



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

SISMORRESISTENTES

TEMA:

PROPUESTA DE PROTOCOLO DE INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO

MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA

INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN LA CIUDAD DE QUITO

AUTORES:

JHONNY DAVID REYES CRUZ

HUMBERTO JAVIER OÑA MORALES

TUTOR:

BOLIVAR MAURICIO CELY VELEZ

QUITO, ABRIL DE 2026

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FORMATOS	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Justificación	1
1.1.2 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
2.1 Antecedentes investigativos	5
2.2 Bases conceptuales	6
2.2.1 Soldadura estructural en edificaciones de acero	6
2.2.2 Discontinuidades en soldaduras	6
2.2.3 Ensayos no destructivos (END)	7
2.2.4 Clasificación funcional de las soldaduras estructurales	11
2.2.5 Severidad y criticidad de las discontinuidades en soldaduras	12
2.2.6 Relación entre la configuración de la unión soldada y la selección de ensayos no destructivos	13
2.3 Integridad estructural en estructuras de acero	14
2.3.1 Definición de integridad estructural	14

2.3.2	Integridad estructural y continuidad mecánica de las soldaduras.....	15
2.3.3	Influencia de las discontinuidades de soldadura en el desempeño estructural 15	
2.3.4	Rol de los ensayos no destructivos en la evaluación de la integridad estructural	15
2.3.5	Integridad estructural de soldaduras en estructuras ubicadas en zonas sísmicas 16	
2.4	Normativa aplicada a la inspección de END	17
2.4.1	Normativa Internacional	17
2.4.2	Norma Ecuatoriana de la Construcción	19
2.5	Requisitos técnicos para la ejecución de soldadura estructural	21
2.5.1	Calificación del procedimiento de soldadura (WPS/PQR).....	22
2.5.2	Calificación del Soldador	22
2.5.3	Calificación de desempeño del soldador (WPQ, Welder Performance Qualification).....	23
2.5.4	Requisitos mínimos para inspección de soldadura según AWS D1.1	23
2.6	Criterios de selección para la aplicación de los END.....	24
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE SOLDADURAS PARA SU APLICACIÓN EN UN PROTOCOLO		26
3.1	Técnicas de Inspección Superficiales	27
3.1.1	Inspección Visual (VT).....	27
3.1.2	Líquidos Penetrantes (PT)	29
3.1.3	Partículas Magnéticas (MT)	31
3.2	Técnicas de inspección volumétricas	33
3.2.1	Ultrasonido (UT)	34
3.2.2	Radiografía industrial (RT).....	36
3.3	Comparación y criterios de selección de métodos de inspección.....	38
CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE PROTOCOLO DE INSPECCIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS		41

4.1	Introducción.....	41
4.2	Alcance del protocolo	41
4.3	Estructura general del protocolo	42
4.4	Procedimiento general de inspección	42
4.5	Formatos de registro de inspección	43
4.5.1	Estructura del formato de inspección	43
4.5.2	Formatos específicos por método	44
4.6	Procedimientos de inspección por método END	44
4.6.1	Inspección visual (VT)	44
4.6.2	Líquidos penetrantes (PT)	45
4.6.3	Partículas magnéticas (MT).....	45
4.6.4	Ultrasonido (UT)	46
4.6.5	Radiografía industrial (RT).....	46
4.7	Criterios de selección de métodos de inspección	47
4.7.1	Tabla de criterios de selección de métodos de inspección.....	49
4.8	Criterios de aceptación y rechazo	51
4.9	Procedimientos de inspección por método	52
4.9.1	Procedimiento de inspección visual (VT)	53
4.9.2	Procedimiento de inspección por líquidos penetrantes (PT)	54
4.9.3	Procedimiento de inspección por partículas magnéticas (MT)	56
4.9.4	Procedimiento de inspección por ultrasonido (UT).....	58
4.10	Formatos de registro de inspección	60
4.10.1	Formato de inspección visual (VT)	61
4.10.2	Formato de inspección por líquidos penetrantes (PT)	64
4.10.3	Formato de inspección por partículas magnéticas (MT)	68
4.10.4	Formato de inspección por ultrasonido (UT)	72
CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DEL PROTOCOLO DE INSPECCIÓN EN UNA ESTRUCTURA METÁLICA EN LA CIUDAD DE QUITO		79

5.1	Descripción de la estructura inspeccionada.....	79
5.2	Identificación y clasificación de soldaduras	80
5.3	Aplicación de ensayos no destructivos	82
5.3.1	Registro de la aplicación del protocolo	83
5.4	Resultados obtenidos	100
5.4.1	Interpretación del comportamiento del protocolo	101
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		103
6.1	Conclusiones.....	103
6.2	Recomendaciones	104
BIBLIOGRAFÍA		106
ANEXOS		109
Anexo A. Certificación del personal de ensayos no destructivos		109
Anexo B. Certificados de calibración de equipos.....		111
Anexo C. Procedimiento de soldadura (WPS)		116
Anexo D. Calificación del soldador (WPQ).....		118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Discontinuidades en soldaduras	7
Figura 2: Ensayo no destructivo superficial	9
Figura 3: Ensayo no destructivo volumétrico	10
Figura 4: Ensayo de inspección visual (VT)	28
Figura 5: Ensayo por líquidos penetrantes (PT)	30
Figura 6: Ensayo por partículas magnéticas (MT)	32
Figura 7: Ensayo por ultrasonido (UT).....	35
Figura 8: Ensayo por radiografía industrial (RT)	37
Figura 9: Flujograma para la selección de métodos de inspección	49
Figura 10: Certificación de persona END	110
Figura 11: Certificado de calibración Pie de rey	111
Figura 12: Certificado de calibración flexómetro.....	112
Figura 13: Certificado de calibración galga de soldadura	113
Figura 14: Certificado de verificación yugo magnético	114
Figura 15: Certificado de calibración detector de fallas UT	115
Figura 16: WPS SEDEMI página 1 de 2	116
Figura 17: WPS SEDEMI página 2 de 2	117
Figura 18: WPQ SEDEMI	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterios de selección de métodos de inspección	50
Tabla 2: Clasificación de aceptación de discontinuidades.....	52
Tabla 3: Resumen de resultados de inspección por junta	100

ÍNDICE DE FORMATOS

Formato 1: Inspección visual (VT).....	62
--	----

Formato 2: Inspección por líquidos penetrantes (PT)	65
Formato 3: Inspección por partículas magnéticas (MT).....	69
Formato 4: Inspección por ultrasonido (UT)	74
Formato 5: Registro de inspección visual (VT) en juntas J1–J7	87
Formato 6: Registro de inspección por líquidos penetrantes (PT) en juntas J1–J7	91
Formato 7: Registro de inspección por partículas magnéticas (MT) en juntas J1–J7	95
Formato 8: Registro de inspección por ultrasonido (UT) en juntas J1–J7	99

RESUMEN

El presente estudio tiene como propósito desarrollar un protocolo de inspección de soldaduras en estructuras de acero mediante la aplicación de ensayos no destructivos (END), orientado a la identificación de discontinuidades que puedan comprometer la integridad estructural de edificaciones en la ciudad de Quito.

La motivación del proyecto surge de la realidad constructiva local, donde la práctica de inspección especializada de soldaduras no se encuentra arraigada. Esto obedece, en gran medida, a una cultura que prioriza la reducción de costos iniciales sobre los procesos de aseguramiento de calidad, lo que incrementa la posibilidad de que existan uniones deficientes sin ser detectadas. En un contexto urbano como Quito, emplazado en una zona de alta sismicidad, esta carencia representa un riesgo significativo tanto para la seguridad de los ocupantes como para la resiliencia de las edificaciones.

La investigación contempla la revisión y sistematización de los principales ensayos no destructivos aplicables a soldaduras estructurales, entre ellos ultrasonido, tintas penetrantes, radiografía, partículas magnéticas y emisión acústica. Además, se analizarán los tipos de discontinuidades más frecuentes y su impacto potencial en el comportamiento de las estructuras.

El resultado esperado es un documento técnico que establezca procedimientos claros y adaptados a la realidad ecuatoriana para la inspección de soldaduras en estructuras metálicas, constituyendo así una herramienta de apoyo para profesionales, empresas constructoras y entidades de control. La implementación de este protocolo busca contribuir al fortalecimiento de la cultura de calidad en la construcción y a la mejora de la seguridad estructural en la ciudad de Quito.

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an inspection protocol for welds in steel structures through the application of non-destructive testing (NDT), aimed at identifying discontinuities that may compromise the structural integrity of buildings in the city of Quito.

The motivation for this project arises from the current construction practices in the local context, where specialized weld inspection is not well established. This is largely due to a culture that prioritizes the reduction of initial costs over quality assurance processes, increasing the likelihood of undetected deficient weld joints. In an urban environment such as Quito, located in a high-seismicity zone, this shortcoming represents a significant risk to both occupant safety and building resilience.

This project includes the review and systematization of the main non-destructive testing methods applicable to structural welds, including ultrasonic testing, liquid penetrant testing, radiographic testing, magnetic particle testing, and acoustic emission testing. Additionally, the most frequent types of discontinuities and their potential impact on structural performance will be analyzed.

The expected result is a technical document that establishes clear procedures adapted to the Ecuadorian context for the inspection of welds in steel structures, thus serving as a support tool for professionals, construction companies, and regulatory agencies. The implementation of this protocol seeks to contribute to strengthening the culture of quality in the construction sector and improving structural safety in the city of Quito.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Introducción

1.1.1 Justificación

En el contexto ecuatoriano, particularmente en la ciudad de Quito, la construcción de edificaciones metálicas no siempre está acompañada de un estricto control técnico. Los profesionales en la industria de la construcción suelen priorizar los costos iniciales de la obra por encima de la implementación de procesos de control de calidad, lo que reduce la aplicación de metodologías de inspección de soldaduras mediante métodos especializados. Esta situación genera incertidumbre respecto a la confiabilidad de las estructuras de acero, considerando que su desempeño depende directamente de la calidad de las conexiones soldadas.

La ausencia de protocolos locales para la inspección de soldaduras con ensayos no destructivos (END) deja un vacío en la práctica profesional, pues limita la detección oportuna de discontinuidades que pueden comprometer la integridad estructural, especialmente frente a cargas sísmicas en una ciudad altamente expuesta como lo es Quito.

A nivel internacional, organismos como la American Welding Society (AWS) y el American Society of Mechanical Engineers (ASME) han establecido normas que regulan la aplicación de ensayos no destructivos (END) en soldaduras. Estas normas describen los procedimientos, criterios de aceptación y calificación del personal, generando marcos técnicos de gran solidez. No obstante, en Ecuador no existe un protocolo específico adaptado al sector de la construcción de edificaciones, lo que dificulta la implementación estandarizada de estas prácticas.

De este modo, el proyecto se justifica no solo por la necesidad de garantizar la seguridad de las edificaciones en una ciudad altamente sísmica, sino también por el vacío normativo y procedimental existente en el país, que demanda propuestas técnicas adaptadas al medio local y de utilidad para profesionales, contratistas y organismos de control.

1.1.2 Planteamiento del problema

Las estructuras de acero se han consolidado en el ámbito constructivo ecuatoriano como una alternativa eficiente frente a otros sistemas estructurales, especialmente en edificaciones de mediana y gran altura. Sin embargo, la calidad y confiabilidad de estas estructuras depende en gran medida de las uniones soldadas, que constituyen los puntos más críticos para la transmisión de esfuerzos.

En la ciudad de Quito, la práctica profesional evidencia que los procesos de inspección de soldaduras no se realizan de forma sistemática ni estandarizada. En la mayoría de los casos, las verificaciones se limitan a inspecciones visuales de carácter básico, insuficientes para detectar discontinuidades internas o superficiales que pueden comprometer la resistencia y ductilidad del material. Defectos como falta de fusión, porosidad, grietas o inclusiones suelen pasar inadvertidos, aumentando la vulnerabilidad de la estructura frente a cargas de servicio y, de manera más preocupante, frente a sollicitaciones sísmicas.

La carencia de un protocolo nacional de inspección mediante ensayos no destructivos (END) profundiza este problema. Si bien existen normas internacionales reconocidas, como AWS D1.1, ASME, estas no han sido adaptadas al contexto local de la construcción ecuatoriana. En consecuencia, cada proyecto aplica criterios diversos y, en muchos casos, carece de un procedimiento de control documentado que garantice uniformidad en la evaluación de soldaduras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer un protocolo de inspección de estructuras de acero mediante ensayos no destructivos para la identificación de afectaciones en la integridad estructural en la ciudad de Quito.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar los fundamentos teóricos relacionados con las discontinuidades en soldaduras, la integridad estructural y los ensayos no destructivos, con el fin de establecer una base conceptual para la evaluación de uniones soldadas.

- Evaluar técnicamente los principales métodos de inspección mediante ensayos no destructivos, considerando sus principios de funcionamiento, alcances, limitaciones y condiciones de aplicabilidad en estructuras de acero.
- Establecer criterios para la selección de métodos de inspección en función de la criticidad estructural, el tipo de soldadura y las condiciones de accesibilidad.
- Desarrollar un protocolo de inspección de soldaduras estructurales que defina la secuencia de evaluación, los métodos a emplear y los niveles de exigencia requeridos.
- Aplicar el protocolo propuesto en un caso de estudio correspondiente a una edificación de estructura metálica, con el fin de verificar su aplicabilidad.
- Analizar los resultados obtenidos durante la aplicación del protocolo, identificando sus alcances, limitaciones y posibles mejoras.

1.3 Alcance

El presente estudio tiene como alcance el desarrollo de un protocolo técnico de inspección de soldaduras estructurales mediante ensayos no destructivos (END), orientado a edificaciones de acero ubicadas en zonas de alta sismicidad como es la ciudad de Quito.

Para el cumplimiento de este objetivo, la investigación aborda inicialmente el análisis conceptual de las discontinuidades en soldaduras, la integridad estructural y los principios de los ensayos no destructivos, estableciendo una base teórica que permite comprender la relación entre la calidad de las uniones soldadas y el desempeño estructural.

Posteriormente, se desarrolla un análisis técnico de los principales métodos de inspección, evaluando sus fundamentos, alcances, limitaciones y condiciones de aplicabilidad, con el fin de establecer criterios para su selección en función de la criticidad estructural, el tipo de soldadura y las condiciones de inspección.

Con base en este análisis, se propone un protocolo de inspección que define la secuencia de evaluación, los métodos a emplear y los niveles de exigencia requeridos para diferentes tipos de uniones soldadas.

Finalmente, el protocolo es aplicado en un caso de estudio correspondiente a una edificación de estructura metálica, con el propósito de evaluar su aplicabilidad, identificar limitaciones

y analizar su contribución en la detección de discontinuidades relevantes para la integridad estructural.

Es importante señalar que el estudio se centrará en soldaduras de estructuras metálicas utilizadas en edificaciones y no abarcará aplicaciones industriales o de otro tipo. Asimismo, aunque se ejecutarán ensayos no destructivos para fines de validación del protocolo, estos se realizarán en una escala representativa y no buscan sustituir procesos de control de calidad a nivel normativo en proyectos de gran envergadura.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos

La calidad de las uniones soldadas ha sido históricamente un aspecto crítico dentro de la ingeniería estructural, particularmente en edificaciones de acero ubicadas en zonas de alta sismicidad. Si bien la soldadura es ampliamente utilizada por su eficiencia y versatilidad, diversos estudios han demostrado que constituye un punto potencial de vulnerabilidad cuando no se controla adecuadamente su ejecución e inspección.

Los eventos sísmicos ocurridos a finales del siglo XX evidenciaron de forma contundente esta problemática. Tras los terremotos de Northridge (1994) en Estados Unidos y Kobe (1995) en Japón, se documentaron fallas frágiles en conexiones soldadas que, en muchos casos, no presentaban daños visibles previos al colapso. Investigaciones posteriores atribuyeron estas fallas a la presencia de discontinuidades internas no detectadas, procedimientos de soldadura inadecuados y ausencia de procesos sistemáticos de ensayos no destructivos durante la etapa constructiva (FEMA, 2000). Estos eventos marcaron un punto de inflexión en la regulación internacional de las soldaduras estructurales y en los criterios de inspección de conexiones críticas.

En los últimos años, la investigación científica ha reforzado la necesidad de implementar técnicas avanzadas de inspección para la detección temprana de discontinuidades. Estudios contemporáneos señalan que los recubrimientos protectores actualmente empleados —como pinturas, imprimaciones y galvanizados— dificultan la inspección convencional, lo que exige el uso de métodos END más precisos y adaptables (Ji et al., 2025). Asimismo, investigaciones sobre ondas guiadas y técnicas ultrasónicas avanzadas han demostrado una mayor capacidad para identificar defectos internos en zonas de acceso limitado, ampliando el alcance de la inspección más allá de la etapa constructiva (Uzun & Gustiani, 2024).

Por otra parte, estudios enfocados en el comportamiento a fatiga del acero evidencian que la aplicación sistemática de END permite identificar estados tempranos de deterioro en elementos sometidos a cargas cíclicas, condición especialmente relevante en regiones sísmicas (Whittington, 2023). Estas investigaciones destacan el rol de los END como herramientas de prevención y mantenimiento estructural basado en evidencia.

En el contexto latinoamericano y ecuatoriano, la adopción de estas metodologías ha sido progresiva. En la práctica local, la inspección de soldaduras se centra mayoritariamente en la evaluación visual, dejando la aplicación de END especializados sujeta a criterios discrecionales del contratista o del supervisor. La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) reconoce la necesidad de asegurar la calidad de las soldaduras, pero no establece procedimientos específicos ni criterios obligatorios para la aplicación de END. Esta situación genera una variabilidad significativa en la práctica constructiva y evidencia la necesidad de desarrollar un protocolo técnico adaptado a la realidad local.

2.2 Bases conceptuales

2.2.1 Soldadura estructural en edificaciones de acero

La soldadura estructural es un proceso de unión permanente que permite generar continuidad mecánica entre elementos de acero, garantizando la transmisión adecuada de esfuerzos dentro del sistema resistente. A diferencia de los elementos laminados en fábrica, cuyas propiedades mecánicas son homogéneas y controladas, la calidad de una soldadura depende de múltiples variables operativas, tales como la preparación de la junta, los parámetros del proceso, el material de aporte y la habilidad del soldador.

Estas características convierten a la soldadura en uno de los componentes más sensibles de una estructura metálica. Una ejecución deficiente puede originar zonas de concentración de esfuerzos, iniciar procesos de fisuración y comprometer el desempeño estructural, especialmente bajo cargas cíclicas asociadas a eventos sísmicos. En este contexto, la inspección mediante ensayos no destructivos se convierte en un mecanismo fundamental para verificar la calidad de las uniones soldadas.

2.2.2 Discontinuidades en soldaduras

Una discontinuidad corresponde a cualquier variación no deseada en la geometría o estructura del material base o del cordón de soldadura. No todas las discontinuidades constituyen defectos inaceptables desde el punto de vista estructural; no obstante, representan potenciales focos de debilidad cuya relevancia depende de su tipo, tamaño, orientación y ubicación (Whittington, 2023).

Entre las discontinuidades más comunes se encuentran la porosidad, inclusiones de escoria, falta de fusión, falta de penetración, mordeduras y fisuras superficiales o internas. Algunas de estas pueden identificarse mediante inspección visual; sin embargo, las discontinuidades internas como la falta de fusión y las fisuras son particularmente peligrosas, ya que pueden propagarse bajo sollicitaciones repetitivas y desencadenar fallas frágiles.

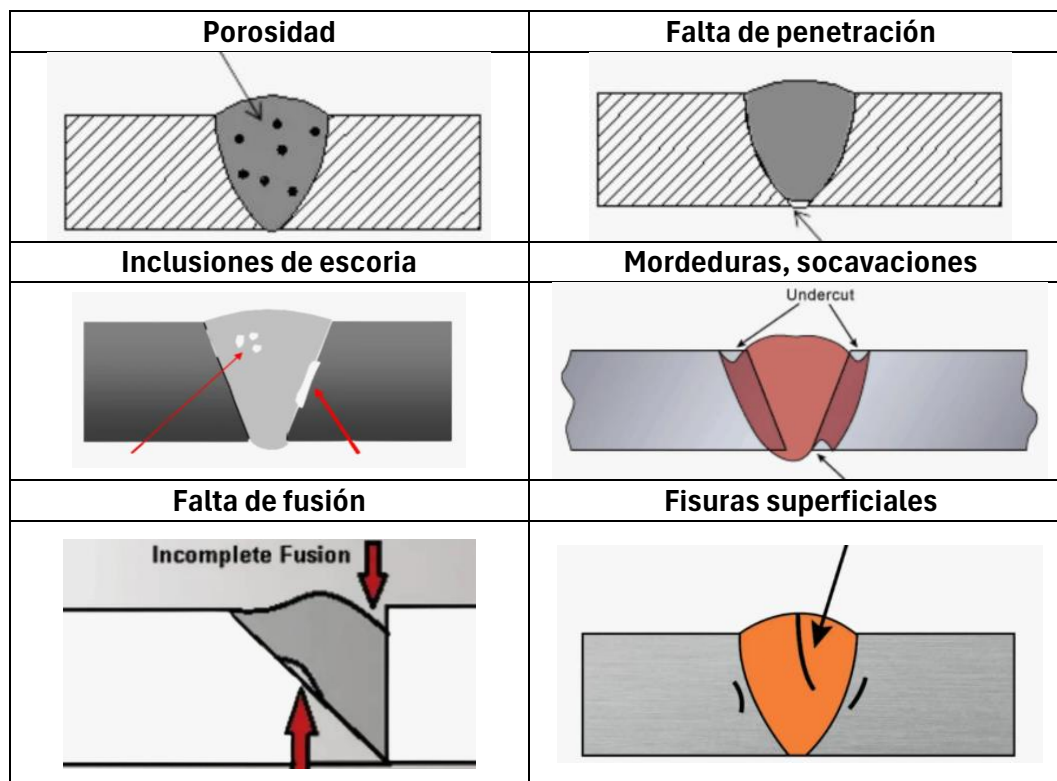


Figura 1. Discontinuidades en soldaduras
Fuente: Adaptado de (Vasco, 2021)

La evaluación de discontinuidades no debe limitarse a su identificación, sino que debe considerar su geometría, orientación y severidad, variables que condicionan directamente su impacto en el desempeño estructural. Por lo tanto, técnicas como el ultrasonido permiten una caracterización más precisa de los defectos, proporcionando información fundamental para la toma de decisiones técnicas respecto a la aceptación, reparación o refuerzo de las soldaduras (Uzun & Gustiani, 2024). Este enfoque resulta esencial para el desarrollo de protocolos de inspección basados en criterios de desempeño estructural.

2.2.3 Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos (END) constituyen un conjunto de técnicas de evaluación que permiten examinar la calidad e integridad de materiales y uniones sin alterar su funcionalidad

ni generar daño permanente en los elementos inspeccionados. En el ámbito de las estructuras de acero, los END representan una herramienta fundamental para el control de calidad de las soldaduras, ya que posibilitan la detección de discontinuidades tanto superficiales como internas que no pueden ser identificadas mediante métodos convencionales de inspección visual (Whittington, 2023).

A diferencia de los ensayos destructivos, que requieren la extracción de probetas y la interrupción del servicio del elemento evaluado, los END permiten realizar inspecciones directamente en obra o en taller, incluso en estructuras ya construidas o en servicio. Esta característica los convierte en una alternativa técnicamente adecuada para garantizar la continuidad estructural y la confiabilidad de las conexiones soldadas, especialmente en edificaciones localizadas en zonas sísmicas, donde la calidad de las uniones adquiere un rol crítico en el desempeño global del sistema estructural (Castillo, 2022).

Desde una perspectiva conceptual, los END no deben entenderse únicamente como un mecanismo de detección de defectos, sino como parte de un sistema integral de aseguramiento de calidad que complementa el diseño estructural, los procedimientos de soldadura y la calificación del personal involucrado. Diversos estudios recientes destacan que la aplicación sistemática de END contribuye significativamente a reducir la probabilidad de fallas frágiles asociadas a discontinuidades no detectadas durante la ejecución de las soldaduras (Uzun & Gustiani, 2024).

2.2.3.1 Clasificación de los ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos pueden clasificarse, de manera general, en función del tipo de discontinuidad que son capaces de detectar y del principio físico en el que se basan. Esta clasificación resulta esencial para comprender el alcance y las limitaciones de cada método, y constituye la base conceptual para su correcta selección dentro de un protocolo de inspección de soldaduras estructurales.

a) Ensayos no destructivos superficiales

Los ensayos superficiales están orientados a la detección de discontinuidades abiertas a la superficie o ubicadas en zonas muy próximas a ella. Estos métodos resultan especialmente útiles para identificar fisuras superficiales, mordeduras, socavaciones y otros defectos asociados a una ejecución inadecuada del cordón de soldadura. Su aplicación es común en

etapas tempranas del control de calidad y en soldaduras donde se espera que las discontinuidades se manifiesten de forma externa (Castillo, 2022).



Figura 2: Ensayo no destructivo superficial
Fuente: Elaboración propia

Entre las principales ventajas de los ensayos superficiales se encuentran su relativa simplicidad, bajo costo operativo y facilidad de aplicación en obra. Sin embargo, su principal limitación radica en que no permiten evaluar la condición interna de la soldadura, por lo que su uso aislado no resulta suficiente en uniones estructuralmente críticas o sometidas a cargas cíclicas severas (Whittington, 2023).

b) Ensayos no destructivos volumétricos

Los ensayos volumétricos permiten evaluar el interior del cordón de soldadura y del material base adyacente, posibilitando la detección de discontinuidades internas como falta de fusión, falta de penetración, inclusiones y fisuras internas. Este tipo de ensayos resulta indispensable en soldaduras cuya función es garantizar la continuidad mecánica del elemento estructural, como empalmes, conexiones viga–columna y uniones pertenecientes al sistema sismorresistente (Miño Vaca, 2018).



Figura 3: Ensayo no destructivo volumétrico
Fuente: Elaboración propia

La principal fortaleza de los ensayos volumétricos radica en su capacidad para caracterizar la geometría, orientación y extensión de las discontinuidades internas, información clave para evaluar su severidad y su impacto en el desempeño estructural. Estudios recientes demuestran que el uso de técnicas volumétricas avanzadas permite identificar defectos críticos incluso en soldaduras recubiertas o de geometría compleja, sin necesidad de remover sistemas de protección superficial, optimizando los procesos de inspección en estructuras reales (Ji et al., 2025).

No obstante, estos métodos suelen requerir personal altamente calificado, equipos especializados y mayores costos, lo que refuerza la necesidad de establecer criterios técnicos claros para su aplicación, evitando su uso indiscriminado y orientándolos prioritariamente a soldaduras de mayor relevancia estructural (Uzun & Gustiani, 2024).

Esta clasificación constituye la base para la selección racional de los métodos de inspección dentro de un protocolo técnico, permitiendo asignar cada ensayo en función del tipo de discontinuidad esperada y la criticidad de la soldadura.

2.2.4 Clasificación funcional de las soldaduras estructurales

En las estructuras de acero, no todas las soldaduras cumplen la misma función dentro del sistema resistente, ni tienen el mismo impacto sobre la seguridad global de la edificación. Por esta razón, resulta técnicamente necesario clasificar las soldaduras de acuerdo con su función estructural, ya que esta clasificación permite establecer niveles diferenciados de control, inspección y exigencia técnica durante su ejecución y evaluación (Castillo, 2022).

Desde un enfoque funcional, las soldaduras estructurales pueden clasificarse en soldaduras críticas, soldaduras secundarias y soldaduras no estructurales. Esta distinción no responde únicamente a criterios geométricos, sino principalmente al rol que cumple la unión en la transmisión de esfuerzos y en el comportamiento global de la estructura frente a cargas gravitacionales y sísmicas.

Las soldaduras críticas son aquellas cuya falla puede comprometer directamente la estabilidad del sistema estructural o provocar mecanismos de colapso progresivo. En este grupo se incluyen, por ejemplo, las conexiones viga–columna en marcos resistentes a momento, empalmes de columnas y uniones que forman parte del sistema principal de disipación de energía. Diversos estudios han señalado que estas soldaduras deben ser objeto de inspecciones más rigurosas y del uso obligatorio de ensayos no destructivos volumétricos, como el ultrasonido o la radiografía, debido a las elevadas demandas a las que están sometidas (Miño Vaca, 2018).

Las soldaduras secundarias corresponden a uniones que, si bien participan en la transmisión de esfuerzos, no comprometen directamente la estabilidad global en caso de falla localizada. Estas incluyen uniones de elementos secundarios, rigidizadores, cartelas y componentes auxiliares. En estos casos, los criterios de inspección pueden ser menos exigentes, combinando inspección visual con ensayos no destructivos superficiales, según el nivel de sollicitación y la importancia del elemento dentro del sistema estructural (Cueva & Paredes, 2018).

Finalmente, las soldaduras no estructurales cumplen funciones principalmente constructivas o de fijación, sin una contribución significativa al sistema resistente. Aunque su falla no genera consecuencias estructurales relevantes, estas soldaduras deben igualmente cumplir requisitos mínimos de calidad para evitar problemas de durabilidad o mantenimiento.

Esta clasificación funcional constituye un elemento clave para el desarrollo de un protocolo de inspección, ya que permite definir qué soldaduras deben inspeccionarse, con qué método y con qué nivel de exigencia.

2.2.5 Severidad y criticidad de las discontinuidades en soldaduras

La presencia de discontinuidades en una soldadura no implica necesariamente que la unión sea inaceptable desde el punto de vista estructural. Sin embargo, la severidad y criticidad de dichas discontinuidades determinan su impacto real sobre la resistencia, ductilidad y durabilidad de la conexión. Por ello, resulta fundamental distinguir entre la simple existencia de una discontinuidad y su relevancia estructural (Whittington, 2023).

La severidad de una discontinuidad está asociada a características como su tamaño, orientación, ubicación y tipo. Por ejemplo, discontinuidades volumétricas pequeñas, como poros aislados, pueden tener un impacto limitado en determinadas aplicaciones, mientras que defectos planos, como fisuras o falta de fusión, representan una condición mucho más crítica debido a su alta capacidad de concentración de esfuerzos (Uzun & Gustiani, 2024).

Por otro lado, la criticidad de una discontinuidad depende del contexto estructural en el que se encuentra la soldadura. Una misma discontinuidad puede ser aceptable en una soldadura secundaria, pero inaceptable en una unión crítica sometida a cargas cíclicas o sísmicas. Estudios desarrollados en estructuras metálicas han demostrado que defectos internos detectados mediante ultrasonido en soldaduras críticas se asocian con una reducción significativa de la capacidad de deformación plástica de las conexiones (Miño Vaca, 2018).

Este enfoque evidencia que la evaluación de soldaduras no debe basarse únicamente en criterios de aceptación genéricos, sino en una valoración integrada que considere tanto la severidad del defecto como la función estructural de la unión. Dicho esto, los ensayos no destructivos se convierten en herramientas indispensables para caracterizar adecuadamente las discontinuidades y fundamentar decisiones técnicas sobre reparación, refuerzo o aceptación.

La incorporación de criterios de severidad y criticidad permiten pasar de una evaluación descriptiva a una evaluación basada en el desempeño estructural, alineada con las exigencias de seguridad en zonas sísmicas.

2.2.6 Relación entre la configuración de la unión soldada y la selección de ensayos no destructivos

La selección de los ensayos no destructivos para la inspección de soldaduras estructurales debe responder a criterios técnicos vinculados a la configuración de la unión, su función estructural, el espesor del material y la accesibilidad del cordón, y no a la aplicación indiscriminada de un único método de inspección. En este sentido, la geometría y el tipo de soldadura condicionan de manera directa la capacidad de cada método END para detectar discontinuidades relevantes (Castillo, 2022).

En uniones soldadas que buscan garantizar continuidad total del elemento estructural —como empalmes o conexiones ejecutadas mediante soldaduras a tope de penetración completa— resulta indispensable la aplicación de métodos volumétricos. En este tipo de configuraciones, los defectos internos como falta de fusión o fisuras planas no pueden ser identificados mediante inspección superficial, por lo que técnicas como el ultrasonido se constituyen en herramientas fundamentales para evaluar la calidad interna del cordón y su continuidad mecánica (Uzun & Gustiani, 2024).

Por el contrario, en soldaduras ejecutadas mediante cordones de filete, comúnmente empleadas en uniones de elementos secundarios, rigidizadores o componentes auxiliares, las discontinuidades más frecuentes suelen manifestarse en la superficie o en zonas próximas a ella. En estos casos, los ensayos superficiales como líquidos penetrantes y partículas magnéticas permiten identificar fisuras, mordeduras y defectos de ejecución con una eficiencia adecuada y un menor costo operativo, lo que los hace compatibles con inspecciones extensivas en obra (Castillo, 2022).

Adicionalmente, factores como el espesor del material y la complejidad geométrica de la unión influyen en la elección del método END. En soldaduras de gran espesor o con geometrías complejas, el ultrasonido ha demostrado una mayor capacidad para caracterizar la orientación y extensión de discontinuidades internas, incluso en condiciones de acceso limitado. Estudios recientes evidencian que estas técnicas permiten evaluar soldaduras recubiertas sin necesidad de remover sistemas de protección superficial, optimizando los tiempos y costos de inspección (Ji et al., 2025).

Desde un enfoque aplicado, la relación entre la configuración de la unión soldada y la selección del método de inspección constituye un criterio esencial para el desarrollo de un protocolo de inspección eficiente. Este enfoque permite asignar los recursos de inspección de manera racional, concentrando los métodos más rigurosos en uniones estructuralmente críticas y evitando la aplicación innecesaria de técnicas complejas en soldaduras de menor relevancia.

En consecuencia, un protocolo de inspección técnicamente fundamentado debe establecer criterios claros que vinculen el tipo de unión, su función estructural y el nivel de exigencia de inspección, garantizando así una evaluación coherente y efectiva de la calidad de las soldaduras en estructuras de acero.

2.3 Integridad estructural en estructuras de acero

La integridad estructural, en el contexto de las estructuras de acero, se encuentra estrechamente vinculada al desempeño real de las uniones soldadas, ya que estas constituyen los puntos de transferencia de esfuerzos entre los elementos resistentes (Castillo, 2022).

Desde un enfoque aplicado, la integridad estructural no se limita a la verificación teórica de resistencia, sino que incorpora la evaluación del estado físico de las uniones ejecutadas en obra y taller. Investigaciones realizadas en estructuras metálicas inspeccionadas mediante ensayos no destructivos evidencian que una proporción significativa de las soldaduras presenta discontinuidades internas no detectables mediante inspección visual, las cuales pueden afectar la continuidad estructural del sistema (Miño Vaca, 2018).

2.3.1 Definición de integridad estructural

Desde una perspectiva técnica, la integridad estructural puede definirse como el estado en el cual una estructura mantiene su comportamiento esperado frente a cargas estáticas, dinámicas y accidentales, sin desarrollar mecanismos de falla inaceptables. Este enfoque considera tanto la resistencia última como la ductilidad, la capacidad de disipación de energía y la redundancia del sistema estructural (Castillo, 2022).

En el contexto latinoamericano, la integridad estructural se ha abordado principalmente desde la necesidad de reducir la vulnerabilidad sísmica del parque edificatorio existente, destacando

la importancia del control constructivo y la inspección especializada como complementos indispensables al diseño estructural (Castillo, 2022).

2.3.2 Integridad estructural y continuidad mecánica de las soldaduras

La continuidad mecánica en una estructura metálica depende directamente de la calidad de las soldaduras que conectan vigas, columnas y elementos secundarios. Cuando una soldadura presenta defectos como falta de penetración o falta de fusión, se generan zonas de concentración de esfuerzos que alteran la distribución interna de fuerzas, afectando la integridad estructural del conjunto (Castro et al., 2018).

En estudios desarrollados en el Ecuador, se ha identificado que estas discontinuidades no solo reducen la resistencia de la conexión, sino que también limitan su capacidad de deformación plástica, condición indispensable para un comportamiento dúctil en estructuras sometidas a cargas sísmicas. Esta pérdida de ductilidad incrementa la probabilidad de fallas frágiles, especialmente en conexiones críticas del sistema resistente (Castillo, 2022).

2.3.3 Influencia de las discontinuidades de soldadura en el desempeño estructural

Las discontinuidades presentes en las soldaduras actúan como iniciadores de daño estructural, especialmente bajo solicitaciones cíclicas. Ensayos y evaluaciones han demostrado que defectos internos detectados mediante ultrasonido y radiografía industrial se correlacionan con una disminución significativa del desempeño estructural, incluso cuando dichos defectos cumplen parcialmente con criterios de aceptación visual (Miño Vaca, 2018).

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de evaluar la integridad estructural desde una perspectiva integral, donde la aceptación de una soldadura no se base únicamente en criterios superficiales, sino en su capacidad real de garantizar la continuidad y seguridad estructural. Este enfoque ha sido resaltado en estudios regionales como un aspecto crítico aún poco consolidado en la práctica constructiva local (Castro et al., 2018).

2.3.4 Rol de los ensayos no destructivos en la evaluación de la integridad estructural

Los ensayos no destructivos constituyen la principal herramienta para evaluar la integridad estructural de las soldaduras sin afectar la funcionalidad del elemento inspeccionado. En el contexto de estructuras de acero, los END permiten identificar discontinuidades internas y

superficiales que no son visibles durante la inspección visual convencional, proporcionando información objetiva sobre el estado real de las uniones (Castillo, 2022).

Estudios destacan que la aplicación sistemática de ensayos no destructivos volumétricos mejora significativamente la confiabilidad estructural de las edificaciones metálicas, al permitir la detección temprana de defectos críticos y la toma de decisiones técnicas fundamentadas respecto a la reparación o aceptación de las soldaduras.

2.3.5 Integridad estructural de soldaduras en estructuras ubicadas en zonas sísmicas

En zonas de alta peligrosidad sísmica, como la ciudad de Quito, la integridad estructural adquiere una importancia aún mayor. Durante un sismo, las estructuras están sometidas a demandas que superan las condiciones normales de servicio, lo que exige que los elementos y conexiones mantengan un comportamiento dúctil y estable (Castillo, 2022).

La experiencia ha demostrado que la pérdida de integridad estructural en conexiones soldadas puede desencadenar fallas progresivas y colapsos parciales o totales. Por ello, en zonas sísmicas resulta indispensable implementar criterios de inspección más rigurosos y protocolos específicos que aseguren la calidad de las soldaduras en elementos críticos del sistema resistente (Castillo, 2022).

En este sentido, la evaluación de la integridad estructural mediante END se convierte en una herramienta clave para reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones metálicas y mejorar la seguridad estructural en el entorno urbano de Quito (Castro et al., 2018).

En consecuencia, la integridad estructural puede entenderse como un concepto técnico que vincula directamente la calidad de las soldaduras, la continuidad mecánica y la capacidad de desempeño global de las estructuras de acero, constituyendo la base conceptual para evaluar su comportamiento frente a acciones extremas.

Una vez establecidos los fundamentos técnicos relacionados con las soldaduras y su evaluación mediante ensayos no destructivos, resulta necesario analizar el marco normativo que regula estos procesos y define los requisitos mínimos para su control y verificación.

2.4 Normativa aplicada a la inspección de END

La inspección de soldaduras estructurales se encuentra regulada por un conjunto de normas técnicas nacionales e internacionales que establecen requisitos para el diseño, ejecución, control de calidad e inspección de las uniones soldadas en estructuras de acero. Estas normativas constituyen el marco de referencia técnico que orienta la aplicación de los END, definiendo criterios mínimos de aceptación, responsabilidades del personal involucrado y niveles de control exigibles según la importancia estructural de las conexiones.

En el ámbito internacional, documentos como la AISC 360 y la AWS D1.1 proporcionan lineamientos ampliamente reconocidos para la fabricación y el montaje de estructuras de acero, así como para la inspección de soldaduras y la aplicación de ensayos no destructivos. Sin embargo, dichas normativas presentan distintos niveles de detalle en cuanto a la selección, alcance y obligatoriedad de los END, lo que exige una adecuada interpretación técnica para su aplicación en proyectos reales.

En el contexto ecuatoriano, la Norma Ecuatoriana de la Construcción incorpora criterios generales de control de calidad para estructuras de acero, pero no desarrolla de manera específica procedimientos ni protocolos detallados para la inspección mediante END. Esta situación genera la necesidad de analizar comparativamente el marco normativo existente, con el fin de identificar vacíos técnicos y oportunidades para el desarrollo de un protocolo de inspección adaptado a las condiciones locales y a las exigencias de seguridad en zonas sísmicas.

2.4.1 Normativa Internacional

2.4.1.1 AISC- 360 – Specification for Structural Steel Building

La especificación AISC 360, desarrollada por el American Institute of Steel Construction, constituye uno de los principales documentos normativos de referencia para el diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero a nivel internacional. Esta normativa establece los requisitos mínimos orientados a garantizar el desempeño estructural adecuado de las edificaciones metálicas, considerando tanto criterios de resistencia como de servicio y seguridad.

En particular, el Capítulo N de la AISC 360 aborda los aspectos relacionados con la fabricación, el montaje y el aseguramiento de la calidad, incluyendo disposiciones generales para la inspección de elementos estructurales y la verificación de las uniones soldadas. En este capítulo se reconoce la necesidad de aplicar procesos de control que permitan confirmar que las soldaduras cumplen con los requisitos de diseño y con las especificaciones técnicas establecidas para el proyecto.

Si bien la AISC 360 no desarrolla procedimientos detallados para la ejecución de ensayos no destructivos, sí establece la obligatoriedad de verificar la calidad de las soldaduras mediante inspecciones apropiadas, remitiendo en varios de sus apartados a normas especializadas, como la AWS D1.1, para la definición de métodos de inspección, criterios de aceptación y calificación del personal involucrado. De esta forma, la AISC 360 actúa como un marco general que integra el control de calidad dentro del proceso constructivo de las estructuras de acero.

Desde un enfoque aplicado, la normativa AISC 360 enfatiza que el nivel y alcance de la inspección deben ser coherentes con la importancia estructural de los elementos y conexiones, lo cual resulta especialmente relevante en estructuras ubicadas en zonas de alta demanda sísmica. No obstante, la especificación deja margen a la interpretación técnica respecto a la selección específica de los ensayos no destructivos a emplear.

En este contexto, la AISC 360 proporciona un sustento normativo fundamental para el control de calidad de las soldaduras estructurales, pero no define un protocolo específico de inspección mediante END.

2.4.1.2 AWS D1.1 - Structural Welding Code - Steel

La norma AWS D1.1 – Structural Welding Code – Steel constituye el principal documento técnico de referencia para la ejecución, inspección y aceptación de soldaduras estructurales en edificaciones de acero al carbono. A diferencia de normativas de carácter general, la AWS D1.1 desarrolla de manera específica los requisitos aplicables a las uniones soldadas, abordando tanto aspectos de diseño como de control de calidad durante la fabricación y el montaje.

Esta normativa establece los lineamientos para la elaboración y aplicación de los procedimientos de soldadura (WPS), así como los requisitos para la calificación del

procedimiento (PQR) y la calificación del desempeño del soldador (WPQ), asegurando que las soldaduras sean ejecutadas bajo condiciones controladas y reproducibles. De esta manera, la AWS D1.1 vincula directamente la calidad de la soldadura con la competencia técnica del personal y con la correcta definición de las variables del proceso.

En relación con la inspección, la AWS D1.1 define la inspección visual (VT) como un requisito mínimo obligatorio para todas las soldaduras estructurales, estableciendo que esta debe realizarse antes, durante y después del proceso de soldadura. Asimismo, la norma contempla la aplicación de ensayos no destructivos adicionales, tales como líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y radiografía, en función del tipo de soldadura, su función estructural y los criterios de aceptación establecidos para cada caso.

Un aspecto relevante de la AWS D1.1 es que proporciona criterios claros de aceptación y rechazo para discontinuidades detectadas mediante END, diferenciando entre defectos superficiales e internos y considerando variables como tamaño, ubicación y orientación. Estos criterios permiten evaluar objetivamente la calidad de las soldaduras y su aptitud para cumplir con la función estructural prevista.

Desde el punto de vista estructural, la AWS D1.1 adquiere especial importancia en uniones sometidas a demandas cíclicas o sísmicas, ya que reconoce la necesidad de un control más estricto en soldaduras críticas, particularmente en aquellas que buscan garantizar continuidad mecánica total del elemento. En este sentido, la norma se articula de forma directa con los conceptos de severidad y criticidad de las discontinuidades desarrollados previamente en el marco teórico.

En consecuencia, la AWS D1.1 no solo establece los requisitos técnicos para la ejecución de soldaduras estructurales, sino que también define el marco normativo para su inspección y evaluación mediante END, constituyéndose en una referencia fundamental para el control de calidad de las conexiones soldadas en estructuras de acero.

2.4.2 Norma Ecuatoriana de la Construcción

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) constituye el principal marco regulatorio para el diseño, ejecución y control de calidad de las edificaciones en el Ecuador. En lo referente a estructuras de acero, la NEC establece lineamientos generales orientados a

garantizar la seguridad estructural, la adecuada ejecución de los procesos constructivos y el cumplimiento de los requisitos mínimos de desempeño frente a acciones gravitacionales y sísmicas.

En particular, el capítulo NEC-SE-AC (Estructuras de Acero) incorpora disposiciones relacionadas con el control de calidad durante la fabricación y el montaje de elementos estructurales. Estas disposiciones contemplan la necesidad de verificar materiales, procedimientos constructivos y personal involucrado, mediante la implementación de instrumentos como el Plan de Control de Calidad (PCC) y el Plan de Garantía de Calidad (PGC), los cuales deben formar parte integral de los proyectos que incorporan estructuras metálicas.

No obstante, la normativa ecuatoriana aborda la inspección de soldaduras desde un enfoque general, remitiéndose principalmente a normas internacionales reconocidas, como AWS D1.1 y AISC 360, para la definición de procedimientos específicos, criterios de aceptación y tipos de ensayos aplicables. La NEC no establece de manera explícita la obligatoriedad, alcance ni frecuencia de los ensayos no destructivos para soldaduras estructurales, ni define criterios diferenciados en función de la criticidad de las uniones dentro del sistema resistente.

Esta condición genera un escenario en el cual la aplicación de ensayos no destructivos queda sujeta a decisiones técnicas particulares de proyectistas, fiscalizadores o contratistas, lo que puede derivar en prácticas no homogéneas durante la ejecución de obras. En estructuras ubicadas en zonas de alta amenaza sísmica, como la ciudad de Quito, esta falta de especificidad normativa adquiere especial relevancia, dado que el desempeño estructural depende en gran medida de la calidad y continuidad de las uniones soldadas.

En consecuencia, la Norma Ecuatoriana de la Construcción proporciona el marco general de control y aseguramiento de la calidad, pero deja un espacio técnico que debe ser complementado mediante criterios más detallados para la inspección de soldaduras. Este contexto normativo refuerza la necesidad de establecer lineamientos técnicos claros que permitan interpretar y aplicar de manera coherente los requerimientos internacionales dentro de la realidad constructiva local.

En conjunto, el marco normativo analizado establece los lineamientos generales para el control de calidad e inspección de soldaduras estructurales; sin embargo, la aplicación

específica de los ensayos no destructivos depende de criterios técnicos adicionales que permitan definir su alcance y pertinencia en función de las características de cada proyecto.

2.5 Requisitos técnicos para la ejecución de soldadura estructural

La correcta ejecución de las soldaduras estructurales constituye un requisito fundamental para garantizar que los elementos de acero cumplan con el desempeño previsto en el diseño, particularmente en edificaciones ubicadas en zonas de alta amenaza sísmica. Más allá del cumplimiento formal de la normativa, la calidad de una soldadura depende de la aplicación sistemática de requisitos técnicos que regulan los procedimientos, el personal involucrado y los procesos de inspección durante las distintas etapas de fabricación y montaje.

Las normas internacionales de referencia, como AISC 360 y AWS D1.1, establecen que la confiabilidad de una unión soldada no puede evaluarse de manera aislada, sino como resultado de un sistema integrado que incluye procedimientos previamente calificados, soldadores certificados y mecanismos de verificación técnica. En este contexto, los requisitos técnicos para la ejecución de soldaduras estructurales se convierten en un elemento previo e indispensable para cualquier proceso de inspección mediante ensayos no destructivos, ya que condicionan tanto la calidad esperada de la unión como la interpretación de los resultados obtenidos.

Desde una perspectiva técnica, estos requisitos permiten reducir la variabilidad en la ejecución de las soldaduras y proporcionan una base objetiva para evaluar su conformidad con los criterios de aceptación establecidos. Su cumplimiento resulta especialmente relevante en estructuras sometidas a solicitaciones cíclicas, donde pequeñas deficiencias constructivas pueden amplificarse y afectar la integridad estructural del sistema (Whittington, 2023).

De acuerdo con la normativa aplicable, los principales requisitos técnicos para la ejecución de soldadura estructural se organizan en cuatro componentes fundamentales:

- La calificación del procedimiento de soldadura,
- La calificación del soldador,
- La calificación de desempeño del soldador, y
- Los requisitos mínimos de inspección.

2.5.1 Calificación del procedimiento de soldadura (WPS/PQR)

Todo proceso de soldadura que forme parte de una estructura de acero debe ejecutarse conforme a un Procedimiento de Soldadura (Welding Procedure Specification, WPS) previamente calificado. El WPS define las variables esenciales del proceso y establece las condiciones bajo las cuales se garantiza que la soldadura alcanzará las propiedades mecánicas y la calidad requeridas para su función estructural.

Entre las variables que deben especificarse en un WPS se incluyen el proceso de soldadura, el tipo y clasificación del material de aporte, la posición de soldadura, la geometría de la junta, el rango de espesores aplicables y los parámetros eléctricos de operación. Estas variables deben ser verificadas mediante ensayos realizados sobre probetas soldadas, cuyos resultados se documentan en el Registro de Calificación del Procedimiento (Procedure Qualification Record, PQR), conforme a los lineamientos establecidos por la norma AWS D1.1 (AWS, 2025; ISO, 2017).

La existencia de un WPS y su correspondiente PQR constituye la base técnica que permite evaluar posteriormente la calidad de las soldaduras ejecutadas y sirve como referencia obligatoria durante los procesos de inspección y control de calidad (AISC, 2022).

2.5.2 Calificación del Soldador

La calificación del soldador es el proceso mediante el cual se certifica que el personal encargado de ejecutar las soldaduras posee las habilidades técnicas necesarias para cumplir con los requisitos establecidos en el WPS aprobado. Esta calificación se realiza conforme a los procedimientos definidos en la norma AWS D1.1 y se basa en la ejecución y evaluación de probetas soldadas bajo condiciones controladas (AWS, 2025).

La certificación del soldador es específica y limitada a determinadas variables, tales como el proceso de soldadura utilizado, la posición de soldadura, el tipo y espesor del material base y la configuración de la junta. En consecuencia, un soldador calificado para una determinada combinación de variables no necesariamente está autorizado para ejecutar soldaduras bajo condiciones distintas (ISO, 2017).

Desde el punto de vista del control de calidad, la calificación del soldador permite reducir la probabilidad de defectos asociados a una ejecución deficiente y proporciona un respaldo

técnico que complementa los procesos de inspección visual y ensayos no destructivos aplicados a las uniones soldadas (AISC, 2022).

2.5.3 Calificación de desempeño del soldador (WPQ, Welder Performance Qualification)

La Calificación de Desempeño del Soldador (Welder Performance Qualification, WPQ) tiene como objetivo verificar de manera continua que el soldador mantiene la competencia técnica necesaria para ejecutar soldaduras conformes a los requisitos del proyecto. A diferencia de la calificación inicial, el WPQ se enfoca en el desempeño real del soldador en condiciones representativas de la obra o del taller (AWS, 2025).

Esta calificación resulta especialmente relevante en proyectos de estructuras metálicas de alta exigencia, donde la calidad de las uniones soldadas tiene un impacto directo en la integridad estructural. El WPQ permite asegurar que las soldaduras inspeccionadas mediante END han sido ejecutadas por personal técnicamente competente, lo cual es un aspecto clave para interpretar adecuadamente los resultados de la inspección (ISO, 2017; Whittington, 2023).

2.5.4 Requisitos mínimos para inspección de soldadura según AWS D1.1

La norma AWS D1.1 establece que, como requisito mínimo, todas las soldaduras estructurales deben ser sometidas a una inspección visual (VT) del 100%, la cual debe realizarse antes, durante y después del proceso de soldadura. Esta inspección tiene como finalidad verificar el cumplimiento del WPS aprobado, la correcta preparación de la junta, la idoneidad de los materiales y la validez de las calificaciones del soldador (AWS, 2025).

Adicionalmente, la norma contempla la aplicación de ensayos no destructivos complementarios cuando la función estructural de la unión, su nivel de criticidad o las especificaciones del proyecto así lo requieran. En estructuras localizadas en zonas de alta amenaza sísmica, estos requisitos adquieren una relevancia particular debido a las elevadas demandas de deformación y disipación de energía que experimentan las conexiones soldadas durante un evento sísmico (AWS, 2025; AISC, 2022; FEMA, 2000).

Los requisitos mínimos de inspección forman parte de un sistema de control que permite garantizar que las soldaduras evaluadas mediante END cumplen con las condiciones técnicas necesarias para contribuir al desempeño estructural esperado (AWS, 2025).

2.6 Criterios de selección para la aplicación de los END

La selección de los ensayos no destructivos para la inspección de soldaduras estructurales no debe realizarse de manera arbitraria, sino en función de criterios técnicos que permitan garantizar una evaluación adecuada de la calidad de las uniones. Estos criterios deben responder a las características de la soldadura y a su función dentro del sistema estructural, de modo que los métodos de inspección sean consistentes con el nivel de exigencia requerido en cada caso. (AWS, 2025; AISC, 2022).

Uno de los principales criterios de selección corresponde a la importancia estructural de la unión soldada. Las soldaduras críticas, cuya falla puede comprometer la estabilidad global de la estructura, requieren métodos de inspección con mayor capacidad de detección de discontinuidades internas, tales como los ensayos volumétricos. En contraste, las soldaduras secundarias o no estructurales pueden ser evaluadas mediante métodos superficiales, en función del tipo de sollicitación y del riesgo asociado (Miño Vaca, 2018; Cueva & Paredes, 2018).

Otro criterio relevante es el tipo de junta soldada y su configuración geométrica. Las uniones de penetración completa demandan técnicas que permitan evaluar el volumen interno del cordón, mientras que las soldaduras de filete presentan una mayor susceptibilidad a discontinuidades superficiales. Esta diferenciación permite seleccionar métodos de inspección acordes al comportamiento esperado de cada tipo de unión, optimizando el proceso de evaluación. (Castillo, 2022; AWS, 2025).

El espesor del material y la accesibilidad a la soldadura constituyen factores determinantes en la selección del método END. En elementos de mayor espesor o en configuraciones complejas, técnicas como el ultrasonido permiten una mejor caracterización de discontinuidades internas, incluso en condiciones de acceso limitado. Por el contrario, en elementos delgados o de fácil acceso, los métodos superficiales pueden resultar suficientes para detectar defectos relevantes desde el punto de vista estructural (Uzun & Gustiani, 2024).

Asimismo, la naturaleza de las discontinuidades esperadas influye directamente en la selección del ensayo. Defectos volumétricos, como inclusiones o falta de penetración, requieren métodos capaces de evaluar el interior de la soldadura, mientras que discontinuidades superficiales, como fisuras o mordeduras, pueden ser identificadas

mediante técnicas de inspección superficial. Esta relación entre tipo de defecto y método de inspección permite optimizar la eficiencia del proceso de evaluación (Whittington, 2023).

Adicionalmente, deben considerarse factores prácticos como la disponibilidad de equipos, la calificación del personal inspector y los costos asociados a la inspección. Si bien los ensayos volumétricos ofrecen mayor capacidad de detección, su aplicación requiere mayor especialización técnica y recursos, lo que hace necesario priorizar su uso en soldaduras de mayor relevancia estructural. En este sentido, la selección de los END debe responder a un equilibrio entre rigurosidad técnica y viabilidad operativa (AWS, 2025; ISO, 2017).

En estructuras ubicadas en zonas de alta amenaza sísmica, la correcta selección de los ensayos no destructivos adquiere una importancia aún mayor, ya que la capacidad de las uniones soldadas para disipar energía y mantener un comportamiento dúctil depende en gran medida de su calidad interna. Por esta razón, los criterios de selección deben orientarse a garantizar que las discontinuidades potencialmente críticas sean detectadas y evaluadas de manera oportuna (FEMA, 2000; AISC, 2022).

En conjunto, estos criterios permiten establecer una base técnica sólida para la aplicación de ensayos no destructivos en soldaduras estructurales, orientando la selección de los métodos de inspección en función de la criticidad, la configuración de la unión y las condiciones de ejecución. Este enfoque resulta esencial para estructurar un proceso de inspección coherente y técnicamente justificado dentro del contexto de edificaciones de acero en zonas sísmicas.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE SOLDADURAS PARA SU APLICACIÓN EN UN PROTOCOLO

Una vez establecidos los fundamentos conceptuales relacionados con la integridad estructural, la naturaleza de las discontinuidades en soldaduras y los criterios para la selección de ensayos no destructivos, resulta necesario analizar en detalle los métodos de inspección disponibles para la evaluación de uniones soldadas en estructuras de acero.

Los ensayos no destructivos constituyen la herramienta técnica que permite trasladar los conceptos desarrollados en el marco teórico hacia una aplicación práctica, posibilitando la detección, caracterización y evaluación de discontinuidades que pueden comprometer el desempeño estructural de las conexiones. En este sentido, el conocimiento de los principios, alcances y limitaciones de cada método resulta fundamental para su correcta aplicación dentro de un proceso de inspección estructurado.

Desde un enfoque técnico, los métodos de inspección no deben analizarse únicamente desde su funcionamiento, sino en función de su capacidad para responder a condiciones reales de inspección, tales como el tipo de soldadura, la criticidad estructural del elemento, la accesibilidad y el tipo de discontinuidad esperada. Esta perspectiva permite establecer criterios objetivos para la selección de los métodos más adecuados en cada caso.

Entonces, los métodos de inspección pueden clasificarse en técnicas superficiales y técnicas volumétricas, en función del tipo de discontinuidad que son capaces de detectar. Esta clasificación constituye la base para su aplicación dentro de un protocolo de inspección, ya que permite organizar los ensayos de manera coherente y eficiente, priorizando aquellos métodos que resulten más adecuados según las características de la unión soldada.

El presente capítulo desarrolla los principales métodos de inspección aplicables a soldaduras estructurales, analizando sus fundamentos, alcance, ventajas, limitaciones y aplicabilidad dentro de un esquema de inspección técnica. Este análisis se orienta a establecer una base sólida para la formulación de un protocolo de inspección adaptado a las condiciones de edificaciones en la ciudad de Quito, el cual será desarrollado en el capítulo siguiente.

3.1 Técnicas de Inspección Superficiales

Las técnicas de inspección superficiales constituyen el primer grupo de métodos aplicables a la evaluación de soldaduras estructurales y están orientadas a la detección de discontinuidades abiertas a la superficie o ubicadas en zonas próximas a ella. Su aplicación resulta especialmente relevante en etapas iniciales del control de calidad, así como en la inspección de soldaduras donde se espera la presencia de defectos asociados a la ejecución del cordón, tales como fisuras superficiales, mordeduras, socavaciones o irregularidades en el acabado (Castillo, 2022).

Desde el enfoque de un protocolo de inspección, estos métodos cumplen una función fundamental como herramientas de evaluación preliminar, ya que permiten identificar de manera rápida y eficiente posibles anomalías antes de recurrir a técnicas de mayor complejidad. Su facilidad de aplicación, rapidez operativa y menor costo relativo los convierten en una alternativa adecuada para inspecciones extensivas en obra.

No obstante, estas técnicas presentan limitaciones inherentes, ya que no permiten detectar discontinuidades internas ni caracterizar defectos subsuperficiales profundos, por lo que su uso aislado resulta insuficiente en soldaduras de alta criticidad estructural (Whittington, 2023).

La selección de técnicas superficiales debe estar condicionada por factores como la función estructural de la soldadura, el tipo de discontinuidad esperada, la accesibilidad a la zona de inspección y el nivel de exigencia requerido. Este criterio de selección, desarrollado en el capítulo anterior, permite integrar estos métodos dentro de un esquema de inspección coherente y técnicamente justificado.

Dentro de este grupo se incluyen la inspección visual (VT), los ensayos por líquidos penetrantes (PT) y las partículas magnéticas (MT), los cuales, aunque difieren en su principio físico, comparten la capacidad de evaluar la condición superficial de las uniones soldadas y constituyen la base para la toma de decisiones dentro del proceso de inspección estructural.

3.1.1 Inspección Visual (VT)

La inspección visual constituye el método más básico y, al mismo tiempo, el más utilizado en la evaluación de soldaduras estructurales. Su aplicación se basa en la observación directa

del cordón de soldadura y del material base adyacente, con el objetivo de identificar discontinuidades visibles, verificar la geometría de la unión y comprobar el cumplimiento de los requisitos establecidos en los procedimientos de soldadura.



Figura 4: Ensayo de inspección visual (VT)
Fuente: Elaboración propia

En la práctica, este método permite detectar defectos como fisuras superficiales, porosidad visible, mordeduras, socavaciones, exceso o falta de material de aporte, así como irregularidades en el perfil del cordón. De igual manera, facilita la verificación de aspectos constructivos relevantes, tales como la alineación de los elementos, la preparación de bordes y las condiciones de limpieza de la zona a soldar, factores que influyen directamente en la calidad final de la unión (AWS, 2025).

Desde el punto de vista normativo, la inspección visual es considerada un requisito obligatorio en la mayoría de los códigos aplicables a estructuras de acero. En particular, la norma AWS D1.1 establece que todas las soldaduras deben ser sometidas a inspección visual antes, durante y después del proceso de soldadura, lo que resalta su importancia dentro del control de calidad (AWS, 2025).

Sin embargo, a pesar de su amplio uso, este método presenta limitaciones importantes. Su efectividad depende en gran medida de la experiencia del inspector, de las condiciones de

iluminación y de la accesibilidad a la zona de inspección. Además, no permite detectar discontinuidades internas o subsuperficiales, lo que puede llevar a una sobreestimación de la calidad de la soldadura cuando se utiliza como único método de evaluación.

3.1.1.1 Aplicabilidad en inspección estructural

Dentro del enfoque del protocolo de inspección propuesto, la inspección visual debe considerarse como una etapa inicial obligatoria en la evaluación de todas las soldaduras, independientemente de su nivel de criticidad. Su principal función es realizar una verificación preliminar del estado de la unión y determinar si existen indicios que justifiquen la aplicación de métodos de inspección adicionales.

En soldaduras clasificadas como no críticas o de carácter secundario, la inspección visual puede ser suficiente para la aceptación de la unión, siempre que se cumplan los criterios establecidos en la normativa vigente. No obstante, en soldaduras críticas o en aquellas que forman parte del sistema resistente principal, este método debe complementarse necesariamente con ensayos no destructivos de mayor alcance, como los métodos volumétricos, que permitan evaluar la calidad interna del cordón.

En este sentido, la inspección visual no debe entenderse como un método independiente, sino como el punto de partida dentro de una estrategia de inspección integral, en la cual su resultado condiciona la necesidad, el tipo y el alcance de los ensayos posteriores.

3.1.2 Líquidos Penetrantes (PT)

El ensayo por líquidos penetrantes está orientado a la detección de discontinuidades superficiales abiertas, mediante la aplicación de un líquido con alta capacidad de penetración sobre la superficie del material. Este método se basa en el principio de capilaridad, el cual permite que el líquido penetre en fisuras o defectos superficiales que no son fácilmente visibles durante una inspección visual convencional.

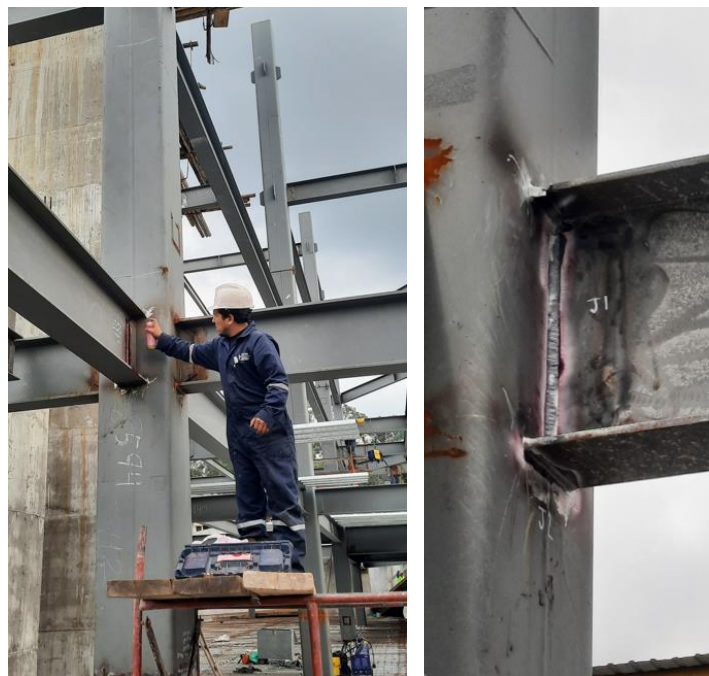


Figura 5: Ensayo por líquidos penetrantes (PT)
Fuente: Elaboración propia

El procedimiento consiste, en términos generales, en la limpieza previa de la superficie, la aplicación del líquido penetrante, la eliminación del exceso y la posterior aplicación de un revelador que permite hacer visibles las discontinuidades mediante el contraste generado. Este proceso facilita la identificación de defectos como fisuras finas, poros abiertos y grietas superficiales que podrían pasar desapercibidas a simple vista.

En comparación con la inspección visual, el ensayo por líquidos penetrantes presenta una mayor sensibilidad para la detección de discontinuidades superficiales pequeñas, especialmente en soldaduras donde el acabado del cordón o la presencia de recubrimientos puede dificultar la observación directa. Por esta razón, su uso resulta particularmente útil como método complementario cuando se requiere confirmar la presencia de defectos superficiales en zonas críticas o de difícil evaluación visual (Castillo, 2022).

No obstante, este método presenta limitaciones importantes. Su aplicación está restringida a materiales no porosos y a superficies accesibles, ya que requiere contacto directo con la zona a inspeccionar. Además, no permite detectar discontinuidades internas ni subsuperficiales, por lo que su alcance se limita exclusivamente a defectos abiertos a la superficie. Asimismo, la preparación de la superficie y las condiciones de limpieza influyen significativamente en la confiabilidad de los resultados.

3.1.2.1 Aplicabilidad en inspección estructural

Dentro del enfoque del protocolo de inspección propuesto, el ensayo por líquidos penetrantes se recomienda como un método complementario a la inspección visual en soldaduras donde exista la necesidad de detectar discontinuidades superficiales con mayor precisión, especialmente en elementos de criticidad media o en zonas donde la evaluación visual no resulte concluyente.

Su uso es particularmente adecuado en soldaduras de geometría compleja, en uniones donde el acabado superficial puede ocultar defectos finos o en inspecciones donde se requiera una mayor confiabilidad en la detección de fisuras superficiales. Sin embargo, en soldaduras críticas que forman parte del sistema resistente principal, su aplicación debe considerarse como una etapa previa o complementaria a ensayos volumétricos, los cuales permiten evaluar la calidad interna del cordón.

En este sentido, el ensayo por líquidos penetrantes no debe utilizarse como método único en evaluaciones estructurales de alta exigencia, sino como parte de una estrategia de inspección escalonada, en la cual su principal aporte radica en mejorar la detección de discontinuidades superficiales que podrían comprometer el desempeño de la unión en condiciones de servicio o bajo sollicitaciones sísmicas.

3.1.3 Partículas Magnéticas (MT)

El ensayo por partículas magnéticas es utilizado para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, como los aceros estructurales. Su funcionamiento se basa en la generación de un campo magnético en el elemento inspeccionado, de tal manera que, ante la presencia de una discontinuidad, se produce una distorsión en las líneas de flujo magnético que da lugar a la formación de fugas de flujo en la zona del defecto (AWS, 2025).

Estas fugas son evidenciadas mediante la aplicación de partículas ferromagnéticas finas, las cuales se acumulan en las zonas donde existe una alteración del campo magnético, permitiendo identificar la ubicación y, en muchos casos, la orientación de la discontinuidad. Este principio le otorga una mayor sensibilidad en comparación con otros métodos

superficiales, especialmente en la detección de fisuras que no son completamente abiertas a la superficie (Castillo, 2022).



Figura 6: Ensayo por partículas magnéticas (MT)
Fuente: Elaboración propia

En el ámbito de las soldaduras estructurales, el ensayo por partículas magnéticas resulta particularmente eficaz para identificar discontinuidades como fisuras, grietas, falta de fusión cercana a la superficie y otros defectos asociados a procesos de soldadura. Su aplicación es relativamente rápida y permite obtener resultados confiables siempre que se garantice una adecuada magnetización y preparación de la superficie (AWS, 2025).

Sin embargo, este método presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas. Su aplicación está restringida a materiales ferromagnéticos, lo que limita su uso en aleaciones no ferrosas. Asimismo, la profundidad de detección es reducida en comparación con los métodos volumétricos, por lo que no resulta adecuado para la identificación de discontinuidades internas profundas. Además, la orientación de la discontinuidad respecto al campo magnético influye directamente en su detectabilidad, lo que en algunos casos requiere realizar la inspección en más de una dirección para asegurar resultados confiables (Whittington, 2023).

3.1.3.1 Aplicabilidad en inspección estructural

Desde el enfoque del protocolo de inspección propuesto, el ensayo por partículas magnéticas constituye una herramienta especialmente útil en estructuras de acero, debido a su capacidad para detectar discontinuidades tanto superficiales como subsuperficiales cercanas, superando en sensibilidad a la inspección visual y, en ciertos casos, a los líquidos penetrantes.

Su uso se recomienda en soldaduras de criticidad media y alta, particularmente cuando existe la posibilidad de fisuración o defectos asociados a la ejecución del cordón. En este sentido, puede emplearse como un método intermedio dentro de una estrategia de inspección escalonada, previo a la aplicación de ensayos volumétricos en aquellos casos donde se requiera una evaluación más profunda (Castillo, 2022).

No obstante, en soldaduras críticas que forman parte del sistema resistente principal, su aplicación debe considerarse complementaria a métodos volumétricos, ya que no permite evaluar de forma completa la integridad interna del cordón de soldadura. Su correcta utilización dentro del protocolo depende de factores como el tipo de material, la geometría de la unión, la orientación de las posibles discontinuidades y las condiciones de accesibilidad.

3.2 **Técnicas de inspección volumétricas**

Las técnicas de inspección volumétricas corresponden a aquellos métodos no destructivos que permiten evaluar el interior del material y del cordón de soldadura, posibilitando la detección de discontinuidades internas que no pueden ser identificadas mediante técnicas superficiales. Este tipo de ensayos resulta fundamental en la evaluación de soldaduras estructurales, especialmente en aquellas que forman parte del sistema resistente principal, donde la integridad interna de la unión es determinante para el desempeño global de la estructura (Miño Vaca, 2018).

A diferencia de los métodos superficiales, los ensayos volumétricos se basan en la propagación de diferentes tipos de energía —como ondas ultrasónicas o radiación— a través del material, lo que permite identificar variaciones internas asociadas a defectos como falta de fusión, falta de penetración, inclusiones o fisuras internas. Esta capacidad de evaluación en profundidad los convierte en herramientas esenciales para la inspección de soldaduras

críticas, donde la presencia de discontinuidades internas puede comprometer significativamente la resistencia y ductilidad de la conexión (Uzun & Gustiani, 2024).

Desde el punto de vista del protocolo de inspección, los métodos volumétricos deben considerarse como técnicas de mayor nivel de exigencia, cuya aplicación se justifica en función de la criticidad estructural de la soldadura, el tipo de unión y el nivel de confiabilidad requerido en la evaluación. Su uso implica generalmente mayores costos, equipos especializados y personal calificado, por lo que su selección debe responder a criterios técnicos claramente definidos.

En este contexto, los ensayos volumétricos no sustituyen a los métodos superficiales, sino que los complementan dentro de una estrategia de inspección escalonada. Mientras que las técnicas superficiales permiten una evaluación preliminar rápida, los métodos volumétricos aportan una caracterización más completa del estado interno de la soldadura, permitiendo tomar decisiones fundamentadas sobre la aceptación, reparación o rechazo de la unión (Castillo, 2022).

Dentro de este grupo se incluyen principalmente el ensayo por ultrasonido (UT) y la radiografía industrial (RT), los cuales constituyen los métodos más utilizados en la inspección de soldaduras estructurales debido a su capacidad para detectar y caracterizar discontinuidades internas con un alto nivel de confiabilidad.

3.2.1 Ultrasonido (UT)

El ensayo por ultrasonido permite evaluar la integridad interna de materiales y soldaduras mediante la propagación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia. Su principio de funcionamiento se basa en la emisión de ondas mecánicas que se introducen en el material a través de un transductor; cuando estas ondas encuentran una discontinuidad o una interfaz interna, parte de la energía es reflejada, permitiendo identificar la presencia y ubicación del defecto (ASNT A. S., 2018).

Este método no genera una imagen directa del interior del material, sino que proporciona información a partir de la interpretación de señales reflejadas. Esto implica que su correcta aplicación depende en gran medida de la experiencia del operador y de la adecuada calibración del equipo. No obstante, esta característica también le otorga una ventaja

importante, ya que permite evaluar discontinuidades con mayor flexibilidad en diferentes orientaciones y espesores de material (García & Caballero, 2016).

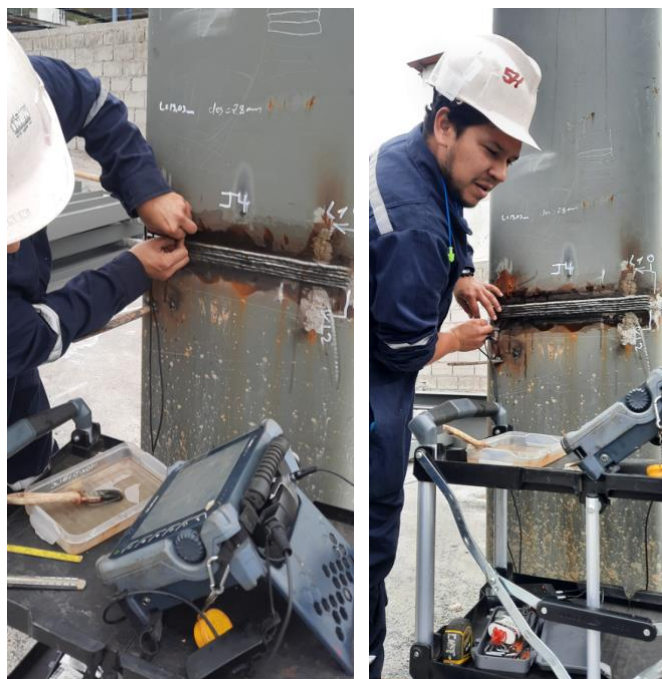


Figura 7: Ensayo por ultrasonido (UT)
Fuente: Elaboración propia

En soldaduras estructurales, el ensayo por ultrasonido resulta especialmente eficaz para la detección de discontinuidades internas de tipo plano, como falta de fusión, falta de penetración y fisuras, las cuales son consideradas críticas debido a su capacidad de concentración de esfuerzos. Estudios desarrollados en el ámbito latinoamericano han demostrado que este método presenta una alta sensibilidad para este tipo de defectos, siendo ampliamente utilizado en el control de calidad de estructuras metálicas (Cueva & Paredes, 2018).

Adicionalmente, el ultrasonido presenta ventajas operativas relevantes, ya que puede aplicarse en campo sin requerir condiciones estrictas de seguridad como en el caso de la radiografía, lo que facilita su uso en edificaciones existentes. Asimismo, permite realizar inspecciones desde un solo lado de la unión, lo que resulta especialmente útil en elementos con acceso limitado. Estas características lo convierten en uno de los métodos más utilizados en la evaluación de soldaduras en estructuras de acero (Miño Vaca, 2018).

Sin embargo, este método también presenta limitaciones que deben ser consideradas. La interpretación de los resultados requiere personal altamente capacitado, y factores como la geometría de la unión, la rugosidad de la superficie o la presencia de recubrimientos pueden afectar la calidad de la señal. Además, no proporciona un registro visual directo del defecto, lo que puede dificultar la documentación en comparación con otros métodos (García & Caballero, 2016).

3.2.1.1 Aplicabilidad en inspección estructural

Desde el enfoque del protocolo de inspección propuesto, el ensayo por ultrasonido se posiciona como el método principal para la evaluación de soldaduras críticas en estructuras de acero, debido a su capacidad para detectar discontinuidades internas relevantes y a su viabilidad de aplicación en condiciones reales de campo.

Su uso se recomienda especialmente en conexiones estructurales de alta responsabilidad, tales como empalmes de columnas, uniones viga–columna y elementos que forman parte del sistema resistente principal, donde la presencia de defectos internos puede comprometer el desempeño global de la estructura. En este tipo de aplicaciones, el ultrasonido permite obtener información suficiente para la toma de decisiones respecto a la aceptación, reparación o rechazo de la soldadura (Cueva & Paredes, 2018).

A diferencia de la radiografía industrial, el ultrasonido ofrece mayor flexibilidad operativa, lo que permite su aplicación en estructuras existentes sin necesidad de interrumpir significativamente las condiciones de servicio. Por esta razón, dentro de un protocolo de inspección orientado a edificaciones reales, este método suele constituir la técnica principal de evaluación volumétrica.

En este sentido, el ultrasonido no solo cumple un rol complementario, sino que se convierte en una herramienta central dentro de la estrategia de inspección, permitiendo integrar los resultados obtenidos con métodos superficiales y establecer un diagnóstico más completo del estado de las uniones soldadas.

3.2.2 Radiografía industrial (RT)

La radiografía industrial permite evaluar la calidad interna de las soldaduras mediante el uso de radiación ionizante, generalmente rayos X o rayos gamma. Su principio de

funcionamiento se basa en la capacidad de esta radiación para atravesar el material y ser atenuada en función de la densidad y espesor del mismo, generando una imagen que revela variaciones internas asociadas a discontinuidades (AWS, 2025).

En el proceso de inspección, la radiación atraviesa la zona soldada y es registrada en una película radiográfica o en un detector digital, produciendo una imagen en la que las discontinuidades internas, como porosidad, inclusiones de escoria o falta de penetración, se manifiestan como variaciones en la tonalidad. Esta característica permite una visualización directa del interior del cordón de soldadura, lo que constituye una de sus principales fortalezas frente a otros métodos de inspección (Uzun & Gustiani, 2024).

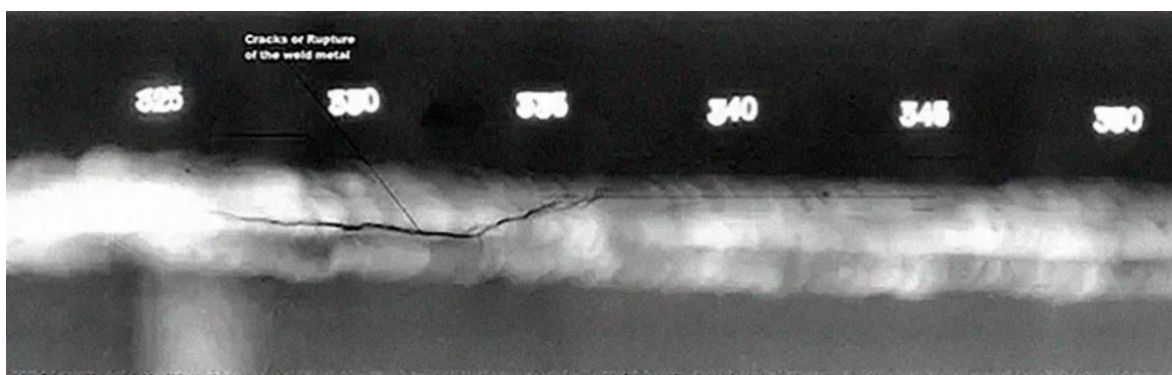


Figura 8: Ensayo por radiografía industrial (RT)
Fuente: Tomado de Villacrés 2019

En el contexto de las estructuras de acero, la radiografía industrial es especialmente efectiva para la detección de discontinuidades volumétricas, tales como porosidad e inclusiones, ya que estos defectos generan contrastes claramente identificables en la imagen radiográfica. No obstante, su capacidad para detectar discontinuidades planas, como fisuras o falta de fusión, puede verse limitada dependiendo de la orientación del defecto respecto al haz de radiación, lo que constituye una de sus principales restricciones técnicas (Whittington, 2023).

Adicionalmente, la aplicación de este método implica consideraciones importantes relacionadas con la seguridad, debido al uso de radiación ionizante, lo que requiere la implementación de protocolos estrictos, zonas de control y personal especializado. Asimismo, el proceso de inspección puede resultar más costoso y demandar mayores tiempos de ejecución en comparación con otros métodos no destructivos.

3.2.2.1 Aplicabilidad en inspección estructural

Desde el enfoque del protocolo de inspección propuesto, la radiografía industrial se considera un método de alta confiabilidad para la evaluación de la calidad interna de soldaduras, particularmente en aquellos casos donde se requiere una evidencia visual directa de las discontinuidades presentes en el cordón.

Su uso resulta adecuado en soldaduras de penetración completa y en uniones donde se busca verificar la presencia de defectos volumétricos que puedan comprometer la continuidad del material. Asimismo, es especialmente útil en procesos de control de calidad en taller o en condiciones donde es posible garantizar el aislamiento del área de inspección.

Sin embargo, en aplicaciones en campo, especialmente en edificaciones existentes, su uso puede verse limitado por condiciones de accesibilidad, restricciones de seguridad y costos operativos. Por esta razón, dentro de un protocolo de inspección aplicado a estructuras reales, la radiografía industrial suele utilizarse de manera selectiva, priorizando su aplicación en elementos críticos o en situaciones donde otros métodos no proporcionan información concluyente.

En este sentido, la radiografía industrial constituye una herramienta valiosa dentro del conjunto de métodos volumétricos, cuya utilización debe evaluarse en función de las condiciones específicas del proyecto, considerando tanto sus ventajas en la visualización interna como sus limitaciones operativas.

3.3 **Comparación y criterios de selección de métodos de inspección**

El análisis de los métodos de inspección presentados evidencia que no existe una técnica única capaz de evaluar de manera completa todas las condiciones de una soldadura estructural. Cada método presenta capacidades específicas en función del tipo de discontinuidad que puede detectar, la profundidad de evaluación, las condiciones de aplicación y el nivel de confiabilidad requerido. Por esta razón, la selección del método de inspección no debe realizarse de forma aislada, sino como parte de un enfoque integrado que considere las características particulares de la unión y su función dentro del sistema estructural (ASNT, 2018).

Desde un punto de vista general, los métodos superficiales, como la inspección visual, los líquidos penetrantes y las partículas magnéticas, resultan adecuados para la detección de discontinuidades abiertas a la superficie o ubicadas en zonas cercanas a ella. Estos métodos permiten una evaluación rápida y eficiente, siendo especialmente útiles en etapas iniciales del control de calidad o en soldaduras de menor criticidad. Sin embargo, su principal limitación radica en que no permiten evaluar la integridad interna del cordón de soldadura (Castillo, 2022).

Por otro lado, los métodos volumétricos, como la radiografía industrial y el ultrasonido, permiten la detección de discontinuidades internas, lo que los convierte en herramientas fundamentales en la evaluación de soldaduras críticas. Mientras que la radiografía ofrece una representación visual del interior del material, siendo especialmente efectiva para detectar defectos volumétricos, el ultrasonido presenta una mayor sensibilidad para discontinuidades de tipo plano y una mayor flexibilidad de aplicación en condiciones de campo (García & Caballero, 2016).

Adicionalmente, existen ensayos como la emisión acústica, que si bien no serán considerados dentro de este estudio pueden aportar una capacidad de monitoreo del comportamiento estructural en condiciones de carga, permitiendo identificar procesos activos de daño. No obstante, su aplicación en la inspección de soldaduras en edificaciones resulta limitada y se restringe a casos específicos donde se requiera un análisis avanzado del comportamiento estructural (Grosse & Ohtsu, 2008).

A partir de este análisis, se puede establecer que la selección del método de inspección debe basarse en criterios técnicos claramente definidos, evitando la aplicación indiscriminada de técnicas que no responden a las condiciones reales de la estructura. Entre los principales criterios a considerar se incluyen:

- La criticidad estructural de la soldadura, en función de su rol dentro del sistema resistente.
- El tipo de discontinuidad esperada, diferenciando entre defectos superficiales y defectos internos.
- La geometría y configuración de la unión, que puede condicionar la aplicabilidad de ciertos métodos.

- La accesibilidad a la zona de inspección, especialmente en estructuras existentes.
- El nivel de confiabilidad requerido, en función de las exigencias del proyecto.
- Las condiciones operativas y económicas, que influyen en la viabilidad de aplicación de cada técnica.

Estos criterios permiten estructurar un proceso de selección racional de métodos de inspección, en el cual las técnicas superficiales se emplean como una primera etapa de evaluación, mientras que los métodos volumétricos se aplican en función de la necesidad de profundizar en la evaluación de la integridad interna de la soldadura.

Por lo tanto, la inspección de soldaduras debe entenderse como un proceso escalonado, en el cual la combinación adecuada de métodos permite optimizar los recursos de inspección y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Este enfoque constituye la base para la formulación de un protocolo de inspección estructurado, el cual será desarrollado en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE PROTOCOLO DE INSPECCIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

4.1 Introducción

El control de calidad de las soldaduras en estructuras de acero no depende únicamente de la aplicación aislada de ensayos no destructivos, sino de la existencia de criterios técnicos claros que orienten su selección, ejecución y evaluación dentro de un proceso sistemático de inspección. En la práctica constructiva, es común que la inspección de soldaduras se limite a verificaciones puntuales, sin una estructura metodológica que garantice la trazabilidad de los resultados ni su relación con el desempeño estructural de la edificación.

La presente investigación plantea el desarrollo de un protocolo de inspección de soldaduras basado en ensayos no destructivos, orientado a estructuras de acero ubicadas en zonas de alta sismicidad. Este protocolo no solo define los pasos necesarios para la ejecución de los ensayos, sino que integra criterios de selección, niveles de exigencia y mecanismos de registro que permiten evaluar de manera consistente la calidad de las uniones soldadas.

A diferencia de enfoques tradicionales centrados únicamente en la ejecución del ensayo, el protocolo propuesto incorpora una estructura que vincula el tipo de soldadura, su función estructural y el método de inspección aplicado, permitiendo una evaluación más coherente desde el punto de vista del desempeño estructural. De esta manera, se busca reducir la variabilidad en la práctica de inspección y fortalecer los procesos de control de calidad en edificaciones metálicas.

4.2 Alcance del protocolo

El protocolo de inspección desarrollado en este capítulo está orientado a la evaluación de soldaduras en estructuras de acero utilizadas en edificaciones, particularmente aquellas que forman parte del sistema resistente frente a cargas sísmicas. Su aplicación está concebida tanto para procesos constructivos como para evaluaciones en estructuras existentes.

El alcance del protocolo incluye la definición de criterios para la selección de los ensayos no destructivos, la descripción de los procedimientos generales de inspección, la adaptación de los métodos a diferentes tipos de uniones soldadas y la implementación de formatos estandarizados de registro que permitan documentar los resultados de manera sistemática.

No se pretende reemplazar las disposiciones establecidas en normas internacionales como AWS D1.1 o AISC 360, sino complementar su aplicación mediante una estructura organizada que facilite su implementación en el contexto local. En este sentido, el protocolo se plantea como una herramienta técnica que permite integrar los requerimientos normativos con criterios prácticos de inspección.

4.3 Estructura general del protocolo

El protocolo de inspección se organiza en tres componentes principales que permiten estructurar el proceso de evaluación de soldaduras de manera lógica y sistemática:

- Definición del elemento a inspeccionar, considerando su función estructural, tipo de unión y nivel de criticidad.
- Selección del método de ensayo no destructivo, en función de la geometría de la soldadura, el tipo de discontinuidad esperada y las condiciones de accesibilidad.
- Registro y evaluación de resultados, mediante formatos estandarizados que permitan documentar las condiciones del ensayo, los resultados obtenidos y los criterios de aceptación o rechazo.

Esta estructura permite establecer una secuencia clara de inspección, evitando la aplicación indiscriminada de métodos y garantizando que los resultados obtenidos sean comparables, verificables y útiles para la toma de decisiones técnicas.

4.4 Procedimiento general de inspección

El procedimiento general de inspección propuesto establece una secuencia de actividades que deben seguirse para la evaluación de soldaduras mediante ensayos no destructivos, independientemente del método específico utilizado.

En primer lugar, se realiza la identificación del elemento estructural y del tipo de soldadura, determinando su función dentro del sistema resistente. Esta etapa es fundamental para establecer el nivel de exigencia de la inspección y los métodos más adecuados a utilizar.

Posteriormente, se selecciona el método de ensayo no destructivo en función de las características de la unión, considerando aspectos como el tipo de discontinuidad esperada, el espesor del material y la accesibilidad del cordón de soldadura.

Una vez definido el método, se procede a la ejecución del ensayo siguiendo los procedimientos establecidos en las normas técnicas aplicables, asegurando que las condiciones de inspección sean adecuadas y que el personal encargado cuente con la calificación correspondiente.

Finalmente, los resultados obtenidos son registrados en formatos estandarizados, permitiendo su análisis y la aplicación de criterios de aceptación o rechazo en función de la normativa vigente y de la importancia estructural de la soldadura evaluada.

4.5 Formatos de registro de inspección

El protocolo de inspección incorpora formatos estandarizados de registro con el objetivo de garantizar la trazabilidad, consistencia y confiabilidad de los ensayos realizados. Estos formatos constituyen un elemento fundamental dentro del proceso de inspección, ya que permiten documentar de manera estructurada tanto las condiciones del ensayo como los resultados obtenidos.

A diferencia de registros informales utilizados en la práctica constructiva, los formatos propuestos integran información técnica relevante que facilita la evaluación de la calidad de la soldadura en función de su desempeño estructural.

4.5.1 Estructura del formato de inspección

Cada formato de inspección debe incluir, como mínimo, los siguientes elementos:

- Identificación del proyecto y elemento estructural
- Ubicación de la soldadura
- Tipo de unión soldada
- Clasificación de la soldadura (crítica, secundaria o no estructural)
- Equipo utilizado
- Parámetros del ensayo
- Resultados obtenidos

- Discontinuidades detectadas
- Evaluación de aceptación o rechazo
- Observaciones técnicas
- Identificación y firmas de responsabilidad

4.5.2 Formatos específicos por método

En función del método de ensayo aplicado, los formatos pueden incorporar variables adicionales específicas, tales como:

- En ultrasonido: tipo de transductor, ángulo, ganancia
- En radiografía: tipo de fuente, tiempo de exposición
- En líquidos penetrantes: tipo de penetrante, tiempo de revelado
- En partículas magnéticas: tipo de magnetización

Estos formatos permiten adaptar el registro a las particularidades de cada técnica, manteniendo una estructura común que facilita su interpretación y comparación.

4.6 Procedimientos de inspección por método END

Los métodos de ensayo no destructivo analizados en el capítulo anterior se integran en el presente protocolo a través de procedimientos específicos de aplicación, los cuales definen su uso en función de la criticidad de la soldadura, las condiciones de inspección y el tipo de discontinuidad esperada.

Estos procedimientos no tienen como finalidad describir el funcionamiento de cada técnica, sino establecer criterios prácticos para su aplicación dentro de un esquema de inspección estructurado. De esta manera, cada método se incorpora como parte de un proceso escalonado, en el cual su uso responde a decisiones técnicas previamente definidas.

4.6.1 Inspección visual (VT)

La inspección visual constituye la primera etapa del proceso de evaluación de soldaduras y debe aplicarse en la totalidad de las uniones, independientemente de su nivel de criticidad. Su objetivo dentro del protocolo es identificar discontinuidades visibles, evaluar la calidad general del cordón de soldadura y determinar la necesidad de aplicar métodos de inspección adicionales.

Durante esta etapa se verifica la geometría del cordón, la presencia de discontinuidades superficiales evidentes, la continuidad de la soldadura y las condiciones generales de ejecución. Asimismo, permite identificar indicios que puedan estar asociados a defectos internos, tales como irregularidades en el perfil o cambios abruptos en la geometría.

En función de los resultados obtenidos, la inspección visual permite clasificar preliminarmente la condición de la soldadura, estableciendo si la evaluación puede concluir en esta etapa o si es necesario aplicar ensayos no destructivos adicionales.

4.6.2 Líquidos penetrantes (PT)

El ensayo por líquidos penetrantes se incorpora en el protocolo como un método de inspección complementario orientado a la detección de discontinuidades abiertas a la superficie, especialmente en soldaduras donde se requiere una mayor sensibilidad que la proporcionada por la inspección visual.

Su aplicación se recomienda en casos donde la inspección visual ha identificado indicios de posibles defectos superficiales o cuando la soldadura presenta un nivel de criticidad que requiere una verificación más detallada de su superficie. Este método resulta particularmente útil en la identificación de fisuras finas, poros abiertos y discontinuidades que no son visibles a simple vista.

Dentro del protocolo, su uso se limita a soldaduras con accesibilidad adecuada y superficies que permitan una correcta aplicación del ensayo, considerando que su efectividad depende de la preparación adecuada del área de inspección.

4.6.3 Partículas magnéticas (MT)

El ensayo por partículas magnéticas se utiliza como una alternativa o complemento al ensayo por líquidos penetrantes en materiales ferromagnéticos, permitiendo la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales cercanas a la superficie.

En el protocolo, su aplicación se recomienda en soldaduras de criticidad media y alta, especialmente cuando se requiere una mayor confiabilidad en la detección de fisuras que podrían no ser completamente abiertas a la superficie. Su uso resulta adecuado en conexiones estructurales donde la presencia de discontinuidades superficiales puede representar un riesgo para el desempeño del elemento.

La selección de este método depende de las características del material y de las condiciones de acceso, siendo especialmente útil en inspecciones en campo donde se requiere rapidez y sensibilidad en la detección de defectos.

4.6.4 Ultrasonido (UT)

El ensayo por ultrasonido se establece dentro del protocolo como el método principal para la evaluación de la integridad interna de soldaduras críticas. Su aplicación se orienta a la detección de discontinuidades internas relevantes, tales como falta de fusión, falta de penetración y fisuras, las cuales pueden comprometer el comportamiento estructural de la unión.

En el proceso de inspección, este método se aplica cuando la soldadura presenta un nivel de criticidad elevado o cuando los resultados de las etapas previas indican la posible existencia de defectos internos. Su uso permite obtener información sobre la ubicación, orientación y extensión de las discontinuidades, facilitando la toma de decisiones técnicas respecto a la aceptación o reparación de la soldadura.

Debido a su flexibilidad de aplicación en campo y su capacidad para evaluar uniones desde un solo lado, el ultrasonido constituye la herramienta principal dentro del protocolo para la inspección de estructuras existentes.

4.6.5 Radiografía industrial (RT)

La radiografía industrial se incorpora en el protocolo como un método alternativo para la evaluación interna de soldaduras, particularmente en situaciones donde se requiere una representación visual directa de las discontinuidades presentes en el cordón.

Su aplicación se recomienda en soldaduras de penetración completa y en condiciones donde es posible garantizar los requerimientos de seguridad asociados al uso de radiación. Este método resulta especialmente útil en la detección de discontinuidades volumétricas, tales como porosidad e inclusiones.

No obstante, dentro del protocolo su uso se considera limitado en inspecciones en campo, debido a restricciones operativas, costos y condiciones de seguridad. Por esta razón, se plantea como una técnica complementaria cuya aplicación debe evaluarse en función de las condiciones específicas del proyecto.

4.7 Criterios de selección de métodos de inspección

Los criterios de selección de métodos de inspección se fundamentan en un proceso escalonado que inicia con la identificación del elemento a inspeccionar y culmina con la definición del método o combinación de métodos más apropiados para su evaluación.

El primer criterio de decisión corresponde a la clasificación de la soldadura según su importancia estructural. Las uniones que forman parte del sistema resistente principal, como conexiones viga–columna, empalmes de columnas o uniones críticas en marcos metálicos, requieren un nivel de exigencia superior al de soldaduras secundarias o de fijación. Esta diferenciación condiciona directamente el alcance de la inspección y la necesidad de recurrir a métodos de evaluación interna.

El segundo criterio corresponde al tipo de discontinuidad esperada. Cuando se presume la presencia de defectos superficiales, como fisuras abiertas, mordeduras o irregularidades en el acabado del cordón, los métodos superficiales constituyen una primera alternativa de inspección. En cambio, cuando existe la posibilidad de discontinuidades internas, como falta de fusión, falta de penetración, inclusiones o fisuras internas, la inspección debe escalar hacia métodos volumétricos que permitan evaluar la integridad interna de la unión.

Un tercer criterio está relacionado con la configuración de la soldadura y las condiciones de accesibilidad. Existen uniones en las que la geometría del elemento, el espesor del material o las restricciones de acceso limitan la aplicación de ciertos métodos. En estos casos, la selección del ensayo no destructivo debe considerar no solo su capacidad de detección, sino también su viabilidad operativa en condiciones reales de inspección.

Desde esta perspectiva, el protocolo propone una secuencia de decisión en la que la inspección visual constituye siempre la etapa inicial, independientemente del tipo de soldadura. A partir de los resultados obtenidos en esta primera evaluación, la decisión se orienta hacia métodos complementarios superficiales o volumétricos, dependiendo de la criticidad de la unión y de la naturaleza de los indicios detectados.

Cuando la soldadura corresponde a un elemento de baja criticidad y no se observan indicios de discontinuidades relevantes, la inspección puede concluir con la evaluación visual. Si, por el contrario, la unión presenta indicios de defectos superficiales o se trata de una soldadura

de criticidad media, el protocolo orienta la aplicación de líquidos penetrantes o partículas magnéticas, dependiendo del tipo de material y de la sensibilidad requerida.

En soldaduras de alta criticidad, o cuando existen indicios que sugieren la posible presencia de discontinuidades internas, la lógica del protocolo establece la aplicación de métodos volumétricos, priorizando el ensayo por ultrasonido debido a su capacidad de detección, flexibilidad operativa y aplicabilidad en estructuras existentes. La radiografía industrial se considera una alternativa complementaria en aquellos casos donde se requiera una representación visual directa del interior del cordón y existan condiciones adecuadas para su ejecución.

De esta manera, la lógica de decisión del protocolo no se basa en la sustitución de un método por otro, sino en la combinación racional de técnicas de inspección, aplicadas de forma progresiva según el nivel de información requerido. Este enfoque permite optimizar recursos, reducir decisiones subjetivas y mejorar la confiabilidad del proceso de evaluación de soldaduras estructurales.

El proceso de selección de los métodos de inspección se resume en el flujograma presentado en la Figura 9, el cual establece una secuencia lógica de evaluación basada en la criticidad de la soldadura y el tipo de discontinuidad identificada. Este esquema permite estructurar la aplicación de los ensayos no destructivos dentro de un proceso sistemático, facilitando su implementación en condiciones reales de inspección.

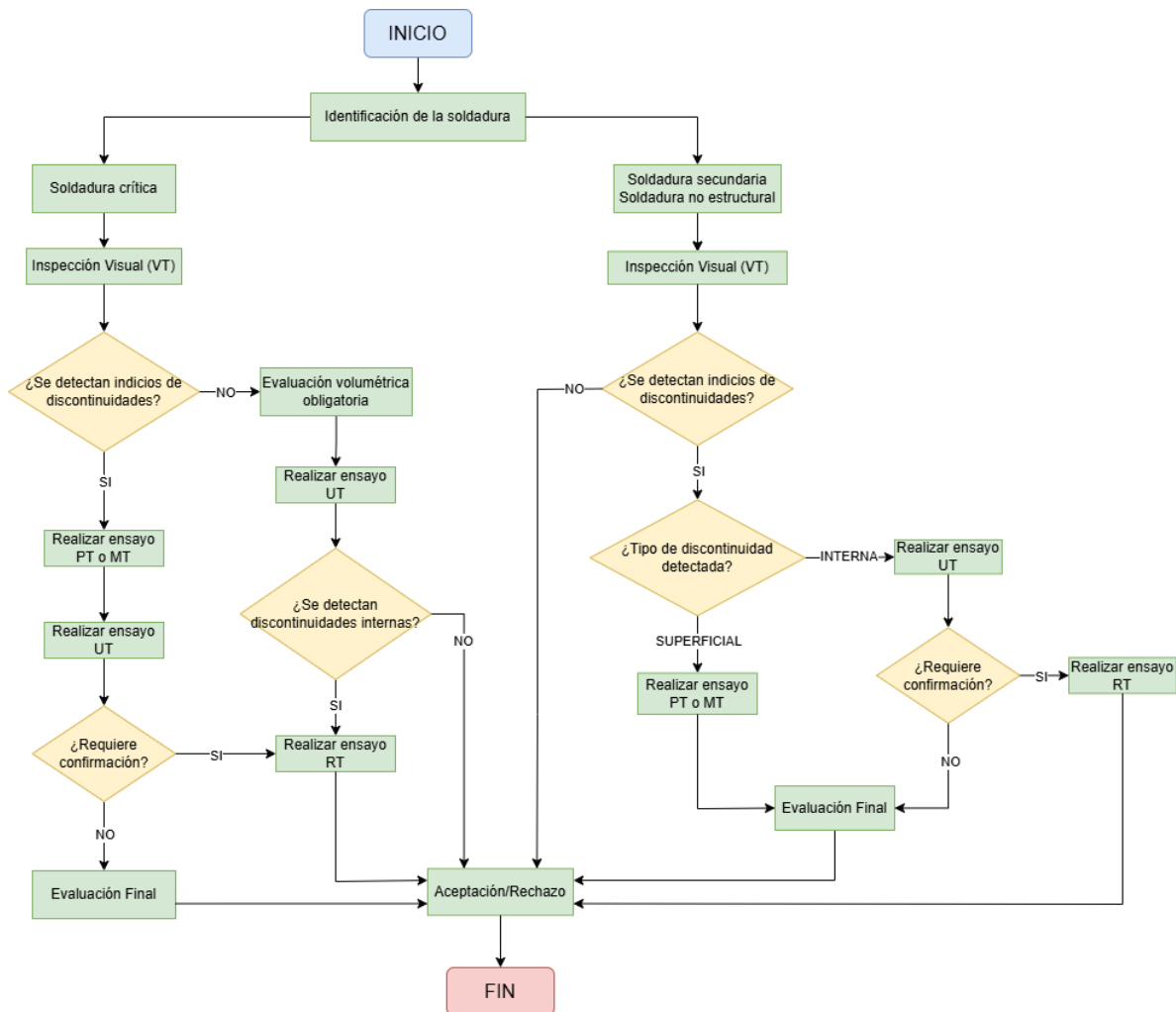


Figura 9: Flujograma para la selección de métodos de inspección

Fuente: Elaboración propia

4.7.1 Tabla de criterios de selección de métodos de inspección

Con el fin de complementar la lógica de decisión presentada en el flujograma anterior, se desarrolla una tabla de criterios de selección de métodos de inspección, la cual sintetiza de manera estructurada las condiciones bajo las cuales se deben aplicar los diferentes ensayos no destructivos.

Esta tabla permite relacionar la criticidad de la soldadura, los resultados de la inspección visual y el tipo de discontinuidad identificada, con el método de inspección más adecuado en cada caso. De esta manera, el protocolo no solo se representa mediante una secuencia lógica de decisiones, sino que también se traduce en una herramienta práctica que facilita su aplicación en procesos reales de inspección.

Asimismo, la tabla permite estandarizar los criterios de selección, reduciendo la variabilidad en la toma de decisiones y asegurando que la evaluación de las soldaduras se realice de manera consistente y técnicamente fundamentada.

Tabla 1: Criterios de selección de métodos de inspección

Nivel de criticidad	Condición de inspección	Tipo de discontinuidad	Método recomendado	Observaciones
Baja	Sin indicios en VT	No aplica	VT	La inspección puede concluir en esta etapa
Baja	Indicios superficiales	Superficial	VT + PT / MT	Aplicar según accesibilidad y material
Baja	Sospecha de defecto interno	Interna	VT + UT	Aplicar solo si es necesario
Media	Sin indicios en VT	No aplica	VT	Puede requerir verificación adicional según criterio técnico
Media	Indicios superficiales	Superficial	VT + PT / MT	Evaluación superficial detallada
Media	Indicios de posible defecto interno	Interna	VT + UT	Evaluación interna recomendada
Crítica	Sin indicios en VT	No aplica	VT + UT	Evaluación interna obligatoria
Crítica	Indicios superficiales	Superficial	VT + PT / MT + UT	Evaluación completa de la unión
Crítica	Indicios de defecto interno	Interna	VT + UT (+ RT)	RT como método de confirmación

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 1, la selección del método de inspección responde principalmente a la criticidad de la soldadura y al tipo de discontinuidad detectada, lo cual permite estructurar el proceso de evaluación de manera sistemática.

4.8 Criterios de aceptación y rechazo

La evaluación de las soldaduras inspeccionadas mediante ensayos no destructivos requiere la definición de criterios técnicos que permitan determinar la aceptabilidad de las discontinuidades detectadas. En este sentido, los resultados obtenidos durante la inspección deben ser analizados en función de su relevancia estructural, considerando tanto la severidad del defecto como la criticidad de la unión dentro del sistema resistente.

Los criterios de aceptación y rechazo adoptados en el presente protocolo se fundamentan en los lineamientos establecidos en normas internacionales como AWS D1.1, las cuales definen límites permisibles para diferentes tipos de discontinuidades en soldaduras estructurales. No obstante, estos criterios se complementan con un enfoque basado en el desempeño estructural, en el cual la evaluación no se limita únicamente a la presencia de un defecto, sino a su posible influencia en la integridad de la unión.

Desde esta perspectiva, las discontinuidades detectadas pueden clasificarse en tres categorías principales:

- Discontinuidades aceptables: aquellas que se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa y que no comprometen el desempeño estructural de la soldadura.
- Discontinuidades reparables: aquellas que exceden los criterios de aceptación, pero cuya corrección es técnicamente viable mediante procedimientos de reparación.
- Discontinuidades críticas: aquellas que representan un riesgo significativo para la integridad estructural, requiriendo la remoción o reconstrucción de la soldadura.

La aplicación de estos criterios debe realizarse considerando el tipo de discontinuidad, su tamaño, ubicación y orientación, así como la función estructural de la soldadura evaluada. En soldaduras críticas, los límites de aceptación deben ser más restrictivos, debido a su influencia directa en el comportamiento global de la estructura, especialmente en condiciones sísmicas.

Adicionalmente, cuando se detecten discontinuidades mediante ensayos no destructivos volumétricos, como ultrasonido o radiografía, se deberá evaluar la necesidad de realizar inspecciones complementarias que permitan confirmar la naturaleza y extensión del defecto antes de tomar una decisión definitiva.

En este contexto, el protocolo propuesto establece que la decisión final sobre la aceptabilidad de una soldadura debe basarse en una evaluación integral que combine los resultados de los ensayos realizados, los criterios normativos aplicables y el juicio técnico del inspector, garantizando así una evaluación coherente y fundamentada.

Con el fin de sistematizar la evaluación de los resultados obtenidos, se presenta la clasificación de aceptación de discontinuidades utilizada en el presente protocolo.

Tabla 2: Clasificación de aceptación de discontinuidades

Clasificación	Descripción	Acción
Aceptable	Cumple criterios normativos	No requiere intervención
Reparable	Excede límites permisibles	Reparación local
Crítica	Compromete integridad estructural	Reemplazo o reconstrucción

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 2, la clasificación de las discontinuidades permite establecer acciones claras en función de su impacto sobre la integridad estructural, facilitando la toma de decisiones durante el proceso de inspección.

4.9 Procedimientos de inspección por método

Con el propósito de estandarizar la ejecución de los ensayos no destructivos dentro del protocolo propuesto, se establecen procedimientos generales para cada método de inspección considerado. Estos procedimientos definen las condiciones básicas de aplicación, los pasos principales del ensayo y los criterios generales para el registro de resultados.

A diferencia de procedimientos normativos extensos, los procedimientos presentados en este apartado se enfocan en su aplicabilidad dentro del protocolo, permitiendo su implementación en campo de manera práctica y coherente con los criterios de selección previamente definidos.

4.9.1 Procedimiento de inspección visual (VT)

Objetivo

Establecer el procedimiento para la inspección visual de soldaduras, con el fin de identificar discontinuidades superficiales y evaluar la calidad geométrica del cordón de soldadura, como parte de la primera etapa del protocolo de inspección.

Alcance

Este procedimiento aplica a todas las soldaduras evaluadas dentro del protocolo, independientemente de su nivel de criticidad, constituyendo el primer nivel de inspección previo a la aplicación de otros ensayos no destructivos.

Normativa de referencia

- AWS D1.1
- ISO 17637

Equipos y herramientas

- Fuente de iluminación adecuada
- Lupa o instrumentos de aumento (si aplica)
- Galgas de soldadura
- Calibrador pie de rey

Procedimiento

- Preparación de la inspección
- Verificar que las condiciones de iluminación permitan una adecuada visibilidad de la junta soldada.
- Asegurar que la zona de inspección sea accesible y segura para el inspector.
- Confirmar que la superficie se encuentre libre de elementos que dificulten la observación (escoria, suciedad, pintura excesiva, entre otros).

Ejecución de la inspección

- Evaluar la geometría del cordón de soldadura, verificando continuidad, uniformidad y dimensiones aproximadas.

- Identificar posibles discontinuidades visibles, tales como porosidad superficial, socavado, falta de fusión, grietas o irregularidades en el perfil del cordón.
- Observar la transición entre el cordón y el metal base, verificando la calidad del acabado.

Registro de resultados

- Documentar las discontinuidades detectadas, indicando su tipo y ubicación.
- Registrar observaciones relacionadas con el estado general de la soldadura.
- Determinar si la soldadura cumple con los criterios visuales establecidos o si requiere la aplicación de métodos adicionales de inspección.

Criterios de evaluación

La evaluación de la soldadura se realizará conforme a los criterios establecidos en AWS D1.1, considerando además el nivel de criticidad definido en el protocolo, lo cual permitirá determinar la necesidad de aplicar ensayos complementarios.

4.9.2 Procedimiento de inspección por líquidos penetrantes (PT)

Objetivo

Establecer el procedimiento para la detección de discontinuidades abiertas a la superficie mediante el ensayo de líquidos penetrantes, con el fin de identificar defectos superficiales que no son detectables mediante inspección visual.

Alcance

Este procedimiento aplica a la inspección de soldaduras en las cuales se requiera evaluar la presencia de discontinuidades superficiales, particularmente en uniones de criticidad media o como método complementario en soldaduras críticas dentro del protocolo de inspección.

Normativa de referencia

- AWS D1.1
- ASTM E165

Equipos y materiales

- Líquido penetrante (visible o fluorescente)

- Limpiador o solvente
- Revelador
- Paños limpios o material absorbente
- Fuente de iluminación adecuada

Procedimiento

- Preparación de la superficie
- Limpiar la superficie de la soldadura eliminando cualquier contaminante como grasa, polvo, pintura o humedad, que pueda impedir la penetración del líquido.
- Verificar que la superficie se encuentre seca y libre de residuos antes de aplicar el penetrante.

Aplicación del penetrante

- Aplicar el líquido penetrante de manera uniforme sobre la superficie a inspeccionar, asegurando una cobertura completa del cordón de soldadura.
- Mantener el penetrante en la superficie durante el tiempo de penetración recomendado, permitiendo que el líquido ingrese en posibles discontinuidades abiertas.

Remoción del exceso de penetrante

- Retirar el exceso de penetrante de la superficie utilizando un limpiador adecuado, evitando remover el líquido retenido en las discontinuidades.
- Verificar que la superficie quede limpia, sin afectar las indicaciones potenciales.

Aplicación del revelador

- Aplicar el revelador de forma uniforme sobre la superficie inspeccionada.
- Permitir que el revelador actúe durante el tiempo necesario para hacer visibles las indicaciones.

Inspección y evaluación de indicaciones

- Observar la superficie bajo condiciones de iluminación adecuadas.
- Identificar la presencia de indicaciones generadas por el revelador, las cuales corresponden a discontinuidades abiertas a la superficie.

- Clasificar las indicaciones según su forma, tamaño y distribución.

Registro de resultados

- Documentar las indicaciones detectadas, especificando su tipo, ubicación y extensión aproximada.
- Registrar observaciones relevantes sobre la condición de la superficie y el comportamiento del ensayo.
- Determinar si los resultados requieren la aplicación de métodos adicionales de inspección, de acuerdo con el protocolo.

Criterios de evaluación

La aceptación o rechazo de las discontinuidades detectadas se realizará conforme a los criterios establecidos en AWS D1.1 y en función del nivel de criticidad de la soldadura, definido previamente en el protocolo de inspección.

4.9.3 Procedimiento de inspección por partículas magnéticas (MT)

Objetivo

Establecer el procedimiento para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos mediante el ensayo de partículas magnéticas, con el fin de identificar defectos que puedan comprometer la integridad de la soldadura.

Alcance

Este procedimiento aplica a la inspección de soldaduras en materiales ferromagnéticos, particularmente en uniones donde se requiere identificar discontinuidades superficiales o cercanas a la superficie. Su aplicación es común en soldaduras de criticidad media y como método complementario en soldaduras críticas dentro del protocolo.

Normativa de referencia

- AWS D1.1
- ASTM E709

Equipos y materiales

- Equipo de magnetización (yugo, bobina u otro sistema)

- Partículas magnéticas (secas o en suspensión)
- Fuente de energía
- Fuente de iluminación adecuada

Procedimiento

- Verificación del material
- Confirmar que el material base de la soldadura sea ferromagnético, condición necesaria para la aplicación del ensayo.

Preparación de la superficie

- Limpiar la superficie de la soldadura eliminando contaminantes como grasa, pintura, óxido o suciedad.
- Verificar que la superficie permita una adecuada adherencia de las partículas magnéticas.

Aplicación del campo magnético

- Magnetizar la zona de inspección mediante el equipo seleccionado, asegurando una orientación adecuada del campo respecto a la posible dirección de las discontinuidades.
- En caso necesario, realizar magnetizaciones en más de una dirección para aumentar la probabilidad de detección.

Aplicación de partículas magnéticas

- Aplicar las partículas magnéticas sobre la superficie mientras se mantiene el campo magnético activo.
- Permitir que las partículas se distribuyan sobre la zona inspeccionada.

Inspección y evaluación de indicaciones

- Observar la acumulación de partículas en la superficie, las cuales indican la presencia de discontinuidades.
- Identificar la forma, tamaño y orientación de las indicaciones.
- Evaluar si las indicaciones corresponden a discontinuidades relevantes o a condiciones superficiales no críticas.

Registro de resultados

- Documentar las discontinuidades detectadas, indicando su ubicación, tipo y extensión aproximada.
- Registrar las condiciones del ensayo y cualquier observación relevante.
- Determinar la necesidad de aplicar métodos adicionales, de acuerdo con el protocolo.

Criterios de evaluación

La aceptación o rechazo de las discontinuidades se realizará conforme a los criterios establecidos en AWS D1.1 y considerando el nivel de criticidad de la soldadura, lo cual permitirá definir la necesidad de intervención o inspección complementaria.

4.9.4 Procedimiento de inspección por ultrasonido (UT)

Objetivo

Establecer el procedimiento para la inspección de soldaduras mediante ultrasonido, con el fin de detectar, localizar y caracterizar discontinuidades internas que no pueden ser identificadas mediante inspección superficial, contribuyendo a la evaluación de la integridad estructural de la unión.

Alcance

Este procedimiento aplica a la inspección de soldaduras de criticidad media y alta, especialmente en aquellas donde se requiere evaluar la continuidad interna del cordón de soldadura. Su aplicación es fundamental en uniones críticas dentro del sistema estructural, de acuerdo con los criterios definidos en el protocolo.

Normativa de referencia

- AWS D1.1
- ASME Sección V
- ISO 17640

Equipos y materiales

- Equipo de ultrasonido tipo A-scan
- Transductores angulares (45°, 60°, 70°)

- Acoplante (gel, agua jabonosa u otro)
- Bloques de calibración (V1, V2 u otros equivalentes)

Procedimiento

- Preparación de la inspección
- Verificar que la superficie del metal base se encuentre limpia y con condiciones adecuadas para el desplazamiento del transductor.
- Confirmar la accesibilidad a la zona de inspección y la geometría de la unión soldada.
- Seleccionar el tipo de transductor en función del espesor del material y la configuración de la soldadura.

Calibración del equipo

- Ajustar el equipo de ultrasonido utilizando bloques de calibración adecuados.
- Determinar el punto de salida del haz ultrasónico y el ángulo real de refracción del transductor.
- Definir el rango de inspección en función del espesor del elemento.
- Ajustar la ganancia y sensibilidad del equipo para asegurar la adecuada detección de indicaciones.

Ejecución de la inspección

- Aplicar el acoplante sobre la superficie de inspección.
- Realizar el barrido del transductor sobre el metal base adyacente al cordón de soldadura, cubriendo toda la longitud de la unión.
- Ejecutar movimientos sistemáticos que permitan detectar discontinuidades en diferentes orientaciones.
- Identificar indicaciones relevantes en la pantalla del equipo, evaluando su amplitud, posición y repetitividad.

Evaluación de indicaciones

- Analizar las señales obtenidas para determinar si corresponden a discontinuidades internas.
- Estimar la ubicación, profundidad y extensión de las discontinuidades detectadas.

- Diferenciar indicaciones reales de posibles interferencias o señales no relevantes.

Registro de resultados

- Documentar las discontinuidades detectadas, indicando su tipo, ubicación, profundidad y longitud aproximada.
- Registrar los parámetros utilizados durante el ensayo y las condiciones de inspección.
- Evaluar la necesidad de aplicar métodos complementarios, como radiografía, en caso de requerirse confirmación.

Criterios de evaluación

La aceptación o rechazo de las discontinuidades detectadas se realizará conforme a los criterios establecidos en AWS D1.1, considerando adicionalmente el nivel de criticidad de la soldadura definido en el protocolo, lo cual permitirá establecer decisiones técnicas fundamentadas respecto a la integridad de la unión.

4.10 Formatos de registro de inspección

Con el fin de documentar de manera sistemática los resultados obtenidos durante la aplicación del protocolo de inspección, se establecen formatos de registro específicos para cada uno de los métodos de ensayo no destructivo considerados. Estos formatos permiten recopilar información técnica relevante relacionada con la identificación de la soldadura, las condiciones del ensayo, los parámetros de evaluación y las discontinuidades detectadas.

Los formatos han sido desarrollados tomando como referencia la estructura de informes técnicos utilizados en la práctica profesional, de manera que no solo cumplen una función de registro, sino que también permiten sustentar la evaluación realizada. En este sentido, se integran criterios de aceptación y rechazo, así como información necesaria para garantizar la trazabilidad del proceso de inspección.

Asimismo, cada formato incorpora una descripción detallada de sus campos, con el propósito de facilitar su correcta aplicación y asegurar la consistencia en el registro de la información durante la inspección.

4.10.1 Formato de inspección visual (VT)

El presente formato corresponde al registro de resultados del ensayo de inspección visual (VT), el cual ha sido diseñado para documentar de manera sistemática la información relevante obtenida durante la evaluación de las soldaduras. En este formato se integran los datos generales del proyecto, las condiciones de inspección y la identificación de discontinuidades visibles, así como su correspondiente evaluación.

Su estructura permite garantizar la trazabilidad del proceso de inspección y la coherencia con los criterios establecidos en el protocolo propuesto, facilitando además la verificación del estado superficial de las soldaduras y la toma de decisiones respecto a su aceptación o la necesidad de aplicar métodos complementarios.

ID Documento:	INF-VT	INFORME DE INSPECCIÓN VISUAL (VT)			
Versión:	1.0				
Fecha revisión:	abr-26				
Datos generales del proyecto					
Proyecto: [1]		Cliente: [2]			
Ubicación: [3]		Solicitado por: [4]			
Informe N.º: [5]		Fecha de inspección: [6]			
Parámetros de inspección					
Técnica de inspección utilizada: [7]			Instrumentos utilizados: [11]		
Condición superficial: [8]					
Accesibilidad: [9]					
Intensidad de luz (min 1076 lux): [10]					
Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)					
Id. junta o elemento [12]	Id. Soldador [13]	Elemento estructural [14]	Tipo de soldadura [15]	Clasificación de la soldadura [16]	Material [17]
Esquema(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s) [18]					

Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [19]	Geometría del cordón [20]	Discontinuidades visibles [21]	Norma de evaluación aplicada [22]	Resultado [23]		
				Aceptado	Rechazado	Requiere otro método
Nomenclatura de discontinuidades (AR) ACUMULACION DE DEFECTOS (LS) DEFECTO LINEAL SUPERFICIAL (LB) DEFECTO LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) DEFECTO VOLUMETRICO TRANSVERSAL (VC) DEFECTO VOLUMETRICO AGRUPADO (VI) DEFECTO VOLUMETRICO INDIVIDUAL						
Observaciones [24]						
Inspector [25]			Revisión / Supervisor [26]			
Firma:			Firma:			
Nombre:			Nombre:			
C.I.:			C.I.:			
Nivel:			Nivel:			

Formato 1: Inspección visual (VT)
Fuente: Elaboración propia

Descripción de los campos del formato de inspección visual (VT)

A continuación, se describe la información que debe ser registrada en cada uno de los campos del formato de inspección visual:

Datos generales del proyecto:

1. Proyecto: Nombre del proyecto o estructura donde se realiza la inspección.
2. Cliente: Entidad o persona responsable del proyecto o que solicita la inspección.
3. Ubicación: Localización del proyecto donde se realizará la inspección.
4. Solicitado por: Persona o entidad que requiere la ejecución de la inspección.
5. Informe N.º: Código o número único asignado al informe para su identificación y trazabilidad.
6. Fecha de inspección: Fecha en la que se ejecuta la inspección visual.

Parámetros de inspección

7. Técnica de inspección utilizada: Tipo de inspección visual aplicada, indicando si se realizó de forma directa o mediante ayudas visuales.
8. Condición superficial: Estado de la superficie inspeccionada previo al ensayo, considerando limpieza, presencia de óxido, pintura o contaminantes.
9. Accesibilidad: Condiciones de acceso a la zona inspeccionada, indicando si es directa o requiere medios auxiliares como andamios.
10. Intensidad de luz (mín. 1076 lux): Nivel de iluminación durante la inspección, medido en lux, para verificar el cumplimiento de condiciones adecuadas de visibilidad.
11. Instrumentos utilizados: Equipos o herramientas empleadas durante la inspección, junto con su respectiva identificación.

Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)

12. Id. junta o elemento: Código asignado a cada junta inspeccionada (J1, J2, etc.).
13. Id. soldador: Identificación del soldador responsable de la ejecución de la unión.
14. Elemento estructural: Tipo de elemento estructural donde se ubica la soldadura.
15. Tipo de soldadura: Tipo de unión soldada inspeccionada (filete, tope, etc.).
16. Clasificación de la soldadura: Nivel de criticidad asignado a la junta según el protocolo.
17. Material: Material base del elemento estructural.

Registro fotográfico

18. Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s): Imágenes que permiten identificar la ubicación de las juntas dentro de la estructura y evidenciar visualmente su condición.

Resultados de la inspección

19. Id. junta o elemento: Identificación de la junta evaluada dentro de la tabla de resultados.
20. Geometría del cordón: Descripción del cordón de soldadura en términos de continuidad, forma y dimensiones observadas.
21. Discontinuidades visibles: Registro de defectos observados durante la inspección visual.
22. Norma de evaluación aplicada: Normativa utilizada como criterio de aceptación o rechazo.
23. Resultado: Decisión final de la inspección, que puede ser: Aceptado, rechazado o requiere otro método de inspección.

Nomenclatura de discontinuidades

Sección destinada a definir las abreviaturas utilizadas para clasificar las discontinuidades detectadas durante la inspección, tales como defectos lineales, volumétricos o acumulaciones de material.

Observaciones

24. Observaciones: Comentarios adicionales sobre la inspección, incluyendo decisiones basadas en el protocolo o limitaciones del ensayo.

Responsables

25. Inspector: Datos del profesional que realiza la inspección.

26. Revisión / Supervisor: Datos del responsable de la validación o supervisión del informe.

4.10.2 Formato de inspección por líquidos penetrantes (PT)

El presente formato corresponde al registro de resultados del ensayo de líquidos penetrantes (PT), el cual ha sido diseñado para documentar de manera sistemática la información relevante obtenida durante la inspección de discontinuidades abiertas a la superficie. En este formato se integran los datos generales del proyecto, las condiciones de inspección, los parámetros del ensayo y la evaluación de las indicaciones detectadas.

Su estructura permite garantizar la trazabilidad del proceso de inspección y la coherencia con los criterios establecidos en el protocolo propuesto, facilitando la identificación de defectos superficiales y la toma de decisiones respecto a la aceptación o la aplicación de métodos adicionales de evaluación.

ID Documento:	INF-PT	INFORME DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES (PT)		
Versión:	1.0			
Fecha revisión:	abr-26			
Datos generales del proyecto				
Proyecto: [1]		Cliente: [2]		
Ubicación: [3]		Solicitado por: [4]		
Informe N.º: [5]		Fecha de inspección: [6]		
Parámetros de inspección				
Técnica de inspección utilizada: [7]		Instrumentos utilizados: [11]		
Condición superficial: [8]				
Accesibilidad: [9]				

Intensidad de luz (min 1076 lux): [10]						
Limpiador: [12]				Método de remoción o lavado: [13]		
Penetrante: [14]				Tiempo de penetración: [15]		
Revelador: [16]				Tiempo de revelado: [17]		
Id. junta o elemento [18]	Id. Soldador [19]	Elemento estructural [20]	Tipo de soldadura [21]	Clasificación de la soldadura [22]	Material [23]	
Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s) [24]						
Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [18]	Geometría del cordón [25]	Localización de indicadores por PT [26]	Norma de evaluación aplicada [27]	Resultado [28]		
				Aceptado	Rechazado	Requiere otro método
NOMENCLATURA DE DISCONTINUIDADES (AR) ACUMULACION DE DEFECTOS (LS) DEFECTO LINEAL SUPERFICIAL (LB) DEFECTO LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) DEFECTO VOLUMETRICO TRANSVERSAL (VC) DEFECTO VOLUMETRICO AGRUPADO (VI) DEFECTO VOLUMETRICO INDIVIDUAL						
Observaciones [29]						
Inspector [30]			Revisión / Supervisor [31]			
Firma:			Firma:			
Nombre:			Nombre:			
C.I.:			C.I.:			
Nivel:			Nivel:			

Formato 2: Inspección por líquidos penetrantes (PT)
Fuente: Elaboración propia

Descripción de los campos del formato de inspección por líquidos penetrantes (PT)

A continuación, se describe la información que debe registrarse en cada uno de los campos del formato de inspección por líquidos penetrantes:

Datos generales del proyecto

1. Proyecto: Nombre del proyecto o estructura en la cual se realiza la inspección.
2. Cliente: Entidad o persona responsable del proyecto o que solicita la inspección.
3. Ubicación: Localización del proyecto o del elemento inspeccionado dentro de la obra.
4. Solicitado por: Persona o entidad que requiere la ejecución del ensayo.
5. Informe N.º: Código o número único asignado al informe para su identificación y trazabilidad.
6. Fecha de inspección: Fecha en la que se ejecuta el ensayo.

Parámetros de inspección

7. Técnica de inspección utilizada: Tipo de aplicación del ensayo, indicando si se realizó de forma directa o mediante algún procedimiento específico.
8. Condición superficial: Estado de la superficie antes del ensayo, verificando que se encuentre limpia, libre de óxido, pintura o contaminantes que puedan afectar la penetración.
9. Accesibilidad: Condición de acceso a la zona inspeccionada, indicando si es directa o requiere medios auxiliares.
10. Intensidad de luz (mín. 1076 lux): Nivel de iluminación durante la inspección, necesario para garantizar la adecuada visibilidad de las indicaciones.
11. Instrumentos utilizados: Equipos o herramientas empleadas durante el ensayo, junto con su respectiva identificación o código.

Parámetros específicos del ensayo PT

12. Limpiador: Producto utilizado para la limpieza inicial de la superficie, previo a la aplicación del penetrante.
13. Método de remoción o lavado: Procedimiento utilizado para retirar el exceso de penetrante, ya sea mediante solvente, agua u otro método aplicable.
14. Penetrante: Tipo y referencia del líquido penetrante utilizado en el ensayo.

- 15. Tiempo de penetración: Tiempo durante el cual el penetrante permanece en contacto con la superficie para permitir su ingreso en posibles discontinuidades.
- 16. Revelador: Producto utilizado para extraer el penetrante retenido en las discontinuidades y hacerlas visibles.
- 17. Tiempo de revelado: Tiempo de espera luego de aplicar el revelador, necesario para que se manifiesten las indicaciones.

Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)

- 18. Id. junta o elemento: Código asignado a cada junta inspeccionada.
- 19. Id. soldador: Identificación del soldador responsable de la ejecución de la unión.
- 20. Elemento estructural: Tipo de elemento donde se ubica la soldadura.
- 21. Tipo de soldadura: Configuración de la unión soldada (filete, tope, etc.).
- 22. Clasificación de la soldadura: Nivel de criticidad asignado según el protocolo.
- 23. Material: Material base del elemento inspeccionado.

Registro fotográfico

- 24. Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s): Imágenes que muestran el proceso de aplicación del ensayo y las condiciones finales de las superficies, incluyendo la posible aparición de indicaciones.

Resultados de la inspección

- 25. Geometría del cordón: Descripción del cordón de soldadura en términos de continuidad, forma y dimensiones.
- 26. Localización de indicadores por PT: Registro de la presencia o ausencia de indicaciones detectadas mediante el ensayo de líquidos penetrantes.
- 27. Norma de evaluación aplicada: Norma técnica utilizada como criterio de aceptación o rechazo.
- 28. Resultado: Decisión final de la inspección, que puede ser: Aceptado, rechazado o requiere otro método de inspección.

29. Nomenclatura de discontinuidades

- 30. Sección destinada a definir las abreviaturas utilizadas para clasificar las discontinuidades detectadas durante la inspección, tales como defectos lineales, volumétricos o acumulaciones de material.

Nomenclatura de discontinuidades

Sección destinada a definir las abreviaturas utilizadas para clasificar las discontinuidades detectadas durante la inspección, tales como defectos lineales, volumétricos o acumulaciones de material.

Observaciones

31. Observaciones: Comentarios adicionales relevantes sobre el ensayo, condiciones de la superficie o comportamiento de las indicaciones.

Responsables

32. Inspector: Datos del profesional que ejecuta el ensayo, incluyendo firma, nombre, identificación y nivel de calificación.

33. Revisión / Supervisor: Datos del responsable de la revisión o supervisión del informe, en caso de aplicar.

4.10.3 Formato de inspección por partículas magnéticas (MT)

El presente formato corresponde al registro de resultados del ensayo de partículas magnéticas (MT), el cual ha sido diseñado para documentar de manera sistemática la información relevante obtenida durante la inspección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. En este formato se integran los datos generales del proyecto, las condiciones de inspección, los parámetros del ensayo y la evaluación de las indicaciones detectadas.

Su estructura permite garantizar la trazabilidad del proceso de inspección y la coherencia con los criterios establecidos en el protocolo propuesto, facilitando la identificación de defectos y la toma de decisiones respecto a la aceptación o rechazo de las soldaduras evaluadas.

ID Documento:	INF-MT	INFORME DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT)		
Versión:	1.0			
Fecha revisión:	abr-26			
Datos generales del proyecto				
Proyecto: [1]		Cliente: [2]		
Ubicación: [3]		Solicitado por: [4]		
Informe N.º: [5]		Fecha de inspección: [6]		
Condiciones generales de inspección				

Luz visible (mín 1076 lux): [7]		Tipo de partícula: [8]				
Luz negra (mín 1000uW/cm2): [9]		Tipo de corriente: [10]				
Zona oscura (máx 21,5 lux): [11]		Magnetización: [12]				
Conc. partículas fluores. (0,1-0,4 ml): [13]		Levantamiento de yugo (10lb): [14]				
Campo magnético residual (máx 3G): [15]						
Equipos Utilizados						
Control dimensional y volumétrico: [16]		Intensidad de luz: [17]				
		Campo magnético residual: [18]				
		Equipo de magnetización: [19]				
Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)						
Id. junta o elemento [20]	Id. Soldador [21]	Elemento estructural [22]	Tipo de soldadura [23]			
Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s) [26]						
Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [20]	Geometría del cordón [27]	Localización de indicadores por MT [28]	Norma de evaluación aplicada [29]	Resultado [30]		
				Aceptado	Rechazado	Requiere otro método
NOMENCLATURA DE DISCONTINUIDADES						
(AR) ACUMULACION DE DEFECTOS (LS) DEFECTO LINEAL SUPERFICIAL (LB) DEFECTO LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) DEFECTO VOLUMETRICO TRANSVERSAL (VC) DEFECTO VOLUMETRICO AGRUPADO (VI) DEFECTO VOLUMETRICO INDIVIDUAL						
Observaciones [31]						
Inspector [32]				Revisión / Supervisor [33]		
Firma:				Firma:		
Nombre:				Nombre:		
C.I.:				C.I.:		
Nivel:				Nivel:		

Formato 3: Inspección por partículas magnéticas (MT)
Fuente: Elaboración propia

Descripción de los campos del formato de inspección por partículas magnéticas (MT)

A continuación, se describe la información que debe registrarse en cada uno de los campos del formato de inspección por partículas magnéticas:

Datos generales del proyecto

1. Proyecto: Nombre del proyecto o estructura en la cual se realiza la inspección.
2. Cliente: Entidad o persona responsable del proyecto o que solicita la inspección.
3. Ubicación: Localización del elemento inspeccionado dentro de la obra.
4. Solicitado por: Persona o entidad que requiere la ejecución del ensayo.
5. Informe N.º: Código o número único asignado al informe.
6. Fecha de inspección: Fecha en la que se ejecuta el ensayo.

Condiciones generales de inspección

7. Luz visible (mín. 1076 lux): Nivel de iluminación durante la inspección, medido en lux, requerido para la correcta observación de indicaciones en métodos con partículas visibles.
8. Tipo de partícula: Tipo de partículas magnéticas utilizadas en el ensayo, indicando si son secas o húmedas y si son visibles o fluorescentes.
9. Luz negra (mín. 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$): Nivel de radiación ultravioleta requerido en caso de utilizar partículas fluorescentes. En caso de no aplicarse, se indica como no aplicable (NA).
10. Tipo de corriente: Tipo de corriente empleada para la magnetización del elemento, como corriente alterna (AC) o corriente continua (DC).
11. Zona oscura (máx. 21.5 lux): Condición de iluminación ambiental requerida para ensayos con partículas fluorescentes. Se indica como no aplicable cuando se utilizan partículas visibles.
12. Magnetización: Tipo de magnetización aplicada durante el ensayo (continua o residual).
13. Concentración de partículas fluorescentes: Rango de concentración de partículas en suspensión cuando se utilizan partículas húmedas fluorescentes. En caso contrario, se indica como no aplicable.
14. Levantamiento de yugo (10 lb): Verificación de la capacidad del yugo magnético para generar un campo adecuado, mediante prueba de levantamiento de carga, según lo requerido por normativa.

15. Campo magnético residual (máx. 3G): Valor del campo magnético residual medido en el elemento después de la inspección, para asegurar que se encuentra dentro de los límites aceptables.

Equipos utilizados

16. Control dimensional y volumétrico: Herramientas utilizadas para la evaluación geométrica de la soldadura, como galgas de soldadura o pie de rey.
17. Intensidad de luz: Equipo utilizado para medir la iluminación durante la inspección, generalmente un luxómetro.
18. Campo magnético residual: Instrumento utilizado para medir el magnetismo residual en la pieza, como un gausímetro.
19. Equipo de magnetización: Equipo empleado para generar el campo magnético, como un yugo magnético.

Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)

20. Id. junta o elemento: Código asignado a cada junta inspeccionada.
21. Id. soldador: Identificación del soldador responsable de la ejecución de la unión.
22. Elemento estructural: Tipo de elemento donde se ubica la soldadura.
23. Tipo de soldadura: Configuración de la unión soldada.
24. Clasificación de la soldadura: Nivel de criticidad asignado según el protocolo.
25. Material: Material base del elemento inspeccionado.

Registro fotográfico

26. Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s): Imágenes que muestran la aplicación del ensayo y las condiciones finales de las superficies inspeccionadas.

Resultados de la inspección

27. Geometría del cordón: Descripción del cordón en términos de continuidad, forma y dimensiones.
28. Localización de indicadores por MT: Registro de las indicaciones detectadas mediante el ensayo de partículas magnéticas, indicando su presencia o ausencia.
29. Norma de evaluación aplicada: Norma técnica utilizada como criterio de aceptación o rechazo, como AWS D1.1.

30. Resultado: Decisión final de la inspección, que puede ser: Aceptado, rechazado o requiere otro método de inspección.

Nomenclatura de discontinuidades

Sección destinada a definir las abreviaturas utilizadas para clasificar las discontinuidades detectadas durante la inspección, tales como defectos lineales, volumétricos o acumulaciones de material.

Observaciones

31. Observaciones: Comentarios adicionales relevantes.

Responsables

32. Inspector: Datos del inspector que ejecuta el ensayo.

33. Revisión / Supervisor: Datos del responsable de la revisión.

4.10.4 Formato de inspección por ultrasonido (UT)

El presente formato corresponde al registro de resultados del ensayo de ultrasonido (UT), el cual ha sido diseñado para documentar de manera sistemática la información relevante obtenida durante la inspección de discontinuidades internas en soldaduras. En este formato se integran los datos generales del proyecto, las condiciones de inspección, los parámetros del ensayo, el registro gráfico de las indicaciones ultrasónicas y la evaluación de los resultados obtenidos.

Su estructura permite garantizar la trazabilidad del proceso de inspección y la coherencia con los criterios establecidos en el protocolo propuesto, facilitando la interpretación de las señales detectadas y la toma de decisiones fundamentadas respecto a la integridad de las soldaduras evaluadas.

ID Documento:	INF-UT	INFORME DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO (UT)		
Versión:	1.0			
Fecha revisión:	abr-26			
Datos generales del proyecto				
Proyecto: [1]		Cliente: [2]		
Ubicación: [3]		Solicitado por: [4]		
Informe N.º: [5]		Fecha de inspección: [6]		
Equipo empleado				

Equipo: [7]			Fecha de Calibración: [13]	
Transductor: [8]			Dimensiones: [14]	
Cables: [9]			Software: [15]	
Zapata: [10]			Focalización: [16]	
Apertura virtual $A=n \cdot p$: [11]			Modo de transmisión: [17]	
Pitch entre elementos: [12]				
Parámetros de inspección				
Tipo de inspección: [18]			Fecha estandarización: [28]	
Método de inspección: [19]			Técnica: [29]	
Bloque distancia amplitud: [20]			Calibración BLK-25: [30]	
Bloque estandarización: [21]			Ajuste de sensibilidad: [31]	
Ángulo barrido S-Scan: [22]			Nivel de ganancia sensibilidad dB: [32]	
Codificado / manual: [23]			Nivel de ganancia barrido dB: [33]	
Condición superficial: [24]			Encoder: [34]	
Acoplante: [25]			Norma aplicable: [35]	
Intensidad de luz: [26]				
Medición de temperatura: [27]				
Configuración de la junta				
<u>Datos Referenciales para la configuración de juntas</u>		[41]		
Tipo de junta: [36]				
Altura talón (mm): [37]				
Desplazamiento talón (mm): [38]				
Ángulo de bisel (°): [39]				
Espesor t material base (mm): [40]				
Plan de inspección				
<u>Datos referenciales para plan de inspección</u>		[45]		
Configuración de ley focal: [42]				
Cantidad de elementos: [43]				
Desplazamiento índice: [44]				

Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)						
Id. junta o elemento [46]	Id. Soldador [47]	Elemento estructural [48]	Tipo de soldadura [49]	Clasificación de la soldadura [50]	Material [51]	
Registro gráfico de indicaciones ultrasónicas A SCAN, S SCAN, C SCAN [52]						
Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [46]	Long. escaneado (mm) [53]	Lado [54]	Espesor (mm) [55]	Dimensionamiento y localización de indicadores [56]	Resultado [57]	
					Aceptado	Rechazado
NOMENCLATURA DE INDICACIONES (AR) ACUMULACION DE INDICACIONES (LS) INDICACIÓN LINEAL SUPERFICIAL (LB) INDICACIÓN LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) INDICACIÓN VOLUMETRICA TRANSVERSAL (VC) INDICACIÓN VOLUMETRICA AGRUPADA (VI) INDICACIÓN VOLUMETRICA INDIVIDUAL						
Observaciones [58]						
Inspector [59]				Revisión / Supervisor [60]		
Firma:				Firma:		
Nombre:				Nombre:		
C.I.:				C.I.:		
Nivel:				Nivel:		

Formato 4: Inspección por ultrasonido (UT)

Fuente: Elaboración propia

Descripción de los campos del formato de inspección por ultrasonido (UT)

A continuación, se describe la información que debe registrarse en cada uno de los campos del formato de inspección por ultrasonido:

Datos generales del proyecto

1. Proyecto: Nombre del proyecto o estructura donde se realiza la inspección.
2. Cliente: Entidad o persona responsable del proyecto o que solicita la inspección.
3. Ubicación: Localización del elemento inspeccionado dentro de la obra.
4. Solicitado por: Persona o entidad que requiere la ejecución del ensayo.
5. Informe N.º: Código único asignado al informe.
6. Fecha de inspección: Fecha en la que se ejecuta el ensayo.

Equipo empleado

7. Equipo: Equipo ultrasónico utilizado, incluyendo marca, modelo y número de serie.
8. Transductor: Tipo de transductor utilizado, incluyendo configuración (Phased Array), número de elementos y rango de frecuencia.
9. Cables: Tipo de cable utilizado para la conexión del transductor al equipo.
10. Zapata: Tipo de zapata o wedge utilizado, incluyendo ángulo y velocidad acústica.
11. Apertura virtual A (Aperture): Número de elementos activos utilizados en la formación del haz ultrasónico.
12. Pitch entre elementos: Separación entre elementos del transductor.
13. Fecha de calibración: Fecha de la última calibración del equipo.
14. Dimensiones: Dimensiones del transductor o arreglo.
15. Software: Software utilizado para la adquisición y procesamiento de señales.
16. Focalización: Profundidad o rango focal utilizado en la inspección.
17. Modo de transmisión: Modo de operación del equipo, generalmente pulso-eco.

Parámetros de inspección

18. Tipo de inspección: Tipo de barrido realizado (ej. barrido continuo).
19. Técnica: Técnica de inspección aplicada, en este caso Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT).
20. Bloque distancia amplitud: Bloque utilizado para la calibración DAC.
21. Bloque estandarización: Bloque patrón utilizado para verificación del equipo.
22. Ángulo barrido S-Scan: Rango de ángulos utilizados en el barrido sectorial.
23. Codificado / manual: Indica si la inspección fue manual o con sistema codificado.
24. Condición superficial: Estado de la superficie inspeccionada.
25. Acoplante: Tipo de material utilizado para garantizar la transmisión del sonido.

- 26. Intensidad de luz: Condición de iluminación durante la inspección.
- 27. Medición de temperatura: Registro de temperatura de la pieza y patrón.
- 28. Fecha estandarización: Fecha en la que se realizó la calibración del sistema.
- 29. Técnica de escaneo: Tipo de escaneo utilizado (ej. S-Scan lineal raster).
- 30. Calibración BLK-25: Bloque de calibración específico utilizado.
- 31. Ajuste de sensibilidad: Nivel de sensibilidad configurado (porcentaje FSH).
- 32. Nivel de ganancia sensibilidad dB: Ganancia aplicada para detección.
- 33. Nivel de ganancia barrido dB: Ganancia durante el escaneo.
- 34. Encoder: Sistema de codificación de desplazamiento (ej. mini wheel).
- 35. Norma aplicable: Norma bajo la cual se evalúan los resultados.

Configuración de la junta

- 36. Tipo de junta: Configuración geométrica de la unión.
- 37. Altura de talón: Dimensión del talón de la soldadura.
- 38. Desplazamiento del talón: Desalineación u offset en la junta.
- 39. Ángulo de bisel: Ángulo de preparación de la junta.
- 40. Espesor y material base: Espesor del material inspeccionado.
- 41. Datos referenciales: Imagen o esquema de la configuración de la junta.

Plan de inspección

- 42. Configuración de ley focal: Tipo de ley focal utilizada (ej. sectorial).
- 43. Cantidad de elementos: Número de elementos activos.
- 44. Desplazamiento índice: Posiciones de escaneo.
- 45. Datos referenciales del plan: Imagen del plan de inspección.

Identificación de juntas

- 46. Id. junta o elemento: Identificación de la junta.
- 47. Id. soldador: Código del soldador.
- 48. Elemento estructural: Elemento inspeccionado.
- 49. Tipo de soldadura: Configuración de la unión.
- 50. Clasificación de la soldadura: Nivel de criticidad.
- 51. Material: Material base.

Registro gráfico

52. Registro gráfico de indicaciones ultrasónicas: Imágenes A-Scan, S-Scan y C-Scan que evidencian la evaluación interna de la soldadura.

Resultados de la inspección

53. Longitud escaneada: Longitud total evaluada en cada junta.
54. Lado: Cara o dirección de inspección.
55. Espesor: Espesor del material evaluado.
56. Dimensionamiento y localización de indicadores: Descripción de las indicaciones detectadas, incluyendo amplitud, profundidad y longitud.
57. Resultado: Decisión final de la inspección, que puede ser: Aceptado o rechazado.

Observaciones

58. Observaciones: Comentarios adicionales relevantes sobre el ensayo, condiciones de inspección o interpretación de resultados.

Responsables

59. Inspector: Datos del inspector que ejecuta el ensayo, incluyendo firma, nombre, identificación y nivel de calificación.
60. Revisión / Supervisor: Datos del responsable de la revisión o supervisión del informe.

Con el desarrollo de los procedimientos de inspección y la elaboración de los formatos de registro correspondientes a cada uno de los ensayos no destructivos considerados, se ha establecido una base metodológica estructurada que permite garantizar la correcta ejecución, documentación y evaluación de las inspecciones en soldaduras de estructuras metálicas.

Los formatos propuestos no solo facilitan el registro sistemático de la información, sino que también aseguran la trazabilidad del proceso de inspección, integrando de manera coherente los criterios de evaluación y los resultados obtenidos. De esta manera, se consolida un protocolo de inspección aplicable en campo, que permite estandarizar los procedimientos y mejorar la confiabilidad de las evaluaciones realizadas.

Una vez definida la estructura del protocolo y los instrumentos necesarios para su implementación, en el siguiente capítulo se procede a su aplicación en un caso de estudio

real, con el objetivo de validar su funcionamiento, analizar los resultados obtenidos y evaluar su utilidad en la identificación de discontinuidades en soldaduras de estructuras metálicas.

CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DEL PROTOCOLO DE INSPECCIÓN EN UNA ESTRUCTURA METÁLICA EN LA CIUDAD DE QUITO

El presente capítulo tiene como finalidad aplicar el protocolo de inspección de soldaduras mediante ensayos no destructivos, desarrollado en los capítulos anteriores, en una estructura metálica real. Esta etapa constituye un componente fundamental del trabajo, ya que permite evaluar la viabilidad práctica del protocolo propuesto, así como su capacidad para identificar y caracterizar discontinuidades en un contexto de aplicación en campo.

Para ello, se selecciona una estructura metálica representativa, en la cual se realiza una inspección sistemática de las uniones soldadas, siguiendo la metodología establecida. La aplicación del protocolo comprende la identificación y clasificación de las soldaduras según su nivel de criticidad, la ejecución de los ensayos no destructivos correspondientes y el registro de la información mediante los formatos diseñados.

Asimismo, se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, considerando tanto la detección de discontinuidades como la evaluación de su relevancia estructural. Este análisis permite verificar la coherencia entre los procedimientos planteados y su implementación en campo, así como identificar posibles ajustes o mejoras al protocolo.

Finalmente, la aplicación desarrollada en este capítulo permite validar la utilidad del protocolo como herramienta para la inspección de estructuras metálicas, aportando criterios técnicos para la toma de decisiones en procesos de evaluación de integridad estructural.

5.1 Descripción de la estructura inspeccionada

El presente estudio se desarrolla sobre una estructura metálica existente, seleccionada con el propósito de aplicar el protocolo de inspección de soldaduras mediante ensayos no destructivos propuesto en esta investigación. La estructura corresponde a un sistema estructural de acero, compuesto principalmente por elementos tipo columnas, vigas y uniones soldadas, los cuales forman parte del sistema resistente de la edificación.

La edificación objeto de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Quito, en el sector de la Av. Ilaló vía al Tingo, y corresponde al proyecto denominado Paseo Ilaló, cuya ejecución se encuentra a cargo de la empresa SEDEMI. Es importante mencionar que, debido a restricciones de confidencialidad por parte de la empresa responsable, no se dispone de

información detallada adicional respecto a aspectos de diseño estructural o especificaciones técnicas del proyecto.

La selección de la estructura se realizó considerando su representatividad en el contexto de edificaciones metálicas, así como la accesibilidad a sus elementos estructurales, lo que permitió la ejecución de inspecciones en condiciones reales de campo. En particular, se identificaron zonas críticas donde las uniones soldadas desempeñan un papel fundamental en la transmisión de cargas, tales como conexiones columna–columna, viga principal–columna y viga principal–viga secundaria.

Desde el punto de vista geométrico y constructivo, la estructura presenta perfiles de acero laminado, con uniones ejecutadas mediante soldadura, predominantemente del tipo filete y, en algunos casos, uniones de penetración parcial o completa, así como configuraciones en ranura tipo V. Estas características permiten evaluar el comportamiento del protocolo frente a diferentes configuraciones de soldadura.

Durante la inspección, se consideraron las condiciones reales de la estructura, tales como presencia de recubrimientos, grado de exposición ambiental y estado superficial de las uniones, factores que influyen directamente en la selección y aplicación de los ensayos no destructivos.

En consecuencia, la estructura seleccionada constituye un caso de estudio adecuado para la aplicación del protocolo, permitiendo analizar su desempeño en la identificación de discontinuidades y en la evaluación de la integridad de las soldaduras en condiciones representativas de la práctica profesional.

5.2 Identificación y clasificación de soldaduras

En esta etapa se procedió a la identificación de las uniones soldadas presentes en la estructura, con el objetivo de establecer un inventario de las soldaduras a inspeccionar y definir su nivel de criticidad dentro del sistema estructural.

Para ello, se realizó un recorrido detallado de la estructura, identificando las principales conexiones soldadas en elementos como vigas, columnas, arriostres y placas base. Cada soldadura fue registrada y codificada, permitiendo su localización dentro del conjunto estructural y su posterior seguimiento durante el proceso de inspección.

Una vez identificadas, las soldaduras fueron clasificadas de acuerdo con su nivel de criticidad, siguiendo los criterios establecidos en el protocolo propuesto. Esta clasificación se fundamenta en la función estructural de la unión, su participación en la transmisión de cargas y las posibles consecuencias asociadas a la presencia de discontinuidades.

Las soldaduras se agruparon en las siguientes categorías:

- Soldaduras críticas: corresponden a aquellas uniones cuya falla podría comprometer la estabilidad global de la estructura o generar mecanismos de colapso. En este grupo se incluyen, principalmente, conexiones viga-columna y uniones en elementos de arriostramiento.
- Soldaduras secundarias: corresponden a uniones que, si bien forman parte del sistema estructural, no tienen una influencia directa en la estabilidad global, pero pueden afectar el comportamiento local de los elementos.
- Soldaduras no estructurales: incluyen aquellas uniones que no participan en la resistencia estructural principal, como elementos de soporte secundario o componentes auxiliares.

Para efectos del desarrollo del presente estudio, y con el objetivo de evaluar de manera integral la aplicación del protocolo propuesto, se seleccionó un conjunto de soldaduras clasificadas como críticas. Esta decisión responde a que, de acuerdo con el protocolo establecido, este tipo de uniones requiere la aplicación de ensayos no destructivos de mayor alcance, incluyendo la inspección mediante ultrasonido (UT), lo cual permite una evaluación más completa de la integridad de las soldaduras.

Adicionalmente, debido a limitaciones operativas asociadas a la disponibilidad de acceso a la estructura, así como a consideraciones de carácter logístico y económico, se definió una muestra de siete (7) juntas soldadas para su inspección. A estas juntas se les aplicaron los cuatro métodos de ensayo no destructivo considerados en el protocolo (VT, PT, MT y UT), con el fin de comparar su desempeño y analizar la complementariedad entre los diferentes ensayos en la detección de discontinuidades.

Esta selección permite desarrollar un análisis detallado del comportamiento del protocolo en condiciones controladas, manteniendo la representatividad del estudio y garantizando la viabilidad de su ejecución en un contexto real.

5.3 Aplicación de ensayos no destructivos

En esta etapa se procedió a la aplicación de los ensayos no destructivos sobre las juntas soldadas previamente identificadas y clasificadas, siguiendo la secuencia y criterios establecidos en el protocolo de inspección desarrollado en el Capítulo 4.

De acuerdo con lo definido en la sección anterior, se seleccionaron siete (7) juntas soldadas clasificadas como críticas, con el fin de realizar una evaluación integral mediante la aplicación de los cuatro métodos de ensayo considerados: inspección visual (VT), líquidos penetrantes (PT), partículas magnéticas (MT) y ultrasonido (UT). Esta metodología permitió analizar la complementariedad entre los diferentes ensayos y su capacidad para detectar distintos tipos de discontinuidades.

La aplicación de los ensayos se realizó de manera secuencial, iniciando con la inspección visual (VT), la cual constituye el primer nivel de evaluación y permite identificar discontinuidades superficiales evidentes, así como condiciones generales de la soldadura que puedan influir en la selección de ensayos posteriores.

Posteriormente, en aquellas juntas donde se consideró necesario profundizar en la detección de discontinuidades superficiales, se aplicaron los ensayos de líquidos penetrantes (PT) y partículas magnéticas (MT), los cuales permiten identificar defectos abiertos a la superficie o cercanos a ella, que no siempre son detectables mediante inspección visual.

Finalmente, se realizó la inspección mediante ultrasonido (UT), con el objetivo de evaluar la presencia de discontinuidades internas en las soldaduras, tales como falta de fusión, inclusiones o discontinuidades volumétricas. Este ensayo se aplicó especialmente en las juntas clasificadas como críticas, en concordancia con los criterios del protocolo.

Durante la ejecución de cada ensayo, se utilizaron los formatos de registro desarrollados en el Capítulo 4, lo que permitió documentar de manera sistemática los resultados obtenidos, incluyendo la identificación de las discontinuidades, su ubicación y características principales, así como la evaluación correspondiente en función de los criterios establecidos.

La aplicación conjunta de estos métodos permitió obtener una visión integral del estado de las soldaduras inspeccionadas, evidenciando las ventajas y limitaciones de cada técnica, así como su aporte dentro del proceso de evaluación estructural.

5.3.1 Registro de la aplicación del protocolo

Con el fin de evidenciar la aplicación del protocolo de inspección en condiciones reales de campo, en esta sección se presenta el registro detallado de los ensayos no destructivos realizados sobre las juntas soldadas seleccionadas.

Para cada una de las juntas inspeccionadas, se documentó el proceso mediante registros fotográficos y el llenado de los formatos desarrollados en el Capítulo 4, los cuales permitieron sistematizar la información correspondiente a cada ensayo, incluyendo las condiciones de inspección, los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

La información se presenta de manera individual para cada junta soldada y ensayo, incorporando una breve descripción de sus características y la evidencia correspondiente de los ensayos realizados. Esta organización permite visualizar de forma clara la aplicación del protocolo y facilita la posterior interpretación de los resultados.

5.3.1.1 Registro de Inspección visual (VT)

Se presenta la inspección realizada a Juntas del 1 al 7, que corresponden a uniones soldadas de tipo: unión de columnas, conexión viga-columna y viga-viga. Estas juntas, de acuerdo con su nivel de criticidad, se clasifican como críticas, debido a su importancia en la transmisión de cargas dentro del sistema estructural.

Durante la inspección Visual se evaluaron los criterios establecidos en la AWS D1.1 conforme al protocolo establecido.

A continuación, se presenta el formato de registro correspondiente, el cual incluye la información detallada de los ensayos realizados y los resultados obtenidos.

ID Documento:	INF-VT	INFORME DE INSPECCIÓN VISUAL (VT)		
Versión:	1.0			
Fecha revisión:	abr-26			
Datos generales del proyecto				
Proyecto: [1]	Edificio Paseo Ilalo	Cliente: [2]	Reyes & Oña	
Ubicación: [3]	Quito, El Tingo Av. Ilaló	Solicitado por: [4]	Reyes & Oña	
Informe N.º: [5]	INF-VT-001	Fecha de inspección: [6]	27-03-2026	
Parámetros de inspección				
Técnica de inspección utilizada: [7]	Directa	Instrumentos utilizados: [11]		
Condición superficial: [8]	Superficie grateada, libre de óxido y/o pintura	Galga de soldadura	INST-24	

Accesibilidad: [9]		Directa, uso de andamios		Pie de rey	INST-04
Intensidad de luz (min 1076 lux): [10]		Luxómetro	2250 lux		
Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)					
Id. junta o elemento [12]	Id. Soldador [13]	Elemento estructural [14]	Tipo de soldadura [15]	Clasificación de la soldadura [16]	Material [17]
J1	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J2	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J3	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J4	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J5	W-262	Conexión viga-viga	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J6	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J7	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50

Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s) [18]





J1



J2



J3



J4



J5



J6

						
J7						
Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [12]	Geometría del cordón [19]	Discontinuidades visibles [20]	Norma de evaluación aplicada [21]	Resultado [22]		
				Aceptado	Rechazado	Requiere otro método
J1	Cordón continuo, espesor 8 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
J2	Cordón continuo, espesor 15 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
J3	Cordón continuo, espesor 10 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
J4	Cordón continuo, espesor 15 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
J5	Cordón continuo, espesor 10 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
J6	Cordón continuo, espesor 15 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
J7	Cordón continuo, espesor 15 mm.	No se observa evidencias	AWS D1.1	x		Se aplicará PT, MT y UT
NOMENCLATURA DE DISCONTINUIDADES (AR) ACUMULACION DE DEFECTOS (LS) DEFECTO LINEAL SUPERFICIAL (LB) DEFECTO LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) DEFECTO VOLUMETRICO TRANSVERSAL (VC) DEFECTO VOLUMETRICO AGRUPADO (VI) DEFECTO VOLUMETRICO INDIVIDUAL						
Observaciones [23]						
Dado que las juntas inspeccionadas corresponden a soldaduras críticas, y conforme al flujograma del protocolo establecido, se requiere la aplicación obligatoria de ensayos superficiales y volumétricos complementarios.						

Inspector [24]		Revisión / Supervisor [25]	
Firma:		Firma:	
Nombre:	Christian Pérez	Nombre:	Reyes & Oña
C.I.:	1003710843	C.I.:	
Nivel:	SNT-TC-1A Lv. II	Nivel:	

Formato 5: Registro de inspección visual (VT) en juntas J1–J7

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2 Registro de Inspección por Tintas Penetrantes

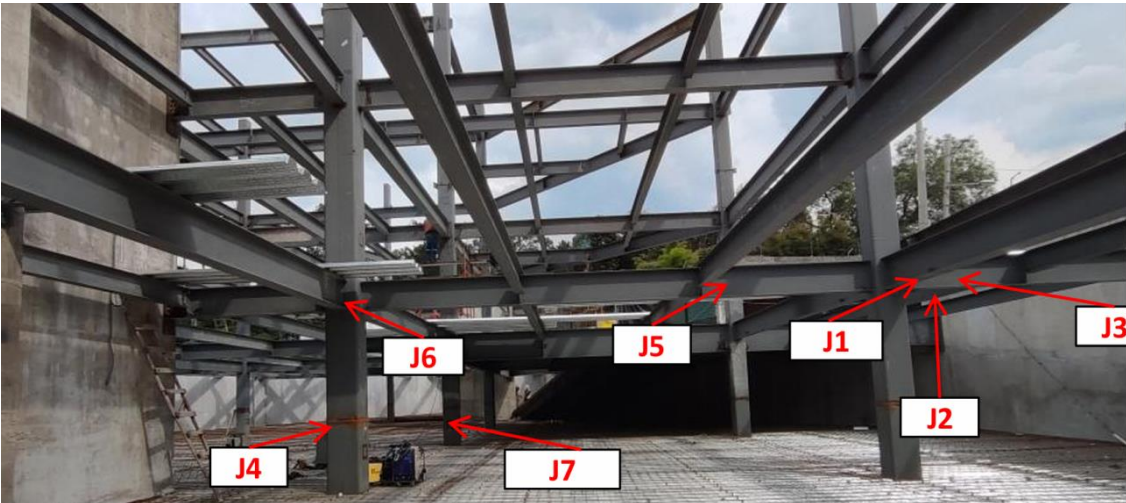
Se presenta la inspección mediante líquidos penetrantes (PT) realizada en las juntas J1 a J7, previamente evaluadas mediante inspección visual y clasificadas como soldaduras críticas dentro del sistema estructural.

La aplicación de este ensayo tuvo como objetivo la detección de discontinuidades abiertas a la superficie que no pudieron ser identificadas claramente durante la inspección visual, tales como fisuras, porosidades o discontinuidades superficiales finas.

El procedimiento se ejecutó conforme a lo establecido en el protocolo propuesto, considerando las etapas de limpieza de la superficie, aplicación del penetrante, remoción del exceso, aplicación del revelador e inspección final de las indicaciones. Durante este proceso se verificó que las condiciones superficiales de las juntas fueran adecuadas para garantizar la correcta penetración del producto y la confiabilidad de los resultados.

A continuación, se presenta el formato de registro correspondiente, el cual incluye los parámetros del ensayo, las indicaciones detectadas y la evaluación realizada para cada una de las juntas inspeccionadas.

ID Documento:	INF-PT	INFORME DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES (PT)					
Versión:	1.0						
Fecha revisión:	abr-26						
Datos generales del proyecto							
Proyecto: [1]	Edificio Paseo Ilalo	Cliente: [2]	Reyes & Oña				
Ubicación: [3]	Quito, El Tingo Av. Ilaló	Solicitado por: [4]	Reyes & Oña				
Informe N.º: [5]	INF-PT-001	Fecha de inspección: [6]	27-03-2026				
Parámetros de inspección							
Técnica de inspección utilizada: [7]	Directa	Instrumentos utilizados: [11]					
Condición superficial: [8]	Superficie grateada, libre de óxido y/o pintura	Galga de soldadura	INST-24				

Accesibilidad: [9]		Directa, uso de andamios		Pie de rey	INST-04
Intensidad de luz (min 1076 lux): [10]		Luxómetro	2250 lux	Termómetro	INST-49
Limpiador: [12]		SKC-S SPOTCHECK		Método de remoción o lavado: [13]	Aplicación de removedor
Penetrante: [14]		SKL-SP SPOTCHECK		Tiempo de penetración: [15]	10 min
Revelador: [16]		SKD-S2 SPOTCHECK		Tiempo de revelado: [17]	10 min
Id. junta o elemento [18]	Id. Soldador [19]	Elemento estructural [20]	Tipo de soldadura [21]	Clasificación de la soldadura [22]	Material [23]
J1	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J2	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J3	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J4	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J5	W-262	Conexión viga-viga	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J6	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J7	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50
Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s) [24]					
					



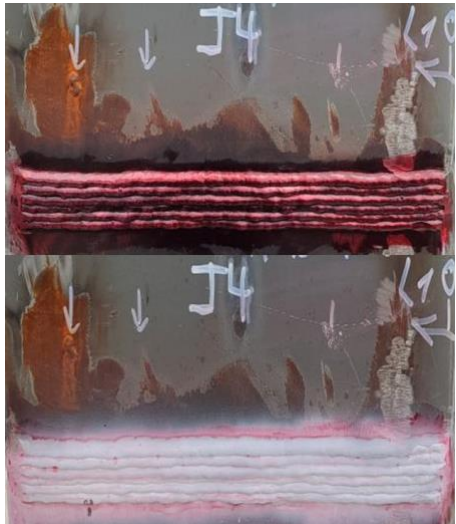
J1



J2



J3



J4



J5



J6

						
J7						
Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [18]	Geometría del cordón [25]	Localización de indicadores por PT [26]	Norma de evaluación aplicada [27]	Resultado [28]		
				Aceptado	Rechazado	Requiere otro método
J1	Cordón continuo, espesor 8 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J2	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J3	Cordón continuo, espesor 10 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J4	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J5	Cordón continuo, espesor 10 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J6	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J7	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
NOMENCLATURA DE DISCONTINUIDADES						
(AR) ACUMULACION DE DEFECTOS (LS) DEFECTO LINEAL SUPERFICIAL (LB) DEFECTO LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) DEFECTO VOLUMETRICO TRANSVERSAL (VC) DEFECTO VOLUMETRICO AGRUPADO (VI) DEFECTO VOLUMETRICO INDIVIDUAL						
Observaciones [29]						
Dado que las juntas inspeccionadas corresponden a soldaduras críticas, y conforme al flujograma del protocolo establecido, se requiere la aplicación obligatoria de ensayos superficiales y volumétricos complementarios.						
Inspector [30]			Revisión / Supervisor [31]			
Firma:			Firma:			

Nombre:	Christian Pérez	Nombre:	Reyes & Oña
C.I.:	1003710843	C.I.:	
Nivel:	SNT-TC-1A Lv. II	Nivel:	

Formato 6: Registro de inspección por líquidos penetrantes (PT) en juntas J1–J7

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.3 Registro de inspección por Partículas Magnéticas

Se presenta la inspección mediante partículas magnéticas (MT) realizada en las juntas J1 a J7, previamente evaluadas mediante inspección visual (VT) y líquidos penetrantes (PT), y clasificadas como soldaduras críticas dentro del sistema estructural.

De acuerdo con el protocolo propuesto, el ensayo de partículas magnéticas puede emplearse como un método complementario a la inspección visual, o como una alternativa al ensayo de líquidos penetrantes para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Sin embargo, para efectos del presente estudio y con fines académicos, se consideró pertinente aplicar este ensayo adicionalmente a todas las juntas seleccionadas, con el objetivo de comparar su desempeño respecto a los otros métodos superficiales y analizar la complementariedad entre las técnicas de inspección.

La aplicación del ensayo se realizó siguiendo las etapas establecidas en el protocolo, que incluyen la preparación de la superficie, la magnetización del elemento, la aplicación de partículas magnéticas y la evaluación de las indicaciones generadas. Este procedimiento permitió identificar posibles discontinuidades que no fueron detectadas en etapas previas o confirmar las observaciones realizadas mediante otros ensayos.

A continuación, se presenta el formato de registro correspondiente, el cual contiene los parámetros del ensayo, las indicaciones detectadas y la evaluación realizada para cada una de las juntas inspeccionadas.

ID Documento:	INF-MT	INFORME DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT)		
Versión:	1.0			
Fecha revisión:	abr-26			
Datos generales del proyecto				
Proyecto: [1]	Edificio Paseo Ilalo	Cliente: [2]	Reyes & Oña	
Ubicación: [3]	Quito, El Tingo Av. Ilaló	Solicitado por: [4]	Reyes & Oña	
Informe N.º: [5]	INF-MT-001	Fecha de inspección: [6]	27-03-2026	
Condiciones generales de inspección				
Luz visible (mín 1076 lux): [7]	2250	Tipo de partícula: [8]	Secas, luz visible	

Luz negra (mín 1000uW/cm2): [9]	NA	Tipo de corriente: [10]	AC
Zona oscura (máx 21,5 lux): [11]	NA	Magnetización: [12]	Continua
Conc. partículas fluores. (0,1-0,4 ml): [13]	NA	Levantamiento de yugo (10lb): [14]	Aceptable (50 a 150 mm)
Campo magnético residual (máx 3G): [15]	2G		

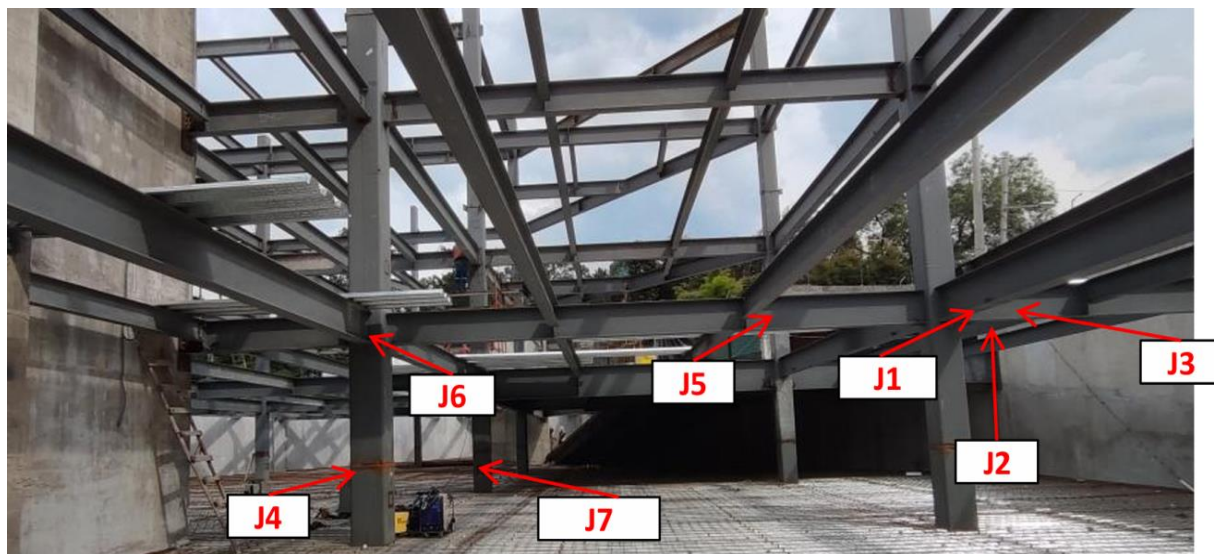
Equipos Utilizados

Control dimensional y volumétrico: [16]	Galga de soldadura	INTS-04	Intensidad de luz: [17]	Luxómetro	INTS-24
	Pie de rey	INTS-20	Campo magnético residual: [18]	Gausímetro	INTS-25
	Centrífuga tipo pera	INTS-26	Equipo de magnetización: [19]	Yugo magnético	ENS-20

Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)

Id. junta o elemento [20]	Id. Soldador [21]	Elemento estructural [22]	Tipo de soldadura [23]	Clasificación de la soldadura [24]	Material [25]
J1	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J2	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J3	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J4	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J5	W-262	Conexión viga-viga	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J6	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J7	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50

Fotografía(s) de la(s) junta(s) o elemento(s) inspeccionado(s) [26]





J1



J2



J3



J4



J5



J6

						
J7						
Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [20]	Geometría del cordón [27]	Localización de indicadores por MT [28]	Norma de evaluación aplicada [29]	Resultado [30]		
				Aceptado	Rechazado	Requiere otro método
J1	Cordón continuo, espesor 8 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J2	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J3	Cordón continuo, espesor 10 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J4	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J5	Cordón continuo, espesor 10 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J6	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
J7	Cordón continuo, espesor 15 mm.	Ausencia de indicaciones relevantes	AWS D1.1	x		Se aplicará MT y UT
NOMENCLATURA DE DISCONTINUIDADES (AR) ACUMULACION DE DEFECTOS (LS) DEFECTO LINEAL SUPERFICIAL (LB) DEFECTO LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) DEFECTO VOLUMETRICO TRANSVERSAL (VC) DEFECTO VOLUMETRICO AGRUPADO (VI) DEFECTO VOLUMETRICO INDIVIDUAL						
Observaciones [31]						
Dado que las juntas inspeccionadas corresponden a soldaduras críticas, y conforme al flujograma del protocolo establecido, se requiere la aplicación de ensayos volumétricos complementarios para la evaluación de la integridad interna.						
Inspector [32]			Revisión / Supervisor [33]			

Firma:		Firma:	
Nombre:	Christian Perez	Nombre:	Reyes & Oña
C.I.:	1003710843	C.I.:	
Nivel:	SNT-TC-1A Lv. II	Nivel:	

Formato 7: Registro de inspección por partículas magnéticas (MT) en juntas J1–J7

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.4 Registro de Inspección por Ultrasonido

Se presenta la inspección mediante ultrasonido (UT) realizada en las juntas J1 a J7, previamente evaluadas mediante ensayos no destructivos superficiales y clasificadas como soldaduras críticas dentro del sistema estructural.

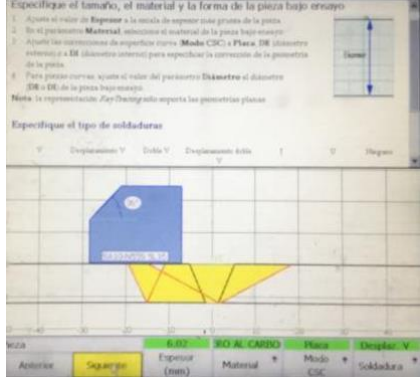
De acuerdo con el protocolo propuesto, el ensayo de ultrasonido se aplica principalmente en soldaduras críticas, debido a su capacidad para identificar discontinuidades internas que no pueden ser detectadas mediante métodos de inspección superficial. En este sentido, su aplicación resulta fundamental para evaluar la integridad volumétrica de las uniones soldadas y verificar la presencia de defectos como falta de fusión, inclusiones o discontinuidades internas.

En el presente estudio, y en concordancia con los criterios establecidos en el protocolo, el ensayo de ultrasonido fue aplicado a todas las juntas seleccionadas, considerando su nivel de criticidad y la necesidad de realizar una evaluación más completa del estado de las soldaduras. Esta aplicación permitió complementar la información obtenida mediante los ensayos previos y obtener una caracterización más integral de las uniones inspeccionadas.

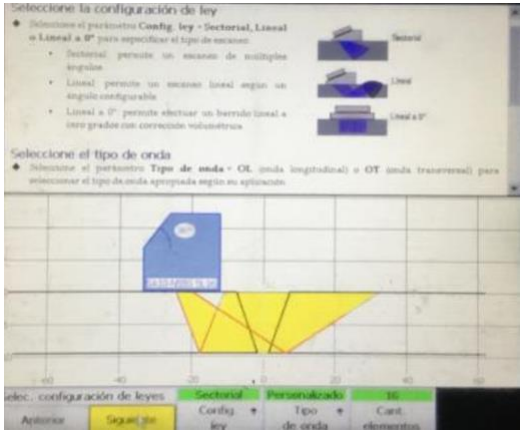
El procedimiento se ejecutó siguiendo las etapas definidas en el protocolo, que incluyen la preparación de la superficie, la calibración del equipo, la selección del transductor y la ejecución del barrido ultrasónico. Durante la inspección se registraron las indicaciones detectadas, así como su ubicación y características principales, con base en la interpretación de las señales obtenidas en el equipo.

A continuación, se presenta el formato de registro correspondiente, el cual incluye los parámetros del ensayo, el registro gráfico de las indicaciones ultrasónicas y la evaluación realizada para cada una de las juntas inspeccionadas.

ID Documento:	INF-UT	INFORME DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO (UT)		
Versión:	1.0			
Fecha revisión:	abr-26			
Datos generales del proyecto				
Proyecto: [1]	Edificio Paseo Ilalo	Cliente: [2]	Reyes & Oña	
Ubicación: [3]	Quito, El Tingo Av. Ilaló	Solicitado por: [4]	Reyes & Oña	
Informe N.º: [5]	INF-UT-001	Fecha de inspección: [6]	27-03-2026	
Equipo empleado				
Equipo: [7]	OMNISCAN SX - PA1664PR S/N QC-002664	Fecha de Calibración: [13]	24/01/2026	
Transductor: [8]	LYMPUS ARRAY 5L 16-9.6X10-A10-P-2,5-OM 5MHZ	Dimensiones: [14]	23mmx16mmx20mm	
Cables: [9]	OLYM-A32P-A4P-3M (RoHS) / long. 1.5 mts	Software: [15]	Omniscan MXU 4.3	
Zapata: [10]	SA10-N55S / ANGULO 55° / 23x23x40x14 mm, Ref. 2760 m/s	Focalización: [16]	50mm / Aprt 9.6mm	
Apertura virtual A=n*p: [11]	Número de elementos (n)=16, A=9.6mm	Modo de transmisión: [17]	Pulso - Eco	
Pitch entre elementos: [12]	Pitch (p)= 0.60mm			
Parámetros de inspección				
Tipo de inspección: [18]	Barrido continuo	Fecha estandarización: [28]	27/3/2026	
Método de inspección: [19]	PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING	Técnica: [29]	S SCAN LINEAR RASTER	
Bloque distancia amplitud: [20]	ID: BLK 25 IIW TYPE II	Calibración BLK-25: [30]	21/02/2025	
Bloque estandarización: [21]	IIW	Ajuste de sensibilidad: [31]	80% ±5% FSH	
Angulo barrido S-Scan: [22]	40°-70°	Nivel de ganancia sensibilidad dB: [32]	15.1	
Codificado / manual: [23]	Codificado	Nivel de ganancia barrido dB: [33]	15.1	
Condición superficial: [24]	Grateada	Encoder: [34]	MINI WHEEL	
Acoplante: [25]	Carboxi Metil CELULOSA / CMC	Norma aplicable: [35]	AWS D1.1.	
Intensidad de luz: [26]	Luxómetro	2250	INST-24	
Medición de temperatura: [27]	T. de la superficie [°C]	22 °C	INST-49	
	T. del patrón [°C]	24 °C		
Configuración de la junta				
<u>Datos Referenciales para la configuración de juntas</u>		[41]		
Tipo de junta: [36]	Desplazada V			
Altura talón (mm): [37]	3			

Desplazamiento talón (mm): [38]	2	
Ángulo de bisel (°): [39]	50-70°	
Espesor t material base (mm): [40]	8 / 10 / 15	

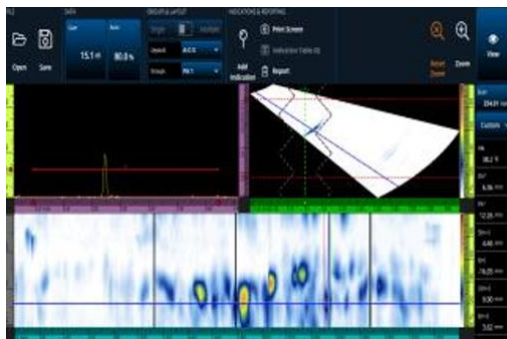
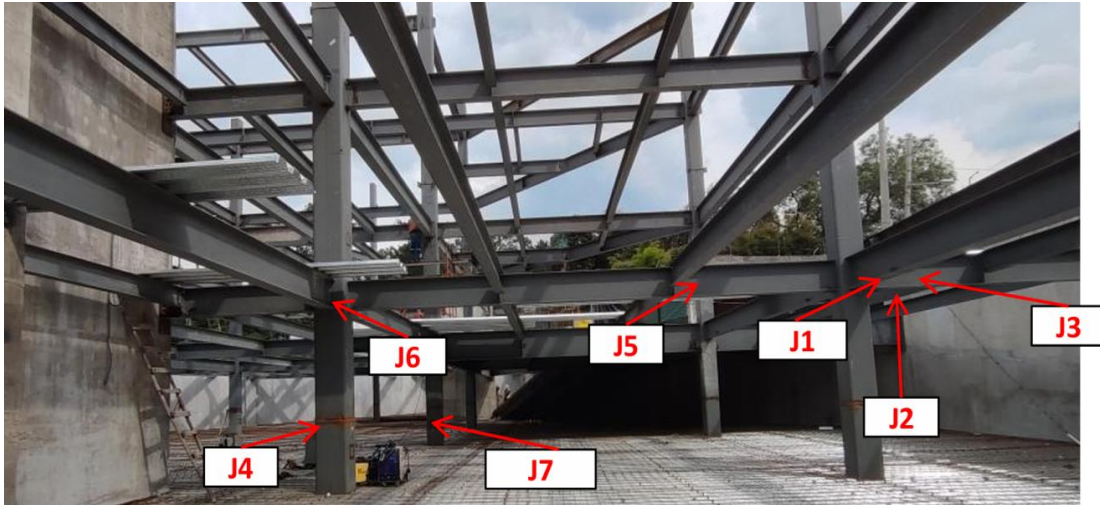
Plan de inspección

<u>Datos referenciales para plan de inspección</u>		[45]	
Configuración de ley focal: [42]	Sectorial		
Cantidad de elementos: [43]	16		
Desplazamiento índice: [44]	-12 / -15 / -28		

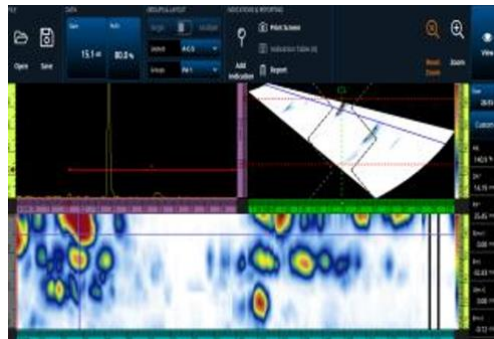
Identificación de la(s) junta(s) o elemento(s) soldado(s)

Id. junta o elemento [46]	Id. Soldador [47]	Elemento estructural [48]	Tipo de soldadura [49]	Clasificación de la soldadura [50]	Material [51]
J1	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J2	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J3	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J4	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J5	W-262	Conexión viga-viga	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J6	W-262	Conexión viga-columna	Filete	Crítica	ASTM 572 Gr 50
J7	W-262	Empalme de columna	Tope	Crítica	ASTM 572 Gr 50

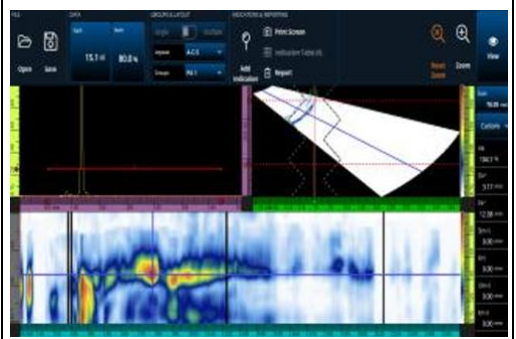
Registro gráfico de indicaciones ultrasónicas A SCAN, S SCAN, C SCAN [52]



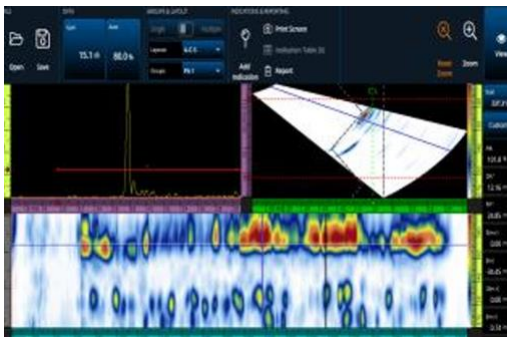
J1 A-C-S SCAN



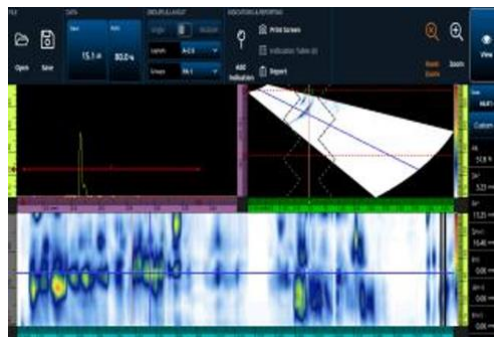
J2 A-C-S SCAN



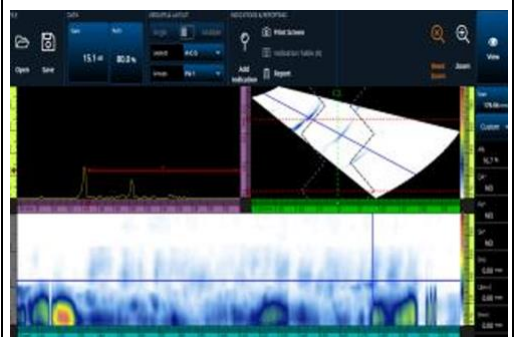
J3 A-C-S SCAN



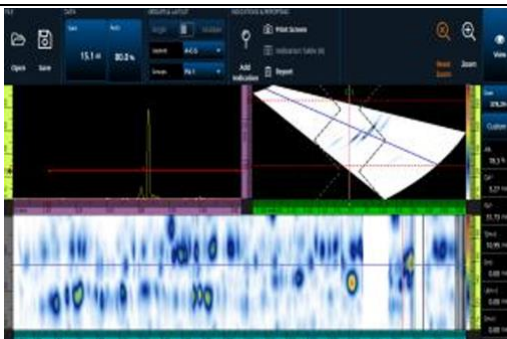
J4 A-C-S SCAN



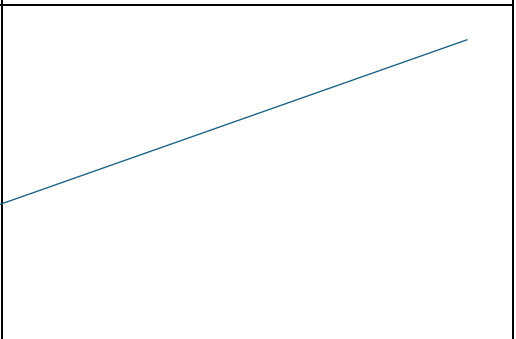
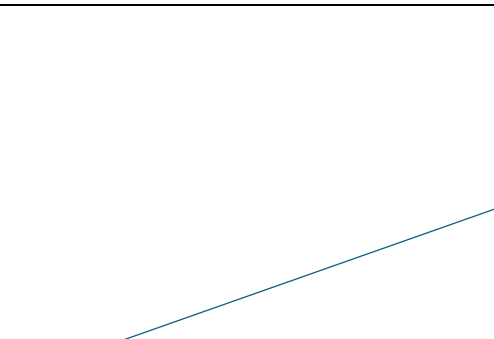
J5 A-C-S SCAN



J6 A-C-S SCAN



J7 A-C-S SCAN



Resultados de la inspección						
Id. junta o elemento [46]	Long. escaneado (mm) [53]	Lado [54]	Espesor (mm) [55]	Dimensionamiento y localización de indicadores [56]	Resultado [57]	
					Aceptado	Rechazado
J1	360	1	8	Indicación relevante dentro de tolerancia	x	
		2		Indicación relevante dentro de tolerancia		
J2	180	1	15	Indicación LB con Amplitud: 140%, Profundidad: 14,19mm		x
		2		Indicación relevante dentro de tolerancia		
J3	280	1	10	Indicación LB con Amplitud: 104,7%, Profundidad: 3,17mm		x
		2		Indicación relevante dentro de tolerancia		
J4	420	1	15	Indicación LB con Amplitud: 63,6%, Profundidad: 0,88mm, Longitud: 7,50mm dentro de tolerancia.		x
		2		Indicación LB con Amplitud: 101,8%, Profundidad: 12,16mm		
J5	220	1	10	Indicación LB con Amplitud: 57,8%, Profundidad: 3,23mm, Longitud: 16,40mm dentro de tolerancia.	x	
		2		Indicaciones relevantes dentro de tolerancia		
J6	260	1	15	Indicaciones relevantes dentro de tolerancia	x	
		2		Indicación LB con Amplitud: 43,0%, Profundidad: 5,84mm, Longitud: 4,16mm dentro de tolerancia.		
J7	420	1	15	Indicaciones relevantes dentro de tolerancia	x	
		2		Indicación LB con Amplitud: 78,3%, Profundidad: 3,27mm, Longitud: 10,99mm dentro de tolerancia.		
NOMENCLATURA DE INDICACIONES (AR) ACUMULACION DE INDICACIONES (LS) INDICACIÓN LINEAL SUPERFICIAL (LB) INDICACIÓN LINEAL SUBSUPERFICIAL (T) INDICACIÓN VOLUMETRICA TRANSVERSAL (VC) INDICACIÓN VOLUMETRICA AGRUPADA (VI) INDICACIÓN VOLUMETRICA INDIVIDUAL						
Observaciones [58]						
Luego de la aplicación del protocolo de inspección, y pese a que mediante los ensayos previos (VT, PT y MT) no se identificaron discontinuidades relevantes, el ensayo por ultrasonido (UT) permitió detectar indicaciones internas en determinadas juntas, evidenciando la presencia de discontinuidades no identificables mediante métodos superficiales.						
Inspector [59]				Revisión / Supervisor [60]		
Firma:				Firma:		
Nombre:	Christian Pérez			Nombre:	Reyes & Oña	
C.I.:	1003710843			C.I.:		
Nivel:	SNT-TC-1A Lv. II			Nivel:		

Formato 8: Registro de inspección por ultrasonido (UT) en juntas J1–J7
Fuente: Elaboración propia

5.4 Resultados obtenidos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los ensayos no destructivos en las siete (7) juntas soldadas seleccionadas. La información se organiza de manera sintética con el propósito de identificar las discontinuidades detectadas, los métodos mediante los cuales fueron evidenciadas y la evaluación final de cada junta, conforme a los criterios establecidos en el protocolo.

A partir del análisis de los registros presentados en la sección anterior, se observa que, mediante los ensayos superficiales (inspección visual, líquidos penetrantes y partículas magnéticas), no se evidenciaron discontinuidades relevantes en las juntas inspeccionadas, lo que indica condiciones superficiales aceptables de los cordones de soldadura. Sin embargo, al aplicar el ensayo volumétrico por ultrasonido (UT), se identificaron indicaciones internas en ciertas juntas, asociadas principalmente a discontinuidades subsuperficiales, algunas de las cuales superan los criterios de aceptación establecidos.

Con el fin de resumir los resultados obtenidos, se presenta la Tabla 3, en la cual se consolidan las principales observaciones realizadas para cada junta inspeccionada, considerando los métodos aplicados y la evaluación final correspondiente.

Tabla 3: Resumen de resultados de inspección por junta

Junta	VT	PT	MT	UT	Tipo de indicación UT	Resultado final
J1	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios relevantes	—	Aceptada
J2	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Indicación LB (14.19 mm)	Lineal subsuperficial	Rechazada
J3	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Indicación LB (3.17 mm)	Lineal subsuperficial	Rechazada
J4	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Indicación LB leve (dentro tolerancia)	Lineal subsuperficial	Aceptada
J5	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Indicación leve (dentro tolerancia)	—	Aceptada
J6	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Indicación LB leve (dentro tolerancia)	Lineal subsuperficial	Aceptada
J7	Sin indicios	Sin indicios	Sin indicios	Indicación LB leve (dentro tolerancia)	Lineal subsuperficial	Aceptada

Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis conjunto de los resultados, se observa que los ensayos superficiales aplicados (VT, PT y MT) presentaron concordancia al no evidenciar indicaciones relevantes en las juntas inspeccionadas, lo que confirma que las discontinuidades, de existir, no se encontraban abiertas a la superficie ni en condiciones detectables por estos métodos.

Sin embargo, la aplicación del ensayo por ultrasonido (UT) permitió identificar indicaciones internas en ciertas juntas, principalmente asociadas a discontinuidades de tipo lineal subsuperficial, algunas de las cuales superan los criterios de aceptación establecidos. Este comportamiento pone en evidencia la limitación de los ensayos superficiales frente a defectos internos y resalta la necesidad de incorporar métodos volumétricos en la evaluación de soldaduras críticas.

En conjunto, los resultados obtenidos reflejan que la secuencia de inspección definida en el protocolo permite una evaluación progresiva y complementaria de las uniones soldadas, donde cada método aporta información específica que contribuye a una caracterización más completa del estado de las juntas.

5.4.1 Interpretación del comportamiento del protocolo

A partir de los resultados obtenidos, es posible analizar el comportamiento del protocolo de inspección en condiciones reales de aplicación, considerando la secuencia de evaluación y la interacción entre los diferentes métodos de ensayo no destructivo.

En primer lugar, se observa que la estructura del protocolo, basada en la aplicación progresiva de ensayos superficiales y volumétricos en función de la criticidad de las juntas, permitió organizar el proceso de inspección de manera lógica y sistemática. La inspección visual (VT) actuó como una etapa inicial de verificación general, mientras que los ensayos de líquidos penetrantes (PT) y partículas magnéticas (MT) confirmaron la ausencia de discontinuidades superficiales relevantes en las juntas evaluadas.

Sin embargo, el comportamiento más representativo del protocolo se evidenció en la etapa de inspección por ultrasonido (UT), donde se detectaron indicaciones internas en determinadas juntas que no habían sido identificadas mediante los ensayos previos. Esto demuestra que la secuencia planteada en el protocolo no solo es coherente desde el punto de

vista metodológico, sino que también resulta efectiva para identificar discontinuidades en función de su naturaleza y localización.

Asimismo, se evidencia que la clasificación de las soldaduras como críticas desempeñó un papel fundamental en la selección de los métodos de inspección, ya que permitió justificar la aplicación de ensayos volumétricos, los cuales resultaron determinantes para la evaluación de la integridad interna de las uniones.

Desde un enfoque práctico, el protocolo facilitó la toma de decisiones durante la inspección, al establecer criterios claros para la aplicación de ensayos complementarios, evitando la dependencia exclusiva de un solo método. En este sentido, se confirma que la combinación de técnicas de inspección permite superar las limitaciones individuales de cada ensayo.

En general, el comportamiento del protocolo evidencia que su aplicación permite estructurar el proceso de inspección de manera ordenada y coherente con las condiciones reales de campo, proporcionando una guía clara para la evaluación de soldaduras sin reemplazar el criterio técnico del inspector, el cual continúa siendo un elemento clave en la interpretación de los resultados.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A partir del desarrollo de la presente investigación, orientada a la propuesta de un protocolo de inspección de estructuras de acero mediante ensayos no destructivos, y de su aplicación en una edificación de estructura metálica, se establecen las siguientes conclusiones:

1. En base a la investigación realizada se pudo desarrollar un protocolo de inspección estructurado que integra de manera coherente la selección, ejecución y evaluación de ensayos no destructivos aplicados a soldaduras en estructuras metálicas, considerando el nivel de criticidad de las uniones como criterio principal.
2. Se comprobó que la clasificación de las soldaduras en función de su criticidad constituye un criterio clave para la toma de decisiones, ya que permite priorizar el uso de ensayos de mayor alcance en aquellas uniones cuya falla tendría mayores implicaciones estructurales.
3. Durante la inspección, se observó que la inspección visual, si bien es indispensable como primera etapa, resulta insuficiente para identificar todas las discontinuidades presentes, lo que evidencia la necesidad de complementar su aplicación con otros métodos de ensayo no destructivo.
4. Los ensayos de líquidos penetrantes (PT) y partículas magnéticas (MT) no evidenciaron discontinuidades en las juntas inspeccionadas, lo que indica la ausencia de defectos abiertos a la superficie; sin embargo, esto también pone en evidencia la limitación de estos métodos frente a discontinuidades internas.
5. El ensayo de ultrasonido permitió identificar indicaciones internas en ciertas juntas, las cuales no fueron detectadas mediante los ensayos superficiales, confirmando su relevancia en la evaluación de soldaduras críticas.
6. Se evidenció que ningún método de ensayo no destructivo, aplicado de manera aislada, permite caracterizar completamente el estado de una soldadura, por lo que la combinación de técnicas resulta fundamental para obtener una evaluación integral.
7. El uso de formatos estandarizados facilitó el registro de la información durante la inspección, mejorando la trazabilidad de los resultados y permitiendo un seguimiento claro de las juntas evaluadas.

8. La aplicación del protocolo en condiciones reales puso en evidencia ciertas limitaciones prácticas observadas durante la aplicación en campo, como accesibilidad restringida, condiciones superficiales variables y restricciones operativas, factores que influyen directamente en la selección y ejecución de los ensayos.
9. Finalmente, el protocolo propuesto constituye una herramienta técnica aplicable en la práctica profesional, que contribuye a mejorar la organización del proceso de inspección, la trazabilidad de la información y la confiabilidad en la evaluación de la integridad estructural, sin sustituir el criterio técnico del inspector.

6.2 Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos y al desarrollo del presente estudio, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda aplicar el protocolo de inspección propuesto en un mayor número de estructuras y con una mayor cantidad de juntas soldadas, con el fin de validar su desempeño en diferentes condiciones y tipologías estructurales.
2. Es recomendable complementar la aplicación del protocolo con otros métodos de ensayo no destructivo, como la radiografía industrial o la emisión acústica, especialmente en casos donde se requiera una evaluación más detallada de discontinuidades internas.
3. Se sugiere adaptar los formatos de registro desarrollados a herramientas digitales, lo que permitiría mejorar la eficiencia en la recopilación de datos, el almacenamiento de la información y el análisis posterior de los resultados.
4. Se recomienda capacitar al personal encargado de la inspección en la correcta aplicación de los ensayos no destructivos y en el uso del protocolo, con el fin de garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.
5. Es importante considerar las condiciones reales de la estructura, como accesibilidad, estado superficial y presencia de recubrimientos, al momento de aplicar los ensayos, ya que estos factores pueden influir significativamente en los resultados de la inspección.
6. Se recomienda priorizar la aplicación de ensayos volumétricos, como ultrasonido (UT), en soldaduras clasificadas como críticas, incluso cuando los ensayos superficiales no evidencien discontinuidades, debido a la posibilidad de existencia de defectos internos no detectables mediante otros métodos.

7. Finalmente, se sugiere utilizar el protocolo como una herramienta de apoyo en procesos de mantenimiento y evaluación periódica de estructuras metálicas, contribuyendo a la detección temprana de discontinuidades y a la toma de decisiones oportunas.

BIBLIOGRAFÍA

- AISC, A. I. (2022). *Steel construction manual*. Chicago.
- ASME, A. S. (2019). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive Examination*. Nw York: ASME.
- ASNT, A. S. (2002). *Nondestructive Testing Handbook :Volume 4, Radiographic Testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- ASNT, A. S. (2018). *Manual de Ensayos No Destructivos*.
- ASTM Internacional. (2021b). *Standard Guide for Magnetic Particulate Testing*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- ASTM Internacional. (2023a). *Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- ASTM International. (2020). *Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM International. (2021a). *Standard Guide for Primary Calibration of Acoustuc Emission Sensors*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM International. (2023). *Stand Practice for Design, Manufacture and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology*. West Conshohoken: ASTM International.
- ASTM International. (2024). *Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Weldments*. West Conshohocken: ASTM iNTERNACIONAL.
- AWS, A. (2016b). *Specification for AWS Certification of Welding Inspectors*. Miami: American Welding Society.
- AWS, A. W. (2025a). *AWS Structural Welding Code – Steel (AWS D1.1/D1.1M-2025)*. Miami: AWS.
- Castillo, E. R. (2022). *Investigación de las causas de fallas y daños en estructuras metálicas mediante la aplicación de ensayos no destructivos*. Guayaquil: Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

- Castro Merino, E. P., Cely Vélez, B. M., Sotomayor, V., & Monar, W. (2018). *Identificación de defectos en soldaduras de acero estructural ASTM A36 mediante ensayos no destructivos según AWS D1.1*. Quito: Revista Técnica de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Cueva, D., & Paredes, L. (2018). *Evaluación de discontinuidades en estructuras metálicas mediante END en Latinoamérica*.
- Cueva, L. A., & Paredes, J. F. (2018). *Aplicación de ensayos no destructivos en soldaduras de estructuras metálicas para proyectos industriales en Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Dunegan, H. L. (2015). *Introduction to Acoustic Emission. Acoustic Emission Working Group*.
- FEMA. (2000). *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. Washington, D.C.
- Flores, J. (2015). *Elaboración de una guía de inspección de soldadura y calificación de soldadores aplicado a las normas ASME BPVC y API 1104*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- García, J., & Caballero, M. (2016). *Ensayos no destructivos aplicados a soldaduras*. Editorial Técnica.
- Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (2018). *Acoustic Emission Testing*. Springer.
- Grosse, C. U., Ohtsu, M., Aggelis, D. G., & Shiotani, T. (2022). *Acoustic Emission Testing*. Berlin: Springer.
- Hellier, C. J. (2020). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. New York: McGraw-Hill.
- Howell, P. A. (2020). *Nondestructive Evaluation(NDE)*. Virginia: Langley Research Center.
- IG-EPN, I. G. (2019). *Informe de amenaza sísmica en el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: IG-EPN.
- Internacional, A. (2020). *Standard Practice for UltrasonicPulse-Echo Straight-Beam Examination by the Contact Method*. West Conshohocken: ASTM Internacional.

- International, A. (2021b). *Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors*. West Conshohocken: ASTM International.
- Ji, Z., Xu, D., Wang, H., Chen, J., & Fu, Y. (2025). Recent advances in non-destructive testing technology for coated steel structure welds.
- Krautkrämer, j. (2013). *Ultrasonic Testing of Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- MIDUVI-CAMICON. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción 15 (NEC-SE-AC)*. Quito: MIDUVI.
- Miño Vaca, B. A. (2018). *Determinación, interpretación y evaluación de discontinuidades en juntas soldadas de estructuras metálicas mediante ensayos no destructivos basados en AWS D1.1*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Ranjan, R. &. (2018). *Non-Destructive Testing of Welds*. Singapur: Springer.
- Silva, J., & Valenzuela, W. (2019). Evaluación de discontinuidades en soldaduras mediante ensayos no destructivos aplicados a estructuras metálicas. *Revista Ingeniería Civil* 23 (2), 45–59.
- Tracy, N., & Moore, P. O. (1999). *Nondestructive Testing Handbook*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- Uzun, H., & Gustiani, D. (2024). Review of phased array ultrasonic testing of weld joints. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 77–92.
- Vasco, P. (2021). *Tesis de grado sobre inspección y control de calidad de soldaduras en proyectos de acero en Quito*.
- Whittington, K. (2023). Advances in non-destructive testing for steel fatigue analysis. *Journal of Steel Structures and Constructions*, 205.
- Zambrano, R., & Villacís, M. (2018). Evaluación de la seguridad estructural en edificaciones metálicas en Quito mediante inspección visual y ensayos no destructivos. *Revista de Ingeniería y Construcción* 35(2), 77-89.

ANEXOS

Los anexos presentados a continuación contienen documentación complementaria que respalda el desarrollo del presente trabajo de investigación. En esta sección se incluyen registros técnicos y documentos utilizados durante la ejecución de los ensayos no destructivos, los cuales permiten evidenciar la trazabilidad, confiabilidad y cumplimiento de los procedimientos aplicados.

En particular, se incorporan los certificados de calibración de los equipos utilizados en los ensayos, así como la documentación relacionada con el procedimiento de soldadura y la calificación del personal ejecutor. Estos documentos constituyen un soporte técnico fundamental para validar la correcta aplicación del protocolo de inspección desarrollado en esta investigación.

Anexo A. Certificación del personal de ensayos no destructivos

El presente anexo contiene la documentación correspondiente a la certificación del personal encargado de la ejecución de los ensayos no destructivos, la cual acredita su competencia técnica de acuerdo con los requisitos establecidos en normas aplicables.

La inclusión de esta documentación permite validar que los ensayos realizados en el marco de esta investigación fueron ejecutados por personal calificado, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos y el cumplimiento de las buenas prácticas de inspección.

CERTIFICACIÓN DE PERSONAL DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS										
	Certificación N°:	ILPM-CR-2024-PAUT-1			Nro. Hoja:	1 de 1	ID Documento: ILPM-RT-51 Rev.03 06/05/2024			
	Empleador:	ILPM Engineering Cía. Ltda.								
NOMBRE:		CHRISTIAN RODRIGO PÉREZ PAREDES		# CEDULA:	1003710843	Fecha Contrato:	1/8/2023			
ESTADO ACTUAL	ENTRENAMIENTO	☐	NIVEL I	☐	NIVEL II	☒	NIVEL III	☐		
CERTIFICACIÓN INICIAL	MÉTODO/ TÉCNICA	Inspección por Ultrasonido (UT) / Inspección por Ultrasonido Arreglo de Fases (PAUT)								
	FECHA DE CERTIFICACIÓN:	8/8/2024		FECHA DE VENCIMIENTO DE CERTIFICACIÓN:	8/8/2029					
DATOS GENERALES										
ANTECEDENTES EDUCATIVOS	COLEGIO	☐	UNIVERSIDAD	☒	TÉCNICO	☐	PROFESIONAL	☐	INGENIERÍA	☒
ENTRENAMIENTO END	TÍTULO CURSO	FECHA	Duración (Horas)	INSTRUCTOR	LOCACIÓN	EMITIDO POR	HUBO EXAMEN (SI/NO)			
	Arreglo de fases nivel II	19/7/2024	80	Andrés Tamayo	Quito	INTEG	SI			
	Ultrasonido Nivel I	12/11/2020	40	Edison Aillón	Quito	ICCAEND	SI			
	Ultrasonido Nivel II	12/11/2020	40	Edison Aillón	Quito	ICCAEND	SI			
	Tintas Penetrantes Nv.II	15/11/2020	16	Oscar Cevallos Montalvo	Quito	NTD Smart	SI			
EXPERIENCIA END	MÉTODO/TÉCNICA	FECHA DESDE	FECHA HASTA	#HORAS MÉTODO	#HORAS TOTALES END					
	Inspección por ultrasonido arreglo de fases (Nv. II) [PAUT]	1/10/2021	19/7/2024	938						
	Inspección por Ultrasonido (Nv.I + Nv. II) [UT]	1/10/2021	19/7/2024	2236						
	Inspección por líquidos penetrantes (Nv.I + Nv. II) [PT]	1/10/2021	19/7/2024	836						
	Inspección Visual (Nv.I + Nv. II) [VT]	1/8/2023	19/7/2024	280						
					4290					
RESULTADO DE EXÁMENES										
GENERAL ESPECÍFICO PRÁCTICO	PUNTAJE	FECHA	PUNTAJE PROMEDIO							
	90,0 /100	22/7/2024	85,0 /100							
	85,0 /100	22/7/2024								
		80,0 /100	22/7/2024							
Administrado por: Ing. Andrés Tamayo										
EXAMEN VISUAL	AGUDEZA VISUAL CERCANA (Anual)		☒	Lectura Tabla estándar Jaeger tamaño I		☐	Usa Lentes			
	FECHA: Examen	26/1/2024	FECHA: Expiración	26/1/2025	Administrado Por: Dra. María Pazos					
	DIFERENCIACIÓN/CONTRASTE DE COLORES (5 AÑOS)		☒	Laminas Ishihara		Placas Seudoisocromáticas				
	FECHA: Examen	26/1/2024	FECHA: Expiración	26/1/2029	Administrado Por: Dra. María Pazos					
APROBACIÓN										
El candidato ha reunido los requisitos de escolaridad, capacitación y experiencia práctica, así como el haber aprobado los exámenes: General, específico, práctico bajo la supervisión de personal calificado, además de satisfacer los requisitos para la calificación y certificación del personal para el método de Inspección por ultrasonido UT Nivel II en la técnica de Ultrasonido Arreglo de Fases PAUT, cumpliendo con lo establecido en la práctica recomendada SNT-TC-1A (Edición 2020) de la ASNT "American Society for Nondestructive Testing" y la práctica escrita ILPM-PT-17 "Capacitación, Calificación y Certificación en END" de ILPM. Por lo tanto el candidato se encuentra certificado en la técnica de inspección por Ultrasonido Arreglo de Fases PAUT.										
CALIFICADO POR:		CERTIFICADO POR:		ACEPTADO POR:						
Nombre:	Ing. Andrés Tamayo	Nombre:	Ing. Iván Estupiñán	Nombre:	Ing. Christian Pérez					
Nivel:	ASNT Nv. III Reg. 304371	Nivel:	Director técnico OI	Nivel:	SNT-TC-1A Nv. II: VT+ PT+UT					
Fecha:	8/8/2024	Fecha:	8/8/2024	Fecha:	8/8/2024					
Firma:		Firma:		Firma:						

Figura 10: Certificación de persona END

Anexo B. Certificados de calibración de equipos

El presente anexo contiene los certificados de calibración de los equipos utilizados durante la ejecución de los ensayos no destructivos, los cuales garantizan la confiabilidad de las mediciones y el cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos por la normativa aplicable.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
Certificado N°	ILP-LAB-PR-243-24	
Juan Domingo N65 - 85 y Dr. Manuel Guizado, Cotacollao Quito - Ecuador Tlf: 02 - 600 7779		

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	
Cliente:	ILPM ENGINEERING CIA. LTDA.
Dirección:	Av. Emilio Estrada N54-139 y Oruña
Persona de contacto:	Ing. Danny Parco
Fecha de calibración:	2024-11-08
Fecha de emisión:	2024-11-08
Próxima calibración:	No definido

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO		MÉTODO UTILIZADO
Instrumento:	Pie de rey	Procedimiento de Calibración de Pies de Rey TM-CP-01
Código:	INST-20	
Tipo:	Analógico con Nonio	LUGAR DE CALIBRACIÓN Laboratorio de Dimensional - Área de Micrometría - TEGMETRO S.A.
Marca:	Mitutoyo	
Modelo:	530-114BR	
Serie:	12862533	
Unidad de medida:	mm	
Rango:	(0 a 200) mm	
División de escala:	0,05 mm	

La calibración fue realizada bajo un sistema de gestión de calidad conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017.

Los resultados de la calibración y su Incertidumbre se exponen en las páginas siguientes y son parte de este documento y se refieren al momento y condiciones en que se realizó la calibración.

TEGMETRO S.A. no se responsabiliza por los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del instrumento y/o equipo calibrado.

No es recomendable la reproducción parcial de este certificado ya que puede dar lugar a Interpretaciones equivocadas de sus resultados.

TEGMETRO S.A. mantiene trazabilidad al SI a través de patrones primarios nacionales o internacionales, los certificados de calibración se encuentran en los archivos de TEGMETRO S.A. y pueden ser revisados por cualquier persona que así lo solicite.

Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento y/o equipo. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del instrumento y/o equipo calibrado como de las prácticas para su uso y manejo.

 Calibrado por: Técnico Tec. Santiago Arzaga	 Autorizado por: Gerente Técnico (E) Ing. Jhonny Barbero
--	--

Figura 11: Certificado de calibración Pie de rey

	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
	Certificado N°	ILP-LAB-FLE-149-24	
	Juan Domingo N65 – 85 y Dr. Manuel Guizado, Cotacollao Quito-Ecuador Tlf: 02-6007779		

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ILPM ENGINEERING Cia. Ltda.
Dirección: Av. Emilio Estrada N54-139 y Oruña
Persona de contacto: Ing. Danny Parco
Fecha de calibración: 2024-10-31
Fecha de emisión: 2024-10-31
Próxima calibración: No definido

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO

Instrumento: Flexómetro
Código: INST-15
Material: Acero
Marca: Stanley
Modelo: 30-615
Serie: "-----"
Unidad de medida: m
Rango: (0 a 5) m
División de escala: 1 mm

MÉTODO UTILIZADO

Procedimiento de calibración de Flexómetros TM-CF-01

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Laboratorio de Dimensional – Área de Longitud - TEGMETRO S.A.

La calibración fue realizada bajo un sistema de gestión de calidad conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017.

Los resultados de la calibración y su Incertidumbre se exponen en las páginas siguientes, son parte de este documento, se refieren al momento, condiciones en que se realizó la calibración y se relacionan solamente con el o/los ítems sometidos a calibración.

TEGMETRO S.A. no se responsabiliza por los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del Instrumento y/o equipo calibrado.

No es recomendable la reproducción parcial de este certificado ya que puede dar lugar a Interpretaciones equivocadas de sus resultados.

TEGMETRO S.A. mantiene trazabilidad al SI a través de patrones primarios nacionales o internacionales, los certificados de calibración se encuentran en los archivos de TEGMETRO S.A. y pueden ser revisados por cualquier persona que así lo solicite.

Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del Instrumento y/o equipo. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del Instrumento y/o equipo calibrado como de las prácticas para su uso y manejo.



Firmado electrónicamente por:
 SANTIAGO DAVID
 ARIZAGA MORA

Calibrado por:
 Técnico
 Tec. Santiago Arizaga



Firmado electrónicamente por:
 JHONNY ISRAEL
 BARBERO PALACIOS

Autorizado por:
 Gerente Técnico (E)
 Ing. Jhonny Barbero

Figura 12: Certificado de calibración flexómetro

	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
	Certificado No.	ILP-LAB-GA-187-24	
	Juan Domingo N65 - 85 y Dr. Manuel Guizado, Cotacollao Quito - Ecuador Tlf: 02 600 7779		

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ILPM ENGINEERING CIA. LTDA.
Dirección: Av. Emilio Estrada N54-139 y Oruña
Persona de contacto: Ing. Danny Parco
Fecha de calibración: 2024-07-18
Fecha de emisión: 2024-07-18
Próxima calibración: No definido

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO		MÉTODO UTILIZADO
Instrumento:	Galga de inspección de soldadura	Procedimiento para Calibración de Galgas de Inspección de Soldadura TM-CG-01
Código:	INST-04	
Tipo:	Metálico	LUGAR DE CALIBRACIÓN Laboratorio de Dimensional - Área de Micrometría - TEGMETRO S.A.
Marca:	G.A.L gage co	
Modelo:	Bridge cam gage	
Serie:	N.D.	
Número de funciones:	5	

La calibración fue realizada bajo un sistema de gestión de calidad conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017.

Los resultados de la calibración y su incertidumbre se exponen en las páginas siguientes y son parte de este documento, se refieren al momento, condiciones en que se realizó la calibración y se relacionan solamente con el o los ítems sometidos a calibración.

TEGMETRO S.A. no se responsabiliza por los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del instrumento y/o equipo calibrado.

No es recomendable la reproducción parcial de este certificado ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados.

TEGMETRO S.A. mantiene trazabilidad al SI a través de patrones primarios nacionales o internacionales, los certificados de calibración se encuentran en los archivos de TEGMETRO S.A. y pueden ser revisados por cualquier persona que así lo solicite.

Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento y/o equipo. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del instrumento y/o equipo calibrado como de las prácticas para su uso y manejo.



firmado digitalmente por:
SANTIAGO DAVID
ARIZAGA MONGE

Calibrado por:
 Técnico
 Tec. Santiago Arizaga



firmado digitalmente por:
JHONNY ISMAEL
BARBERO PALACIOS

Autorizado por:
 Gerente Técnico (E)
 Ing. Jhonny Barbero

Figura 13: Certificado de calibración galga de soldadura



ILPM ENGINEERING CÍA. LTDA.
INGENIERÍA LÍDER EN PROYECTOS Y MATERIALES

CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN ASTM E709

Número de certificado: ILPM-CV-2024-02

Fecha de calibración: 15/1/2024

Instrumentos Verificados: YUGO MAGNÉTICO MT-MAGNAFLUX, Luxómetro (Luz visible, Luz negra), Luxómetro de referencia (Luz visible)

Marca: ENS-21 (MAGNAFLUX), INST-24 (LABINO), INST-45 (SMART SENSOR)

Identificación: ENS-21, INST-24, INST-45

Serie: ENS-21 (1543), INST-24 (0353), INST-45 (X0037ZMY4L)

Modelo o tipo: ENS-21 (Y-7 AC/DC), INST-24 (Labino Apollo 1.0), INST-45 (AS803)

Propietario: ILPM ENGINEERING CÍA. LTDA.

Dirección: Emilio Estrada N54-139 y Oruña, Distrito Metropolitano de Quito

Observaciones: El equipo arriba descrito ha sido verificado en base a los requerimientos establecidos en la norma ASTM E709 "Standard Guide for Magnetic Particle Testing"

PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS: Procedimiento técnico ILPM-PT-15 (Rev 03) "Examen con partículas magnetizables"

CONDICIONES AMBIENTALES	
Temperatura:	25,5 °C
Humedad:	48%

PATRONES UTILIZADOS		
Equipo	INST-45 Luxómetro referencia	BLK-28 Pesa 10 lb
Marca	SMART SENSOR	PARKER RESEARCH CORP.
Certificado	ILP-LAB-LX-003-24_Rev1	ILP-LAB-PE-050-22
Fecha calibración	23/1/2024	18/4/2022

VERIFICACIONES E INSPECCIONES	
VERIFICACIÓN DE EQUIPO Y ACCESORIOS	ESTADO
1.- Intensidad de luz visible	Aceptable
2.- Intensidad de luz UV-A	Aceptable
3.- Estado de baterías de lámpara UV-A	Aceptable
4.- Funcionamiento de lámpara UV-A	Aceptable
5.- Concentración de partículas húmedas	Cumple
6.- Levantamiento de peso muerto	Cumple
7.- Estado de circuitos y conexiones	Aceptable

OBSERVACIONES	
VERIFICACIÓN DE CLAMPS	ESTADO
Condición de clamps	Aceptable
LEVANTAMIENTO DE PESO MUERTO	ESTADO
Levantamiento de 10 lb en corriente alterna (AC) y distancia entre clamps de 2 a 4".	Cumple

VERIFICACIÓN DE LUZ VISIBLE (INST-24)									
INST-45 [lx]				INST-24 [lx]					
Valor Medido Patron	Factor de Corrección	Valor Patron Corregido	Valor Medido	Factor de Corrección	Valor Medido Corregido	Error	U Mayor en el rango de medición	ABS(E)+U	EMP Sensor de luz blanca: +/- 5%. Ver ILPM-PC-20
177	0,992	175,584	174	1	174	-1,584	5,4	6,984	8,7
CUMPLE									

ILPM Cía. Ltda. realizó la verificación de los equipos e instrumentos arriba descritos, utilizando patrones trazables al Sistema Internacional de Unidades, SI.

Realizado por:

ILPM CÍA. LTDA.
FIRMA AUTORIZADA

Ing. Iván Estupiñán SNT Nivel II
Técnico de Calibraciones Internas

Aprobado por:

ILPM CÍA. LTDA.
FIRMA AUTORIZADA

Ing. Luis Somoza SNT Nivel II
Director de Calibraciones Internas

Todos Los derechos reservados. Este certificado o parte del mismo no pueden ser reproducidos o transmitidos por ninguna forma o método, incluyendo fotocopiado, escaneado, grabaciones, sin el previo consentimiento de ILPM Cía. Ltda.

Emilio Estrada (María Martínez) N54-139 y Oruña Sector la Kennedy Quito-Ecuador Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: <http://www.ilpm-ec.com>

Página 1 de 1

Figura 14: Certificado de verificación yugo magnético

	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
	Certificado N°	ILP-LAB-UTF-002-26	
	Juan Domingo N65 - 85 y Manuel Guizado, Cotacollao Quito-Ecuador Tlf: 02-253-5947		

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ILPM ENGINEERING Cia. Ltda.
Dirección: Av. Emilio Estrada N54-139 y Oruña
Persona de contacto: Ing. Danny Parco
E-mail: ingenieria3@ilpm-ec.com / calidad@ilpm-ec.com
Fecha de calibración: 2026-01-24
Fecha de emisión: 2026-01-24
Próxima calibración: No definido

IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO

Instrumento: Detector de fallas
Código: ENS-13
Tipo: Ultrasonido arreglo de fases
Marca: Olympus
Modelo: OmniScan SX
Serie: QC-002664
Unidad medida: mm
Rango: (0 a 250) mm
Resolución: 0,01 mm

MÉTODO UTILIZADO

Calibración Detectores de Fallas por Ultrasonido
TM-CD-04

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Área de Dimensional - Laboratorio TEGMETRO

La calibración fue realizada bajo un sistema de gestión de calidad conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017.

Los resultados de la calibración y su Incertidumbre se exponen en las páginas siguientes, son parte de este documento, se refieren al momento, condiciones en que se realizó la calibración y se relacionan solamente con el o los ítems sometidos a calibración.

TEGMETRO S.A. no se responsabiliza por los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del Instrumento y/o equipo calibrado.

No es recomendable la reproducción total o parcial de este certificado sin la aprobación de TEGMETRO S.A. ya que puede dar lugar a Interpretaciones equivocadas de sus resultados.

TEGMETRO S.A. mantiene trazabilidad al SI a través de patrones primarios nacionales o internacionales, los certificados de calibración se encuentran en los archivos de TEGMETRO S.A. y pueden ser revisados por cualquier persona que así lo solicite.

Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del Instrumento y/o equipo. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del Instrumento y/o equipo calibrado como de las prácticas para su uso y manejo.



Calibrado por:
 Técnico
 Tec. Santiago Arizaga



Autorizado por:
 Gerente Técnico
 Ing. Henry Arizaga

Figura 15: Certificado de calibración detector de fallas UT

Anexo C. Procedimiento de soldadura (WPS)

En este anexo se presenta el procedimiento de soldadura (WPS) correspondiente a las uniones inspeccionadas, el cual establece los parámetros técnicos utilizados durante la ejecución de las soldaduras evaluadas.

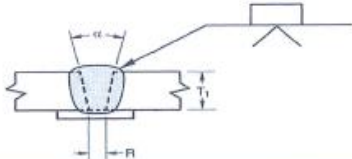
SEDEMI		ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)				CONTROL DE CALIDAD																	
						Pág.	1/1																
						Versión	5/2/2014																
1. DATOS DE IDENTIFICACIÓN																							
WPS NRO.		SED.21PREC.002		Doc.Nro.	2021 CC.WPS.F02																		
PRECALIFICADO ☒		CALIFICADO POR ENSAYO ☐		Revisión:	2																		
POR de Soporte NRO.		N/A		Fecha:	10/3/2022																		
Norma de Referencia		AWS D1.1/D1.1M:2020		Cliente	Varios																		
Proceso		FCAW		Proyecto	Proyectos Varios																		
2. DATOS DEL PROCEDIMIENTO																							
DISEÑO DE JUNTA				PROCESO(S) DE SOLDADURA																			
Tipo de Junta: Tope				Proceso: FCAW																			
Tipo de Soldadura: Ranura Simple V				Tipo: Semiautomático																			
Designación: B-U2a-GF				Modo de Transferencia: N/A																			
Aberura de Raíz: 6mm				Posición: 1G ☒ Plana																			
Angulo Ranura: 45°				H ☒ Horizontal																			
Cara de Raíz: 0				3G ☒ Vertical																			
Radio (J-U): N/A				4G ☒ Botencabeza																			
Acceso: 1 Lado ☒ 2 Lados ☐				PROTECCIÓN																			
Preparar Junta: SI ☒ NO ☐				Tipo: Puro																			
Remoción de Raíz: SI ☒ NO ☐				Composición: 100% CO2																			
Respaldo: SI ☒ NO ☐				Tasa de flujo: 18 - 24 LPM																			
Método: N/A				FUNDENTE																			
Material: Grupo I, II				Tipo: N/A																			
				Clase: N/A																			
MATERIAL BASE				CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS																			
Especificación: ASTM		A36 / A572 Gr.50, Grupos I, II		Tipo Corriente: DC ☒ AC ☐																			
Tipo o Grado: A36 / A572 Gr.50, Grupos I, II		Ref. Tabla 5.3		Polaridad: EP ☒ EN ☐																			
Muestra: Placa																							
Dimensiones: N/A																							
Espesor: 3 a limitado		Diámetro (tubo): N/A																					
METAL DE APORTE				PRECALENTAMIENTO																			
Especificación AWS: A5.20		Diámetro: 1.2 mm		Temp. Mínima: Según Tabla 5.6 - Sec.5																			
Clasificación AWS: E71T1C				Temp. Min. Interfase: Según Tabla 5.6 - Sec.5																			
				TRATAMIENTO POSTSOLDADURA (PWHT)																			
				Temperatura: N/A																			
				Tiempo: N/A																			
TECNICA				NOTAS																			
Nro. Pases: Múltiples Pases		Separación Electrodo: N/A Longitudinal		Revisión adecuada de la alineación de juntas. Realizar una correcta limpieza entre pases.																			
Nro. Electrodo: 1		N/A Lateral		No precalifica para GMAW-S ni GTAW																			
Técnica Avance: Anastro		N/A Angulo		La orientación de los dos miembros en la junta pueden variar desde 135° a 180° para juntas de tope, 45° a 135° para juntas de esquina, o 45° a 90° para juntas T.																			
Progresión Cordón: ---		N/A																					
Limpieza: Grata Metálica		Martillo																					
Stick out: 15 - 22mm		Angulo de Antorcha: N/A																					
3. DETALLE DE JUNTA																							
				<table><tr><td>Preparación de la Ranura</td><td>Tolerancia como ajuste</td><td colspan="2">T. Precalentamiento</td></tr><tr><td>R=6</td><td>+4/-2</td><td>3xT±20</td><td>Tp=0°C</td></tr><tr><td></td><td></td><td>20<T<38</td><td>Tp=10°C</td></tr><tr><td>α=45°</td><td>+10°/-5°</td><td>38<T<65</td><td>Tp=60°C</td></tr></table>				Preparación de la Ranura	Tolerancia como ajuste	T. Precalentamiento		R=6	+4/-2	3xT±20	Tp=0°C			20<T<38	Tp=10°C	α=45°	+10°/-5°	38<T<65	Tp=60°C
Preparación de la Ranura	Tolerancia como ajuste	T. Precalentamiento																					
R=6	+4/-2	3xT±20	Tp=0°C																				
		20<T<38	Tp=10°C																				
α=45°	+10°/-5°	38<T<65	Tp=60°C																				
				<table><tr><td>Esposores</td><td>T1= limitado</td></tr></table>				Esposores	T1= limitado														
Esposores	T1= limitado																						
4. PARÁMETROS DE SOLDADURA																							
ITEM	Proceso	No. pase	METAL APORTE		CORRIENTE			VOLTAJE (V)	VELOCIDAD														
			Clasificación	Diámetro (mm)	Tipo	Polaridad	Amperaje (A)		Alimentación Alambre (in/min)	Avance (mm/min)													
1	FCAW	1-m	E71T1C	1.2	CC	DCEP	180-240	23-28	300-450	250-400													
5. RESPONSABILIDAD																							
Los firmantes certificamos y declaramos que: Los datos descritos en este WPS son correctos y están en conformidad con todos los requerimientos de la sección 5 de AWS D1.1/D1.1M:2020. Así como contiene información confidencial y es propiedad de SEDEMI. Este documento está elaborado en base a condiciones de servicio específicos y del tipo de estructura y no pretende cubrir los rangos de trabajo diferentes a los expuestos. Se prohíbe su difusión, uso o copia sin autorización. No se responsabiliza por el mal uso e interpretación del procedimiento.																							
																							
Ing. Agda de la Cruz Control de Calidad SEDEMI S.C.C 10/3/2022				Ing. Néstor Morales Inspector de Soldadura Certificado CW 17075541 QC1 EXP. 7/1/2023 10/3/2022																			

Figura 16: WPS SEDEMI página 1 de 2

Figura 17: WPS SEDEMI página 2 de 2

El presente anexo incluye la calificación del soldador (WPQ), la cual certifica la competencia del personal encargado de la ejecución de las uniones soldadas evaluadas en el presente estudio.

Figura 18: WPQ SEDEMI