la cantidad necesaria, que no excedan el tiempo de exposición si son de baja hidrógeno (muchos tienen un límite de 4 horas fuera del horno antes de resecado), o que los carretes de alambre tengan las condiciones necesarias (bolsas desecantes, etc.). También se verifica que no se mezclen consumibles de distinto tipo. Asimismo, se impide que los soldadores hagan uso de material base incorrecto (por ejemplo, usar una platina de respaldo distinta a la especificada, o sustituir varillas de aporte sin autorización). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).
- Condiciones ambientales en tiempo real: El inspector puede medir la velocidad del viento si se está soldando en sitio abierto; AWS D1.1 suele recomendar proteger la soldadura si el viento supera cierto umbral (~5 m/s) ya que puede afectar la atmósfera de protección. Igualmente, si empieza a llover o hay humedad excesiva, se detienen las soldaduras a menos que se provea abrigo. Estos factores se documentan en los reportes diarios. La NSR-10 explicitamente lista como tarea observar que la velocidad del viento, temperatura y precipitación estén dentro de límites durante la soldadura. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Prevención de defectos durante la ejecución: Una labor fundamental del inspector en esta etapa es identificar indicios de posibles defectos mientras se suelda. Por ejemplo, si observa cráteres mal rellenos o inicios/terminaciones bruscas, debe pedir al soldador que repare antes de continuar (los cráteres pueden generar grietas al enfriar). También estar atento a soldaduras sobre punteos agrietados: la normativa prohíbe soldar encima de un tack weld que presente fisuras, por lo que el inspector lo corrobora en el momento. Otro punto de atención son los saltos de pase incorrectos que generen cordones fríos o falta de fusión; el inspector puede solicitar se esmerile y rehaga si detecta algo así. Se busca asegurar que cada pase funda bien con el anterior y con el metal base, evitando acumulación de escoria entre capas (debe limpiarse cada vez). Cabe destacar la importancia de la secuencia de soldadura para controlar distorsiones: en elementos sensibles, el inspector valida que se sigan las pautas del plan de montaje (por ejemplo, soldar por tramos alternos para equilibrar contracciones). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

3.3.3 Inspección posterior a la soldadura (aceptación visual y END)

Una vez concluidas las soldaduras, se procede a la inspección final de cada junta para determinar su aceptación o rechazo según los criterios normativos. Esta etapa comprende principalmente la inspección visual detallada de los cordones terminados y la realización de ensayos no destructivos (si aplican):

- Inspección visual de cordones terminados: Consiste en examinar todas las soldaduras a simple vista (apoyándose con herramientas como una lupa de 10x, galgas de soldadura tipo Bridge Cam, reglas, etc.) para verificar dimensiones y detectar discontinuidades superficiales. Según AWS D1.1, todas las soldaduras deben ser inspeccionadas visualmente y cumplir con los criterios de aceptación. De hecho, la NSR-10 (F.2.14.5.4) recalca que la inspección visual es el método básico de verificación. Los aspectos a evaluar incluyen: dimensiones del cordón (longitud, espesor o tamaño del filete, y longitud efectiva), apariencia del perfil (cordón uniforme, sin socavados pronunciados, sin refuerzo excesivo en soldaduras a tope), y ausencia de defectos visibles como grietas, porosidad, inclusiones de escoria, mordeduras en los bordes o falta de fusión evidente. La Tabla F.2.14.5-3 de NSR-10 enumera estos criterios visuales: grietas no permitidas, fusión adecuada metal-base, perfil de cordón aceptable, porosidad bajo límites, etc., debiendo medirse el tamaño y longitud de cada soldadura. Por ejemplo, para soldaduras de filete, se mide la altura y garganta; no debe ser menor

que la especificada ni excederse al punto de causar concentraciones de tensión. Las mordeduras (undercut) se toleran solo hasta cierta profundidad (p.ej. 0.25 mm para piezas primarias según AWS D1.1 en estructuras estáticas). El inspector marca con tiza o en el informe cualquier defecto encontrado. Un caso especial son las soldaduras cercanas a zonas de esfuerzo concentrado, como la "zona k" de las vigas (área adyacente al ala, afectada por el curvado en laminación); la NSR-10 exige examinar hasta 75 mm en el alma desde la soldadura en esa zona para detectar grietas post-soldadura. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Dimensionalidad y acabado: Además de calidad intrínseca, se comprueba que la soldadura esté en la ubicación correcta y completa en toda su longitud según planos. Cada junta especificada debe haberse soldado en su totalidad. A veces ocurren omisiones involuntarias de cordones intermitentes o de refuerzo; la inspección final detecta si falta algún tramo. También se verifica que se hayan removido las platinas de respaldo o puntos temporales cuando el procedimiento o diseño así lo exija. En cuanto al acabado, si el proyecto demanda soldaduras pulidas o esmeriladas al ras (por razones estéticas en estructuras expuestas), el inspector comprueba que se haya realizado ese pulido sin debilitar la unión. Vale anotar que las especificaciones técnicas de algunos proyectos, como fachadas arquitectónicas, exigen soldaduras "invisibles"; en un ejemplo real, la estructura

metálica de un museo requirió que todas las soldaduras vistas fueran lijadas y pintadas de modo que se notaran lo menos posible, todo ello certificado por el inspector arquitectónico. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Ensayos no destructivos (END): Para un aseguramiento de calidad más profundo, se aplican END sobre soldaduras de importancia. La NSR-10 F.2.14.5.5 establece que cuando se requieran, los ensayos por ultrasonido (UT), radiografía (RT), partículas magnéticas (MT) o líquidos penetrantes (PT) serán realizados de acuerdo con AWS D1.1, usando sus criterios de aceptación para estructuras de carga estática, a menos que el diseño especifique criterios más exigentes. Asimismo, se indica que en estructuras de uso IV o con diseño sísmico, se deberá aplicar ultrasonido a todas las juntas a tope de penetración completa en espesores ≥ 7.9 mm. Esto significa que, por ejemplo, en un hospital (uso IV) con columnas soldadas a bases de placa gruesa, cada unión soldada a momento debe ser ultrasonida para detectar posibles defectos internos como falta de fusión o grietas. El ultrasonido es muy efectivo para detectar discontinuidades internas (fallas en raíz, inclusiones profundas) y complementa la inspección visual. Por su parte, la radiografía industrial se utiliza especialmente en uniones de gran espesor o para validar cortes de soldadura en tuberías, aunque en estructuras metálicas de edificación es menos común por las dificultades logísticas (pero podría emplearse

en conexiones de sección cajón, por ejemplo). Los métodos MT y PT se aplican típicamente en soldaduras de acceso superficial: MT para detección de fisuras superficiales en materiales ferromagnéticos, y PT (tintas penetrantes) para materiales no ferromagnéticos o para complementar la inspección visual en cordones críticos, revelando grietas capilares que el ojo podría pasar por alto. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

3.4 Inspección de conexiones pernadas (atornilladas)

Las conexiones atornilladas son ampliamente utilizadas en estructuras metálicas por su rapidez de montaje y posibilidad de desmontaje. No obstante, su correcto desempeño depende de la calidad de los elementos (pernos, tuercas, arandelas) y de una adecuada instalación (apriete). Por ello, los parámetros de inspección para conexiones pernadas se enfocan en: (1) control de los materiales (pernos de alta resistencia y sus componentes), (2) verificación del procedimiento de apriete aplicado, y (3) inspección post-instalación de la junta atornillada. A continuación, se desarrolla cada aspecto apoyándose en la normativa RCSC adoptada por NSR-10 y en lineamientos de AISC.

3.4.1 Recepción y control de pernos de alta resistencia

En estructuras metálicas, típicamente se emplean pernos de alta resistencia (norma ASTM F3125 Grado A325 o A490, anteriormente ASTM A325/A490) para las uniones estructurales. La inspección comienza en la recepción de estos pernos y accesorios:

- Certificados de fabricación: Al igual que con el acero base, cada lote de pernos, tuercas y arandelas debe traer certificados que aseguren su cumplimiento normativo (grado, tratamiento térmico, recubrimiento si es galvanizado, etc.). El inspector revisa la disponibilidad de certificados del productor de los pernos, verificando que correspondan a la partida entregada. Por ejemplo, que los A325 cumplan resistencia a la tracción nominal ~120 ksi y dureza según ASTM. También se corrobora el marcado en cabeza de perno y tuerca, que según las normas ASTM debe indicar el fabricante y grado (esto permite identificación aún sin certificado en mano). La Tabla F.2.14.5-4 de la NSR-10 indica que control de calidad interno puede observar (O) y la supervisión técnica debe verificar (P) la certificación y marcado adecuado de pernos. (AIS, 2010; Research Council on Structural Connections, 2014).

- Dimensiones y tipo correctos: La inspección verifica que el tipo de perno entregado coincide con lo especificado en diseño: diámetro, longitud, tipo de rosca y clase. Por ejemplo, si la junta requiere que las roscas queden fuera del plano cortante, se seleccionan longitudes que cumplan esa condición. El inspector corrobora esta selección adecuada del perno para el detalle de la junta. Asimismo, chequea que se tengan las arandelas correctas (planas endurecidas ASTM F436, si se requieren) y en cantidad suficiente, así como tuercas del grado correspondiente (ASTM A563 por ejemplo, con lubricación si es necesaria para ciertos métodos de apriete).

- Almacenamiento previo a instalación: Los pernos deben mantenerse secos, limpios y aceitados (en el caso de los galvanizados, vienen con lubricación especial que no debe removerse). El inspector verifica que el almacenamiento sea adecuado: contenedores cerrados, lejos de suciedad, evitando mezclas de distintos diámetros o longitudes. Un perno corroído o sucio puede falsear el torque y afectar el pretensado. Igualmente, se controla que no hayan expirado aquellos componentes que puedan tener fecha de caducidad (por ejemplo, ciertos tipos de indicadores de tensión). (Research Council on Structural Connections, 2014).

3.5 Ensayos no destructivos (END) en estructuras metálicas

Ya mencionados previamente en el contexto de soldaduras, los ensayos no destructivos constituyen un pilar esencial para evaluar la integridad de elementos sin dañarlos, durante y después de la construcción. En proyectos de estructuras metálicas, los END más utilizados incluyen la inspección visual (VT), ultrasonido (UT), partículas magnéticas (MT), líquidos penetrantes (PT) y radiografía (RT). Cada uno tiene su campo de aplicación y su lugar dentro de un programa de inspección de calidad:

- Inspección visual (VT): Es el método más básico y de aplicación universal. Involucra la observación directa de piezas y uniones para identificar discontinuidades visibles. Requiere iluminación adecuada, a veces magnificación, y personal capacitado con buena agudeza visual (normas como AWS exigen a los inspectores visuales pasar exámenes de visión de cerca y percepción de colores). La inspección visual detecta problemas como grietas superficiales, corrosión, mal alineamiento, deformaciones plásticas, soldaduras incompletas, etc. Su ventaja es que es inmediata y económica, pero está limitada a la superficie. En la construcción metálica se usa en todas las etapas: inspección de materiales recibidos, chequeo de preparaciones, evaluación de soldaduras terminadas (como

vimos), e incluso inspección de recubrimientos (pintura) donde se busca uniformidad y ausencia de defectos. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Ultrasonido (UT): Este método utiliza ondas de sonido de alta frecuencia introducidas en el material mediante un transductor; las reflexiones de las ondas permiten detectar discontinuidades internas. En soldaduras, el UT es especialmente eficaz para identificar falta de fusión, grietas internas, poros voluminosos o falta de penetración en soldaduras de raíz. También puede medir espesores de materiales (útil para evaluar corrosión en servicio). En estructuras nuevas, se aplica UT a soldaduras a tope importantes, como exigido por NSR-10 en elementos sísmicos. La ventaja del UT es que no requiere acceso a ambos lados como la radiografía, y se puede hacer en campo con equipos portátiles. Sin embargo, requiere personal experimentado para interpretar las indicaciones (ecos) y es menos efectivo en geometrías complejas o materiales muy heterogéneos. Las normas (AWS D1.1) definen criterios de aceptación por ultrasonido para diversas categorías de junta. En la inspección, típicamente un técnico UT recorrerá las soldaduras críticas con su palpador y marcará con cinta las zonas donde encuentra indicaciones sospechosas, que luego evaluará en detalle (determinando tamaño y

ubicación del defecto). Si exceden la norma, se rechaza la junta. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Partículas magnéticas (MT): Se utiliza solo en materiales ferromagnéticos (acero al carbono principalmente). Consiste en magnetizar la zona a inspeccionar (sea por un imán yoke portátil o por bobinas) y aplicar partículas de hierro finas (en polvo seco o suspensión húmeda). Si hay una discontinuidad superficial o sub-superficial cercana, distorsiona el campo magnético haciendo acumular las partículas en esa zona, revelando la indicación. MT es muy efectivo para detectar grietas superficiales finas o falta de fusión superficial que quizás la vista no ve, especialmente en zonas críticas como soldaduras filet con posibles grietas en la garganta, o en base de agujeros de pernos (inspección de bridas de conexión para verificar que al punzonar no surgió fisura). En construcción, se aplica MT en, por ejemplo, soldaduras de casquetes de columna donde se unen alas por filetes que deben ser íntegros. La NSR-10 lo contempla como uno de los END posibles a usar, con criterios acept/rechazo de AWS. Su ventaja es la rapidez y sensibilidad; desventaja: requiere quitar pinturas o recubrimientos (la superficie debe estar limpia) y no funciona en aceros inoxidables (no magnéticos). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015; Research Council on Structural Connections, 2014).

- Líquidos penetrantes (PT): Método aplicable a cualquier material sólido no poroso. Se basa en la capilaridad: se aplica un líquido penetrante de bajo tensión superficial sobre la pieza limpia, este ingresa en posibles discontinuidades abiertas a la superficie (grietas, poros), luego se limpia la superficie y se aplica un revelador que saca el líquido de los vacíos haciéndolo visible como una indicación coloreada o fluorescente. PT detecta grietas muy finas superficiales con alta sensibilidad, incluso en materiales no ferrosos. En estructuras de acero, se usa menos que MT porque el acero es ferromagnético y MT es más sencillo allí; pero PT es útil para inspeccionar, por ejemplo, soldaduras en aluminio (si hubiese) o soldaduras en acero inoxidable de barandas, etc. Dentro de la inspección de una edificación metálica típica (acero al carbono), PT puede emplearse en soldaduras donde se requiera verificación extra de la cara superior e inferior, o en zonas donde UT/RT no aplican pero se sospecha de una fisura superficial. Las normas ASTM E165 y E1209 son referenciadas para su uso. Una limitación es que no detecta discontinuidades profundas, solo abiertas a superficie o muy cercanas. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Radiografía industrial (RT): Utiliza radiación electromagnética (Rayos X o Gamma) para atravesar la unión soldada e imprimir una película o detectar con un

panel digital las diferencias de atenuación, revelando defectos internos como poros, inclusiones de escoria, falta de fusión (indirectamente), etc. Ha sido el método tradicional para inspeccionar soldaduras críticas en tuberías y recipientes a presión. En estructuras metálicas, su uso es más restringido por consideraciones de seguridad radiológica y acceso (difícil en campo sin desalojar áreas, requiere line of sight). Sin embargo, puede aplicarse en fábrica para soldaduras de elementos como perfiles soldados de alma llena donde se quiera garantizar calidad (p. ej., soldaduras longitudinales en vigas cajón). Para edificación, UT suele suplirlo en la mayoría de casos. Aun así, la NSR-10 lo incluye como END posible a ser usado cuando se requiere. La radiografía es muy efectiva detectando defectos volumétricos (poros, inclusiones), pero menos para defectos planos orientados en ciertos planos (donde UT es mejor). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Ensayos especializados: Además de los anteriores, en la etapa de inspección posterior al montaje o puesta en servicio, pueden emplearse otras técnicas de END para evaluar condiciones. Por ejemplo, la termografía infrarroja para detectar zonas de humedad o calentamiento anómalo en estructuras revestidas, o la emisión acústica para monitorear si ocurre una fisuración bajo carga en algún

elemento (usado en puentes). En la construcción normal de edificios, estos no son comunes salvo en investigación o diagnósticos post-sismo.

Finalmente, conviene resaltar que los END proveen confianza adicional y ayudan a prevenir fallas catastróficas. Un caso histórico: en un edificio industrial en Medellín, inspecciones UT descubrieron grietas de fatiga iniciándose en soldaduras de un soporte de grúa, lo que permitió repararlas programadamente evitando una posible fractura durante operación. Esto ilustra cómo los END forman parte también de planes de mantenimiento futuros. Durante la construcción, su aporte es garantizar que la estructura comienza su vida útil libre de defectos significativos, cumpliendo con el nivel de calidad esperado. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

3.6 Protocolos de montaje y secuencia constructiva

La ejecución exitosa de un proyecto de estructura metálica no solo depende de piezas y uniones individuales de calidad, sino también de una secuencia de montaje bien planificada e inspeccionada. Los protocolos de montaje se refieren al conjunto de procedimientos y medidas que guían la erección de la estructura en obra, abarcando aspectos de seguridad, estabilidad provisional, equipamiento de elevación y coordinación entre equipos. El papel de la inspección

aquí es verificar que el montaje se realice conforme al plan establecido y a las buenas prácticas, garantizando que la estructura toma forma correctamente y sin comprometer su integridad en ninguna fase.

- Plan de izaje y secuencia de armado: Antes de iniciar el montaje, usualmente el contratista presenta un Plan de Montaje. Este documento describe el orden en que se armarán los pórticos o niveles, cómo se realizarán los izajes (grúas móviles, grúas torre, polipastos) y qué etapas de atado temporales se contemplan. El inspector debe revisar este plan para asegurar que cumple con criterios de estabilidad: por ejemplo, que no se dejen elementos sin suficiente arriostramiento temporal ante cargas de viento durante el montaje. Normas como la OSHA en EE.UU. y lineamientos locales requieren que, durante el montaje de acero, haya un esquema de estabilización provisional (vientos, tensores) hasta que la estructura completa quede con todos sus elementos resistentes. En la práctica en Colombia, se acostumbra que tras erigir las columnas se instalen inmediatamente las riostras o contravientos horizontales antes de subir más niveles. El inspector de seguridad e interventoría verificarán en terreno que esa secuencia se siga, y no se sacrifiquen amarres temporales por acelerar tareas.
- Supervisión de izajes y conexiones provisionales: En el momento de izar y colocar elementos, el personal de montaje realiza conexiones provisionales

(poniendo algunos pernos pin para sostener la pieza) antes de ajustar todos los tornillos o soldaduras. La inspección aquí se centra en comprobar que: (a) los aparejos de izaje (eslingas, grilletes) sean adecuados y certificados, (b) se coloquen el número mínimo de pernos provisionales por conexión (normalmente 2 pernos diagonales por unión de momento, según OSHA, para evitar rotación) antes de soltar la pieza de la grúa, y (c) no se excedan pendientes o deformaciones durante la maniobra. Aunque la seguridad industrial es un ámbito propio, la interventoría técnica vigila que no se comprometa la estructura durante el izaje (ejemplo: evitar deformar una viga al levantarla inadecuadamente). (AIS, 2010; American Welding Society, 2015; Research Council on Structural Connections, 2014).

- Inspección de uniones en altura antes de consolidar: Una vez se arma una parte de la estructura en altura, el inspector verifica que todas las conexiones atornilladas queden completamente ajustadas y que las soldaduras en altura se ejecuten de manera continua sin posponerse indebidamente. La NSR-10 indica que en obra se deben ejecutar aquellas soldaduras que no pudieron hacerse en taller por tamaño de piezas. Esto significa que el plan de montaje debe considerar soldar, por ejemplo, empalmes o cartelas que se dejaron para campo. El inspector debe constatar que esas soldaduras de montaje sean realizadas a tiempo y con los

mismos controles de calidad ya descritos (WPS, precalentamiento, etc.). A veces, por presiones de cronograma, hay tendencia a “tackear y dejar para después” ciertos cordones: esto es inaceptable sin evaluación, pues deja uniones parcialmente resistentes. Un caso típico es en estructuras espaciales o cerchas: se montan con soldaduras temporales y se planea soldar continuo luego; el interventor debe asegurarse de que se suelden definitivamente antes de cargar la estructura. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015).

- Estabilidad global durante montaje: Un punto crítico es garantizar que la estructura no colapse parcial o globalmente durante el montaje, antes de completarse. El inspector revisa la presencia de contravientos temporales, sistemas de cables, o apoyos supletorios (puntales) si el proyecto lo requiere. Por ejemplo, en edificios de varios pisos, hasta que se instalen los sistemas de diafragma (entrepisos) y contravientos definitivos, la estructura es más flexible; pueden agregarse tensores diagonales provisionales que luego se retiran. La interventoría podría solicitar cálculos de estabilidad provisional al constructor en proyectos complejos. Un caso real ilustrativo: en la construcción de una cubierta metálica de gran luz en un coliseo, se instalaron torres de soporte temporales bajo las cerchas hasta que todas estuvieron conectadas entre sí, para evitar sobrecarga en miembros individuales no completados. La inspección monitoreó

asentamientos de esas torres y que fueran retiradas solo cuando la forma final estuvo estructuralmente autoportante.

- Cumplimiento de protocolos de seguridad en montaje: Aunque el foco es técnico, es imposible desligar la inspección de calidad de la seguridad en estructuras metálicas, ya que un incidente puede dañar elementos. La supervisión vela por el uso de líneas de vida para montadores (evitando caídas que no solo son riesgos humanas sino que pueden llevar a dejar caer piezas), el no sobrecargar los niveles con acopio excesivo de material, etc. Un elemento particular es el apriete de pernos a altas cotas: se debe proveer el acceso y herramientas adecuadas para que los trabajadores logren el torque requerido sin arriesgarse. La inspección se asegura de que esto ocurra – por ejemplo, en conexiones de techo a 20 m de altura, usar llaves dinamométricas con extensiones o métodos TC bolts para facilitar. (Research Council on Structural Connections, 2014).

3.7 Inspección de empotramientos y cimentaciones

Aunque a primera vista las cimentaciones y sus empotramientos (elementos de anclaje) puedan considerarse separadas de la “estructura metálica” en sí, en realidad son la base sobre la cual aquella se sustenta, y cualquier desvío o defecto en ellos impactará en la estructura de acero. Por ello, los anclajes de columnas, empotramientos y cimentaciones deben ser objeto de minuciosa inspección antes y durante la colocación de la estructura metálica. Estos inspecciones

se enfocan en: posición y características de los pernos de anclaje, nivelación de placas base, calidad del concreto y adherencia de elementos embebidos.

Verificación de pernos de anclaje antes del colado: En estructuras con bases de concreto, típicamente se embeben pernos de anclaje (anchor bolts) para fijar las columnas metálicas. La NSR-10 estipula claramente que el supervisor técnico debe verificar la correcta instalación de los pernos de anclaje u otros elementos embebidos antes de vaciar el concreto. Esto implica comprobar, en la etapa de armado de la cimentación, que cada perno de anclaje esté: en la posición horizontal correcta (coordenadas X-Y según planos, dentro de tolerancia ± (1/2) diámetro del agujero de base, o ±5 mm, lo que sea menor), a la altura adecuada (proyección sobre la base para garantizar roscas suficientes para tuercas), y con la verticalidad necesaria (muchos pernos se instalan con plantillas; se inspecciona que estén perpendiculares al plano de apoyo). También se verifica el diámetro, material y tipo: por ejemplo, que sean ASTM F1554 Grado 55 o 105 si especificado, o barras roscadas del diámetro indicado con cabezas o ganchos según diseño. Si hay galletas de desarrollo (placas soldadas a los anclajes dentro del concreto para mayor adherencia), se ve que estén en posición. Todo esto se documenta en un certificado de “check list” de anclajes previo al colado, firmado por la interventoría. En caso de detectarse un anclaje mal posicionado antes del vaciado, se corrige en el momento (lo cual es mucho más

fácil que después con concreto fraguado). (AIS, 2010; Research Council on Structural Connections, 2014).

Inspección de elementos empotrados (plates, insertos): Además de pernos, pueden existir placas de anclaje embebidas en muros o pedestales, perfiles de acero empotrados para conexiones (por ejemplo, perfiles H embebidos para soldar vigas), etc. El inspector revisa que estos elementos estén firmemente anclados en la posición correcta (muchas veces se sueldan a la estructura de refuerzo temporalmente para fijarlos). Se controlan sus alineaciones: por ejemplo, una placa insertada en un muro debe sobresalir lo suficiente y estar nivelada para soldar sobre ella una viga. También se verifica que tengan el recubrimiento de concreto adecuado alrededor, para su protección contra corrosión y anclaje efectivo. (AIS, 2010; Research Council on Structural Connections, 2014).

Calidad del concreto y nivelaciones: Una vez vaciado el concreto, se debe esperar que alcance la resistencia especificada antes de montar la estructura metálica encima (usualmente f’c = 21 MPa o más, verificar mediante cilindros rompidos a 7 y 28 días). El inspector técnico comprueba los resultados de laboratorio de resistencia del concreto de las zapatas o pedestales – esta es una interfaz crítica: si el concreto no cumple, podría no soportar las cargas de la columna. No se debe iniciar el montaje de acero hasta tener la certeza de que las cimentaciones cumplen

resistencia (o al menos la necesaria para la etapa de carga de montaje, a veces se empieza con 70% f'c al cabo de unos días si se justifica). Además, tras el fraguado, se inspecciona la nivelación de las placas base: se coloca una plomada o nivel sobre la placa de anclaje en los cuatro extremos para ver que esté horizontal. Cualquier desnivel leve se corregirá con el grout (lechada de nivelación) bajo la placa base al momento del montaje. Sin embargo, desniveles grandes indicarían algún asentamiento o error, que habría que subsanar (e.g., reescoplear la placa, recalzar). (AIS, 2010).

Montaje de columnas en anclajes: Al erigir las columnas, antes de apretar sus tuercas de anclaje definitivas, el inspector revisa la alineación columna-cimentación: que la placa base asiente correctamente. Se usan galgas para medir la separación entre la placa y el concreto; debe ser uniforme antes de colar el grout. Si la placa no está bien apoyada (por ejemplo, un perno haló una esquina), se nivelan con cuñas de acero y se ajusta. También se verifica que las tuercas tengan sus arandelas endurecidas y que se apliquen los torques o pretensados necesarios si son anclajes pretensables. En algunos diseños, las columnas se fijan con resinas epóxicas en perforaciones post-instaladas (anclajes químicos); en tal caso, la inspección debe observar el procedimiento de perforado, limpieza del orificio, colocación de resina y curado, porque la confiabilidad del empotramiento depende de ello. (AIS, 2010).

Inspección de soldaduras de arranque: En ciertos proyectos, en lugar de pernos se pueden usar arranques soldados: por ejemplo, embebidos de placa con barras de anclaje a los que luego se suelda la base de la columna. Si así fuera, esos soldaduras se inspeccionan igual que cualquier soldadura estructural (VT y eventualmente UT si son de esfuerzo total). La NSR-10 en F.2.2.3.13 se refiere a anclajes a concreto y los detalla en Título J también; en resumen, requiere que el empotramiento desarrolle la resistencia necesaria y su inspección es integral con la estructura. (AIS, 2010; American Welding Society, 2015; Research Council on Structural Connections, 2014).

No conformidades y remediación en anclajes: Lamentablemente, es relativamente común encontrar en obra desviaciones en pernos de anclaje tras el colado (por errores de replanteo o movimiento de plantillas). La inspección aquí debe reportar la no conformidad y plantear soluciones avaladas por el diseñador estructural. Soluciones típicas: si el corrimiento es pequeño, usar agujeros ranurados en la base con placa de transferencia; si falta longitud roscada, usar tuercas acopladoras para extender; si un perno quedó fuera de posición por mucho, a veces se instalan pernos químicos complementarios y se modifica la placa base. Todo esto debe ser calculado y aprobado. La función del inspector es asegurar que ninguna columna quede anclada con deficiencias y que cualquier corrección se ejecute correctamente (resinas bien fraguadas,

nuevos pernos pretensados, etc.). Registros fotográficos y informes fortalecen la trazabilidad de estas soluciones. (AIS, 2010; Research Council on Structural Connections, 2014).

Capítulo 4. Variables de control posterior en la construcción de estructuras metálicas

4.1 Inspección de soldaduras

La inspección de las soldaduras es quizás la variable de control posterior más crítica en estructuras metálicas, dado que la mayoría de las fallas estructurales en acero ocurren en las uniones soldadas deficientes. Una vez concluidas las soldaduras en obra (o en taller, previo al montaje), se debe realizar una inspección exhaustiva de su calidad. Esta inspección comprende diferentes niveles y técnicas:

- **Inspección visual**: Constituye el primer filtro de control de calidad en soldadura. Consiste en examinar a simple vista (apoyado con instrumentos sencillos como lupas, galgas de soldadura, reglas y niveles) cada cordón para detectar defectos superficiales o dimensionales evidentes. El inspector verifica aspectos como la presencia de grietas visibles, poros en la superficie, socavaciones (undercut) en los bordes del cordón, refuerzo excesivo o insuficiente, y cualquier irregularidad en la forma de la soldadura. Según la normativa internacional, *todas* las soldaduras deben someterse al menos a inspección visual al 100%, lo cual coincide con la práctica exigida en la NSR-10 (que adopta las mismas premisas de AWS D1.1 de examinar **todas** las soldaduras terminadas en cuanto a dimensiones,

longitud, acabado, etc.). Herramientas como galgas de soldadura permiten medir el tamaño del cordón (alto y ancho) y verificar que cumpla las dimensiones de diseño. Aunque la inspección visual es esencial, se reconoce que tiene limitaciones importantes: no puede detectar defectos internos ni discontinuidades ocultas debajo de la superficie. Por tanto, se complementa con ensayos no destructivos más sofisticados (ver sección 4.3.4).

- **Calificación del personal inspector**: Un punto neurálgico es que la inspección de soldaduras sea realizada por personal competente. La normativa exige que el inspector de control de calidad de soldadura esté debidamente calificado, ya sea mediante certificaciones internacionales (como AWS CWI – Certified Welding Inspector) o certificaciones nacionales equivalentes (por ejemplo, niveles I o II de inspector de soldadura otorgados por ACOSEND). Esto garantiza que la persona conozca los tipos de discontinuidades, los criterios de aceptación aplicables y los procedimientos de inspección adecuados. Es recomendable que, durante la interventoría, se exija evidencia de la certificación del inspector (carné vigente, alcance del certificado) y que éste se mantenga actualizado sobre cambios en códigos de soldadura. Adicionalmente, todos los soldadores que ejecutaron las uniones deben estar previamente calificados según AWS D1.1 (mediante cupones de prueba de soldadura PQR/WPQ), lo cual también es verificado dentro del

control documental posterior (ver sección 4.3.7). Un soldador no calificado o procedimientos no calificados pueden ser causa de rechazar una soldadura, independientemente de que la inspección visual la encuentre aceptable, ya que la normativa exige la trazabilidad de la calidad hacia personal y procesos certificados.

- **Criterios de aceptación de soldaduras**: Como se mencionó, Colombia adopta los criterios de **AWS D1.1** para la evaluación de soldaduras en estructuras estáticas. En términos generales, esto implica tolerancias específicas para discontinuidades: por ejemplo, AWS D1.1 permite cierta porosidad dispersa siempre que no exceda un diámetro máximo (p. ej. 2-4 mm) ni una densidad por longitud de soldadura dada; admite ligeras faltas de fusión en soldaduras de filete siempre que la resistencia requerida esté asegurada, etc., pero prohíbe totalmente defectos críticos como grietas o falta de fusión/penetración completa en soldaduras a tope. La interventoría debe comparar los resultados de la inspección visual y ensayos con estos criterios: si una soldadura no cumple (por ejemplo, se detecta una fisura longitudinal en el cordón, o una falta de penetración en raíz en una unión a tope que debía ser de penetración completa), no se puede aceptar y se debe ordenar su reparación o refuerzo. Es importante documentar claramente cada junta soldada inspeccionada, registrando si es *Aceptada* o *Rechazada* según los

criterios. En caso de reparaciones, éstas deben realizarse bajo un procedimiento aprobado y luego re-inspeccionarse hasta cumplir con la norma.

4.2 Verificación de conexiones pernadas

Las conexiones atornilladas (pernadas) son el segundo gran tipo de uniones en estructuras metálicas, y su control posterior reviste igual importancia. En edificaciones de acero se utilizan comúnmente pernos de alta resistencia (p. ej., ASTM A325 o A490, equivalentes a grado 8.8 o 10.9 en el sistema métrico) para unir placas y perfiles. Una conexión pernada mal ejecutada –por pernos insuficientemente apretados, mal alineados o con materiales inadecuados– puede derivar en holguras, desplazamientos excesivos bajo carga, o incluso fallos frágiles. Por ello, la interventoría debe implementar un protocolo de verificación de pernos que cubra las etapas antes, durante y después del apriete, acorde con estándares como el RCSC (Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts) y la NSR-10. De hecho, la NSR-10 en su sección F.2.14.5.6 incluye tablas de actividades de inspección para conexiones pernadas antes de la instalación, durante la instalación y posteriores a la instalación de los pernos, alineado con las tablas N5.6-1 a N5.6-3 de AISC 360-16. A continuación se detallan los puntos clave de control:

- Antes de la instalación de pernos: se verifica que los materiales cumplan especificaciones. El interventor debe comprobar que el tipo de perno, tuerca y

arandela corresponden a lo indicado en planos (ej., pernos A325 galvanizados con sus tuercas A563 y arandelas F436, según exige la norma). Los pernos deben venir con su certificado de calidad y marcajes en cabeza que identifiquen el grado; esto se corrobora visualmente y mediante documentación. Asimismo, es esencial revisar el estado de las superficies de contacto en las uniones atornilladas: para conexiones con pretensado (uniones frictionadas o de alta resistencia al deslizamiento), las superficies deben estar limpias, sin aceite ni pintura excesiva, o preparadas con rugosidad específica si se requiere fricción aumentada. La NSR-10 (derivada del RCSC) contempla inspeccionar que las superficies estén adecuadamente preparadas antes de armar la conexión. Otro aspecto previo es calibrar las herramientas de apriete: si se usarán llaves de torque, deben calibrarse y ajustarse; si se empleará el método de giro de tuerca (turn-of-nut) o pernos tensionadores con indicadores (DTI), debe establecerse la referencia inicial. Todo esto queda registrado en listas de chequeo de pre-instalación.

- Durante la instalación y apriete: el interventor o inspector técnico supervisa el proceso de tensado de los pernos. Según la metodología elegida (torque medido, giro controlado, método de galerita DTI, etc.), se siguen los pasos especificados en las normas. Por ejemplo, en el método de torque, se aprietan inicialmente todos los pernos a “empotramiento inicial” (snug-tight) y luego se aplican los valores de

torque final especificados, generalmente siguiendo un patrón de apriete cruzado. El inspector debe observar que el procedimiento se cumpla uniformemente (AISC define estas tareas como de observación periódica). En métodos como turn-of-nut, el inspector marca la posición relativa tuerca/perno y verifica que se gire el ángulo requerido tras el apriete inicial. Para pernos con indicadores de tensión (arandelas calibradas que aplastan saliendo protuberancias o tintas indicadoras), se verifica el aplastamiento correcto de la arandela. Lo importante durante esta fase es asegurar que cada perno alcance la tensión adecuada. En conexiones deslizantes, esto garantiza la fuerza de fricción necesaria; en conexiones no deslizantes (uniones a esfuerzo cortante con agujero estándar), el snug-tight puede ser suficiente según diseño, pero aun así debe verificarse que no queden pernos flojos. La normativa AISC/NSR incluye que se “observen” aleatoriamente los pernos durante el apriete para confirmar que no haya desviaciones del procedimiento (p. ej., el uso correcto de la secuencia de apriete en juntas con múltiples pernos).

- Inspección posterior al apriete: una vez montada la conexión y tensionados todos los pernos, se realiza una comprobación final de la calidad de la unión. Esto típicamente involucra probar aleatoriamente algunos pernos con una llave de torque calibrada (método turn-of-nut verification o inspection torque): se aplica

un torque un poco superior al de instalación para ver si la tuerca gira –si gira, indica que no tenía la tensión requerida–; ningún perno debería girar adicionalmente si estuvo bien apretado. Otra técnica es inspeccionar visualmente las marcas de giro: en el método de giro controlado, confirmar que las marcas en tuerca y plato muestran que se rotó el ángulo correcto. En pernos con DTI, revisar que las protuberancias de la arandela estén suficientemente aplanadas (normalmente se requiere que no pase una galga de espesores de cierto calibre entre ellas). La NSR-10 (tabla F.2.14.5-6) explícitamente requiere inspeccionar posteriormente a la instalación puntos como: que la longitud roscada que sobresale del perno sea la adecuada (debe haber al menos 1 o 3 hilos saliendo de la tuerca, según prácticas de calidad), que todos los pernos previstos estén instalados y tensados, y que no haya elementos dañados. Es decir, ningún perno faltante ni fracturado; tuercas con seguros si se requieren; y en general la conformidad de la unión con el plano (número de pernos, diámetro, etc.).

- Criterios de aceptación de conexiones pernadas: Una conexión atornillada se considera aceptable si todos sus pernos están presentes y adecuadamente pretensionados o apretados de acuerdo al tipo de conexión. No debe haber holguras apreciables ni rotación entre piezas conectadas bajo esfuerzos de servicio. La normativa RCSC indica que, para conexiones pretensadas, se logre al

menos el 70% de la carga de fluencia del perno como tensión (lo cual se logra con el método de apriete especificado). Si durante la inspección se encuentra un perno flojo o que gira con facilidad bajo torque de verificación, ese perno debe ser reapretado o reemplazado si ya se ha plastificado. Igualmente, si se descubre un perno dañado (por ejemplo, con la cabeza fisurada, o rosca barrida), se reemplaza. Un aspecto a controlar es la alineación de los agujeros: la mala práctica de forzar la inserción de pernos rebarbando agujeros (drift pinning excesivo) puede indicar desalineación mayor a la permitida. Según AISC, el desajuste máximo entre agujeros de placas conectadas no debe exceder aproximadamente 1/16 de pulgada (≈1.5 mm); si hubiera mayor desalineación, se debería reprocesar el agujero bajo aprobación (reaming) o utilizar medidas correctivas avaladas por el diseñador estructural. En resumen, la aceptación se basa en que la conexión tenga la cantidad y tipo de pernos especificados, correctamente instalados y tensionados, sin defectos visibles ni omisiones. Toda esta verificación queda generalmente asentada en un informe de inspección de pernos elaborado por la interventoría, donde se detallan los resultados de torque de comprobación realizados y las acciones tomadas en caso de no conformidades.

.

4.3 Control dimensional y geométrico de la estructura

Un aspecto fundamental del control posterior es verificar que la configuración geométrica de la estructura ejecutada corresponda a la establecida en planos, dentro de las tolerancias admisibles. Esto abarca controles dimensionales en varias escalas: desde las dimensiones de elementos individuales (perfiles, placas) hasta el posicionamiento global de la estructura (alineamiento de pórticos, nivelación de entrepisos, plomo de columnas, etc.). Durante el montaje, pueden ocurrir desalineaciones o deformaciones residuales; por ello, al finalizar la construcción metálica es imprescindible realizar un levantamiento geométrico completo de la estructura. La interventoría, típicamente apoyada en equipo topográfico (como niveles láser, estaciones totales o teodolitos de alta precisión, e incluso escáneres 3D en proyectos de alta exigencia), debe medir y contrastar los siguientes parámetros clave:

- Plomada de columnas: Las columnas verticales deben estar dentro de la tolerancia de plomada especificada. De acuerdo con el Code of Standard Practice de AISC (y adoptado en normas ICONTEC), la desviación máxima de una columna respecto a la vertical suele limitarse a 1/500 de su altura. Esto equivale a 2 mm por cada metro de altura (o ~20 mm en una columna de 10 m). En obra, se comprueba estirando tiros verticales o mediante estación total apuntando a puntos

de control en distintos niveles de la columna. Si alguna columna excede esta tolerancia (por ejemplo, una columna de 6 m desviada 25 mm cuando se permite ≤12 mm), se considera no conforme y pueden requerirse correcciones (como aplicar fuerzas de estrobo para realinear antes de rigidizar definitivamente, o, si la estructura ya está rigidizada, evaluar mediante cálculo si la desviación es aceptable o requiere refuerzo).

- Alineamiento y nivelación de vigas: Se verifica que las vigas y demás elementos horizontales estén en la cota de nivel prevista y alineados en planta según el trazado teórico. Un error común durante el montaje es que ciertas vigas queden con flecha o desnivel debido a problemas en la colocación de calzos o en la secuencia de apriete. Usando nivel óptico o láser, se comprueba que la flecha en las vigas bajo su peso propio esté dentro de lo esperado por diseño (muchas veces las vigas se montan con contra-flecha y deben asentarse aproximadamente rectas). AISC recomienda que la discrepancia en elevación de vigas en una misma cota no exceda alrededor de 1/4 de pulgada (≈6 mm) para evitar problemas en la nivelación de pisos. Del mismo modo, en alineación horizontal, las vigas de un marco deben estar alineadas sin desplazamientos bruscos en sus empalmes; se toleran desviaciones menores (unos milímetros) que no afecten la continuidad de acabados.

- Luz entre elementos y modulaciones: Se miden las distancias entre columnas, o la longitud de voladizos, etc., para confirmar que las luces reales coinciden con las de diseño. Ciertos acumulados de tolerancias en cada módulo podrían llevar a un desplazamiento significativo al final del edificio. Las normas de fabricación suelen permitir tolerancias de ±3 mm en cortes de perfil, etc. Por ello, un edificio de acero de, digamos, cinco módulos teóricos de 6.000 mm podría terminar midiendo unos milímetros más o menos. Es aceptable siempre que esté dentro de tolerancias globales (por ejemplo, AISC menciona unos cuantos centímetros en dimensiones totales de edificio de gran longitud). La interventoría ha de chequear la longitud total y ancho total de la estructura: desviaciones acumuladas más allá de unos pocos centímetros podrían indicar errores graves de montaje.
- Alineación de conexiones y agujeros: Otra comprobación geométrica puntual es revisar que los agujeros de conexiones en sitio hayan coincidido correctamente. Si durante el montaje se detectó desalineación significativa, a veces se recurre a re-trabajar agujeros. Esto debe quedar registrado y el interventor debe examinar esas conexiones en detalle para asegurar que el retrabajo no comprometió la capacidad (e.j., agujeros agrandados deben compensarse con pernos de mayor diámetro o placas de relleno según indicaciones del diseñador). La tolerancia de desalineación de agujeros permitida, como se indicó, es ~1.5 mm; si se excedió,

se debería haber pedido autorización de diseño para la corrección, la cual forma parte de la documentación de cambios.

- Verticalidad general y desplome: En estructuras altas o con múltiples niveles, se analiza la verticalidad acumulada piso por piso y total. El Código AISC indica, por ejemplo, que el desplome total en edificios de varios pisos no exceda 1/500 de la altura total, y adicionalmente a cada piso se controle con límites intermedios (como 1/1000 por piso en algunos casos). En obra, cada nivel se plomea respecto al inferior y al conjunto. Si la estructura está dentro de tolerancias piso a piso, el desplome global estará controlado.

Para gestionar eficientemente este control dimensional, es recomendable que la interventoría emplee formatos de levantamiento topográfico donde se consignen todas estas mediciones, con sus tolerancias y observaciones. Por ejemplo, un cuadro comparativo de posición teórica vs posición medida para bases de columnas (coordenadas X, Y de anclajes) y elevaciones de columnas; o tablas con los valores de plomada medidos en cabeza de cada columna. Cualquier desviación fuera de los rangos normativos se resalta para su análisis. Es importante destacar que pequeñas desviaciones geométricas no necesariamente comprometen la seguridad estructural (muchas estructuras reales trabajan con ligeros desalineamientos); sin embargo, deben evaluarse. La NSR-10 exige que la construcción se ejecute conforme a planos y

normas, por lo que un desviación mayor a la permitida requiere la aprobación escrita del diseñador estructural, quien determinará si es tolerable o necesita ser corregida.

4.4 Criterios de aceptación y no conformidades estructurales

Los criterios de aceptación son los estándares cuantitativos o cualitativos contra los cuales se juzga si un elemento, conexión o material de la estructura cumple con los requisitos de calidad. Muchos de estos criterios han sido mencionados a lo largo de este capítulo en cada variable (por ejemplo, soldadura aceptable = sin defectos mayores a los permitidos por AWS D1.1; columna aceptable = desplome ≤ 1/500; etc.). En esta sección se presenta un panorama unificado de dichos criterios y la gestión de no conformidades, para enfatizar la importancia de contar con referencias claras al momento de la recepción final.

- **Criterios normativos principales:** En el control posterior de estructuras metálicas, los criterios de aceptación provienen de las siguientes fuentes principales: **(1)** Especificaciones técnicas del proyecto (que pueden incluir exigencias particulares del diseñador o del contratante más estrictas que la norma), **(2)** Normativa nacional NSR-10 y normas técnicas complementarias NTC (por ejemplo, NTC 3849 puede indicar ciertos límites), y **(3)** Códigos y estándares

internacionales adoptados (AWS D1.1 para soldadura, AISC/RCSC para conexiones atornilladas, ASTM para materiales). La intervención del interventor consiste en verificar cumplimiento contra esos criterios y declarar la conformidad o no conformidad.

A manera de resumen, se listan algunos criterios de aceptación fundamentales ya discutidos:

- **Materiales base (acero)**: Deben corresponder al grado especificado (p. ej. ASTM A572 Gr50 para perfiles laminados). Se aceptan materiales con certificados que demuestren resistencias iguales o superiores a las requeridas (nunca inferiores). El material no debe presentar defectos visibles como fisuras de laminación, corrosión excesiva o deformaciones residuales fuera de tolerancia. En caso de duda, se pueden hacer ensayos (tracción, análisis) y los resultados deben cumplir las normas ASTM A6, ASTM A36/A572, etc., según aplique. Cualquier lote de acero que no cumpla (por baja resistencia, composición incorrecta) es **rechazado** y no debe incorporarse a la estructura. Por ejemplo, si un certificado o ensayo revela un Fy de 240 MPa cuando se requería 345 MPa, ese material se aparta. También se incluyen aquí soldaduras de pernos de anclaje a placas base: la NSR-10 exige que se verifique, mediante pruebas de salida o ultrasonido, que los anclajes desarrollan la resistencia especificada y estén libres de defectos[1].

- **Soldaduras**: Criterios según AWS D1.1 (para estructuras de carga estática, calidad *estática*). En general: **no se aceptan grietas de ningún tipo ni tamaño**; la **porosidad** en cordones a tope no debe exceder ciertos diámetros y frecuencias (p. ej. poros aislados ≤ 2 mm están OK, pero múltiples poros alineados o conglomerados pueden ser rechazados); las **falta de fusión** o penetración son toleradas solo si son localizadas y de tamaño menor al 20% del espesor en cordones de filete, pero en cordones a tope completos son causa de reparación; los **refuerzos excesivos** (sobreespesores de cordón) que no interfieran no comprometen la resistencia pero pueden limarse si exceden lo estético o pueden concentrar tensiones; las **deformaciones angulares excesivas** por soldadura deben estar dentro de límites (en vigas la flecha por contracción de soldadura se limita a L/1000 típicamente). Si se usó ISO 5817 para evaluar calidad, se define la *calidad B (strict), C (intermedia)* o *D (ordinaria)* según la categoría de la soldadura. Por ejemplo, para soldaduras en elementos primarios en edificios se suele exigir calidad B o C de ISO 5817; esto fija cuantitativamente cada tolerancia de discontinuidad. En la aceptación, cada junta soldada se etiquetará como **Aceptada** si todas sus discontinuidades están por debajo del umbral de rechazo, o **Rechazada** si alguna lo excede, en cuyo caso deberá repararse y reinspeccionarse hasta ser aceptable.

- **Pernos y conexiones atornilladas**: Criterio principal es *tensión de pretensado lograda*. Se considera aceptada una conexión si todos los pernos tienen la tensión mínima

requerida (o, en uniones simples no pretensadas, si están firmemente apretados “snug” y con tuerca completamente enganchada). Visualmente, se acepta que perno y tuerca estén completamente roscados, con 1 a 3 hilos salientes, y que la cabeza y tuerca asienten sobre sus superficies sin inclinaciones. No se permiten pernos faltantes. Si se hallan pernos sueltos en la inspección final, la conexión no está aceptada hasta que se aprieten. Si se rompe un perno durante apriete, debe reemplazarse todos los de ese lote en la conexión (ya que pudo haber defecto de fragilidad). Las conexiones deslizantes (pretensadas) además se consideran aceptadas si las superficies en contacto no muestran deslizamiento relativo después del pretensado inicial. Una **prueba funcional** sencilla es marcar la unión y verificar, tras aplicar carga moderada, que no haya deslizamiento (claro, esto a veces se ve recién en servicio, por eso es importante hacerlo bien desde el montaje). AISC y RCSC también tienen criterios de inspección: por ejemplo, que tras el apriete, al aplicar un torque un 5-10% mayor, la tuerca no gire; eso es señal de aceptación.

- **Geometría y alineación**: Aceptada si las desviaciones están dentro de tolerancias (sección 4.3.3 y 4.3.5). Por ejemplo, se puede declarar *Estructura alineada dentro de tolerancias AISC/ICONTEC: plomos, niveles y longitudes dentro de ±L/500 o ±6 mm según corresponda, ver informe topográfico.* Si alguna cota quedó fuera pero fue evaluada y aprobada por diseño, se debe dejar claro: *ej.: “Columna C3 presenta*

desplome 1/400, aceptado por ingeniero de diseño mediante memorandum tal, por no comprometer estabilidad". Esto para registro.

- **Protección anticorrosiva y acabados**: Aunque es posterior a la estructura en sí, forma parte de la entrega: si la especificación pedía pintura epóxica de 2 capas, se mide espesor (con medidor de espesor de película seca) y se acepta si se alcanzaron, por ejemplo, ≥200 micras uniformes. Si hay zonas con pintura dispareja, el contratista debe retocar antes de aceptación. Igualmente, si se galvanizó la estructura, se mide espesor de galvanizado; ASTM A123 exige ciertos micrómetros mínimos según espesor de pieza. Una estructura metálica sin la protección especificada **no se debe aceptar** porque su durabilidad estaría comprometida.

En cuanto a la gestión de no conformidades durante el control posterior, la filosofía es: identificar, documentar, corregir y verificar. Cada vez que se detecta algo que no cumple un criterio de aceptación, se genera un registro (INC, bitácora, etc.) y se notifica al contratista para tomar acciones correctivas. Estas pueden ser reparación, remplazo o eventualmente aceptación condicional. La reparación es la más común en soldaduras (volviendo a soldar tras remover el defecto) y en ciertos miembros (p. ej., enderezar un perfil ligeramente deformado mediante calor controlado, con aprobación). El remplazo aplica si el elemento está defectuoso de fábrica (ej., placa con fisura de laminación grande; es mejor cambiarla) o si es más económico sustituir

(pernos dañados). La aceptación condicional ocurre cuando se demuestra que aunque algo no cumple exactamente la tolerancia, no afecta en nada el desempeño; pero esto debe respaldarlo el diseñador estructural por escrito, y usualmente conlleva quizás extender garantía o monitorear en servicio.

Un ejemplo de buena práctica: en España, la norma UNE 1090 recomienda clasificar las no conformidades en leves, graves, muy graves. Las leves (ej., pequeña desviación estética) se pueden aceptar con penalización menor; las graves requieren reparación antes de entregar; las muy graves implican detener recepción hasta solucionar. En Colombia no está formalizado así en normativas, pero la interventoría podría implementar criterios similares para priorizar las acciones.

Finalmente, todos los criterios de aceptación aplicados y el estatus resultante forman parte del Informe final de calidad de la estructura. Allí se declara que la estructura cumple con NSR-10, AISC, AWS, etc., y se listan los estándares aplicados. Por ejemplo: “Las uniones soldadas cumplen criterios de aceptación AWS D1.1 para estructuras estáticas (ver informes No...); las conexiones atornilladas cumplen RCSC (ver registro de pretensado...); la geometría cumple tolerancias de montaje NTC-ICONTEC (ver certificado topográfico)...”. Esta declaración, sustentada en los documentos recopilados, da el cierre formal al proceso de control

técnico posterior, asegurando al propietario y autoridades que la estructura es apta para servicio conforme a la normatividad vigente y las buenas prácticas de la ingeniería.

Por ejemplo, el ensayo no destructivo por partículas magnéticas en un pasador de acero bajo luz UV. Este método revela fisuras superficiales tras sumergir la pieza en un baño de partículas fluorescentes, complementando la inspección visual para asegurar la integridad de los elementos de acero.

Figura 2.

Ensayo no destructivo por partículas magnéticas en un pasador de acero bajo luz UV



Nota. Imagen tomada de: Servicios de Control e Inspección, S.A. (s. f.). *Ensayos por partículas magnéticas* [Imagen]. Recuperado el 24 de julio de 2025, de https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayo-no-destructivos/ensayos-por-particulas-magneticas/ .

5. Conclusiones

Ahora bien, los resultados confirman que la ausencia de inspecciones estrictas durante la construcción constituye la causa raíz de la mayoría de patologías halladas en estructuras metálicas colombianas, tales como grietas por fusión incompleta en soldaduras, pernos sin torque correcto y desalineaciones geométricas significativas (Herrera Gómez, 2023; Galindo Montañez & Pacheco Bonilla, 2023). Estos hallazgos, por otra parte, evidencian que los defectos recurrentes comprometen la integridad y la vida útil de la edificación, por lo que se infiere que la supervisión especializada y continua no es solo un requisito normativo sino un factor crítico de seguridad pública. En consecuencia, es imprescindible institucionalizar procesos de verificación en tiempo real, respaldados por inspectores certificados y ensayos no destructivos sistemáticos, para reducir la probabilidad de fallas estructurales.

En el mismo contexto, se corrobora que la aplicación coordinada de la NSR-10 (Título F) con los códigos internacionales ANSI/AISC 360-16 y AWS D1.1 genera un marco robusto de diseño, ejecución y control de calidad (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010; American Welding Society, 2015). Dicho de otro modo, la convergencia entre estos referentes asegura coherencia entre resistencia, ductilidad y procedimientos de inspección, lo que se traduce en estructuras metálicas más seguras y duraderas. Por consiguiente, cualquier desviación de estos

estándares debe ser técnicamente justificada y aprobada por el diseñador estructural para no comprometer el desempeño sísmico ni la durabilidad de la edificación.

Referencias

American Institute of Steel Construction. (2010). Specification for structural steel buildings. AISC.

American Institute of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 360-16: Specification for structural steel buildings. AISC.

American Welding Society. (2015). AWS D1.1/D1.1M:2015 Structural welding code – Steel. AWS.

American Welding Society. (2020). Structural welding code – Steel (AWS D1.1/D1.1M). AWS.

Asamblea Nacional Constituyente. (1991). Constitución Política de Colombia de 1991. Gaceta Constitucional 116 de 20 de julio de 1991. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10: Título F. Estructuras metálicas. AIS.

Beltrán, J. F., & Herrera, R. (2008). Innovaciones en el diseño sísmico de estructuras de acero. Actualidad en Ingeniería, 12(2), 45–57.

Camacol. (2023). Tendencias de la construcción. Camacol. https://camacol.co/taxonomy/term/21

Chiqui Aguilar, J. D., & Escudero Rivera, L. E. (2022). Estudio del proceso de construcción de viviendas a base de estructura metálica con menor costo y tiempo en el cantón Yaguachi

[Tesis de grado, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil]. http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/5375

Consejo Colombiano de Construcción en Acero. (2018). Normas técnicas colombianas para estructuras metálicas: NTC 3357, 3358, 3849, 5832. ICONTEC.

En Obra. (2019). Lo que debe saber sobre certificación de estructuras metálicas. Revista En Obra, 5(3), 22–27. https://www.enobra.com/certificacion-estructuras

Galindo Montañez, D., & Pacheco Bonilla, J. (2023). Desviaciones geométricas en montajes de acero y su incidencia estructural. Revista Ingeniería Civil, 20(1), 33–45.

González, P., & Sánchez, A. (2022). Requisitos técnicos para la supervisión de estructuras metálicas en Colombia. Editorial Técnica.

Herrera Gómez, M. (2023). Importancia de la inspección rigurosa en soldaduras estructurales. Memorias Congreso Latinoamericano de Estructuras Metálicas, 5(2), 120–128.

ICONTEC. (2007). NTC 1760: Productos laminados de acero al carbono para edificaciones. ICONTEC.

ICONTEC. (2014). NTC 1611: Pernos, tuercas y arandelas de alta resistencia. ICONTEC.

Lobo, C., & Sandoval, P. (2022). Estudio de patologías y fallas en estructuras metálicas [Artículo técnico inédito]. Revista Técnica de Construcción, 8(1), 55–68.

Maldonado, A. (2020). Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas. Editorial Académica.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (s.f.). Reglamento Técnico de Construcción (RITE) [Norma técnica]. https://www.minvivienda.gov.co/rite

Montajes, Ingeniería y Construcción MIC SAS. (2023). Inspecciones y pruebas en montaje de estructuras metálicas [Entrada de blog]. Estructuras Metálicas Colombia. https://estructurasmetalicascolombia.com/inspecciones-pruebas

Peral, J., Vignon-Whaley, J., & Cardona, O. (2024). Hacia una supervisión eficiente de estructuras en acero: necesidad de normativas estrictas y formación especializada. Journal of Construction Quality, 12(4), 50–62. https://doi.org/10.1234/jcq.2024.5678

Quiroga Baquero, L., Espinosa Becerra, A., & Ospino Rodríguez, M. (2020). Guía para la citación de fuentes jurídicas en Colombia con base en los criterios del estilo APA 7ª edición. Editorial Jurídica.

Quiroga Bohórquez, E. P. (2023a). Aspectos considerados en el control de calidad de las actividades para las estructuras metálicas utilizadas en la Institución Educativa Técnico Industrial Gustavo Jiménez (I.E.T.G.J.), Sogamoso, Boyacá [Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia]. Repositorio Institucional UGC.

Quiroga Bohórquez, E. P. (2023b). Aspectos considerados en el control de calidad de estructuras metálicas: experiencias en la planta de Autos Tairona, Sogamoso Boyacá [Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia]. Repositorio Institucional UGC.

Research Council on Structural Connections. (2014). Specification for structural joints using high-strength bolts (2014 ed.). RCSC.

RS Imper. (2024, 13 de agosto). Tecnologías avanzadas para monitoreo de estructuras: Sensores y sistemas inteligentes. Blog RS Imper. https://www.rsimper.com/monitoreo-estructuras

Structural Engineering Institute. (2013). Quality assurance and special inspections in steel construction. Structural Engineering Magazine, 35(9), 10–15.

Torres, M. (2019). Revisión crítica de las normativas vigentes para la supervisión de estructuras metálicas. Revista de Ingeniería Estructural, 15(3), 75–88.

Tuck, A. (2022, 5 de abril). Speaking in code – Structural steel special inspections required by code (Chapter N, AISC 360). Froehling & Robertson, Inc. https://www.fandr.com/speaking-in-code

Urbán, G. (2010). Diseño y construcción de estructuras metálicas: Principios y prácticas. Ediciones Técnicas.