

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL**  
**TÍTULO DE**  
**INGENIERO CIVIL**

**ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN**  
**DE FALLAS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS EMPLEANDO**  
**TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS**

**AUTOR:**

**EDUARDO ESTEBAN ESPINOZA AGUILAR**

**DIRECTOR: ING. MAURICIO CELY**

**QUITO, MAYO 2019**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |    |
|---|----|
| CAPITULO I: GENERALIDADES   | 10 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN   | 10 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN  | 11 |
| 1.3. ALCANCE  | 12 |
| 1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA   | 13 |
| 1.5. OBJETIVOS  | 13 |
| <b>1.5.1. General</b>   | 13 |
| <b>1.5.2. Específicos</b>   | 13 |
| 1.6. ANTECEDENTES   | 13 |
| CAPITULO II: MARCO TEÓRICO  | 15 |
| 2.1. TÉCNICAS VOLUMÉTRICAS  | 15 |
| <b>2.1.1. Radiografía industrial</b>  | 15 |
| 2.1.1.1. La fuente de radiación   | 15 |
| 2.1.1.2. Película radiográfica  | 16 |
| - <i>Densidad.</i>  | 16 |
| - <i>Definición.</i>  | 16 |
| - <i>Contraste.</i>   | 16 |
| 2.1.1.3. Penetrámetro o IQI (Image Quality Indicator)                       | 16 |
| 2.1.1.4. Variables de ensayos de Radiografía Industrial                     | 17 |
| 2.1.1.5. Técnicas de exposición para radiografía industrial                 | 17 |
| <i>Técnica de pared simple.</i>   | 17 |
| <i>Técnica de pared doble.</i>  | 18 |
| 2.1.1.6. Evaluación de la radiografía                                       | 20 |
| 2.1.1.7. Evaluación de las discontinuidades mediante radiografía industrial | 21 |
| - <i>Grietas.</i>   | 21 |
| - <i>Falta de fusión.</i>   | 21 |

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| -             | <i>Penetración incompleta.</i>                     | 21        |
| -             | <i>Inclusiones (denso y menos denso).</i>          | 21        |
| -             | <i>Porosidad.</i>                                  | 22        |
| -             | <i>Condiciones geométricas.</i>                    | 22        |
| <b>2.1.2.</b> | <b><i>Ultrasonido</i></b>                          | <b>23</b> |
| 2.1.2.1.      | Naturaleza de las ondas sonoras                    | 24        |
| 2.1.2.2.      | Modos de propagación                               | 25        |
| -             | <i>Ondas de compresión u ondas longitudinales.</i> | 26        |
| -             | <i>Ondas de corte u ondas transversales</i>        | 26        |
| -             | <i>Ondas superficiales u ondas Rayleigh.</i>       | 26        |
| -             | <i>Las Ondas de Lamb u ondas de placa.</i>         | 26        |
| 2.1.2.3.      | Propiedades de las ondas de sonido                 | 26        |
| -             | <i>Velocidad:</i>                                  | 26        |
| -             | <i>Longitud de onda:</i>                           | 26        |
| -             | <i>Reflexión:</i>                                  | 26        |
| -             | <i>Conversión de modo:</i>                         | 27        |
| -             | <i>Haz de propagación:</i>                         | 27        |
| 2.1.2.4.      | Atenuación de las ondas de Ultrasonido             | 27        |
| -             | <i>Disipación de la energía acústica:</i>          | 27        |
| -             | <i>Absorción:</i>                                  | 27        |
| -             | <i>Colisión:</i>                                   | 28        |
| -             | <i>Impedancia acústica:</i>                        | 28        |
| 2.1.2.5.      | Técnicas   | 28        |
| -             | <i>Técnicas de pulso-eco</i>                       | 28        |
| -             | <i>Técnicas de transmisión directa</i>             | 29        |
| <b>2.2.</b>   | <b>TÉCNICAS SUPERFICIALES</b>                      | <b>29</b> |
| <b>2.2.1.</b> | <b><i>Inspección visual</i></b>                    | <b>30</b> |

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| 2.2.1.1.      | Herramientas útiles para la inspección visual            | 30        |
| -             | <i>Fuentes de luz.</i>                                   | 30        |
| -             | <i>Magnificadores de imagen.</i>                         | 30        |
| -             | <i>Endoscopios y equipos para la observación remota.</i> | 31        |
| -             | <i>Sensores de imagen.</i>                               | 31        |
| 2.2.1.2.      | Características generales de la inspección visual        | 31        |
| -             | <i>Ventajas del método visual:</i>                       | 31        |
| -             | <i>Limitaciones:</i>                                     | 31        |
| <b>2.2.2.</b> | <b><i>Líquidos penetrantes</i></b>                       | <b>32</b> |
| 2.2.2.1.      | Tipos de líquidos Penetrantes                            | 33        |
| -             | <i>Tipo I. Fluorescentes.</i>                            | 34        |
| -             | <i>Tipo II. Visibles o no fluorescentes.</i>             | 34        |
| 2.2.2.2.      | Clasificación según el tipo de revelador                 | 34        |
| -             | <i>Forma A.</i>  | 34        |
| -             | <i>Forma B.</i>  | 34        |
| -             | <i>Forma C.</i>  | 34        |
| -             | <i>Forma D.</i>  | 34        |
| 2.2.2.3.      | Métodos de inspección por líquidos penetrantes           | 34        |
| -             | <i>Método A. Soluble en agua.</i>                        | 35        |
| -             | <i>Método B. Emulsión, base aceite.</i>                  | 35        |
| -             | <i>Método C. Penetrante, base solvente.</i>              | 35        |
| -             | <i>Método D. Emulsión, base agua.</i>                    | 35        |
| <b>2.2.3.</b> | <b><i>Partículas magnéticas</i></b>                      | <b>35</b> |
| 2.2.3.1.      | Principios básicos del magnetismo                        | 36        |
| 2.2.3.2.      | Generación del campo magnético                           | 37        |
| -             | <i>El método continuo</i>                                | 37        |
| -             | <i>El método por campo residual</i>                      | 37        |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 2.2.3.3.                                       | Métodos de magnetización de elementos _____                          | 37 |
| -  | <i>Yugos.</i> _____  | 37 |
| -  | <i>Bobinas.</i> _____  | 38 |
| -  | <i>Conductores centrales.</i> _____                                  | 38 |
| -  | <i>Contacto directo.</i> _____                                       | 38 |
| -  | <i>Puntas de contacto.</i> _____                                     | 38 |
| 2.2.3.4.                                       | Histéresis magnética y desmagnetización _____                        | 38 |
| 2.2.3.5.                                       | Desmagnetización _____   | 38 |
| -  | <i>Desmagnetización antes del análisis.</i> _____                    | 38 |
| -  | <i>Desmagnetización luego del análisis.</i> _____                    | 39 |
| 2.3.   | CÓDIGOS Y NORMAS DE REFERENCIA _____                                 | 39 |
| 2.3.1.   | <b>AISC-360</b> _____  | 39 |
| 2.3.2.   | <b>ASME-V</b> _____  | 39 |
| 2.3.3.   | <b>AWS D1.1</b> _____  | 39 |
| 2.3.4.   | <b>ISO 9712-3</b> _____  | 40 |
| 2.3.5.   | <b>NEC-SE-AC</b> _____   | 40 |
| 2.4.   | MATERIALES Y ESTRUCTURAS A ENSAYAR _____                             | 40 |
| 2.5.   | CRITERIO PARA SELECCIONAR UNA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA _____           | 41 |
| CAPITULO III: METODOLOGÍAS DE INSPECCIÓN _____ |  | 44 |
| 3.1.   | SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS _____                      | 44 |
| 3.1.1.   | <i>Diseño de la junta</i> _____                                      | 45 |
| 3.2.   | PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS _____                                    | 46 |
| 3.2.1.   | <i>Preparación del material base</i> _____                           | 46 |
| 3.2.2.   | <i>Realización de la soldadura</i> _____                             | 47 |
| 3.3.   | METODOLOGÍAS PARA TÉCNICAS SUPERFICIALES _____                       | 48 |
| 3.3.1.   | <i>Metodología para la inspección visual</i> _____                   | 48 |
| 3.3.2.   | <i>Metodología para la inspección con líquidos penetrantes</i> _____ | 50 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 3.3.3.  | <b>Metodología para la inspección con partículas magnéticas</b>  | 54 |
| 3.4.  | <b>METODOLOGÍAS PARA TÉCNICAS VOLUMÉTRICAS</b>                   | 56 |
| 3.4.1.  | <b>Metodología para la inspección por ultrasonido</b>            | 56 |
| 3.4.1.1.  | Marcado de la zona de inspección.                                | 56 |
| 3.4.1.2.  | Calibración  | 57 |
| 3.4.1.3.  | Procedimiento de inspección por ultrasonido                      | 59 |
| 3.4.2.  | <b>Metodología para la inspección por radiografía industrial</b> | 62 |
| 3.4.2.1.  | Planificación  | 62 |
| -   | <i>Interpretación del ensayo:</i>                                | 62 |
| -   | <i>Selección del tipo de película:</i>                           | 62 |
| -   | <i>Selección de IQI:</i>   | 62 |
| -   | <i>Selección de la ubicación más conveniente de la película:</i> | 62 |
| -   | <i>Distancias:</i>   | 62 |
| -   | <i>Angulo de incidencia:</i>                                     | 62 |
| -   | <i>Fuente de radiación:</i>                                      | 62 |
| -   | <i>Exposición:</i>   | 62 |
| 3.4.2.2.  | Preparación  | 62 |
| -   | <i>Seguridad:</i>  | 62 |
| 3.4.2.3.  | Ejecución de la exposición                                       | 63 |
| 3.4.2.4.  | Procesado de la película   | 63 |
| 3.4.2.5.  | Interpretación   | 63 |
| 3.4.2.6.  | Decisiones en base a los resultados obtenidos                    | 63 |
| <b>CAPITULO IV: METODOLOGÍA GENERAL DE INSPECCIÓN</b> |  | 64 |
| 4.1.  | <b>FLUJOGRAMA GENERAL DE INSPECCIÓN MEDIANTE END.</b>            | 65 |
| 4.2.  | <b>FLUJOGRAMA INSPECCIÓN VISUAL</b>                              | 67 |
| 4.3.  | <b>FLUJOGRAMA INSPECCIÓN CON LÍQUIDOS PENETRANTES</b>            | 68 |
| 4.4.  | <b>FLUJOGRAMA INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS</b>           | 69 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 4.5.   | FLUJOGRAMA INSPECCIÓN CON ULTRASONIDO _____                 | 70 |
| 4.6.   | REPARACIONES POSTERIORES A LA INSPECCIÓN _____              | 71 |
| CAPITULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS _____ |   | 72 |
| 5.1.   | INSPECCIÓN SUPERFICIAL _____                                | 72 |
| 5.1.1.   | <i>Probeta 1</i> _____                                      | 72 |
| 5.1.2.   | <i>Probeta 2</i> _____                                      | 74 |
| 5.1.3.   | <i>Ejemplo de una probeta realizada correctamente</i> _____ | 76 |
| 5.2.   | INSPECCIÓN VOLUMÉTRICA _____                                | 77 |
| 5.2.1.   | <i>Inspección por ultrasonido</i> _____                     | 77 |
| 5.2.1.1.   | Inclusiones de escoria _____                                | 78 |
| 5.2.1.2.   | Falta de fusión _____                                       | 78 |
| 5.2.1.3.   | Porosidades _____   | 79 |
| 5.2.1.4.   | Grietas longitudinales _____                                | 79 |
| 5.2.1.5.   | Interpretación de una soldadura sin discontinuidades _____  | 80 |
| 5.2.2.   | <i>Inspección por radiografía industrial</i> _____          | 81 |
| 5.2.2.1.   | Exceso de penetración _____                                 | 81 |
| 5.2.2.2.   | Falta de penetración _____                                  | 81 |
| 5.2.2.3.   | Concavidad _____  | 82 |
| 5.2.2.4.   | Mordeduras _____  | 82 |
| CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____    |   | 84 |
| 6.1.   | CONCLUSIONES _____  | 84 |
| 6.2.   | RECOMENDACIONES _____                                       | 85 |
| REFERENCIAS _____                                    |   | 87 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Características principales de las técnicas volumétricas para END _____                | 42 |
| Tabla 2: Características principales de las técnicas superficiales que se utilizan en END _____ | 43 |
| Tabla 3: Metales base aprobados para WPS precalificadas _____                                   | 44 |
| Tabla 4: Metal de aporte para las resistencias coincidentes _____                               | 45 |
| Tabla 5: Criterios de aceptación para Inspección Visual _____                                   | 49 |
| Tabla 6: Criterios de aceptación – rechazo UT _____   | 61 |
| Tabla 7: Reparaciones permitidas según AWS D1.1: 2015 _____                                     | 71 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Técnica radiográfica de pared simple _____                                    | 17 |
| Figura 2: Exposición de pared doble, técnica de vista única _____                       | 18 |
| Figura 3: Exposición de pared doble, técnica de doble visión _____                      | 19 |
| Figura 4: Distancia de exposición entre fuente, objeto y película _____                 | 20 |
| Figura 5: IQI de hilos ISO–DIN (ASTM E-747) _____                                       | 20 |
| Figura 6: Humectación a partir del ángulo entre la gota y la superficie _____           | 32 |
| Figura 7: Capilaridad de un líquido _____   | 33 |
| Figura 8: Métodos de magnetización _____  | 36 |
| Figura 9: Detalle de la junta soldada en ranura con junta de penetración completa _____ | 45 |
| Figura 10: Biselado de las placas de acero _____  | 46 |
| Figura 11: Ranura tipo V con un ángulo total de 60 grados y separación de 2mm _____     | 47 |
| Figura 12: Realización del primer cordón de soldadura _____                             | 47 |
| Figura 13: Probeta antes y después de la limpieza _____                                 | 50 |
| Figura 14: Aplicación del líquido limpiador en la probeta _____                         | 51 |
| Figura 15: Limpieza de la probeta con un trapo _____                                    | 51 |
| Figura 16: Colocación del líquido penetrante _____                                      | 52 |
| Figura 17: Remoción del exceso de líquido penetrante de la superficie _____             | 52 |
| Figura 18: Limpieza del exceso de penetrante con el líquido limpiador _____             | 53 |
| Figura 19: Revelador recién colocado _____  | 53 |
| Figura 20: Discontinuidades una vez seco el revelador _____                             | 54 |
| Figura 21: Identificación de ejes de referencia y zona de barrido _____                 | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22: Determinación de la zona de barrido _____                            | 57 |
| Figura 23: Bloque de calibración _____  | 57 |
| Figura 24: Calibración del ángulo de incidencia del equipo de ultrasonido _____ | 58 |
| Figura 25: Calibración de sensibilidad del equipo de ultrasonido _____          | 59 |
| Figura 26: Colocación de gel previo al barrido _____                            | 59 |
| Figura 27: Verificación de distancia transductor-borde _____                    | 60 |
| Figura 28: Inspección de soldadura mediante ultrasonido _____                   | 60 |
| Figura 29: Probeta 1 _____  | 73 |
| Figura 30: Falta de penetración probeta 1 _____                                 | 73 |
| Figura 31: Salpicaduras adyacentes _____  | 73 |
| Figura 32: Porosidades visibles con líquidos penetrantes, probeta 2 _____       | 73 |
| Figura 33: Falta de fusión _____  | 73 |
| Figura 34: Probeta 2 _____  | 75 |
| Figura 35: Penetración incompleta probeta 2 _____                               | 75 |
| Figura 36: Porosidades y falta de fusión _____                                  | 75 |
| Figura 37: Inspección con líquidos penetrantes probeta 2 _____                  | 75 |
| Figura 38: Ejemplo de soldadura realizada correctamente _____                   | 76 |
| Figura 39: Ejemplo de penetración completa en la raíz _____                     | 76 |
| Figura 40: Inspección por ultrasonido _____                                     | 77 |
| Figura 41: Inclusiones de escoria vista a través de UT _____                    | 78 |
| Figura 42: Falta de fusión vista a través de UT _____                           | 78 |
| Figura 43: Porosidades vistas a través de UT _____                              | 79 |
| Figura 44: Grietas longitudinales vistas a través de UT _____                   | 79 |
| Figura 45: Inspección de una soldadura sin discontinuidades _____               | 80 |
| Figura 46: Interpretación de UT en soldadura sin discontinuidades _____         | 80 |
| Figura 47: Exceso de penetración vista con RX _____                             | 81 |
| Figura 48: Falta de penetración vista con RX _____                              | 82 |
| Figura 49: Concavidad vista con RX _____  | 82 |
| Figura 50: Mordeduras vistas con RX _____                                       | 83 |
| Figura 51: Porosidades vistas con RX _____                                      | 83 |
| Figura 52: Inclusiones de escoria vistas con RX _____                           | 83 |

# CAPITULO I: GENERALIDADES

## 1.1.INTRODUCCIÓN

El acero es uno de los materiales estructurales más versátiles ya que posee una gran resistencia, es ligero, de fácil fabricación y muchas propiedades más. Las estructuras de acero rara vez fallan por defectos de fabricación del material, por el contrario, las fallas se producen debido al uso inadecuado durante el proceso de construcción. (McCormac & Csernak, 2012)

No es muy común que en un elemento estructural o en la totalidad de una estructura metálica existan fallas, sin embargo, estas llegan a suceder por dos razones principales, la primera debido a errores en la fabricación de los mismos y la segunda generándose daños durante el uso. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

Para el primer caso, hay muchos factores que intervienen durante la fabricación, pero la razón principal es el error humano presente en la etapa de diseño, durante la selección de material y durante el control de calidad. En cambio, en el segundo caso es más difícil identificar o anticiparse ya que se presenta debido al comportamiento de la estructura y este es un factor desconocido que no se puede prever en la etapa de diseño. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

A pesar de presentarse fallas por ambos casos, es posible diseñar estructuras con elementos metálicos utilizando el criterio de diseño con tolerancia al daño junto con la utilización correcta de ensayos no destructivos, con los cuales se podrá asegurar la operación de la estructura en un rango de fallas controlado. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

El criterio de diseño con tolerancia al daño quiere decir que se diseña la estructura para que siga operando aun cuando existan defectos o grietas hasta un tamaño crítico sin que la integridad estructural se vea comprometida. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

La utilización de los ensayos no destructivos en cambio nos da información actualizada de la situación actual de los elementos metálicos de la estructura, de manera que identifica la presencia de la grieta, su ubicación y tamaño. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

Las técnicas de ensayos no destructivos para el control de materiales representan un instrumento imprescindible a la hora de proporcionar la seguridad en una estructura, tanto en la etapa inicial de construcción como durante la vida útil de la misma. (Porco & Valer Montero, 2013)

Con la información recolectada con estas dos herramientas, podemos hacer un análisis de las condiciones de la estructura, establecer si las grietas presentes son perjudiciales, y en el caso que no lo sean, estimar el tiempo en que lleguen a serlo. Luego se podrá establecer el tiempo de vida útil y establecer periodos de inspección para conocer el progreso de las grietas y dar el respectivo mantenimiento. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

Los ensayos no destructivos nos dan la información necesaria para asegurar la integridad de la estructura, identificando elementos próximos a fallar los cuales deben ser reparados o sustituidos, pero como en la mayoría de técnicas de inspección, incluyendo los ensayos no destructivos, existe la posibilidad de que no se detecten ciertas fallas, es por esta razón que nuestro segundo punto de control es el diseño con tolerancia al daño. Gracias a este criterio de diseño se tiene cierto grado de protección en la estructura ante condiciones de falla producidas por grietas indetectables. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

## 1.2.JUSTIFICACIÓN

La microestructura de un material metálico no es homogénea, esto se puede observar en las discontinuidades que el material puede presentar en forma de fisuras, inclusiones, porosidades o grietas; por este motivo es importante el entendimiento de las relaciones de las propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas que conlleva la utilización de una estructura metálica. (Ruiz, 2015)

Durante el diseño, el proyectista considera al metal como un material perfecto, pero en la realidad este material perfecto no existe. Por este motivo surge la necesidad de generar un control de calidad mediante la cual se pueda garantizar la seguridad y operatividad de la estructura metálica bajo criterios establecidos en normas o códigos. (Hellier, 2003)

Una manera de llevar a cabo este análisis es mediante Ensayos No Destructivos (END) los cuales establecen pruebas de calidad a un material sin que se altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales, es decir que implican un daño imperceptible o nulo. En la actualidad los END cuentan con distintos métodos de evaluación entre estos tenemos a las técnicas superficiales, volumétricas y globales. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

Esta metodología de detección de fallas se realizará bajo la norma NEC-SE-AC, 2015 y el código de diseño de estructuras de acero AISC-360 (American Institute of Steel Construction), los cuales recomiendan un plan de garantía de calidad que debe ser realizado por un fiscalizador, el mismo que debe incluir procesos de END basados en los códigos AWS D1.1 y AWS D1.3 (Structural Welding Code Steel) según la aplicación requerida.

La presente tesis aportará con una metodología de inspección no destructiva mediante técnicas seleccionadas, como proceso de inspección donde los fiscalizadores puedan guiarse ante la necesidad de realizar dicho control de calidad en una estructura metálica.

### 1.3.ALCANCE

El presente trabajo de titulación enmarca estudios exploratorios de las diferentes técnicas no destructivas volumétricas y superficiales para la detección de fallas. Estos estudios se centran en brindar técnicas de inspección a estructuras metálicas con el fin de tener un control de calidad en elementos metálicos.

No se abordarán las distintas técnicas globales ya que la descripción de estas metodologías implica la utilización de equipo con un costo excesivo.

## 1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante el diseño y posterior mantenimiento de estructuras metálicas, la aplicación de una metodología de inspección es fundamental y juega un papel predominante en todo momento, por esta razón la estructura debe ser sometida a una evaluación en cada etapa específica como la construcción, fiscalización, operación o mantenimiento. Para facilitar esta evaluación se desarrollará una metodología de detección de fallas empleando técnicas de END.

## 1.5. OBJETIVOS

### *1.5.1. General*

- Elaboración de una metodología para la detección de fallas en estructuras metálicas empleando técnicas no destructivas.

### *1.5.2. Específicos*

- Investigar sobre las técnicas no destructivas, códigos y normativas que rigen en el análisis de estructuras metálicas.
- Proponer los procedimientos de inspección a efectuar en cada tipo de prueba no destructiva en estructuras metálicas.
- Ensayar soldaduras en probetas metálicas bajo criterios de la norma AWS D1.1 para verificar la calidad de esta.
- Comparar la metodología con parámetros y valores admisibles expuestos en códigos y normas para inspección de estructuras metálicas.

## 1.6. ANTECEDENTES

A lo largo de la historia las técnicas para realizar END han ido evolucionando con la implementación de códigos y normativas, uno de los primeros registros históricos de este tipo de ensayos fue en 1868 cuando se pudo observar los trabajos realizados con campos magnéticos. (Espejo, 2003)

Desde ese entonces la localización de grietas superficiales en ejes de ferrocarril fue una de las primeras prácticas que se realizó en END, sin embargo, con el desarrollo de la tecnología y de casi todos los procesos de producción, la localización de discontinuidades era limitada y no era suficiente, por lo que se vio la necesidad de adquirir información cuantitativa sobre el tipo y tamaño de discontinuidades para generar una fuente de información y tener una idea de cuál es el comportamiento de la vida mecánica de un material metálico. (Hellier, 2003)

Un gran acontecimiento para el desarrollo de END se dio en 1941 cuando se creó la fundación de la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT, American Society For Nondestructive Testing). Esta sociedad es una de las entidades más importantes en todo el mundo sobre métodos de inspección no destructivos y es creadora de normativas y servicios para la certificación sobre el control de calidad del personal que realiza este tipo de ensayos. (ASNT, 2010)

Otro suceso importante en el desarrollo de la inspección no destructiva se llevó a cabo en el año 2012 con la implementación de la normativa ISO 9712-3, que es la normativa más actual existente para la capacitación, calificación y certificación del personal que realiza END. (Luna, 2015)

La implementación del código para control de calidad de estructuras metálicas fue promovida por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS D1.1, 2010) en el año 2010, con este código la inspección de estructuras metálicas soldadas se desarrolló ampliamente ya que en la actualidad se tienen especificaciones para la obtención de probetas que pueden ser ensayadas en laboratorio y procesos de calidad que deben ser cumplidos al realizar una inspección mediante END. (OSMHatec, 2017)

El código de diseño de estructuras de acero AISC con el que en la actualidad se diseñan los elementos estructurales metálicos para edificios dedica un capítulo para describir los requisitos que debe cumplir el personal que realiza el control de calidad mediante END y muestra un sistema integral de requisitos de control de calidad por parte del fabricante y constructor. (AISC-360, 2016)

Actualmente en el Ecuador la norma NEC-SE-AC de estructuras de acero menciona un plan de garantía de calidad (PGC) que debe incluir una técnica de control de calidad en estructuras metálicas mediante el uso de técnicas no destructivas. (NEC-SE-AC, 2015)

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se revisan los conceptos básicos y fundamentales en los que se basan cada uno de los ensayos no destructivos tanto volumétricos como superficiales.

### 2.1. TÉCNICAS VOLUMÉTRICAS

Son técnicas utilizadas para conocer la sanidad de un material y detectar discontinuidades generalmente ocultas en su estructura interna y sub-superficial. Para esto se hace fluir energía a través del elemento a inspeccionar y se analiza la variación en la respuesta, que generalmente resulta ser la intensidad y el tiempo.

#### *2.1.1. Radiografía industrial*

La historia de las pruebas radiográficas comienza con dos sucesos importantes. El primero, el correspondiente a los rayos X por Wilhelm Conrad Roentgen en 1895 y el segundo el anuncio de la existencia de un nuevo material radioactivo llamado "radio" por Marie y Pierre Curie, en diciembre de 1898.

En este método se hablan de dos tipos de radiación. El primero, rayos x que se generan mediante un tubo y el segundo, rayos gamma que son provenientes de una fuente radiactiva. Independientemente de su origen, existen algunos componentes esenciales que se aplican al proceso de las pruebas radiográficas (Hellier, 2003).

##### *2.1.1.1. La fuente de radiación*

Es el primer componente del equipo de rayos X. El tipo de radiación que se utiliza es del tipo ondas electromagnéticas que se asemejan a las propiedades de la luz, a diferencia que la energía es mayor a la de la luz normal y las longitudes de onda son pequeñas.

Adicionalmente, la fuente de radiación utiliza cuatro componentes fundamentales:

- Tubo de rayos X.

- Consola de control.
- Generador de alta tensión.
- Sistema de enfriamiento.

#### 2.1.1.2. Película radiográfica

La película que se utiliza en la radiografía industrial se compone de una de una lámina de nitrato de celulosa cubierta con una emulsión de haluro de plata que es sensible a la radiación.

La película debe constar de ciertas características, que se detallan a continuación:

- *Densidad.* Esta depende de la cantidad de radiación que absorbe la película y varía según la cantidad de emulsión que esta contiene, a su vez la cantidad de radiación depende de ciertos factores como la radiación que emite la fuente, distancia entre la fuente y la película, la sección de energía de radiación.
- *Definición.* Se refiere a la calidad de la película, reflejada en la nitidez de los contornos, a la falta de nitidez, esta se corrige ajustando la distancia entre la fuente, película y objeto, aumentando la distancia fuente-película y reduciendo la distancia objeto-película.
- *Contraste.* Se refiere al brillo de la imagen, es decir que se pueda diferenciar el elemento a radiografiar y el fondo adyacente.

#### 2.1.1.3. Penetrómetro o IQI (Image Quality Indicator)

Se utilizan para establecer el nivel de calidad de la técnica radiográfica. Los tipos de IQI utilizados son 2, de tipo taladro y de tipo hilo. Los tipos taladro son placas de espesores definidos y con orificios de diferentes diámetros, mientras que los de tipo hilo se conforman de un grupo de hilos sobre soportes plásticos en un arreglo progresivo de diámetros.

#### 2.1.1.4. Variables de ensayos de Radiografía Industrial

Este método de ensayo tiene muchas variables. Estas variables son debido a cambios en:

- Energía.
- Tiempo de exposición.
- mA (rayos x) o curies (rayos gamma).
- Tipo de material y densidad.
- Grosor del material.
- Tipo de película.
- Pantallas utilizadas.
- Procesamiento de la película (tiempo y temperatura de revelado del procedimiento, etc.).
- Densidad de película.
- Distancia de la fuente de radiación al objeto.
- Distancia del objeto a la película.
- Tamaño físico del objetivo (rayos x) o fuente (rayos gamma).

#### 2.1.1.5. Técnicas de exposición para radiografía industrial

*Técnica de pared simple.* La técnica más efectiva utilizada en la radiografía. La radiación pasa a través de un único espesor y la película está en contacto con la superficie opuesta al lado de la fuente como se observa en la figura 1.

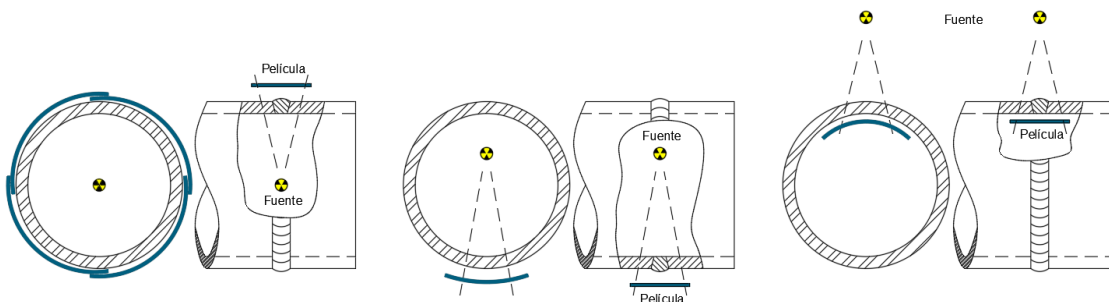


Figura 1: Técnica radiográfica de pared simple.  
Fuente: (ASME V, 2001)  
Elaboración: Propia

*Técnica de pared doble.* Cuando el uso de la técnica de pared simple no es viable, se puede efectuar una de las siguientes técnicas de pared doble.

- a) *Exposición de pared doble, técnica de vista única.* En este caso, la radiación pasa a través de dos paredes, pero solo se evalúa el área más cercana a la película. Esta técnica se muestra en la figura 2.

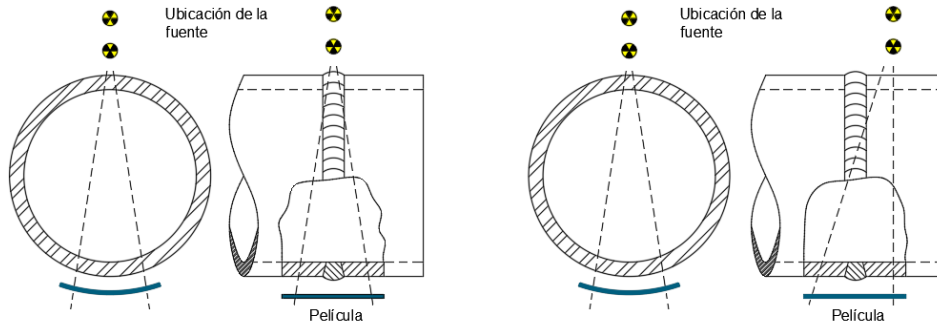


Figura 2: Exposición de pared doble, técnica de vista única.  
Fuente: (ASME V, 2001)  
Elaboración: Propia

- b) *Exposición de pared doble, técnica de doble visión.* La radiación pasa a través de ambas paredes del objeto y se evalúan ambas paredes. Se restringe su uso a elementos con diámetros iguales o menores que 3.5 pulgadas. En esta técnica, la fuente de radiación puede colocarse directamente sobre el área de interés, superponiendo así la porción superior con la región directamente debajo de ella. Como alternativa, la fuente puede compensarse con un ángulo de aproximadamente  $15^\circ$  para observar tanto la pared superior como la inferior. Cuando la fuente se compensa, la técnica a menudo se denomina técnica de "elipse".

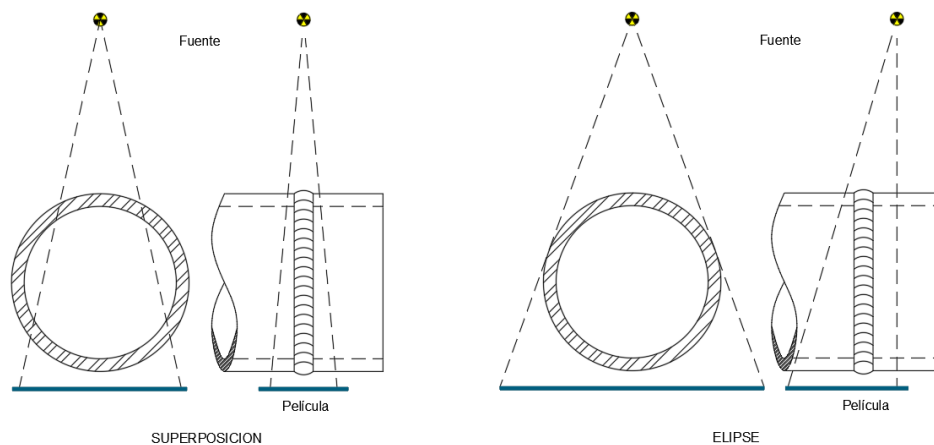


Figura 3: Exposición de pared doble, técnica de doble visión.  
 Fuente: (ASME V, 2001)  
 Elaboración: Propia

En la técnica de pared simple, el penetrámetro se coloca en el lado de la fuente del objeto (lado opuesto a la película). En la exposición de pared doble, técnica de vista única, el penetrámetro puede estar en el lado de la fuente del objeto o del lado de la película, dependiendo de la accesibilidad.

Indiferente del método utilizado, el objetivo es lograr el nivel de calidad más alto posible, esto se logra colocando el penetrámetro lo más cerca posible del área de interés. Si el objeto que se está radiografiando es una soldadura, el penetrámetro debe estar lo más cerca posible de la soldadura, sin interferir con la imagen de la soldadura. En el caso de fundiciones, puede ser necesario colocar el penetrámetro en el área de interés, dependiendo del tamaño y la forma de la fundición. En otros casos, la técnica puede permitir que un objeto de densidad y espesor radiográfico similar se coloque junto al objeto de prueba.

Con todas las técnicas, es necesario que haya alguna forma de "boceto de disparo" que indique los aspectos clave de la técnica, como la ubicación de la fuente, la ubicación de la película, la ubicación del penetrámetro y la posición de la pieza de prueba. Esto sirve como una gran ayuda para el intérprete de películas radiográficas que puede no estar totalmente familiarizado con la técnica radiográfica utilizada. (Hellier, 2003)

Dado que el objetivo de la radiografía es detectar discontinuidades, la naturaleza, la ubicación y la orientación de las discontinuidades esperadas siempre deben ser un factor importante para establecer la técnica.



*Figura 4: Distancia de exposición entre fuente, objeto y película  
Fuente: (Riaño Calderon, Rodriguez Calle, Romero Castaño, & Tabima, 2015)*

#### 2.1.1.6. Evaluación de la radiografía

El paso final y más importante, es la evaluación de la radiografía. En ocasiones, la radiografía ha sido referida como una mezcla de arte y ciencia. La ciencia involucra toda la física y el proceso involucrado en la producción de la imagen radiográfica. La interpretación de la imagen implica arte, hasta cierto punto. La interpretación de las radiografías no es algo que se aprende en un aula, requiere horas de revisión y comprensión de los diferentes tipos de imágenes y las diversas condiciones que prevalecen en la radiografía industrial. Muchos profesionales que han estado evaluando radiografías durante décadas admitirán que aún siguen aprendiendo a interpretar con cada radiografía adicional. (Hellier, 2003)

Lo siguiente es observar el estado de la película en sí. Este aspecto inicial indicará la calidad general lograda. Luego se debe confirmar el nivel de calidad comparando con la imagen del IQI y asegurando que el agujero esencial en el IQI de tipo cuña, o el cable en el IQI del tipo hilo, se muestre de manera clara.



*Figura 5: IQI de hilos ISO-DIN (ASTM E-747)  
Fuente: (Construcciones, 2015)*

#### 2.1.1.7. Evaluación de las discontinuidades mediante radiografía industrial

Las condiciones de discontinuidad que normalmente se encuentran en las soldaduras incluyen aquellas en las siguientes subsecciones, enumeradas en orden de gravedad:

- *Grietas*. Hay diferentes tipos de grietas que se clasifican según su orientación y ubicación. Aparecen en la radiografía como indicaciones oscuras, irregulares, lineales y se consideran las más graves de todas las discontinuidades. No siempre son detectables por radiografía a menos que su orientación coincida de alguna manera con el plano de la dirección de la radiación. Las grietas más comunes son las longitudinales (a lo largo de la soldadura). Ocasionalmente aparecen transversales a la soldadura.
  
- *Falta de fusión*. Es el resultado de la ausencia de fusión metalúrgica, ya sea entre un cordón de soldadura y el material base (preparación del borde de soldadura) o entre dos pasadas de soldadura sucesivas.  
La falta de fusión suele ser muy estrecha, lineal y tiende a ser más recta que la grieta. En sus extremidades, la condición "plumas" desciende a un borde inusualmente afilado. En muchos casos, la imagen de falta de pared lateral o falta de fusión parece algo recta a lo largo de un borde y ligeramente ondulada en el otro.
  
- *Penetración incompleta*. Se debe a la ausencia de metal de soldadura o un área de "no fusión" en el paso de la raíz de la soldadura. Su apariencia es muy recta, oscura, lineal y por lo general, "nítida" en nitidez. Puede ser corto, pero generalmente tiene una longitud significativa.
  
- *Inclusiones (denso y menos denso)*. Las inclusiones son materiales que han quedado atrapados en la soldadura que no deben estar allí. Tienen una variedad de formas y dimensiones que van desde cortas y aisladas hasta lineales y numerosas. Las inclusiones de densidad más ligera se observan de forma más oscura en la radiografía y las inclusiones más densas, como el tungsteno, como una imagen más clara.

- *Porosidad.* Son las discontinuidades de soldadura más fáciles de detectar. Aparecen cuando el gas se queda atrapado en un metal de soldadura. La porosidad aparece de diferentes formas (globulares, de cola, alargadas) y distribuciones (linealmente alineadas, agrupadas, aisladas, dispersas). La porosidad siempre aparecerá más oscura, ya que están llenas de gas.
- *Condiciones geométricas.* Existen numerosas condiciones geométricas que pueden ocurrir en soldaduras que se observan en una radiografía, las cuales se deben abordar mediante exámenes visuales y verificaciones dimensionales. Siempre que sea posible, estas discontinuidades se deben analizar con medidores mecánicos (Hellier, 2003).

Estas condiciones geométricas pueden ser:

- Concavidad: una concavidad en la raíz de una soldadura da como resultado una región más delgada a través de la sección transversal de la soldadura. La concavidad en una radiografía suele ser fácil de identificar, ya que es una indicación amplia con un cambio gradual de densidad en comparación con el cambio abrupto asociado con la penetración incompleta.
- Convexidad: Es lo contrario de la concavidad, ya que esta condición es un abultamiento más grueso en el paso de la raíz. La causa es un depósito excesivo de material en el paso. En casos extremos, el metal de soldadura "quemará" y puede formar gotas que se conocen como "carámbanos". La preocupación es el cambio abrupto en el contorno y la posibilidad de constricción de flujo en una tubería debido al abultamiento de metal de soldadura adicional.
- Socavado (undercut): Es una depresión que se produce en el borde de la soldadura donde se fusionó con el metal base en la superficie externa o interna. Es como un ligero "valle" que continúa a lo largo de la soldadura y varía en profundidad. La profundidad es la dimensión mensurable que determina su seriedad.

- Socavación del cordón (Underfill): A veces se interpreta como socavado porque puede aparecer en la misma región de la soldadura. De hecho, es lo contrario, ocurre cuando la ranura de soldadura no está completamente llena de metal de soldadura. Además, a diferencia del corte inferior, el contorno de la parte inferior de esta condición tiene más forma de V o de muesca en comparación con la configuración gradual generalmente amplia del recorte.
- Exceso de material (Overreinforcement): Esta condición resulta de un depósito excesivo de metal de soldadura en la superficie externa de la soldadura. La preocupación es el cambio geométrico que puede crear una condición de aumento de tensión en la superficie exterior donde las tensiones normalmente tienden a ser más altas por diseño.

### ***2.1.2. Ultrasonido***

El uso de la energía del sonido para determinar la integridad de los objetos sólidos es posiblemente tan antiguo como la habilidad de la humanidad para fabricar objetos en cerámica y metal.

Cualquier interrupción importante de la homogeneidad del objeto distorsionará la frecuencia natural e indicará que hay un problema, pero no fue hasta que existió la capacidad de generar y detectar ondas de sonido a frecuencias mucho más altas que se pudieron detectar discontinuidades más pequeñas en los metales.

Los primeros pasos hacia esta habilidad se dieron en la década de 1870 con la publicación del trabajo sobre el sonido "The Theory of Sound" de Lord Rayleigh, en el cual se explicó la naturaleza y propiedades de las ondas de sonido en sólidos, líquidos y gases, lo que llevó al desarrollo de las técnicas que actualmente se usan en pruebas no destructivas.

En 1880, los Curie descubrieron que se podía generar un potencial eléctrico aplicando presión mecánica a placas cortadas de manera particular de ciertos cristales.

Cristales de cuarzo, turmalina y sal de Rochelle de origen natural se encuentran entre los materiales que muestran el efecto piezoeléctrico.

Con el paso de los años, se han realizado muchos usos de este efecto, desde micrófonos de cristal y pastillas de gramófono hasta generadores de chispas para encendedores de cigarrillos y, por supuesto, transductores ultrasónicos para END.

S. Y. Sokolov, en Rusia, fue el primero en sugerir el uso de ondas ultrasónicas para detectar discontinuidades en metales. En 1929 describió algunos experimentos en los que generó ondas ultrasónicas en metales, incluidas muestras de hierro y acero, que posteriormente se seccionaron. En 1935 describió su diseño para transductores piezoeléctricos para generar y detectar ultrasonidos, incluyendo un método para acoplar el sonido al metal. Su método consistía en una técnica de transmisión que usaba ondas continuas con transductores de cuarzo y mercurio como un acoplador, utilizando un generador de corriente alterna para impulsar el transmisor de cristal de cuarzo, y las vibraciones llegaban al receptor provocando una señal alterna que podía medirse. (Hellier, 2003)

Fue Silk, en 1977, quien utilizó por primera vez la técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD) para mostrar los bordes superior e inferior de las discontinuidades de una manera que permitiría una mayor precisión en la medición del grosor total. El método emplea transductores de onda de compresión en ángulo, ubicados en la misma superficie, para transmitir y recibir sonido. Las señales de difracción de onda lateral y punta permiten una triangulación precisa de los bordes superior e inferior del reflector. Los recientes avances en la instrumentación que permiten el análisis en tiempo real y posterior a la inspección de los resultados utilizando la tecnología informática han aumentado el número de usuarios que explotan esta técnica. (Hellier, 2003)

#### *2.1.2.1. Naturaleza de las ondas sonoras*

Las ondas sonoras no son más que vibraciones de las partículas que forman un sólido, líquido o gas. Como una forma de energía, son por lo tanto un ejemplo de energía mecánica, y se deduce que debe existir algo para vibrar, las ondas de sonido no pueden existir en el vacío. (Hellier, 2003)

La audición es el único sentido humano que puede detectar ondas sonoras, y ese sentido está restringido a un rango estrecho de frecuencias de vibración llamado "rango audible". A partir de esto se sabe que habrá frecuencias de vibración tan bajas o tan altas que no podrán ser detectadas por el oído humano.

La unidad de frecuencia es el hercio (Hz), que se define como "un ciclo de vibración por segundo". El rango audible se encuentra entre 16 Hz y 20 000 Hz. Los sonidos menores a 16 Hz se denominan "vibraciones subsónicas" y los sonidos superiores a 20,000 Hz se denominan "vibraciones ultrasónicas". Es más común usar el término "tono" para referirse a la frecuencia; un tono agudo significa alta frecuencia audible, y un tono bajo significa baja frecuencia audible. (Hellier, 2003)

Para convertir las ondas de sonido en energía eléctrica para que se puedan mostrar como señales visuales en una pantalla de tubo de rayos catódicos (CRT) o en una pantalla de cristal líquido (LCD) se utilizan los transductores. Gracias a esto se puede detectar y estudiar todos los sonidos, incluso los que están fuera del rango audible.

Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía a otra, y viceversa. Los materiales que exhiben el efecto piezoeléctrico se usan comúnmente para generar y detectar ondas de sonido.

#### 2.1.2.2. Modos de propagación

El tipo o modo de propagación de ondas de compresión pueden existir en sólidos, líquidos o gases. Pueden existir otros modos de vibración, pero solo en sólidos.

Las distintas formas en que el sonido se puede propagar se diferencian generalmente por la dirección del movimiento de la partícula en relación con la dirección en la que viaja la onda de sonido.

Los tres medios tienen fuerzas que unen a las partículas para resistir la compresión o la tensión. En sólidos, esta resistencia la proporciona el módulo de elasticidad, conocido como "módulo de Young". Los sólidos, a diferencia de los líquidos y gases, también tienen rigidez que es una resistencia a las fuerzas cortantes.

Los cuatro modos principales de propagación son las ondas de compresión, las ondas de corte, las ondas superficiales y las ondas de placa.

Cada una de estas tiene un nombre alternativo que a veces se usa. Estos nombres alternativos son:

- *Ondas de compresión u ondas longitudinales.* Se producen en la dirección de propagación.
- *Ondas de corte u ondas transversales.* Se producen de manera perpendicular a la dirección de propagación, son características de los medios sólidos, aunque también se presentan en líquidos muy viscosos.
- *Ondas superficiales u ondas Rayleigh.* Las partículas se mueven en sentido elíptico en dirección vertical-normal a la dirección de propagación.
- *Las Ondas de Lamb u ondas de placa.* Solo se produce en placas muy delgadas y es una combinación de ondas transversales y longitudinales. El comportamiento depende de las propiedades del material como densidad, geometría, espesor.

#### 2.1.2.3. Propiedades de las ondas de sonido

- *Velocidad:* La velocidad del sonido depende del tipo de material. Los factores principales que afectan la velocidad son la densidad y la elasticidad del material.
- *Longitud de onda:* Distancia a la que se encuentran dos planos en los que las partículas se encuentran en la misma condición de movimiento.
- *Reflexión:* El límite entre un medio y otro, se denomina "interfaz". En una interfaz, un porcentaje de las ondas de sonido puede transmitirse al siguiente medio y el sobrante se refleja hacia primer medio. En el caso de una interfaz de acero a aire, casi toda la energía se refleja y prácticamente ninguna sale al aire. Si el acero está bajo el agua, de modo que hay una interfaz de acero a agua, el 88% de la energía se refleja

y el 12% se transmite al agua. Las proporciones que se reflejarán o transmitirán dependen de las propiedades de los materiales en ambos lados de la interfaz.

- *Conversión de modo:* A medida que el rayo de sonido se introduce en un ángulo de incidencia con respecto a un sólido, comienza a surgir otro fenómeno, que es la conversión de modo.
- *Haz de propagación:* En el campo cercano, se considera que el rayo es más o menos cilíndrico y tiene el mismo diámetro que el cristal transductor. Más allá del campo cercano, en lo que se llama el "campo lejano", el rayo se extiende como un cono.

#### 2.1.2.4. Atenuación de las ondas de Ultrasonido

Las ondas de ultrasonido van atenuándose conforme atraviesan el elemento a inspeccionar, por lo que es importante conocer cuál es la intensidad que va a recibir en comparación con la intensidad que se emitió el pulso. Hay muchos factores que alteran el pulso original como son la geometría del elemento, el material, la frecuencia, la configuración del transductor, entre otros.

Los efectos que producen atenuación de las ondas de ultrasonido son:

- *Disipación de la energía acústica:* A medida que la onda se aleja de la fuente, esta se va distribuyendo cada vez en un área mayor, lo que reduce su intensidad por unidad de área.
- *Absorción:* El sonido se propaga a través de la vibración de partículas en un sólido, líquido o gas, el movimiento de estas partículas provoca fricción y absorbe parte de la energía. La velocidad con la que se absorbe la energía depende del material a través del cual pasa el sonido y la frecuencia del sonido. En general, a mayor frecuencia, mayor absorción; o, dicho de otra manera, cuanto menor es la frecuencia del sonido, más penetra en el material.

- *Colisión:* Este depende de la anisotropía y tamaño del grano que conforma el elemento. Se produce un cambio brusco en la impedancia acústica debido al cambio de densidad en las “micro fronteras” entre granos.
- *Impedancia acústica:* Es una pérdida que se presentan en la interfaz transductor-pieza a analizar cuando se produce la emisión y recepción de la onda de sonido. En algunas técnicas se utiliza agua como medio de acoplamiento, en las que la pérdida se produce en la interfaz agua-metal.

#### 2.1.2.5. Técnicas

La manera en que las ondas sonoras se propagan a través de los materiales y se atenúan, reflejan o transmiten dictan los diferentes métodos o técnicas ultrasónicas utilizadas para detectar los diferentes tipos de discontinuidades que pueden existir en los materiales. Estas técnicas se dividen principalmente en dos categorías, una llamada "pulso-eco" y la otra llamada "transmisión directa".

Cualquiera de las técnicas que pueden usarse requiere la calibración del sistema ultrasónico para que la base de tiempo pueda tener algún significado en términos de espesor del material. Esto también se cumple para las técnicas de transmisión donde la información de profundidad no está disponible, ya que el profesional necesita estar seguro de que se dispone de una base de tiempo adecuada para mostrar la energía transmitida.

#### - *Técnicas de pulso-eco*

En esta técnica se hace uso de ondas longitudinales, de corte, superficiales o de Lamb. Para esta técnica se utilizan transductores especiales que se encargan de emitir y recibir el ultrasonido, con los cuales se genera el pulso, se lo transmite al elemento a analizar y el mismo recibe el pulso inicial y también la onda reflejada. Al detectarse una irregularidad la onda se refleja hacia otro lado y no es detectada por el transductor.

Este tipo de ensayos son los más utilizados debido a que solo se requiere tener acceso a un solo lado del elemento. En la práctica se pueden utilizar transductores simples o dobles. Para el caso del uso de transductor simple, este actúa como transmisor y receptor, mientras que,

en el uso de transductores dobles, uno actúa de emisor y el otro de receptor. El uso de transductores dobles permite detectar defectos en zonas más cercanas, ya que cada transductor se configura para realizar una función específica y la sensibilidad de estos es mayor, a diferencia de los transductores simples que deben realizar una doble función al mismo tiempo.

- *Técnicas de transmisión directa*

En esta técnica se aplica la onda de ultrasonido en un punto específico del elemento y en el lado opuesto de ese mismo punto se recibe la señal. Una limitación de esta técnica es que no se puede conocer la localización de la falla en caso de existir debido a que solo se puede recibir la onda atenuada. Resulta adecuado el uso de esta técnica para elementos cuyo material posee un alto grado de atenuación como son los materiales compuestos o los polímeros. Ya que se debe colocar un receptor en el lado opuesto del emisor, es de vital importancia la correcta alineación de estos dos.

## 2.2.TÉCNICAS SUPERFICIALES

Las inspecciones superficiales son la principal forma de detección de fallas en elementos mecánicos o estructurales bajo condiciones servicio. El primer síntoma de falla se manifiesta de manera superficial que se hace “visible”, y que básicamente es detectable a través de una inspección superficial. Este tipo de ensayos es de muy bajo costo y el tiempo de aplicación es relativamente bajo, poseen un amplio campo de aplicaciones, por lo que son los más importantes de todos los END que se realizan. Dentro de las técnicas superficiales, la más utilizada es la inspección visual, ya que se realiza en al menos el 90% de todos los casos de inspección. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

La evaluación superficial es la de mayor importancia ya que sus resultados son fundamentales para justificar otros tipos de inspección.

### *2.2.1. Inspección visual*

El método visual es la técnica de END más utilizada, y es la que permite detectar el 80% de fallas presentes en elementos estructurales. La técnica de inspección visual se puede dividir en dos grupos principales: inspecciones directas e indirectas.

En la inspección directa se hace uso de herramientas ópticas como telescopios, microscopios, endoscopios, periscopios, proyectores ópticos, comparadores, o dispositivos de procesamiento de imágenes en tiempo real. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

En la inspección indirecta se analiza el objeto a través de un análisis posterior mediante fotografías o video grabaciones.

Una correcta interpretación depende principalmente del conocimiento del analista en lo referente a las propiedades y características del elemento.

#### *2.2.1.1. Herramientas útiles para la inspección visual*

Es muy frecuente el uso de herramientas que ayuden a detectar fallas en lugares inaccesibles del elemento a analizar, estas se clasifican en cuatro tipos:

- *Fuentes de luz.* Su uso es de mucha importancia ya que con el manejo de la luz y la configuración del contraste con el fondo se puede hacer visibles fallas que a simple vista son imposible de identificar. Se puede controlar la intensidad, el contraste y también se puede intentar cambiar el fondo mediante el uso de pantallas.
  
- *Magnificadores de imagen.* Son herramientas ópticas que se usan para ampliar el área de inspección. Entre estas están las lupas y los microscopios. Generalmente, los macroscópicos amplifican la imagen entre 5X y 10X, y los microscopios amplifican la imagen entre 10X y 200X.

- *Endoscopios y equipos para la observación remota.* Cuando no se tiene el espacio suficiente para realizar la inspección directamente en el elemento, se puede utilizar los endoscopios, que ayudan a la visualización de manera remota. Entre estos están los telescopios y los drones o robots equipados con una cámara y controlados a distancia. Gracias al uso de estas herramientas se puede realizar una inspección visual en la parte interna de los elementos sin la necesidad de desarmar. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)
  
- *Sensores de imagen.* Son los equipos de fotografía o video que se utilizan con la finalidad de documentar la inspección. Posteriormente las imágenes son procesadas para obtener un mejor resultado y poder identificar de mejor manera las fallas.

#### 2.2.1.2. Características generales de la inspección visual

- *Ventajas del método visual:*
  - Es un método de visualización directa.
  - Se puede usar junto a otros métodos.
  - Es de muy bajo costo.
  - Los resultados obtenidos son inmediatos
  - No requiere tener un conocimiento avanzado.
  - Es inofensivo y no se requiere un grado alto de seguridad.
  - Es un método de ensayo rápido.
  
- *Limitaciones:*
  - Sólo se puede analizar el elemento superficialmente.
  - Se debe limpiar la superficie de inspección.
  - Solo se puede analizar zonas accesibles.

- Depende completamente de la agudeza visual del inspector.
- Los resultados dependen principalmente de factores humanos.
- La probabilidad de detección de fallas es muy pequeña en comparación a otros métodos.

### 2.2.2. Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes (PT) es uno de los ensayos más utilizados para la detección de fallas superficiales ya que puede ser aplicado a cualquier material magnético o no magnético, existiendo variantes en el método para adaptarse a diferentes tamaños y formas del elemento a analizar. Este método se fundamenta en la acción capilar, y en la capacidad que tienen los líquidos de baja viscosidad para atravesar grietas que no se pueden detectar a simple vista. Estas propiedades dependen de la tensión superficial y la capacidad del líquido para mojar la superficie del material. La humectación se puede determinar con el Angulo que se forma entre el punto de contacto de una gota y la superficie.

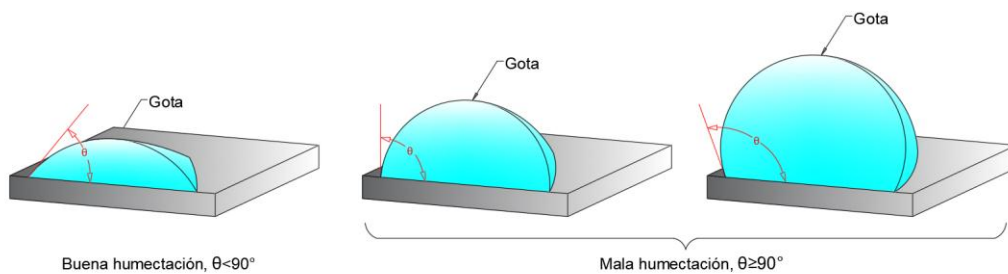


Figura 6: Humectación a partir del ángulo entre la gota y la superficie.  
 Fuente: (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)  
 Elaboración: Propia

Otra forma de medir dicha capacidad es midiendo la altura a la que un líquido sube por un tubo capilar.

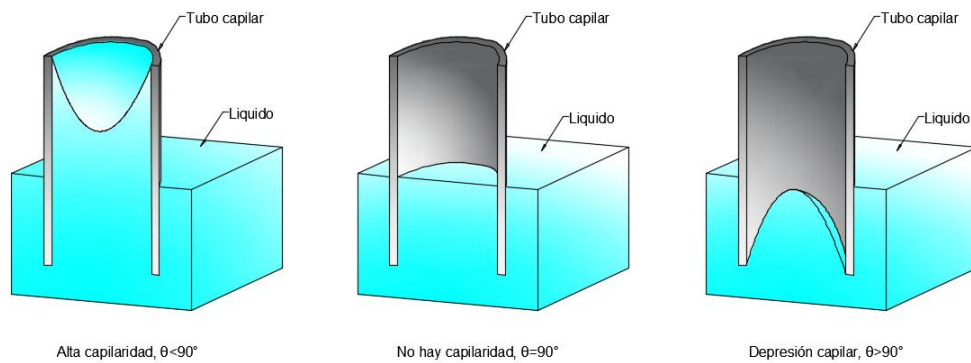


Figura 7: Capilaridad de un líquido.

Fuente: (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)  
Elaboración: Propia

#### 2.2.2.1. Tipos de líquidos Penetrantes

Al momento de seleccionar un método, se debe tomar en cuenta ciertos aspectos como son la geometría y peso del elemento. Pero ya en la práctica surgen otros factores importantes que son el costo y la sensibilidad del ensayo, los cuales están directamente relacionados entre sí, a mayor sensibilidad mayor costo.

Aunque este tipo de inspección es simple, para lograr el mejor resultado posible es necesario seleccionar correctamente el líquido a usar. Hay una gran variedad de líquidos con diferentes propiedades como:

- Capacidad de humectación.
- Viscosidad
- Capilaridad
- Tensión superficial
- Secado
- Corrosividad
- Inflamación
- Fácil de remover o limpiar
- Color brillante y estable

Los líquidos también se clasifican por sus características en dos tipos, siendo estos:

- *Tipo I. Fluorescentes.* Se utilizan para dar un mayor realce a las grietas. La principal característica de estos líquidos es como su nombre lo indica la fluorescencia al estar expuestos a luz ultravioleta. La mayoría de estos líquidos son de color verde y dependiendo su sensibilidad a la luz se tiene cinco niveles:
  - Nivel ½. Ultra baja sensibilidad.
  - Nivel 1. Baja sensibilidad.
  - Nivel 2. Media sensibilidad.
  - Nivel 3. Alta sensibilidad.
  - Nivel 4. Muy alta sensibilidad.
  
- *Tipo II. Visibles o no fluorescentes.* Generalmente son de color rojo y se caracterizan por ser visibles en condiciones ambientales. Comparando con los líquidos fluorescentes, estos equivalen al nivel 1.

#### 2.2.2.2. Clasificación según el tipo de revelador

El revelador es el componente encargado de hacer visibles las grietas y amplificar su presencia para que sean visibles. Existen cuatro formas de reveladores:

- *Forma A.* son polvos secos y que generalmente usados en el tipo I de líquidos penetrantes.
- *Forma B.* Son reveladores líquidos solubles en agua para inspección tipo I o II, y que se aplican para penetrantes no solubles en agua.
- *Forma C.* Suspensión en agua para inspecciones tipo I y II, y la
- *Forma D.* Soluciones no acuosas de alta sensibilidad, para inspecciones tipo I o II.

#### 2.2.2.3. Métodos de inspección por líquidos penetrantes

Los diferentes métodos se clasifican según la manera de remover el líquido penetrante, existen 4 métodos diferentes:

- *Método A. Soluble en agua.* Luego de realizada la inspección, estos pueden ser removidos directamente con agua. Su uso es muy frecuente para inspecciones rápidas. La desventaja de usar este líquido es su baja sensibilidad debido a su composición. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)
- *Método B. Emulsión, base aceite.* Luego de aplicar el líquido penetrante sobre la superficie, se coloca una emulsión a base de aceite, que únicamente actúa en el excedente, lo que lo hace fácil de remover con agua y evitando eliminar el líquido de las grietas. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)
- *Método C. Penetrante, base solvente.* El funcionamiento es igual que el líquido soluble en agua, a diferencia que este usa un solvente. La ventaja que tiene en comparación con el primer método es que tiene mayor sensibilidad, pero es más complicada su preparación. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)
- *Método D. Emulsión, base agua.* Es igual al método B, con la diferencia que la emulsión que se aplica al excedente del líquido penetrante soluble en agua. Con este método se puede obtener una muy alta sensibilidad. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

### 2.2.3. Partículas magnéticas

Este método es aplicado para detectar grietas cerca de la superficie de materiales ferromagnéticos.

La forma más común de observar el campo magnético es mediante el uso de partículas ferromagnéticas. Esta técnica consiste en magnetizar el área a examinar y aplicar partículas ferromagnéticas, de esta manera las partículas formaran patrones en las grietas. Estos patrones son característicos de del tipo de discontinuidad presente.

Hay distintos tipos de partículas magnéticas que se aplican según el ambiente seco o húmedo, las hay de diferentes colores y también fluorescentes.

Además de las partículas magnéticas, se utilizan para hacer “visible” el campo magnético sensores que incluyen pinturas, hules, impresiones, o laminillas magnéticas.

### 2.2.3.1. Principios básicos del magnetismo

El ferromagnetismo está basado en el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld, donde un electrón gira sobre su propio eje. Este genera un momento magnético en donde la polaridad está dada por la dirección del giro.

Cuando dos electrones giran en direcciones opuestas, el momento magnético total se anula, es decir es cero, esto es característico de los materiales no magnéticos. A diferencia de los ferromagnéticos que generan un momento magnético diferente a cero.

La idea de crear una metodología aprovechando el magnetismo surge de Barkhausen en 1919, en donde demostró que el magnetismo es un proceso discontinuo en el cual a medida que aumenta la magnitud de un campo magnético externo la magnetización se realiza en pasos repentinos. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

El uso de una corriente eléctrica para magnetizar un elemento se llama proceso electromagnético. El campo magnético se produce cuando se hace pasar una corriente por un conductor y de manera inversa se genera corriente en el conductor aplicando un campo magnético externo. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

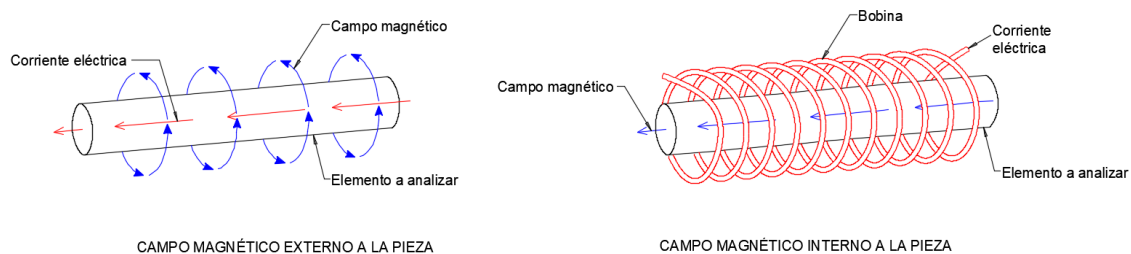


Figura 8: Métodos de magnetización.  
Fuente: (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)  
Elaboración: Propia

### 2.2.3.2. Generación del campo magnético

Los métodos de inspección se describen según la aplicación del campo magnético:

- *El método continuo*, es cuando el campo magnético permanece constante durante la inspección.
- *El método por campo residual*, que se aplica en materiales que tienen alta capacidad para retención del campo magnético. Consiste en aplicar y retirar un campo magnético y luego medir la magnetización residual.

### 2.2.3.3. Métodos de magnetización de elementos

- *Yugos*. En esta técnica se utiliza un magneto denominado yugo, el cual se le aplica corriente alterna o directa, o un campo magnético permanente. Al utilizarlo directamente sobre el elemento, este genera un campo magnético en el que las líneas conectan ambos polos del magneto.

Si la falla se produce en la misma dirección de las líneas del campo magnético, la falla es difícil de observar, pero si se orienta de manera perpendicular, la falla es fácilmente detectable. Con el uso de yugos se tiene la posibilidad de modificar la orientación del campo magnético.

Para llevar a cabo la inspección se puede usar dos tipos de yugos:

- Yugos permanentes. No requieren energía externa para funcionar, por lo que es muy útil en casos donde no se tiene acceso a la energía eléctrica. La desventaja de estos es que no tienen la potencia necesaria para cubrir grandes áreas y tampoco se pueden desmagnetizar por lo que resulta complicado separarlos de la pieza a analizar.
- Electroimanes. Poseen una bobina eléctrica para inducir el campo magnético. Estos utilizan corriente alterna o directa.

- *Bobinas.* Son usadas para generar un campo magnético en el interior de la propia pieza. Esto produce un magnetismo longitudinal en el elemento a medida que la corriente fluye a través de la bobina. El uso de esta técnica no provoca daños térmicos ya que la corriente no se transmite directamente por el elemento.
- *Conductores centrales.* Se usa para piezas con agujeros, en la que se coloca el conductor por el centro de esta y se induce una corriente para generar el campo magnético. Al igual que la técnica de bobina es indirecta porque la corriente se transmite por el conductor y no por el elemento. Ya que esta técnica produce un campo magnético circular, es posible analizar superficies internas y externas.
- *Contacto directo.* Se aplica la corriente eléctrica directamente a la pieza a evaluar, colocando contactos eléctricos en los extremos para magnetizar la pieza en su totalidad. La inspección a través de este método suele ser rápida, aunque tiene la desventaja de que se requiere una alta corriente eléctrica dependiendo el tamaño de la pieza.
- *Puntas de contacto.* Se hace fluir corriente eléctrica por las puntas hacia el material inspeccionado. El campo magnético forma círculos alrededor de cada punta, por lo que se logra una sensibilidad en grietas perpendiculares al campo magnético.

#### 2.2.3.4. Histéresis magnética y desmagnetización

Algunos materiales tienen la propiedad de seguir magnetizados aun después de retirado el campo magnético. Este magnetismo residual en muchos casos es un problema, por esta razón se debe desmagnetizar el elemento.

#### 2.2.3.5. Desmagnetización

Este proceso se debe realizar cuando se considera que la magnetización residual es un problema que afectara el desempeño de la pieza.

- *Desmagnetización antes del análisis.* Si la pieza se ha dejado con un campo residual en una dirección diferente al nuevo campo magnético a ser aplicado, el campo resultante será la suma vectorial del magnetismo residual y el campo recién aplicado. La dirección

del campo resultante, por lo tanto, no será precisamente en la dirección prevista; por lo tanto, la sensibilidad puede ser reducida. Se recomienda la desmagnetización en este caso.

- *Desmagnetización luego del análisis.* Un campo residual en un componente puesto nuevamente a servicio puede tener un efecto perjudicial en futuros análisis del elemento o en equipos cercanos. En el caso de requerir un proceso de maquinado en el que las esquilas se pueden adherir a la pieza, afectando el maquinado de la misma. También representa un problema cuando la pieza se va a soldar o se le va a colocar un recubrimiento.

## 2.3.CÓDIGOS Y NORMAS DE REFERENCIA

### 2.3.1. AISC-360

El código de diseño de estructuras de acero AISC-360 ([American Institute of Steel Construction](#)) recomiendan un plan de garantía de calidad que debe ser elaborado por un fiscalizador, este plan de garantía debe incluir los procesos de END que se rigen a los códigos AWS D1.1 y AWS D1.3 (Structural Welding Code Steel) según la aplicación requerida.

### 2.3.2. ASME-V

Hay una sección específica del código que contiene requisitos y métodos para la aplicación de ensayos no destructivos (END), que son requisitos para otras Secciones del mismo código o referencias. Estos métodos de END están destinados a detectar imperfecciones superficiales e internas en los materiales, soldaduras, partes prefabricadas y otros componentes. Incluyen exámenes radiográficos, ultrasonido, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corriente de Foucault, inspección visual, prueba de fugas y emisiones acústicas.

### 2.3.3. AWS D1.1

El código estructural AWS D1.1 menciona en el capítulo 6 del mismo las especificaciones para distintas técnicas No destructivas que deben cumplir las probetas a ensayar y contiene

todos los requisitos para las calificaciones y responsabilidades del inspector, los criterios de aceptación para las discontinuidades y los procedimientos para el END.

#### ***2.3.4. ISO 9712-3***

Otro suceso importante en el desarrollo de la inspección no destructiva se llevó a cabo en el año 2012 con la implementación de la normativa ISO 9712-3, que es la normativa más actual existente para la capacitación, calificación y certificación del personal que realiza END (Luna, 2015).

#### ***2.3.5. NEC-SE-AC***

La norma NEC-SE-AC menciona las probetas que en la presente tesis serán ensayadas y se registrarán a las especificaciones ahí descritas.

NEC-SE-AC de estructuras de acero menciona un plan de garantía de calidad (PGC) que debe incluir una técnica de control de calidad en estructuras metálicas mediante el uso de técnicas no destructivas (NEC-SE-AC, 2015).

## **2.4.MATERIALES Y ESTRUCTURAS A ENSAYAR**

En la actualidad el uso de estructuras metálicas en la construcción de edificaciones y puentes ha aumentado y desarrollado ampliamente debido a las diferentes aplicaciones y beneficios que ofrece en la actualidad la estructura metálica.

Una de las partes críticas de la estructura es la conexión entre las piezas metálicas en la presente tesis se evaluarán las conexiones soldadas que se conocen como la unión de elementos estructurales metálicos a través de calentamiento para poder lograr un estado plástico del material con o sin la ayuda de un material adicional de refuerzo.

El realizar una END en una conexión soldada nos ayuda a tener garantía y seguridad en la estructura ya que la falla de una de las conexiones de la edificación podría causar el colapso de toda la estructura.

Para analizar y evaluar las conexiones soldadas en el capítulo 10 de la norma NEC-SE-AC se establece que para realizar una END de un elemento estructural se debe regir a las especificaciones que presenta el capítulo 6 del código AWS D1.1. Las probetas que se analizaron en la presente tesis serán las que el código AWS D1.1 propone para realizar END.

## 2.5. CRITERIO PARA SELECCIONAR UNA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA

Cuando es necesaria una inspección no destructiva de un elemento estructural o componente mecánico, la duda que surge es cuál técnica aplicar. Esto se puede determinar teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Defectos potenciales y su localización.
- Orientación del defecto.
- Forma del objeto a inspeccionar.
- Material a inspeccionar.

En la práctica, se suele realizar más de dos tipos de inspección no destructiva en un solo elemento para detectar discontinuidades o defectos con la finalidad de aumentar la velocidad de inspección. En estos casos, no es recomendable aplicar una técnica en reemplazo de otra, ya que el resultado final es desfavorable. Pero si es conveniente realizar distintos tipos de ensayos que lleven a confirmar fallas en el elemento y en otros casos a descartar indicaciones falsas (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003).

La tabla 1 contiene los datos sobre los ensayos no destructivos volumétricos, donde se categorizan los defectos, ventajas y limitaciones de cada uno.

Tabla 1: Características principales de las técnicas volumétricas para END.

Fuente: (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

Elaboración propia.

| <b>PRUEBA</b>                 | <b>DEFECTO</b>   | <b>SE PRESENTA</b>  | <b>VENTAJAS</b>  | <b>LIMITACIONES</b>   |
|-------------------------------|--|---|--|---|
| <b>Emisiones acústicas</b>    | Grietas, velocidad de crecimiento de grietas, fatiga y corrosión.                                      | Metales, aceros estructurales de estructuras de concreto.   | Localiza puntos de falla con alta precisión; determina parámetros para estimar vida útil de los elementos.   | Costo relativamente elevado; análisis e interpretación de datos son complejos.  |
| <b>Radiografía industrial</b> | Grietas, inclusiones, porosidad. Uniformidad del material.   | Fundición, forja, partes maquinadas, soldaduras, componentes electrónicos, materiales compuestos.                               | Detecta fallas internas; usada en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene una impresión permanente; se obtiene información cualitativa y cuantitativa.               | Alto costo de operación, no puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas; se obtienen impresiones en 2D de estructuras en 3D.     |
| <b>Ultrasonido</b>            | Grietas, adherencia, porosidad, inclusiones, defectos de laminación, corrosión, medición de espesores. | Soldadura, aleaciones, adherencia entre materiales, difusión en el pegado, materiales compuestos, tuberías y tanques a presión. | Detecta defectos internos y los muestra en 3D; utilizado en diferentes tipos de geometría y materiales, se obtiene un registro permanente; obtiene información cuantitativa y cualitativa. | Difícil de aplicar en geometrías complejas; generalmente requiere de agua u otro tipo de acoplante; algunas veces se dificulta la interpretación. |

En la tabla 2 se presenta las características de los ensayos no destructivos superficiales, donde se detallan los defectos, las ventajas y las limitaciones que se tiene al utilizar cada uno de ellos.

Tabla 2: Características principales de las técnicas superficiales que se utilizan en END  
 Fuente: (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)  
 Elaboración propia

| <b>PRUEBA</b>                | <b>TIPO DE DEFECTO</b>  | <b>SE PRESENTA EN:</b>  | <b>VENTAJAS</b>   | <b>LIMITACIONES</b>   |
|------------------------------|---|---|---|---|
| <b>Líquidos penetrantes</b>  | Grietas, vacíos, porosidades y uniones entre piezas laminadas, picaduras superficiales. | Soldadura, forja, maquinados superficiales, fundición, grietas en componentes sujetos a fatiga o esfuerzos debido a la corrosión. | Bajo costo de aplicación, fácil de implementar e interpretar, portátil, tiene alta sensibilidad para discontinuidades abiertas y de poca profundidad.                                 | La falla debe estar abierta en la superficie; requiere inmersión del líquido penetrante; la profundidad es difícil de estimar; puede dar indicaciones falsas por irregularidades. |
| <b>Partículas magnéticas</b> | Grietas, vacíos, defectos de laminación y unión entre piezas laminadas.                 | Fundición ferromagnética, forja, extrusión, laminación, rolado.   | Requiere poca preparación, limpieza; es un método rápido y económico; revela discontinuidades que no afloran a la superficie; cuenta con alto espectro de alternativas de aplicación. | Se aplica solo a materiales ferromagnéticos; detecta fallas próximas a la superficie; solo detecta discontinuidades perpendiculares al campo magnético.                           |

## CAPITULO III: METODOLOGÍAS DE INSPECCIÓN

En el presente capítulo se va a desarrollar las metodologías de inspección superficiales y volumétricas tomando como referencia la normativa AWS D1.1: 2015.

### 3.1. SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS

Para la ejecución de los diferentes ensayos no destructivos se realizaron probetas de acuerdo a lo establecido en la normativa AWS D1.1 las mismas que se utilizan para la calificación de soldadores, cuyas dimensiones son 15x15 cm. Para la soldadura se escogió el proceso SMAW ya que es el más utilizado en el país y es el que más discontinuidades presenta al momento de su realización.

Establecido el tipo de soldadura, se procede a la selección del material base y material de aporte, para lo cual nos regimos a la tabla 3.1 de la normativa AWS D1.1, que nos indica que para un proceso de soldadura tipo SMAW y para una placa de acero de espesor menor a 20 mm, el material base debe ser de especificación A36, y para el material de relleno lo establecemos de acuerdo a la tabla 3.2 de la normativa AWS D1.1 que indica que los electrodos recomendados para metales del grupo I son los E60XX y E70XX.

La tabla 3 contiene un resumen de los datos del material base a utilizar para un proceso de soldadura SMAW de acuerdo a la tabla 3.1 de la normativa AWS D1.1.

Tabla 3: Metales base aprobados para WPS precalificadas  
Fuente: Tabla 3.1 AWS D1.1:2015  
Elaboración propia

| <b>Metales base aprobados para WPS precalificadas</b> |                                 |        |                               |            |                          |            |
|---|---------------------------------|--------|-------------------------------|------------|--------------------------|------------|
| <b>Requisitos de la especificación del acero</b>      |                                 |        |                               |            |                          |            |
|   | <b>Especificación del acero</b> |        | <b>Límite elástico mínimo</b> |            | <b>Rango de tracción</b> |            |
|   |                                 |        | <b>ksi</b>                    | <b>MPa</b> | <b>ksi</b>               | <b>MPa</b> |
| <i>Grupo I</i>  | ASTM A36                        | ≤ 20mm | 36                            | 250        | 50 - 80                  | 400 - 550  |

En la tabla 4 se observan las especificaciones de los electrodos a utilizar para las probetas con metal base tipo 1 de acuerdo a la tabla 3.1 de la normativa AWS D1.1.

Tabla 4: Metal de aporte para las resistencias coincidentes  
Fuente: Tabla 3.2 AWS D1.1: 2015  
Elaboración propia

| <b>Metal de aporte para las resistencias coincidentes</b> |   |             |                                   |  |   |
|---|---|-------------|-----------------------------------|--|---|
| <b>Metales según grupo para soldadura SMAW y SAW</b>      |   |             |                                   |  |   |
| <b>Grupo de metal base</b>                                | <b>Especificación AWS del electrodo</b> | <b>SMAW</b> |                                   | <b>SAW</b>                               |   |
|   |   | <b>I</b>    | Clasificación de electrodo de AWS | A5.1, Acero al carbono<br>E60XX<br>E70XX | A5.5 <sup>a</sup> , Acero de baja aleación<br>E70XX-X |

### 3.1.1. Diseño de la junta

El diseño de la junta es un bisel en forma de V, ya que es más utilizado cuando se realizan cordones de soldadura.

La normativa AWS D1.1 figura 3.3 establece que, para una junta en forma de V, el ángulo de la ranura debe ser de 60 grados.

| Proceso de soldadura | Designación de la junta | Espesor del metal base |       | Preparación de la ranura                                      |   | Posiciones de soldadura permitida              | Gas de protección para FCAW | Notas          |                                 |
|----------------------|-------------------------|------------------------|-------|---|---|--|-----------------------------|----------------|---------------------------------|
|                      |                         | T1                     | T2    | Abertura de la raíz<br>Cara de la raíz<br>Angulo de la ranura | Tolerancias   |  |                             |                |                                 |
|                      |                         |                        |       |   | Según detalle (ver 3.13.1)                                    |  |                             |                | Según acoplamiento (ver 3.13.1) |
| SMAW                 | B-U2                    | U                      | ----- | R = 0 a 3<br>f = 0 a 3<br>$\alpha = 60^\circ$                 | $+2, -0$<br>$+2, -0$<br>$+10^\circ, -0^\circ$                 | $+2, -3$<br>Ilimitado<br>$+10^\circ, -5^\circ$ | Todas                       | -----          | d, e, j                         |
| GMAW<br>FCAW         | B-U2-GF                 | U                      | ----- | R = 0 a 3<br>f = 0 a 3<br>$\alpha = 60^\circ$                 | $+2, -0$<br>$+2, -0$<br>$+10^\circ, -0^\circ$                 | $+2, -3$<br>Ilimitado<br>$+10^\circ, -5^\circ$ | Todas                       | No se requiere | a, d, j                         |
| SAW                  | B-L2c-S                 | Mayor de 12 hasta 25   | ----- | R = 0 a 3<br>f = 6 max<br>$\alpha = 60^\circ$                 | R = $\pm 0$<br>f = $+0, -f$<br>$\alpha = +10^\circ, -0^\circ$ | $+2, -3$<br>$\pm 2$<br>$+10^\circ, -5^\circ$   | F                           | -----          | d, j                            |
|                      |                         | Mayor de 25 hasta 38   | ----- | R = 0 a 3<br>f = 12 max<br>$\alpha = 60^\circ$                |   |  |                             |                |                                 |
|                      |                         | Mayor de 38 hasta 50   | ----- | R = 0 a 3<br>f = 16 max<br>$\alpha = 60^\circ$                |   |  |                             |                |                                 |

Figura 9: Detalle de la junta soldada en ranura con junta de penetración completa  
Fuente: AWS D1.1: 2015  
Elaboración: Propia

### 3.2.PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

En esta sección se detalla el proceso de mecanizado del bisel en las probetas de acuerdo a la normativa AWS D1.1 como también el proceso de soldadura de las mismas.

#### *3.2.1. Preparación del material base*

Para cada probeta son necesarias 2 placas de 15x7.5 cm. Con la ayuda de la amoladora y un disco de corte apropiado se realizó el corte de un total de 6 placas de dimensiones 15x7.5 cm a partir de una plancha de acero A36 de 10mm de espesor.

Con las placas ya cortadas se procede a realizar el bisel. Como se requiere una ranura con un ángulo total de 60 grados, se realiza el bisel de cada placa que conforma la probeta con un ángulo de 30 grados.



*Figura 10: Biselado de las placas de acero*

*Fuente: Propia*

### 3.2.2. Realización de la soldadura

Para la realización de las soldaduras, se le presento al soldador una guía para el proceso de relleno, el cual indica la cantidad de cordones necesarios y la ubicación de los mismos.

1. Se procede a colocar las placas en la posición correcta, dejando una separación entre placas de 2mm, como se especifica en la figura 3.3 de la normativa AWS D1.1 (entre 0 y 3mm).



*Figura 11: Ranura tipo V con un ángulo total de 60 grados y separación de 2mm*

*Fuente: Propia*

2. Se realiza el primer cordón de soldadura y luego se limpia para el siguiente cordón de soldadura. Luego se realiza el mismo procedimiento hasta completar los pases.



*Figura 12: Realización del primer cordón de soldadura*

*Fuente: Propia*

### 3.3.METODOLOGÍAS PARA TÉCNICAS SUPERFICIALES

Las técnicas superficiales son las más importantes dentro de los END, ya que nos dan la información previa necesaria para saber si es factible la realización de los ensayos volumétricos. A continuación, se describen los procedimientos para realizar estas técnicas.

#### *3.3.1. Metodología para la inspección visual*

Como se mencionó en el capítulo anterior, se puede utilizar 2 técnicas de inspección, la directa y la indirecta.

Para el caso de la presente tesis se utilizará la técnica de inspección directa ya que se analizarán probetas cuyas dimensiones permiten una total manipulación de las mismas y únicamente será necesario el uso de herramientas básicas como son fuentes de luz y herramientas ópticas.

Finalmente se realiza un reporte escrito que contenga la siguiente información:

1. La fecha de la inspección.
2. Procedimiento realizado (Tipo de revisiones que se realizó).
3. Técnica utilizada.
4. Resultados de la inspección.
5. Identificación del personal que realizó la inspección y su nivel de calificación.
6. Identificación del elemento examinado.

Para llevar a cabo la inspección visual se evaluará de acuerdo con la normativa AWS D1.1 sección 6.9, la cual establece que las soldaduras serán aceptables si cumplen los criterios de la tabla 6.1 de la misma.

A continuación, en la tabla 5 se detallan los criterios de aceptación para realizar una inspección visual según la normativa AWS D1.1.

Tabla 5: Criterios de aceptación para Inspección Visual  
 Fuente: AWS D1.1: 2015  
 Elaboración propia

| <b>Criterios de aceptación para Inspección Visual AWS D1.1: 2015</b> |  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
|--|--|-----------|-----------|-------------------|-------------------|-----------|--------------|-------------------|------------------|
| <b>Categoría de discontinuidad</b>                                   | <b>Criterio de Aceptación</b>  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>1. Prohibición de grietas.</b>                                    | Cualquier grieta será inaceptable, independientemente de su tamaño o localización.   |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>2. Fusión del metal base / soldadura.</b>                         | Deberá existir una fusión completa entre las capas adyacentes del metal base y entre el metal de soldadura y el metal base.  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>3. Sección transversal del cráter.</b>                            | Todos los cráteres deberán rellenarse para proporcionar el tamaño de la soldadura especificada, a excepción de los extremos de las soldaduras de filete intermitente, fuera de su longitud efectiva.   |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>4. Perfiles de soldadura.</b>                                     | Los perfiles de la soldadura deberán estar conforme a la sección 5.24 de AWS D1.1  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>5. Tiempo de Inspección.</b>                                      | La inspección visual de las soldaduras en todos los aceros, puede empezar inmediatamente después de que las soldaduras completadas se hayan enfriado a temperatura ambiente. Los criterios de aceptación para ASTM A-514 y A-709 de aceros grados 100 y 100W deberán basarse en la inspección visual efectuada en no menos de 48 horas después de haber completado la soldadura.   |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>6. Soldadura sub dimensionada</b>                                 | El tamaño de la soldadura de filete en cualquier soldadura continua puede ser inferior al tamaño nominal especificado (L) sin corrección por las siguientes cantidades (U) <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">L (in/mm)</td> <td style="text-align: center;">U (in/mm)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\leq 3/16''</math> (5)</td> <td style="text-align: center;"><math>\leq 1/16''</math> (2)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1/4'' (6)</td> <td style="text-align: center;">3/32'' (2.5)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\geq 5/16''</math> (8)</td> <td style="text-align: center;"><math>\geq 1/8''</math> (3)</td> </tr> </table> | L (in/mm) | U (in/mm) | $\leq 3/16''$ (5) | $\leq 1/16''$ (2) | 1/4'' (6) | 3/32'' (2.5) | $\geq 5/16''$ (8) | $\geq 1/8''$ (3) |
| L (in/mm)  | U (in/mm)  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| $\leq 3/16''$ (5)  | $\leq 1/16''$ (2)  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| 1/4'' (6)  | 3/32'' (2.5)   |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| $\geq 5/16''$ (8)  | $\geq 1/8''$ (3)   |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |
| <b>7. Socavamiento</b>   | Para materiales menores a 1" (25mm) de espesor, el socavamiento no deberá exceder 1/32" (1mm), con la siguiente excepción: El socavamiento no deberá exceder 1/16" (2mm) para cualquier longitud acumulada hasta 2" (50mm) en cualquier tramo de 12" (300mm). Para el material igual o mayor que 1" de espesor, el socavamiento no deberá exceder 1/16" (2mm) para cualquier longitud de soldadura.  |           |           |                   |                   |           |              |                   |                  |

---

## 8. Porosidad

Las soldaduras en ranura con CJP en juntas a tope transversales a la dirección del esfuerzo de tracción calculado no deberán tener porosidad visible en tubería. En todas las demás soldaduras en ranura y soldadas en filete, la suma de la porosidad visible de la tubería de 1/32" (1mm) o de diámetro mayor, no deberá exceder 3/8" (10mm) en cualquier pulgada lineal de soldadura y no deberá exceder 3/4" (20mm) en cualquier tramo de soldadura de 12" (300mm).

---

### 3.3.2. Metodología para la inspección con líquidos penetrantes

Como se menciona en el capítulo anterior, este método es utilizado para localizar discontinuidades abiertas a la superficie en diferentes componentes.

El primer paso para llevar a cabo la inspección es la limpieza del elemento a analizar. Según ASTM se tiene diferentes maneras de realizar esta limpieza dependiendo el contaminante que está en contacto el elemento y especifica una limpieza a través de líquidos o limpiezas mecánicas con el uso de gratas o manuales con el uso de escobillas metálicas.



*Figura 13: Probeta antes y después de la limpieza*

*Fuente: Propia*

Para la inspección visual se utilizó un kit de tintas penetrantes de la marca “Met-L-Chek” el cual consta de un líquido limpiador, un líquido penetrante y un líquido revelador, los cuales deben ser aplicados como indica el siguiente procedimiento:

1. Aplicar el limpiador directamente en la probeta.



*Figura 14: Aplicación del líquido limpiador en la probeta*

*Fuente: Propia*

Después frotar con un trapo hasta quedar completamente limpio. Luego esperar a que seque completamente el líquido limpiador.



*Figura 15: Limpieza de la probeta con un trapo*

*Fuente: Propia*

2. Aplicar el líquido penetrante sobre el cordón de soldadura y también hasta una pulgada adyacente a esta, procurando una colocación uniforme. Como especifica la norma ASTM E165 no se debe saturar el área de inspección con el líquido penetrante. Esperar un tiempo de 2 a 15 minutos para permitir al líquido ingresar por las fallas de la soldadura.



*Figura 16: Colocación del líquido penetrante*

*Fuente: Propia*

3. Luego del tiempo de penetración, con un trapo seco removemos el exceso de penetrante con la finalidad de retirar el líquido visible en la superficie.



*Figura 17: Remoción del exceso de líquido penetrante de la superficie*

*Fuente: Propia*

Se impregna un trapo con el líquido limpiador y pasarlo por el cordón de soldadura con el fin de tener una limpieza mejor del área a analizar. No se debe colocar el líquido limpiador directamente en la superficie.



*Figura 18: Limpieza del exceso de penetrante con el líquido limpiador*

*Fuente: Propia*

4. Se aplica el revelador que permitirá la salida del penetrante que ingresó en las discontinuidades por efecto de capilaridad. Se debe agitar el líquido antes de usar ya que el polvo que contiene se puede asentar. Para la aplicación se realiza una capa uniforme y delgada en la superficie evitando que este escurra.



*Figura 19: Revelador recién colocado*

*Fuente: Propia*

Esperar un tiempo entre 5 y 10 minutos en el cual se puede observar como el penetrante va emergiendo de las discontinuidades.



*Figura 20: Discontinuidades una vez seco el revelador*

*Fuente: Propia*

### ***3.3.3. Metodología para la inspección con partículas magnéticas***

Esta técnica se basa en la acumulación de partículas ferromagnéticas producto de los campos de fuga que se producen por las discontinuidades en el elemento a analizar. Cabe recalcar que esta metodología es específica para aceros en general y no es posible aplicarla a aluminio, zinc, cobre o aceros inoxidable especiales.

En el desarrollo de la inspección se observarán las discontinuidades en las líneas de flujo, que dependen de la profundidad y ancho de la discontinuidad, la profundidad con relación a la superficie, la orientación con respecto a la dirección del flujo magnético.

El procedimiento de inspección con partículas magnéticas es el siguiente:

- 1. Preparación de la superficie del elemento.** Se debe limpiar completamente la soldadura y sus alrededores de escoria y aceites. En el caso de que el elemento tenga un recubrimiento de pintura, este debe ser removido con el fin de alterar la sensibilidad del ensayo.
- 2. Magnetización del elemento.** Se induce un campo magnético al elemento a través de una corriente eléctrica alterna, continua o rectificada. Cabe recalcar que el campo magnético puede ser más profundo si la frecuencia es menor. Dependiendo de la orientación que se espera que aparezcan las discontinuidades se escoge la dirección de magnetización más conveniente.
- 3. Aplicación de las partículas magnéticas.** Estas pueden ser aplicadas en seco o por vía húmeda.
- 4. Interpretación y registro de las indicaciones.** Para esto se requiere un lugar con buena iluminación, y dependiendo el tipo de partículas usadas, es necesario o no el uso de luz ultravioleta. Se debe interpretar las indicaciones que aparecen, es decir si se producen por grietas, poros o falta de unión. Para diferenciar entre estos tipos de defectos, las indicaciones por lo general suelen ser claras cuando son grietas y suelen ser esféricas en el caso de poros.
- 5. Desmagnetización.** Es el último paso del procedimiento, esto es de mucha importancia para el funcionamiento de la pieza ya que, si no se realiza una correcta desmagnetización, esta puede atraer virutas metálicas.

### 3.4.METODOLOGÍAS PARA TÉCNICAS VOLUMÉTRICAS

En esta sección se detallará los procedimientos a seguir para la detección de fallas internas en las soldaduras.

#### 3.4.1. Metodología para la inspección por ultrasonido

Para esta técnica de inspección se detalla el procedimiento a seguir, que consiste en tres fases principales las cuales son el marcado de la zona de inspección, la calibración del equipo y por último la inspección por ultrasonido.

##### 3.4.1.1. Marcado de la zona de inspección.

Esta se refiere a la zona de barrido la misma que depende del espesor de la placa y el ángulo de incidencia de las ondas de ultrasonido. Por experiencia del soldador y por el conocimiento que este tiene de su propio equipo de ultrasonido, con saber que la placa a analizar tiene un espesor de 10 mm y el ángulo nominal del palpador que en este caso es de 70 grados, directamente aconseja realizar el barrido a una distancia de 1 pulgada desde el eje de simetría de la soldadura. (Romero Reyes & Proboste Contreras, 2013)

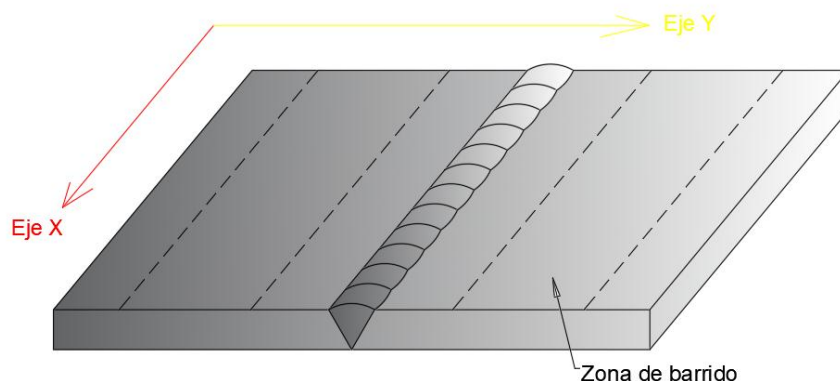
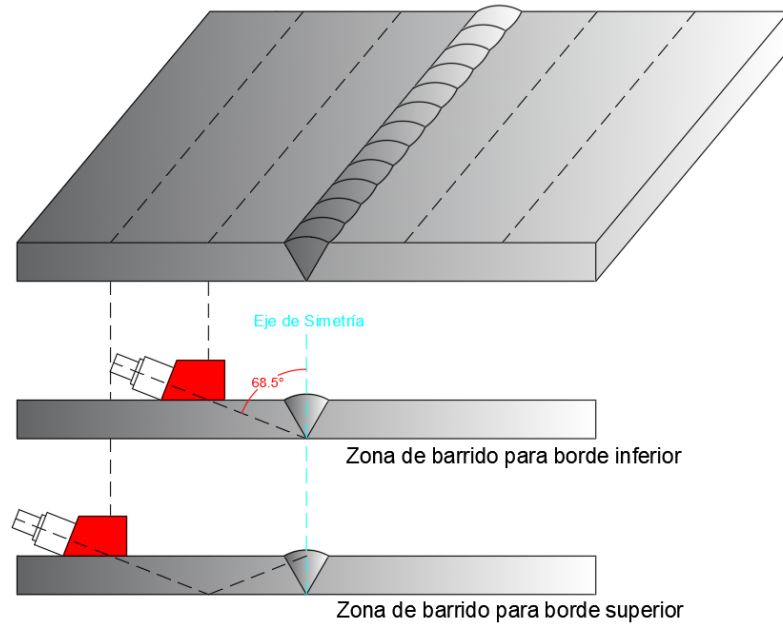


Figura 21: Identificación de ejes de referencia y zona de barrido  
Fuente: (Romero Reyes & Proboste Contreras, 2013)  
Elaboración: Propia

pero para determinar dicha zona se explica en la figura 23:



*Figura 22: Determinación de la zona de barrido  
Fuente: (Romero Reyes & Proboite Contreras, 2013)  
Elaboración: Propia*

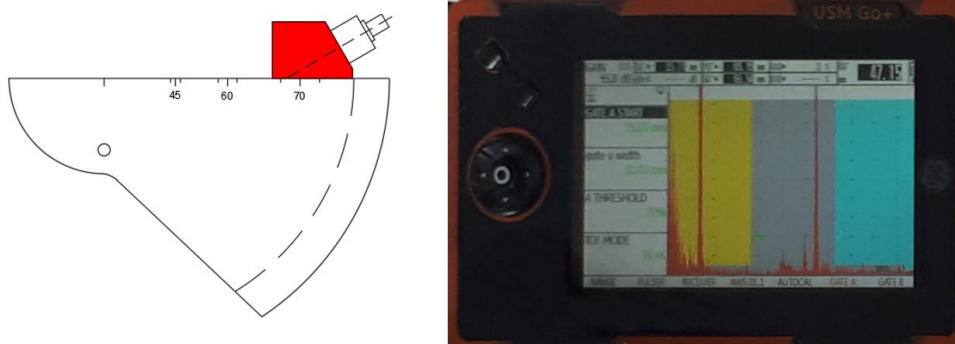
### 3.4.1.2. Calibración

Este procedimiento se realiza bajo la normativa AWS D1.1 con la ayuda del bloque de calibración mostrado en la figura 22, el mismo que nos permite realizar la verificación del ángulo de incidencia, calibración de distancia y calibración de sensibilidad.



*Figura 23: Bloque de calibración  
Fuente: Propia*

Se procede a realizar la calibración del ángulo de incidencia, conociendo que el transductor tiene un ángulo de 70 grados, se coloca este sobre dicha marca en el bloque de calibración y en el equipo se debe encontrar la amplitud máxima, que corresponde al agujero presente en el bloque de calibración y esta configuración se guarda en el equipo. Cabe recalcar que el ángulo nominal del dispositivo de barrido es 70 grados, pero el ángulo real es 68.5 grados, es por esta razón que en el equipo se debe colocar un ángulo de 68.5 grados. (Romero Reyes & Probeste Contreras, 2013)



*Figura 24: Calibración del ángulo de incidencia del equipo de ultrasonido  
Fuente: Propia*

La calibración de distancia corresponde a el cambio de parámetros en el equipo, partiendo desde el ángulo real de incidencia.

Para la calibración de sensibilidad se debe colocar el dispositivo de barrido de tal manera que detecte la fisura en el bloque de calibración y al igual que con la calibración del ángulo de incidencia se busca la amplitud máxima y se guarda la configuración en el equipo.

Una vez calibrada la sensibilidad, el equipo detectara fisuras del tamaño mayor e igual a la fisura del bloque de calibración, para fisuras menores el equipo las pasara por alto. (Romero Reyes & Probeste Contreras, 2013)

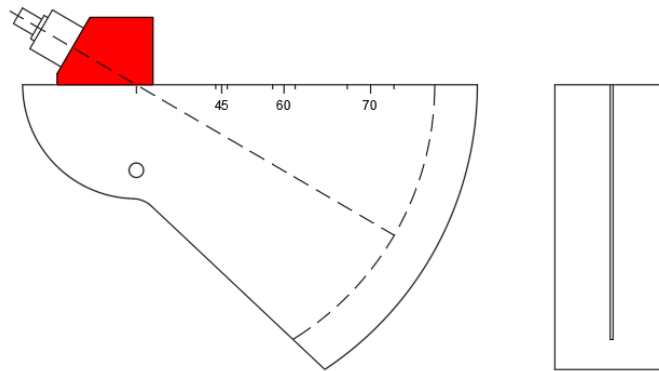


Figura 25: Calibración de sensibilidad del equipo de ultrasonido  
 Fuente: (Romero Reyes & Probeste Contreras, 2013)  
 Elaboración: Propia

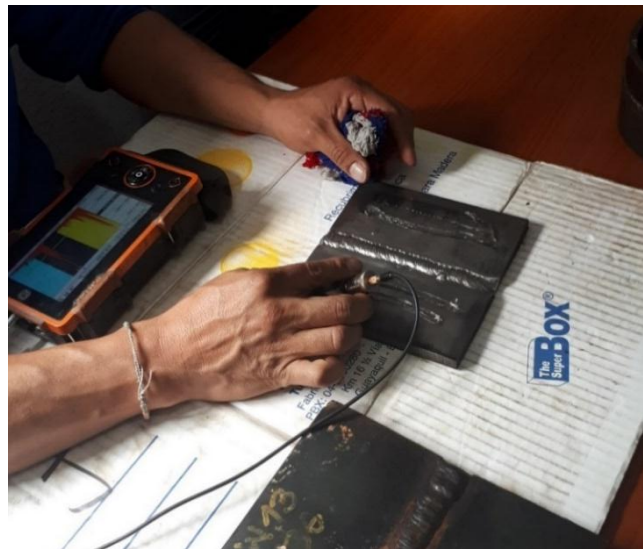
### 3.4.1.3. Procedimiento de inspección por ultrasonido

1. Una vez conocida y delimitada la zona de inspección, se procede a colocar el gel a la placa a lo largo de la zona de barrido.



Figura 26: Colocación de gel previo al barrido  
 Fuente: Propia

2. Se comprueba que el equipo este arrojando datos correctos verificando que el equipo detecte algún vacío, para esto se analiza en el extremo de la probeta en dirección perpendicular al cordón de soldadura y se observa en la pantalla que efectivamente detecta como un vacío y a la distancia correcta entre transductor y borde.



*Figura 27: Verificación de distancia transductor-borde*

*Fuente: Propia*

3. Se procede a la inspección de la soldadura realizando un barrido paralelo a la soldadura y observando los resultados en la pantalla del equipo.



*Figura 28: Inspección de soldadura mediante ultrasonido.*

*Fuente: Propia*

Los criterios de aceptación – rechazo para ultrasonido se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6: Criterios de aceptación – rechazo UT

Fuente: AWS D1.1: 2015

Elaboración: Propia

| Criterios de aceptación – rechazo con UT |  |                          |                            |            |            |                         |            |            |                      |            |            |
|--|--|--------------------------|----------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|----------------------|------------|------------|
| Clase de severidad                       | Tamaño de la soldadura en pulgadas (mm) y ángulo de unidad de búsqueda |                          |                            |            |            |                         |            |            |                      |            |            |
|  | 5/16 hasta 3/4 (8-20)  | >3/4 hasta 1-1/2 (20-38) | >1-1/2 hasta 2-1/2 (38-65) |            |            | >2-1/2 hasta 4 (65-100) |            |            | >4 hasta 8 (100-200) |            |            |
|  | 70°  | 70°                      | 70°                        | 60°        | 45°        | 70°                     | 60°        | 45°        | 70°                  | 60°        | 45°        |
| Clase A                                  | +5 y menor   | +2 y menor               | -2 y menor                 | +1 y menor | +3 y menor | -5 y menor              | -2 y menor | 0 y menor  | -7 y menor           | -4 y menor | -1 y menor |
| Clase B                                  | +6   | +3                       | -1<br>0                    | +2<br>+3   | +4<br>+5   | -4<br>-3                | -1<br>0    | +1<br>+2   | -6<br>-5             | -3<br>-2   | 0<br>+1    |
| Clase C                                  | +7   | +4                       | +1<br>+2                   | +4<br>+5   | +6<br>+7   | -2a<br>+2               | +1<br>+2   | +3<br>+4   | -4a<br>+2            | -1a<br>+2  | +2<br>+3   |
| Clase D                                  | +8 y mayor   | +5 y mayor               | +3 y mayor                 | +6 y mayor | +8 y mayor | +3 y mayor              | +3 y mayor | +5 y mayor | +3 y mayor           | +3 y mayor | +4 y mayor |

*Clase A (Discontinuidades grandes).* Se deberá rechazar cualquier indicación en esta categoría, independientemente de la longitud.

*Clase B (Discontinuidades medianas).* Se deberá rechazar toda indicación en esta categoría con una longitud superior a 3/4" (20mm).

*Clase C (Discontinuidades pequeñas).* Se deberá rechazar toda indicación en esta categoría con una longitud superior a 2" (50mm).

*Clase D (Discontinuidades menores).* Se deberá aceptar toda indicación en esta categoría, independientemente de la longitud o ubicación de la soldadura.

### ***3.4.2. Metodología para la inspección por radiografía industrial***

Detrás del proceso de radiografía industrial se encuentran muchos subprocesos a realizar antes del proceso en sí. Con la finalidad de simplificar se ha dividido en 6 fases principales los cuales comienzan con la planificación, luego viene la preparación, ejecución de la exposición, procesado de la película, interpretación y por último la decisión en base al resultado. (UNLP, 2007)

#### ***3.4.2.1. Planificación***

Esta contempla todo lo relacionado con la selección de materiales a utilizar en función del material y espesor a radiografiar. Esta fase enmarca lo siguiente:

- *Interpretación del ensayo:* Manuales a seguir en función del elemento a radiografiar.
- *Selección del tipo de película:* En función del material, espesor y la calidad esperada.
- *Selección de IQI:* en función del material y espesor en la zona de interés.
- *Selección de la ubicación más conveniente de la película:* Depende de la geometría del elemento.
- *Distancias:* En función del espesor de penumbra y distorsión admitida.
- *Angulo de incidencia:* En función de la geometría del elemento.
- *Fuente de radiación:* Depende de la disposición de la misma y la calidad esperada de la imagen.
- *Exposición:* Para la densidad de imagen requerida en la zona de interés.

#### ***3.4.2.2. Preparación***

- Montar y ubicar correctamente la fuente de radiación.
- *Seguridad:* Colocar vallas de seguridad y luces indicativas (Luz roja intermitente).
- Para el caso de rayos X, se debe precalentar el tubo y durante este proceso medir la radiación en la ubicación del vallado.
- En el cuarto oscuro con luz encandécete de baja potencia se procede a cargar el chasis con la película radiográfica y las pantallas.
- Colocación del chasis con la película, colocación de rótulos e IQI en el lugar correcto.

#### 3.4.2.3. Ejecución de la exposición

- En esta etapa se debe tomar todas las medidas de seguridad, conocer las rutas de evacuación y prestar atención a los anuncios.
- Se procede a realizar el disparo del equipo y la exposición de la película a los rayos.
- Una vez terminado este proceso se procede a apagar el equipo y colocar el bloqueo de seguridad de la fuente de rayos.

#### 3.4.2.4. Procesado de la película

- Esta se debe realizar en el cuarto oscuro. El procesado de la película consiste en el Revelado, detenido, fijado, lavado, humectado y secado.

#### 3.4.2.5. Interpretación

- Se debe observar la imagen obtenida.
- Se procede a la medición de la densidad de los sitios de interés con el densitómetro.
- Se verifica la sensibilidad a través de los IQIs visibles.
- En caso de ser necesario se repite el ensayo con los ajustes necesarios.
- Se realiza la búsqueda de discontinuidades que reflejen defectos en el elemento inspeccionado.
- Se realiza un informe de los resultados obtenidos.

#### 3.4.2.6. Decisiones en base a los resultados obtenidos

Según sean las discontinuidades encontradas en la radiografía se comparan con los criterios de aceptación y rechazo propuestas por instituciones de inspección y se tomaran decisiones acerca de que se puede hacer con el elemento inspeccionado de acuerdo a la norma de inspección vigente.

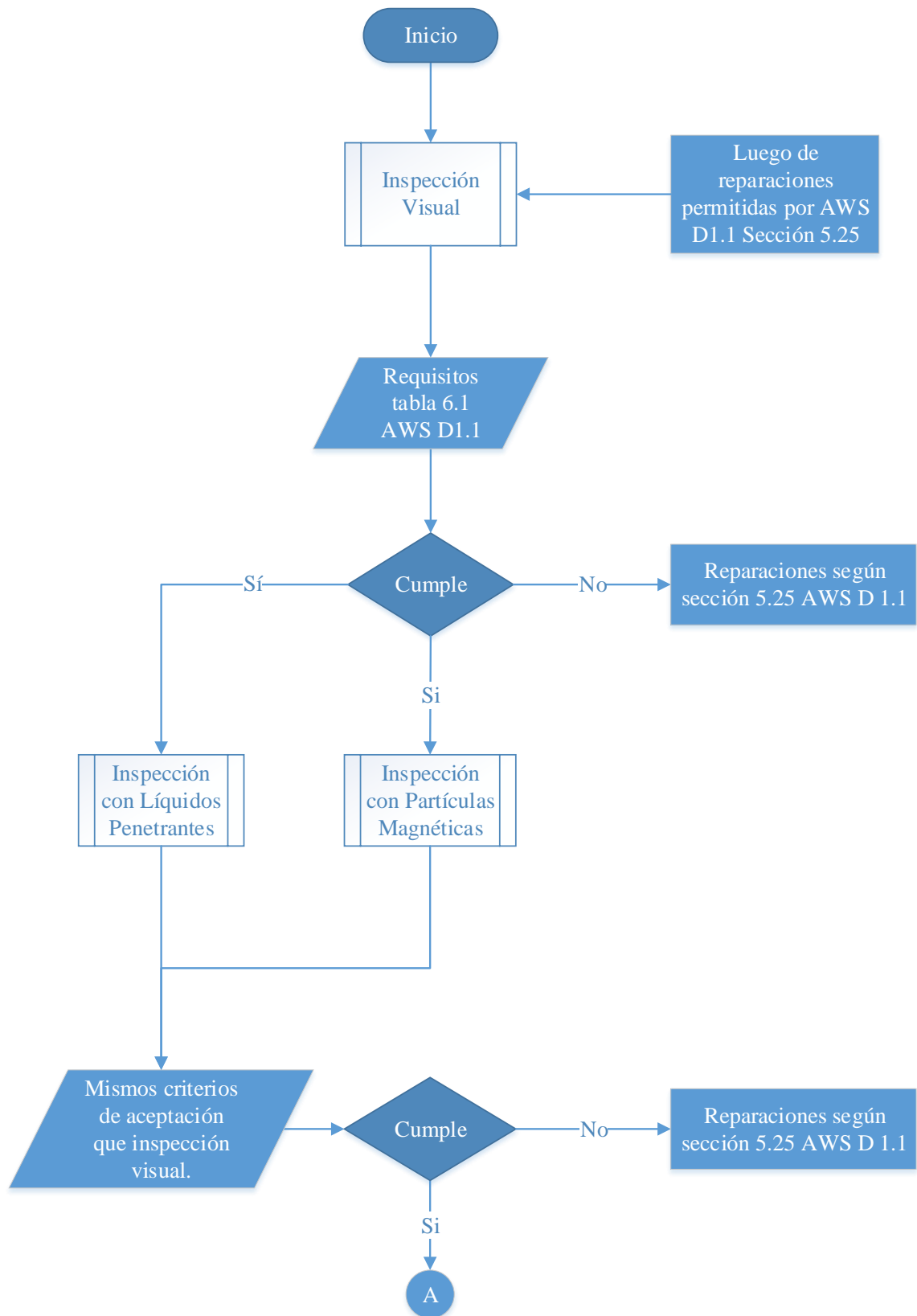
## CAPITULO IV: METODOLOGÍA GENERAL DE INSPECCIÓN

En este capítulo se especifica la metodología o el procedimiento a seguir para llevar a cabo la ejecución de los diferentes ensayos no destructivos y las condiciones que debe cumplir cada uno de ellos para ser factible la ejecución de la siguiente metodología de inspección.

Antes de llevar a cabo los ensayos volumétricos, las soldaduras deben ser aprobadas mediante inspecciones superficiales, y a su vez, estas deben ser realizadas secuencialmente empezando por la inspección visual aprobando todos los criterios descritos en la tabla 6.1 de la normativa AWS D1.1.

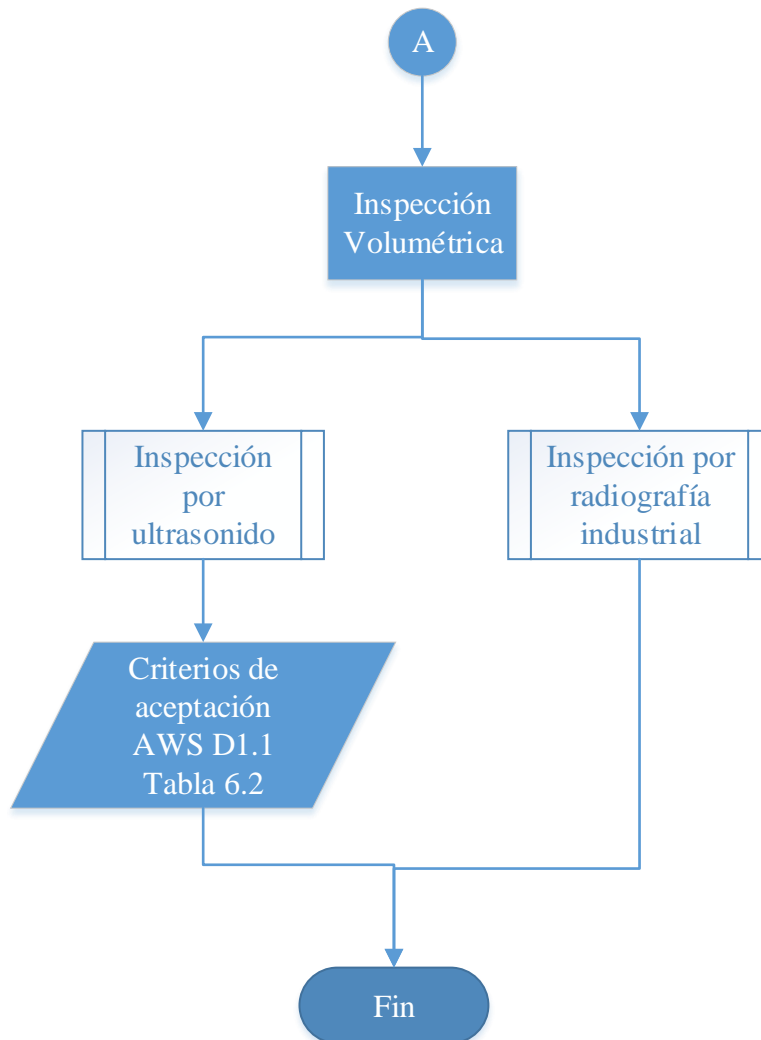
En esta sección de la presente tesis se elaborará un diagrama de flujo presentando un procedimiento general para llevar a cabo una inspección no destructiva y sugiriendo el orden en que estos se deben realizar y a su vez exponer las reparaciones a realizar para proceder con el siguiente ensayo en caso de ser necesario.

#### 4.1.FLUJOGRAMA GENERAL DE INSPECCIÓN MEDIANTE END.

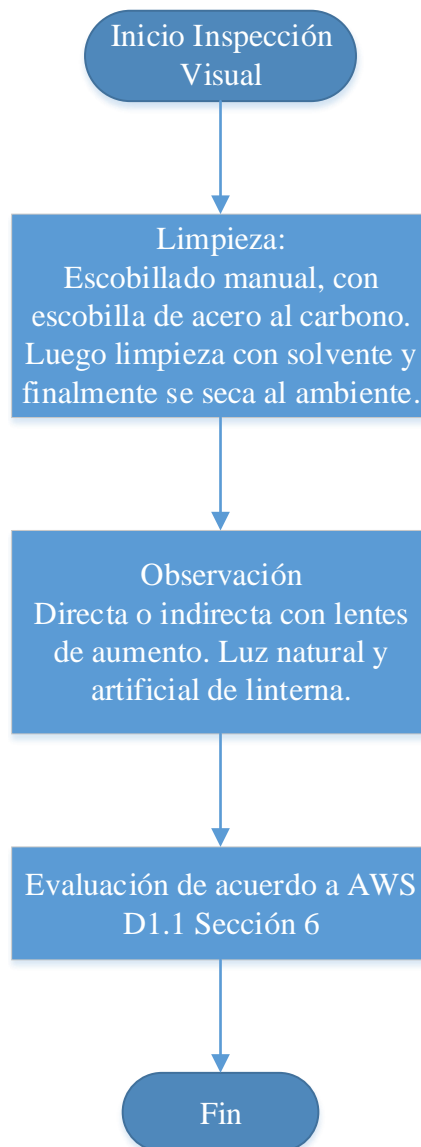


(continua)

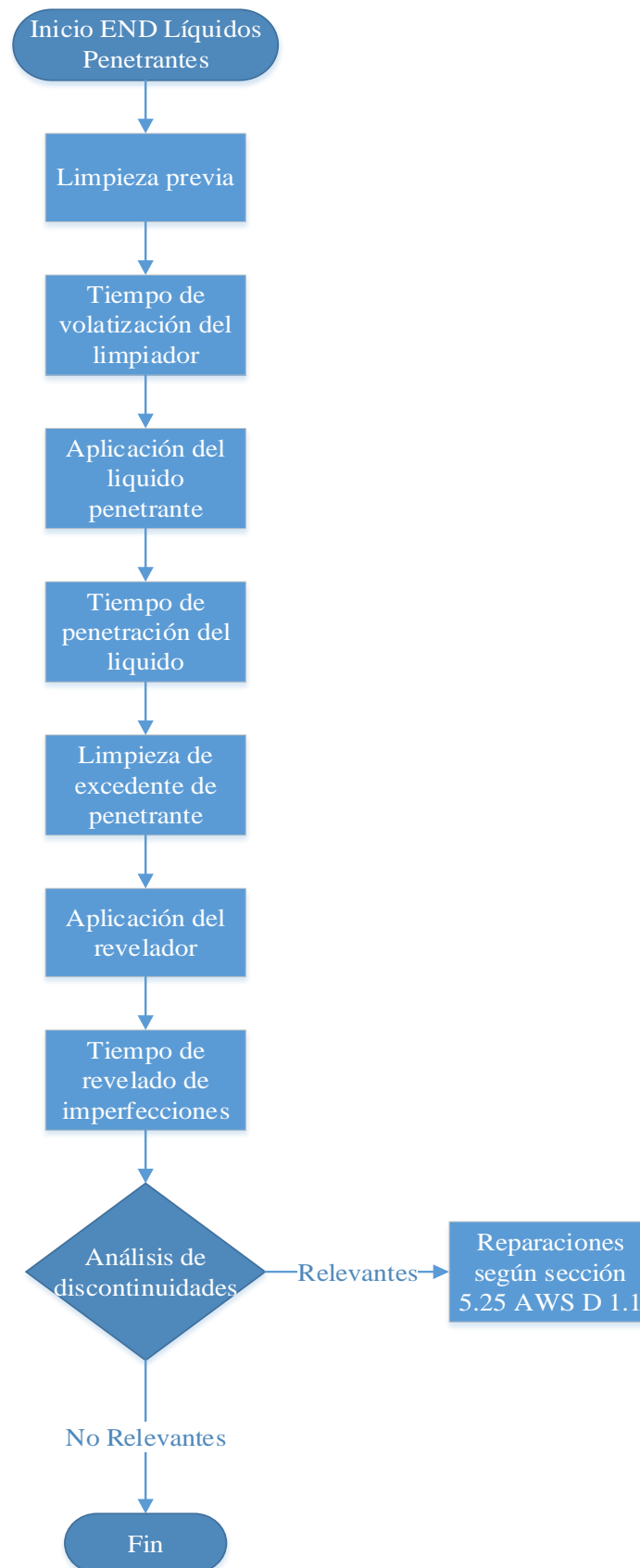
(continuación)



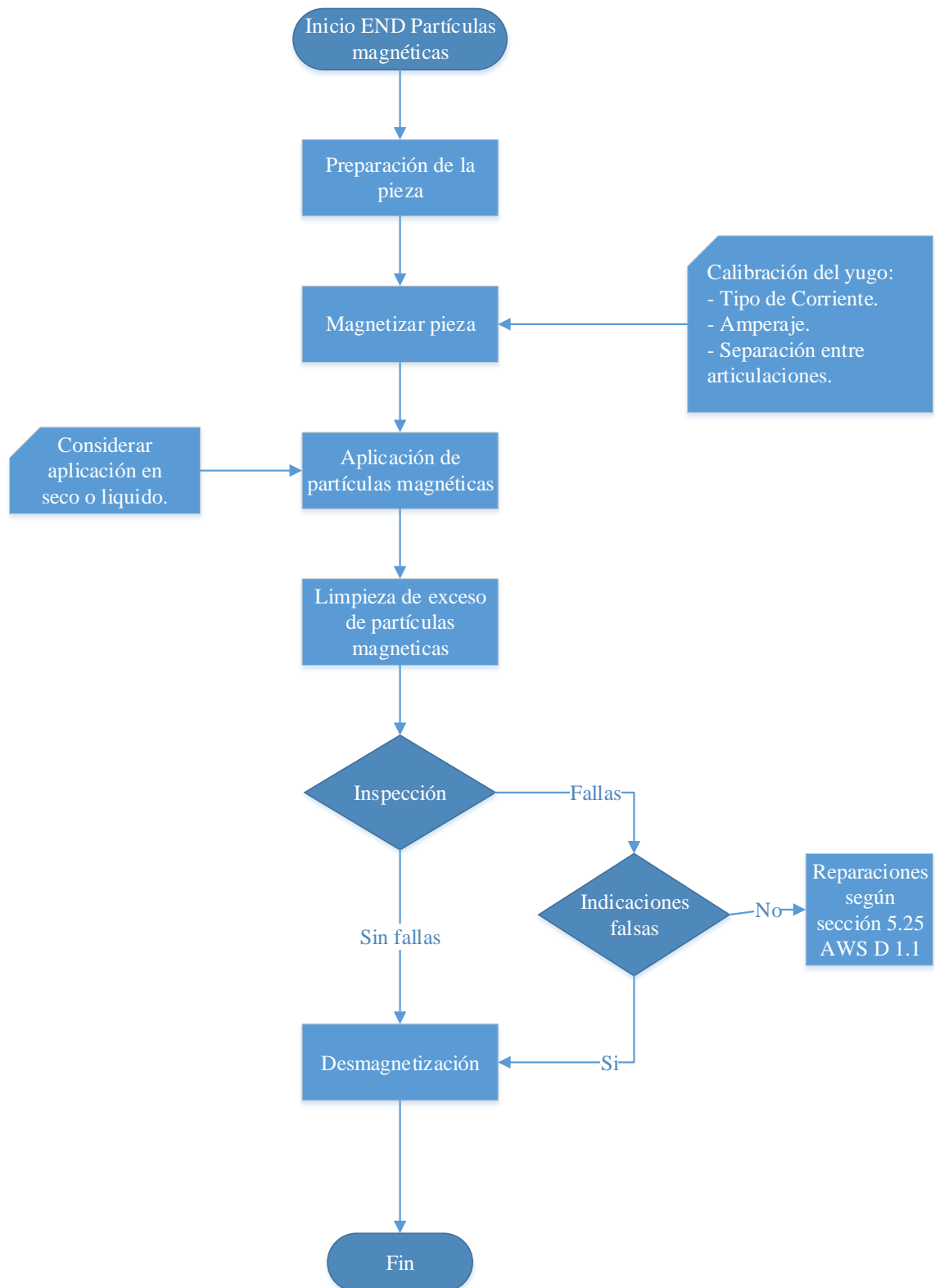
## 4.2.FLUJOGRAMA INSPECCIÓN VISUAL



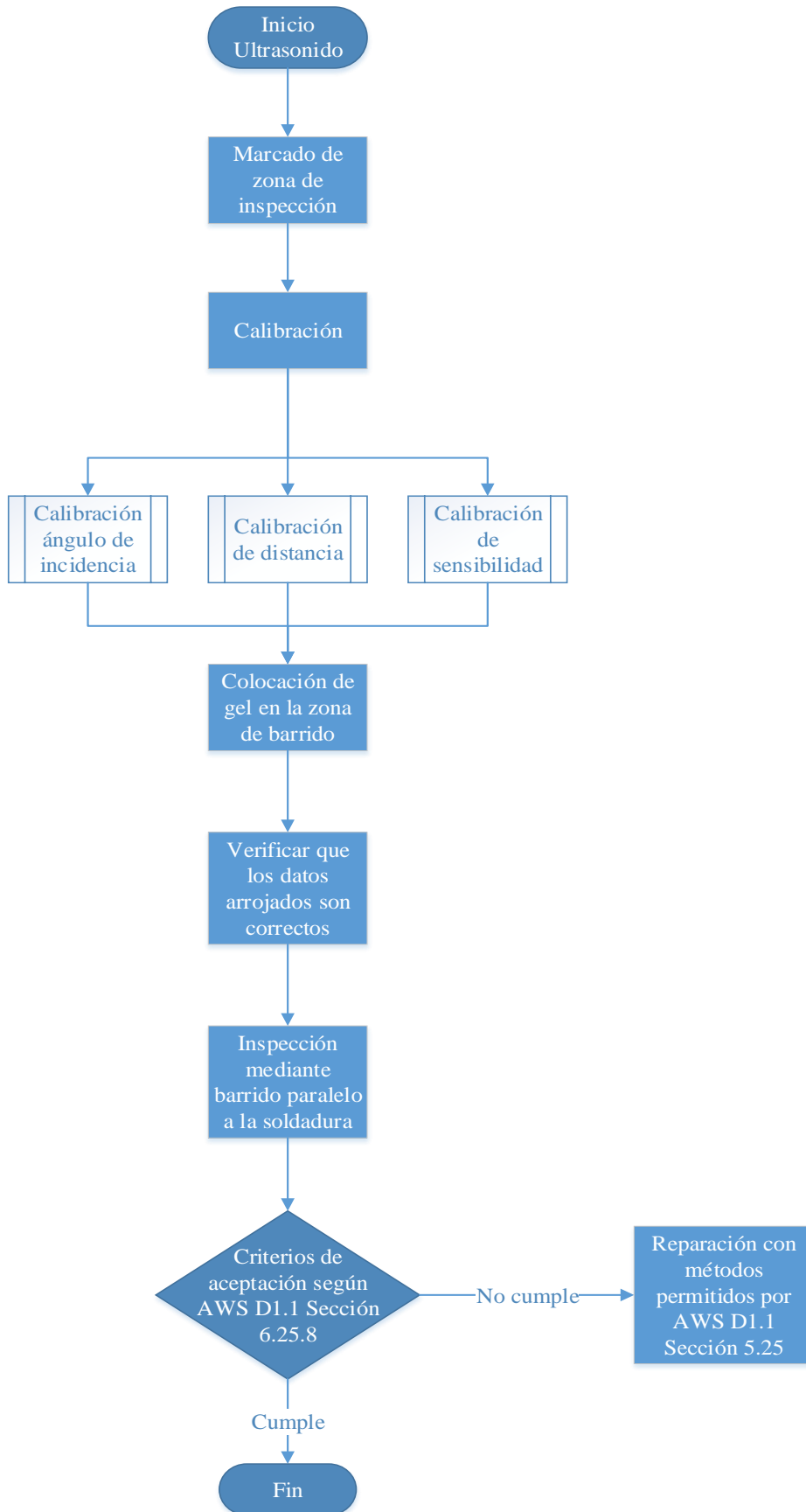
### 4.3.FLUJOGRAMA INSPECCIÓN CON LÍQUIDOS PENETRANTES



#### 4.4.FLUJOGRAMA INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS



#### 4.5.FLUJOGRAMA INSPECCIÓN CON ULTRASONIDO



## 4.6.REPARACIONES POSTERIORES A LA INSPECCIÓN

Las reparaciones se pueden realizar mediante distintas técnicas ya sea por mecanizado<sup>1</sup>, esmerilado<sup>2</sup> o ranurado<sup>3</sup>. Estas deben realizarse sin afectar el metal.

Hay que tomar en cuenta que para la reparación de la soldadura no se debe realizar una eliminación considerable del material base, es decir que es mejor mientras la geometría del metal base se mantenga igual.

Tabla 7: Reparaciones permitidas según AWS D1.1: 2015  
Fuente: AWS D1.1: 2015 sección 6  
Elaboración: Propia

| DISCONTINUIDAD  | TIPO DE REPARACIÓN   |
|---|--|
| <b>Traslape, convexidad excesiva o refuerzo excesivo.</b>   | Eliminar el metal de soldadura en exceso.  |
| <b>Concavidad excesiva de la soldadura o el cráter, soldadura de tamaño insuficiente, socavación.</b> | Preparar superficies según 5.29 y depositar material de soldadura adicional.   |
| <b>Fusión incompleta, porosidad de la soldadura excesiva o inclusiones de escoria.</b>                | Eliminar la partes inaceptables de manera tal que el metal base no se dañe ni se fisure y volver a soldar.   |
| <b>Grietas en la soldadura o en el metal base.</b>  | Determinar la extensión de la grieta mediante MT, PT u otros medios. Se debe eliminar la grieta hasta 50 mm las de los extremos y volver a soldar.   |
| <b>Miembros distorsionados por la soldadura.</b>  | Enderezar por medios mecánicos o mediante aplicación de una cantidad determinada de calor localizado.<br>La parte a enderezar debe estar libre de esfuerzos y fuerzas externas a excepción de la fuerza a utilizar para el enderezado de la misma. |
| <b>Soldadura inaceptable en lugares inaccesibles.</b>   | Se debe restaurar a la condición original en la cual se realizó la soldadura y proceder a la corrección de la misma.   |

<sup>1</sup> El mecanizado consiste en un proceso de fabricación que incluye procesos de conformación de piezas a través del arranque de viruta o por abrasión.

<sup>2</sup> El esmerilado consiste en eliminar el material excedente frotando un material abrasivo sobre la superficie.

<sup>3</sup> El ranurado consiste en la remoción del metal a través de un chorro de plasma el cual expulsa el material fundido y va formando una ranura en el metal.

## CAPITULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

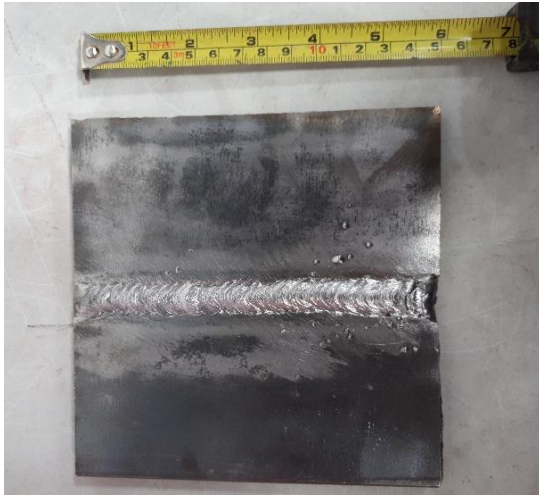
En el presente capítulo se analizarán las fallas superficiales y volumétricas detectadas en las probetas realizadas a través de los diferentes ensayos no destructivos.

### 5.1.INSPECCIÓN SUPERFICIAL

#### 5.1.1. Probeta 1

| <b>REPORTE DE INSPECCIÓN VISUAL</b><br><b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR</b><br><b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>                                  |   |  |                  |
|---|---|--|------------------|
| <b>1. INFORMACIÓN GENERAL</b>   |   |  |                  |
| <b>Ensayado por:</b> Eduardo Espinoza   |   | <b>Fecha:</b> 2019/03/30               |                  |
| <b>Revisado Por:</b> Ing. Mauricio Cely   |   | <b>Proyecto:</b> Trabajo de titulación |                  |
| <b>Descripción:</b> Probeta con Junta de penetración completa   |   | <b>Material:</b> Acero A36             |                  |
| <b>Identificación:</b> Probeta #1   |   |  |                  |
| <b>2. CONDICIONES DEL EXAMEN</b>  |   |  |                  |
| <b>Estado Superficial:</b> Libre de corrosión.  |   | <b>Norma:</b> AWS D1.1: 2015           |                  |
| <b>Tipo de iluminación:</b> Natural   |   |  |                  |
| <b>3. OBSERVACIONES</b>   |   |  |                  |
| Inspección visual directa y a través de fotografías, Inspección con líquidos penetrantes con la finalidad de detectar fallas superficiales en la soldadura. |   |  |                  |
| <b>4. RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN</b>   |   |  |                  |
|   | <b>Descripción</b>  | <b>Cumple</b>                          | <b>No cumple</b> |
| <b>Grietas:</b>   | No hay presencia de grietas en la superficie de la soldadura.   | X                                      |                  |
| <b>Fusión del metal base/soldadura:</b>   | Existe una falta de fusión en ambos lados a lo largo de todo el cordón de soldadura.                            |  | X                |
| <b>Sección transversal del cráter:</b>  | El cordón de soldadura no cumple con el tamaño necesario para cubrir todo el cráter.                            |  | X                |
| <b>Perfil de soldadura:</b>   | El perfil de soldadura se realizó de acuerdo a los criterios AWS D1.1: 2015                                     | X                                      |                  |
| <b>Socavamiento:</b>  | Existencia de socavamiento a lo largo de todo el cordón de soldadura.   |  | X                |
| <b>Porosidad:</b>   | A través de la inspección con líquidos penetrantes se observa una importante cantidad de poros en la soldadura. |  | X                |

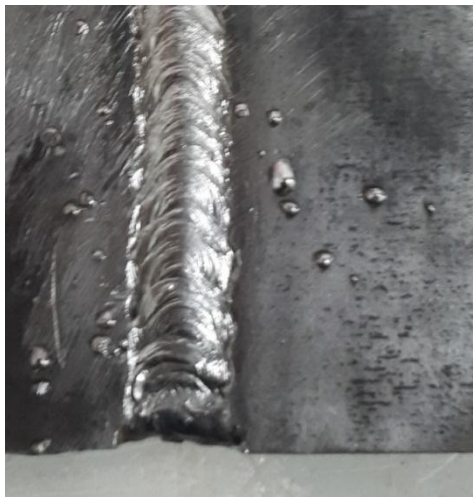
## 5. IMÁGENES DE LA INSPECCIÓN



*Figura 29: Probeta 1  
Fuente: Propia*



*Figura 30: Falta de penetración probeta 1  
Fuente: Propia*



*Figura 31: Salpicaduras adyacentes  
Fuente: Propia*



*Figura 32: Porosidades visibles con  
líquidos penetrantes, probeta 2  
Fuente: Propia*



*Figura 33: Falta de fusión  
Fuente: Propia*

### 5.1.2. Probeta 2

| <b>REPORTE DE INSPECCIÓN VISUAL</b><br><b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR</b><br><b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>                                  |   |  |                  |
|---|---|--|------------------|
| <b>1. INFORMACIÓN GENERAL</b>   |   |  |                  |
| <b>Ensayado por:</b> Eduardo Espinoza   |   | <b>Fecha:</b> 2019/03/30               |                  |
| <b>Revisado Por:</b> Ing. Mauricio Cely   |   | <b>Proyecto:</b> Trabajo de titulación |                  |
| <b>Descripción:</b> Probeta con junta de penetración completa   |   | <b>Material:</b> Acero A36             |                  |
| <b>Identificación:</b> Probeta #2   |   |  |                  |
| <b>2. CONDICIONES DEL EXAMEN</b>  |   |  |                  |
| <b>Estado Superficial:</b> Libre de corrosión.  |   | <b>Norma:</b> AWS D1.1: 2015           |                  |
| <b>Tipo de iluminación:</b> Natural   |   |  |                  |
| <b>3. OBSERVACIONES</b>   |   |  |                  |
| Inspección visual directa y a través de fotografías, Inspección con líquidos penetrantes con la finalidad de detectar fallas superficiales en la soldadura. |   |  |                  |
| <b>4. RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN</b>   |   |  |                  |
|   | <b>Descripción</b>  | <b>Cumple</b>                          | <b>No cumple</b> |
| <b>Grietas:</b>   | No hay presencia de grietas en la superficie de la soldadura.   | X                                      |                  |
| <b>Fusión del metal base/soldadura:</b>   | Existe falta de fusión en la mayor parte del cordón de soldadura.   |  | X                |
| <b>Sección transversal del cráter:</b>  | El cordón de soldadura varía a lo largo de su desarrollo, hay secciones con demasiado material de aporte y otros con falta de material de aporte que no cumplen con el tamaño necesario para cubrir todo el cráter. |  | X                |
| <b>Perfil de soldadura:</b>   | El perfil de soldadura se realizó de acuerdo a los criterios AWS D1.1: 2015   | X                                      |                  |
| <b>Socavamiento:</b>  | Existencia de socavamiento en la mayor parte del cordón de soldadura.   |  | X                |
| <b>Porosidad:</b>   | Se puede observar porosidades a simple vista y se hacen más visibles a través de la inspección con líquidos penetrantes.  |  | X                |
| Además de las fallas detectadas con los criterios de la normativa AWS D1.1: 2015, se puede observar que la probeta sufrió un ligero pandeo.                 |   |  |                  |

## 5. IMÁGENES DE LA INSPECCIÓN



Figura 34: Probeta 2  
Fuente: Propia



Figura 35: Penetración incompleta probeta 2  
Fuente: Propia

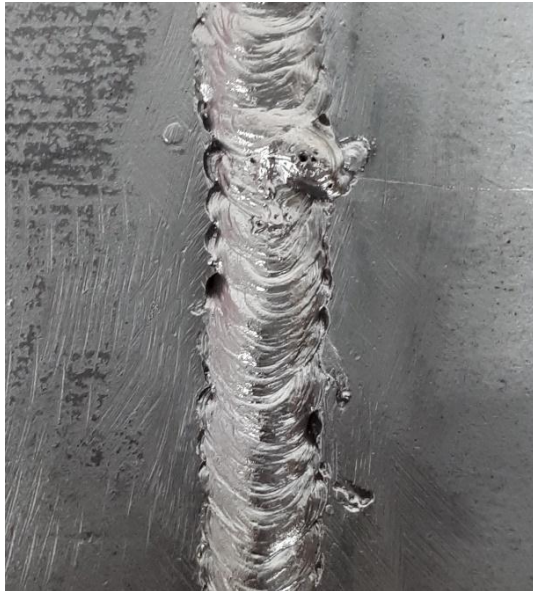


Figura 36: Porosidades y falta de fusión  
Fuente: Propia



Figura 37: Inspección con líquidos penetrantes  
probeta 2  
Fuente: Propia

Las probetas ensayadas no cumplen varios de los criterios de aceptación de la normativa AWS D1.1: 2015, según la metodología de inspección, se deben realizar reparaciones antes de continuar con las inspecciones volumétricas. Sin embargo, con la finalidad de interpretar las discontinuidades internas, se procedió a realizar una inspección por ultrasonido.

### 5.1.3. Ejemplo de una probeta realizada correctamente

La siguiente imagen muestra una soldadura realizada correctamente y que cumple con todos los criterios de aceptación para la inspección visual de la normativa AWS D1.1: 2015.



Figura 38: Ejemplo de soldadura realizada correctamente

Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura siguiente, la parte de la raíz de la junta tiene una penetración completa que cumple con los criterios de aceptación según la normativa AWS D1.1: 2015.



Figura 39: Ejemplo de penetración completa en la raíz

Fuente: Propia

## 5.2.INSPECCIÓN VOLUMÉTRICA

Durante la inspección volumétrica se optó por realizar el ensayo de ultrasonido, el cual fue más accesible y llevo muy poco tiempo su realización, sin embargo, para la finalidad de la presente tesis se detalla también la manera de interpretar los resultados por el método de radiografía industrial.

### 5.2.1. Inspección por ultrasonido

El defecto principal que se observa a través de la inspección por ultrasonido es la penetración incompleta de material de aporte, el cual ya habíamos observado en la inspección visual.

Como la falta de penetración se encuentra a lo largo de todo el cordón de soldadura, es la falla más grande y es la principal que detecta el equipo de ultrasonido. Este tipo de discontinuidad es de clase A (Discontinuidad grande).



Figura 40: Inspección por ultrasonido  
Fuente: Propia

A continuación, se detallan los tipos de discontinuidades y como estas están presentes en la soldadura y también como se observan en el equipo de ultrasonido.

### 5.2.1.1. Inclusiones de escoria

Es la presencia de materiales solidos metálicos y no metálicos incrustados entre las capas del material de aporte durante el proceso de soldadura.

Durante la inspección por ultrasonido estas se presentan con poca presencia de haces secundarios que se reflejan desde la base de la probeta.

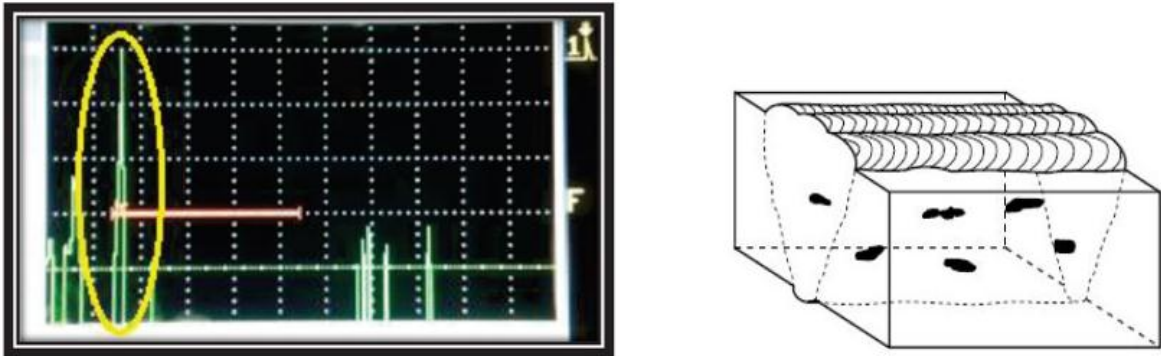


Figura 41: Inclusiones de escoria vista a través de UT  
Fuente: (Chimarro Navas & Malitaxi Urresta, 2016) (Romero Reyes & Proboste Contreras, 2013)  
Elaboración: Propia

### 5.2.1.2. Falta de fusión

Este tipo de discontinuidad se presenta debido a la falta de temperatura, se pueden presentar en la raíz, en los laterales o entre cordones.

La interpretación a través de ultrasonido se da por un pico grande junto a mas picos de menor amplitud debido a los reflejos que se producen a lo largo de la discontinuidad.

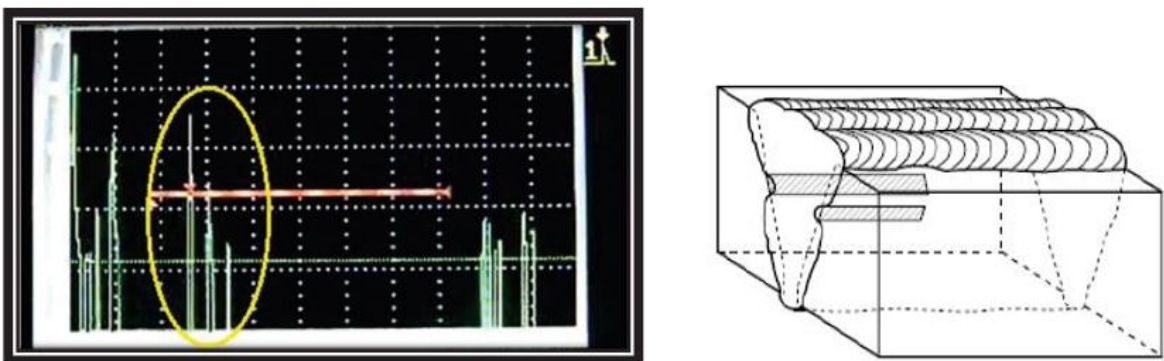


Figura 42: Falta de fusión vista a través de UT  
Fuente: (Chimarro Navas & Malitaxi Urresta, 2016) (Romero Reyes & Proboste Contreras, 2013)  
Elaboración: Propia

### 5.2.1.3. Porosidades

Estas se generan por el gas atrapado durante la solidificación de la soldadura, como su formación es de forma esférica, se consideran menos peligrosas que las demás discontinuidades. Estas se pueden presentar de manera dispersa o agrupada.

Cada poro se manifiesta en la pantalla del equipo de ultrasonido como un solo pico o si son dispersos se presentan varios picos de igual tamaño, pero con distancias variables entre ellos.

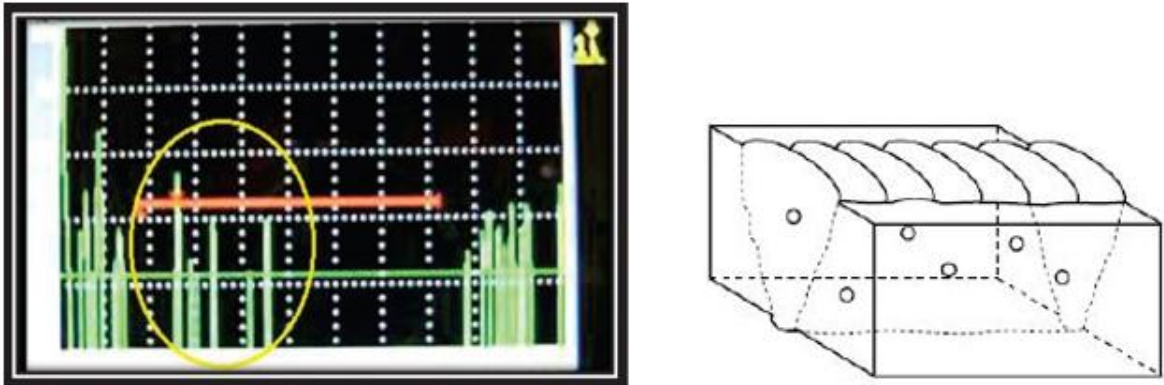


Figura 43: Porosidades vistas a través de UT

Fuente: (Chimarro Navas & Malitaxi Urresta, 2016) (Romero Reyes & Proboste Contreras, 2013)  
Elaboración: Propia

### 5.2.1.4. Grietas longitudinales

Se forman por la separación lineal del material debido a la presencia de esfuerzos internos. Estas son unas de las discontinuidades más peligrosas ya que tienden a propagarse debido a su geometría alargada.

Se manifiestan como varios picos distanciados entre sí con amplitudes parecidas.

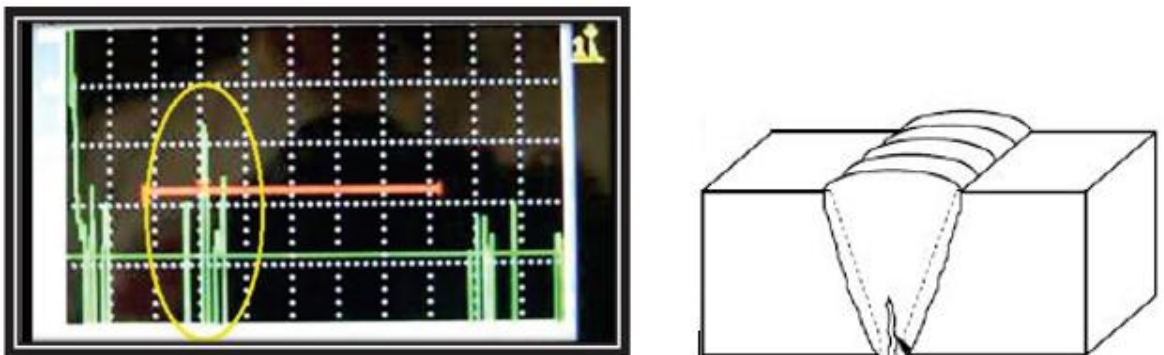


Figura 44: Grietas longitudinales vistas a través de UT

Fuente: (Chimarro Navas & Malitaxi Urresta, 2016) (Romero Reyes & Proboste Contreras, 2013)  
Elaboración: Propia

5.2.1.5. Interpretación de una soldadura sin discontinuidades

Cuando la soldadura no presenta discontinuidades, en la pantalla de la máquina de ultrasonido no se observa ninguna clase de picos.



Figura 45: Inspección de una soldadura sin discontinuidades  
Fuente: Propia

Únicamente se observa los picos de entrada y los picos de la base de la placa como se ve en la figura 47.



Figura 46: Interpretación de UT en soldadura sin discontinuidades.  
Fuente: Propia

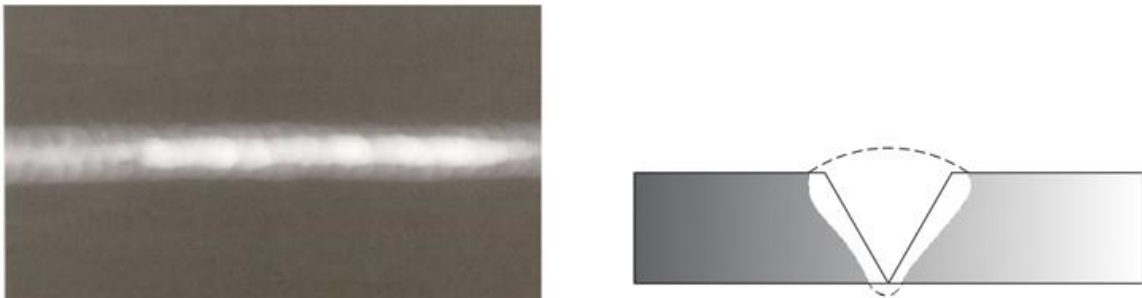
### ***5.2.2. Inspección por radiografía industrial***

A pesar de que la radiografía industrial no nos da la ubicación de las discontinuidades como lo hace la inspección por ultrasonido, la radiografía industrial ofrece una vista en planta con la forma exacta de las discontinuidades, lo que permite que se pueda dar un diagnóstico sin tener demasiada experiencia.

A continuación, se detalla la interpretación de las discontinuidades presentes a través de radiografía industrial.

#### ***5.2.2.1. Exceso de penetración***

Se presenta cuando el proceso de soldadura se realiza a una velocidad relativamente baja. La manifestación de esta discontinuidad en la película radiográfica se da por una imagen con densidad más clara en el centro del cordón de soldadura.

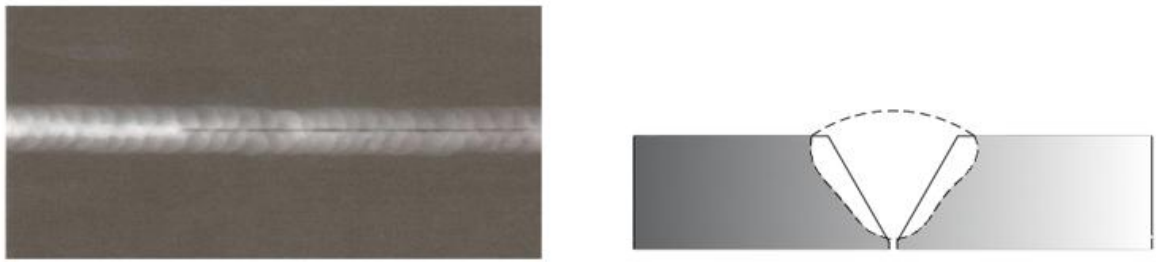


*Figura 47: Exceso de penetración vista con RX  
Fuente: (Villacis Soria, 2011)  
Elaboración: Propia*

#### ***5.2.2.2. Falta de penetración***

A través de la inspección visual se puede detectar fácilmente. Se produce por varios factores como puede ser el electrodo muy grueso, falta de corriente o velocidad de soldadura muy rápida.

Se presenta como una línea continua de color negro bien definida que puede ser continua o por tramos.

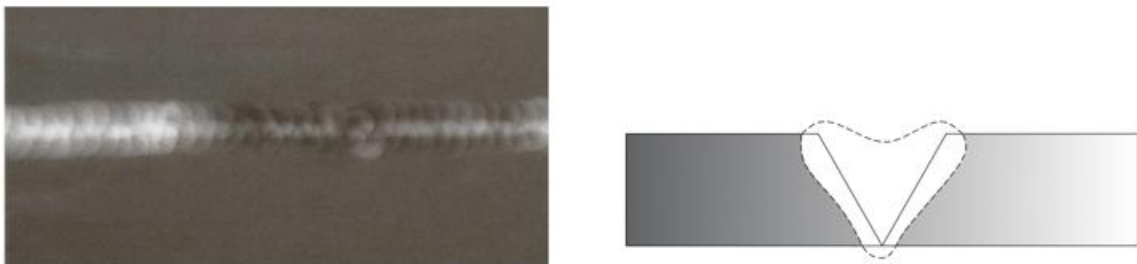


*Figura 48: Falta de penetración vista con RX  
Fuente: (Villacis Soria, 2011)  
Elaboración: Propia*

#### 5.2.2.3. Concavidad

Se genera por la falta de material de aporte en el centro del cordón de soldadura.

En la radiografía se presenta como depósitos de material de color más oscuro que el material base.



*Figura 49: Concavidad vista con RX  
Fuente: (Villacis Soria, 2011)  
Elaboración: Propia*

#### 5.2.2.4. Mordeduras

Estas imperfecciones se producen adyacentes al cordón de soldadura que fueron pasadas por alto en el proceso de llenado con metal de aporte. Se pueden presentar debido a un electrodo en mal estado, demasiada velocidad de soldadura o por un arco incorrecto.

Se presenta como una línea gruesa entre 2 cordones de soldadura de las primeras pasadas.

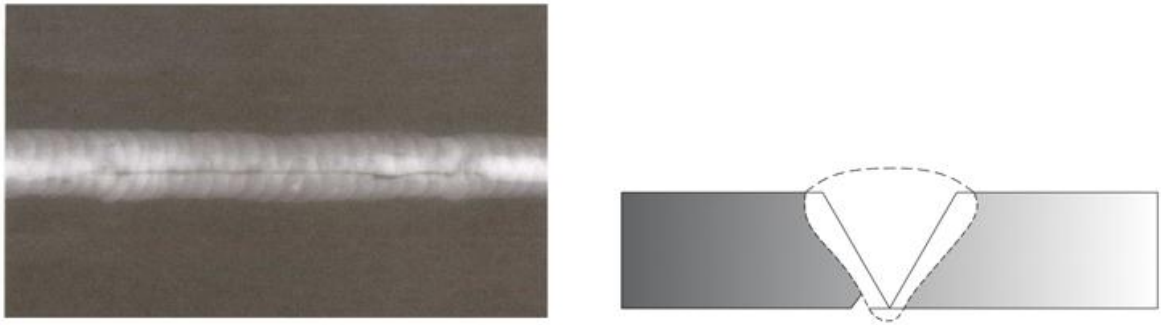


Figura 50: Mordeduras vistas con RX  
 Fuente: (Villacis Soria, 2011)  
 Elaboración: Propia

#### 5.2.2.5. Porosidades

Las porosidades se manifiestan como manchas oscuras en la película radiográfica. Estas pueden estar agrupadas o también dispersas.

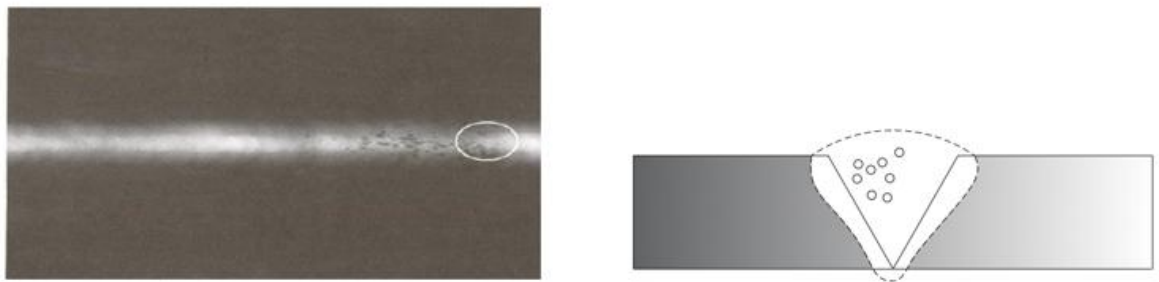


Figura 51: Porosidades vistas con RX  
 Fuente: (Villacis Soria, 2011)  
 Elaboración: Propia

#### 5.2.2.6. Inclusiones de escoria

Se muestran como manchas irregulares de color gris sobre el cordón de soldadura.

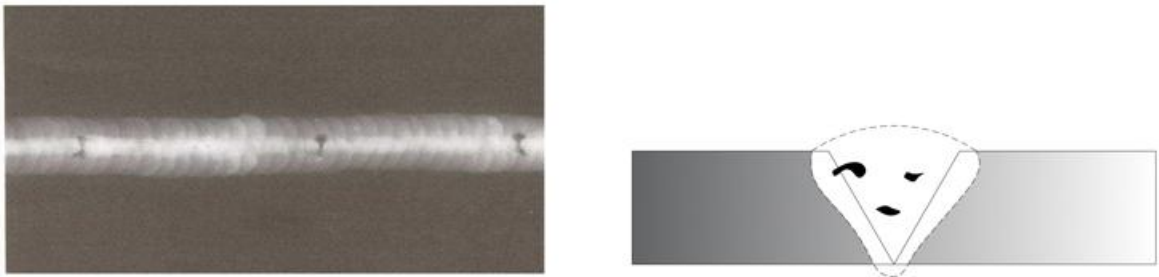


Figura 52: Inclusiones de escoria vistas con RX  
 Fuente: (Villacis Soria, 2011)  
 Elaboración: Propia

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la finalización de los diferentes ensayos no destructivos tanto superficiales como volumétricos, se presenta a continuación las conclusiones que surgieron durante el desarrollo de la presente tesis en base a los objetivos planteados, así como también se presentan ciertas recomendaciones para ayudar a futuros trabajos relacionados con el tema.

### 6.1.CONCLUSIONES

- El objetivo de la presente tesis se cumplió ya que se logró cubrir una gama de procedimientos con los cuales se procura dar la importancia que necesita la soldadura de una estructura metálica ya que es una parte importante dentro de la misma.
- Es necesario garantizar que una obra o construcción tenga procedimientos estandarizados para su debido control de calidad ya que se garantiza de mejor manera que los procesos llevados a cabo por los soldadores estén acorde a una norma de construcción que para el presente caso es de estructuras metálicas.
- El uso de líquidos penetrantes para la inspección visual es un método práctico y de muy bajo costo que no debe ser obviado porque gracias a estos se puede dar un diagnóstico confiable y con un grado de dificultad muy bajo.
- La gran ventaja que tiene el ultrasonido en comparación con una radiografía es el poder localizar con exactitud la ubicación de las discontinuidades y se puede dar una idea de hasta que profundidad eliminar el material de aporte para realizar reparaciones en caso de ser factible.

- Si bien es conocido que en una radiografía se puede observar exactamente la forma de las discontinuidades, solo se puede conocer la ubicación de esta en un plano a través de una vista de planta, en consecuencia, resulta como un impedimento en la determinación de la profundidad de la misma ya que solo se puede estimar a través de la oscuridad con que se manifiestan en la película radiográfica.
- Tanto la falta de material de aporte como el exceso afecta negativamente a las juntas soldadas. Se tiende a pensar que colocar más material de aporte ayuda a la resistencia de la soldadura, esto es un criterio muy erróneo ya que al colocar más material de aporte se produce un cordón muy pronunciado que forma un ángulo con el material base donde se producirá una concentración de esfuerzos que ocasionarán el inicio de una grieta.
- Durante la inspección volumétrica surgen ciertas dudas acerca de que metodología aplicar, lo cierto es que no se puede reemplazar una técnica por otra, cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas. Realizando una comparación de radiografía con ultrasonido para una inspección in situ, es viable realizar ultrasonido por la facilidad que el equipo tiene para ser transportado, sin embargo, se requiere personal calificado para caracterizar las discontinuidades e interpretar los resultados.

## 6.2.RECOMENDACIONES

- Para la realización de la inspección por ultrasonido, la configuración de los parámetros es muy importante y no debe ser omitida antes de cada ensayo ya que el equipo es muy sensible y una mala calibración podría dar indicaciones falsas.
- Previo a la inspección por ultrasonido es recomendable limpiar la superficie a analizar con la finalidad de remover todas las salpicaduras que impedirán un buen barrido con el palpador.

- Antes de realizar la inspección por ultrasonido, es recomendable limpiar la superficie a analizar con la finalidad de remover las salpicaduras que impedirán un buen barrido con el palpador.
- Durante la realización del ensayo de radiografía industrial, el profesional debe calcular los tiempos de exposición de manera correcta ya que la falta o exceso de exposición de radiación afecta a la calidad de la película.
- En las construcciones de estructuras metálicas o mixtas donde se tengan importantes elementos estructurales con juntas soldadas, el residente de obra o encargado debe asegurarse de la correcta ejecución de las soldaduras en base a la normativa vigente para evitar problemas futuros.
- Para una realización adecuada de soldadura es necesario tener en cuenta que se tiene el fenómeno de ZAT, el cual se refiere a la zona afectada por temperatura por lo que no es recomendable realizar varias reparaciones a una misma soldadura.

## REFERENCIAS

- AISC-360. (2016). *American Institute of Steel Construction*. Estados Unidos.
- ASME V. (2001). *The American Society of Mechanical Engineers*.
- ASNT. (2010). *Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification*.
- AWS D1.1. (2010). *Structural Welding Code Steel*. Estados Unidos.
- Carrión Viramontes, F. J., Lomelí González, M. G., Quintana Rodríguez, J. A., & Martínez Madrid, M. (2003). *LA EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA*. Mexico.
- Chimarro Navas, G., & Malitaxi Urresta, J. (2016). *Comparacion entre los metodos de ultrasonido y radiografía industrial para la interpretacion y evaluacion de discontinuidades en juntas soldadas con bisel tipo V y proceso SMAW segun norma AWS D1.1*. Quito.
- Construcciones, T. (2015). *Radiografía Industrial*. Obtenido de Academia.edu: [http://www.academia.edu/8013707/RADIOGRAF%C3%8DA\\_INDUSTRIAL](http://www.academia.edu/8013707/RADIOGRAF%C3%8DA_INDUSTRIAL)
- Espejo, H. (2003). *Evolucion de Ensayos no Destructivos*. Obtenido de <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/espejo.pdf>
- Gomez, E. (2006). *Ultrasonido Nivel II*. Madrid: FC Editorial.
- Hellier, C. (2003). *Handbook of nondestructive evaluation*. McGraw-Hill.
- Luna, M. (2015). *Introduccion a los Ensayos no Destructivos*. Obtenido de [https://www.academia.edu/7793020/INTRODUCCI%C3%93N\\_A\\_LOS\\_ENSAYOS\\_NO\\_DESTRUCTIVOS](https://www.academia.edu/7793020/INTRODUCCI%C3%93N_A_LOS_ENSAYOS_NO_DESTRUCTIVOS)
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de estructuras de acero*. Mexico: Alfaomega.
- NEC-SE-AC. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción para Estructuras de Acero*. Ecuador.
- OSMHatec. (2017). *Historia de los Ensayos no Destructivos*. Obtenido de [https://nanopdf.com/queue/que-entendemos-por-ensayo-no-destructivos\\_end\\_pdf?queue\\_id=1&x=1528681815&z=MjgwMDozNzA6YTE6YmNiMDpiYzhiOmUzZmI6ZjFhYzo0NDY0](https://nanopdf.com/queue/que-entendemos-por-ensayo-no-destructivos_end_pdf?queue_id=1&x=1528681815&z=MjgwMDozNzA6YTE6YmNiMDpiYzhiOmUzZmI6ZjFhYzo0NDY0)
- Porco, G., & Valer Montero, G. F. (2013). *Las tecnicas de ensayos no destructivos para el control de materiales y de estructuras de ingenieria civil*. Mar del Plata.
- Riaño Calderon, M., Rodriguez Calle, E., Romero Castaño, L., & Tabima, A. (11 de Diciembre de 2015). *Ensayos no destructivos PT - PM - RX*. Obtenido de Metalografía - Universidad Tecnologica de Pereira: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/ensayos-no-destructivos-pt-pm-rx/>
- Romero Reyes, B., & Proboste Contreras, F. (2013). *Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura*. Bío-Bío.
- Ruiz, A. (2015). *Discontinuidades del Material Base y la Soldadura*. Peru.
- UNLP, F. d. (2007). *Ensayos por la tecnica de rayos X*. Buenos Aires.

Villacis Soria, J. (2011). *Ensayos no destructivos por el metodo de particulas magneticas y su incidencia en materiales ferromagneticos*. Ambato.