UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

CONTROL DE CALIDAD EN CONEXIONES SOLDADAS DE MIEMBROS ESTRUCTURALES DE ACERO A-36 POR MEDIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

REALIZADO POR VERA B., Marco Antonio

PROFESOR GUIA ING. VELÁSQUEZ., José Manuel
ING. VERA M., Miguel

FECHA Junio, 2005

TESIS
IC 200
V4
J. 1

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

CONTROL DE CALIDAD EN CONEXIONES SOLDADAS DE MIEMBROS ESTRUCTURALES DE ACERO A-36 POR MEDIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: DIECINUEVE PUNTOS

J U R A D O E X A M I N A D O R

Firma:	Firma:	Firma:
Nombre: José M. Velásquez	Nombre:	Nombre:

REALIZADO POR VERA B., Marco Antonio

PROFESOR GUIA ING. VELÁSQUEZ., José Manuel
ING. VERA M., Miguel

FECHA Junio, 2005

Dedicatoria

Dedicado a mis Padres

Agradecimientos

Agradezco a en primer lugar a Dios por la feliz culminación de mi Proyecto de Grado. A mis padres por darme la confianza y ser mi apoyo en cada momento que lo necesitaba.

Deseo igualmente expresar mi más sincero agradecimiento, al Departamento de Control de Calidad de Industrias Metalúrgicas Van Dam (IMVD) a cargo, en su momento, de la Ingº Judith Inojosa y a todo su personal de inspectores que allí laboran, por contribuir de alguna u otra forma en la realización del siguiente trabajo de Grado, en especial al inspector Omar Salazar, quien ejecutó las pruebas de ultrasonido; así mismo IMVD fue quien colaboró con en el material de acero ASTM A-36 y con en personal de soldadores para la fabricación de las probetas con juntas soldadas.

También quiero agradecer Ingº Constantino Bocasini Gerente de Planta de la empresa SOPELCA, a la Universidad Simón Bolívar y a la Universidad Católica Andrés Bello quienes contribuyeron en el proceso de fabricación, maquinado y ensayo de las probetas.

A mi hermano el Ingº Juan Carlos Vera, Nivel II NDT, quien ejecutó la mayoría de los Ensayos No Destructivos, y me hizo importantes sugerencias en el contenido de la tesis; y por supuesto a mi padre el Ingº Miguel Vera, Nivel III NDT, quien sin su valiosa ayuda no hubiese sido posible la realización de esta investigación, ya que el como tutor industrial fue quien revisaba periódicamente el contenido de este Proyecto, además de dirigir y evaluar personalmente cada una de las pruebas contribuyó con todo el material bibliográfico.

Índice General

Pág.

Parte I

Dedicatoria..... I
Agradecimiento..... II
Sinopsis..... XI

Introducción..... 1

1. Metalurgia de la soldadura.

1.1 Ciclo térmico de las juntas soldadas..... 3

2. Procesos de Soldadura.

2.1. Proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido con electrodo recubierto (Shielded Metal Arc Welding - SMAW)..... 5
2.1.1. Funciones del Núcleo Metálico y del Revestimiento de Fundente del electrodo..... 5
2.1.2. Principales ventajas y limitaciones del Proceso SMAW 6
2.1.3. Influencia en las Posiciones de la Junta, la Corriente y el Diámetro del Electrodo en el Proceso de Soldadura SMAW..... 7

2.2. Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (Submerged Arc Welding - SAW). 9
2.2.1. Fundentes neutros..... 11
2.2.2. Principales ventajas y limitaciones del Proceso SAW..... 12
2.2.3. Influencia del Diámetro del Electrodo, la Corriente, el Voltaje, la Polaridad y la Velocidad de Viaje en el Proceso de Soldadura SAW..... 13

3. Conceptos Básicos (Indicación, Discontinuidad y Defecto)..... 17

4. Ensayos No Destructivos.

4.1. Inspección Visual..... 19
4.1.1. Principios y Descripción de la Técnica..... 19
4.1.2. Aplicaciones..... 20
4.1.3. Equipos de Inspección y Niveles de Iluminación..... 20

4.2. Inspección con Líquidos Penetrantes..... 21
4.2.1. Principios y Descripción de la Técnica..... 21
4.2.2. Penetrante Visible Removible con Solvente..... 25
4.2.3. Preparación de la Superficie..... 25
4.2.4. Métodos de Limpieza..... 26

4.2.5. Aplicación del Penetrante..... 26
4.2.6. Tiempo de Penetración. 27
4.2.7. Remoción del Exceso de Penetrante..... 27
4.2.8. El Revelador (revelador en suspensión no acuosa)..... 28
4.2.9. Inspección..... 29
4.2.10. Limpieza Final..... 30

4.3. Inspección con Partículas Magnéticas..... 30

4.3.1. Corriente Alterna (CA) y Continua (CC)..... 30
4.3.2. Curva de Histéresis (Permeabilidad, Retentividad y Fuerza Coercitiva).. 31
4.3.3. Principios y Descripción de la Técnica..... 32
4.3.4. Preparación de la Superficie..... 33
4.3.5. Magnetización Continua y Residual..... 34
4.3.6. Magnetización Longitudinal con Yugo..... 34
4.3.7. Método con Partículas Secas..... 35
4.3.8. Método con Partículas Húmedas Fluorescentes..... 35

4.4. Inspección con Ultrasonido..... 37

4.4.1. Principio del Método..... 37
4.4.2. Modos y Tipos de Onda..... 38
4.4.3. Descripción del Comportamiento del Haz Ultrasónico..... 39
4.4.4. Principales parámetros que deben ser controlados en un sistema ultrasónico..... 41
4.4.5. El Palpador..... 42
4.4.6. Método de Inspección por Pulso-Eco (impulsos)..... 47

4.5. Inspección con Radiografía..... 48

4.5.1. Principio del Método..... 48
4.5.2. Tipos de Radiación..... 48
4.5.3. Fuente de Rayos Gamma..... 49
4.5.4. Películas Radiográficas..... 52
4.5.5. Pantallas intensificadoras..... 53
4.5.6. Indicador de la Calidad de Imagen (ICI) (ICI tipo alambre - ASTM).... 54

5. Discontinuidades en Juntas Soldadas..... 55

6. Estimaciones de Costos en los Procesos de Soldadura.

6.1. Costo del Material Consumido (CM)..... 64
6.2. Costo Personal y de Labor..... 66
6.1.1. Estimando el Tiempo (T) de Soldadura o Tiempo de Arco..... 66
6.2.2. Estimando el Factor de Operación..... 67

7. Conclusiones y Recomendaciones..... 69

8. Referencias Bibliográficas..... 72

Anexos..... 74

Índice de Anexos

Parte II

Anexo A - Diseño de Juntas Soldadas

A.1. Símbolos de Soldadura..... 74
A.2. Diseño de Juntas Soldadas con Penetración Completa más utilizadas en Estructuras (Edificios y Puentes)..... 75
A.3. Diseño de Probetas con Juntas Soldadas..... 77

Anexo B - Especificación del Procedimiento de Soldadura - EPS (Welding Procedure Specification - WPS)..... 84

Anexo C - Procedimientos y Reportes de los Ensayos No Destructivos (END) de Juntas Soldadas de Acero ASTM A-36.

C.1. Procedimiento y Reporte de Inspección Visual de Soldaduras..... 98
C.2. Procedimiento y Reporte de Inspección de Soldaduras con Líquidos Penetrantes..... 122
C.3. Procedimiento y Reporte de Inspección de Soldaduras con Partículas Magnéticas..... 133
C.4. Procedimiento y Reporte de Inspección de Soldaduras con Ultrasonido..... 146
C.5. Procedimiento y Reporte de Inspección de Soldaduras con Radiografía..... 161

C.6. Ensayos No Destructivos Superficiales en Probetas con Defectos..... 178
Reporte de Inspección Visual de Soldaduras 180
Reporte de Inspección de Soldaduras con Líquidos Penetrantes..... 181
Reporte de Inspección de Soldaduras con Partículas Magnéticas..... 184

C.7. Ensayos No Destructivos Volumétricos de Ultrasonido y Radiografía en Probetas con Defectos..... 190
Reporte de Inspección de Soldaduras con Ultrasonido..... 193
Reporte de Inspección de Soldaduras con Radiografía..... 197

Anexo D - Ensayos Destructivos aplicados a Probetas de Acero ASTM A-36 con Juntas Soldadas para la Calificación del Procedimiento.

D.1. Ensayo de Tracción en Juntas a Tope 198
D.2. Ensayo de Doblez de Lado en Juntas a Tope..... 206
D.3. Ensayo de Macroataque en Juntas T con Soldadura de Filete..... 211
D.4. Comparación entre los Ensayos de Macroataque y Ultrasonido en Juntas "T" 216
D.5. Registros de Calificación del Procedimiento (RCP)..... 218

Anexo E - Estimaciones de Costos en los Procesos de Soldadura. Caso de Estudio "Puente de Acero del Caño Matiyure"..... 221

Anexo F - Tablas utilizadas en el Análisis de Costos del Proceso de Soldadura..... 245

Planos 1 y 2 (Puente Caño Matiyure)

Índice de tablas y Gráficas

Pág.

Parte I

Tabla 2.1 - Rangos de corriente para electrodos con Proceso SAW..... 13

Tabla 4.2.1 - Tiempo de Penetración según el tipo de discontinuidad en material de acero de bajo carbón..... 27
Tabla 4.4.1 - Impedancia Acústica (Z) en acero de baja aleación..... 37
Tabla 4.5.1 - Constante Específica de Emisión..... 50
Tabla 4.5.2 - Clasificación de las peliculas Radiográficas según ASTM E-94..... 53

Tabla 6.1- Eficiencia de Deposición DE..... 65
Tabla 6.2 - Peso del metal depositado (WW) en juntas con soldadura de filete..... 65
Tabla 6.3 - Factor de Operación (OF) para diferentes Métodos de Soldadura..... 68
Tabla 6.4 - Factor de Operación (OF) de acuerdo al tipo Proceso de Soldadura..... 68

Parte II (Anexos)

Tabla C.0.1 - Métodos de Ensayos No Destructivos aplicables a la detección de algunas discontinuidades..... 93
Tabla C.0.2 - Métodos de Ensayos No Destructivos aplicables en Juntas a Tope y "T". 93
Tabla C.0.3 - Discontinuidades Comúnmente Asociadas con el Proceso de Soldadura 94
Tabla C.0.4 - Tipos de Discontinuidades Soldadas..... 94
Tabla C.0.5 - Criterios de Aceptación y Rechazo..... 96
Tabla C.1.1 - Tamaño minimo de la soldadura de filete..... 100
Tabla C.1.2 - Convexidad máxima de la soldadura de filete..... 101
Tabla C.4.1 - Ángulo de ensayo..... 147
Tabla C.4.2 - Ángulo de ensayo (continuación de la tala C.4.1)..... 149
Tabla C.4.3 - Nivel de Inspección..... 155
Tabla C.4.4 - Criterio de Aceptación-Rechazo con Ensayo de Ultrasonido para Conexiones No Tubulares Cargadas Estáticamente y Cíclicamente..... 157
Tabla C.5.1 - Máxima Distorsión Geométrica (Ug) de acuerdo al espesor del material. 162
Tabla C.5.2 - Tamaño de Indicadores de calidad de Imagen..... 165
Tabla C.5.3 - Requerimientos del Indicador de Calidad Imagen tipo alambre..... 166
Gráfica C.5.1 - Requerimientos de la Calidad de la Soldadura para Discontinuidades Alargadas en Estructuras No Tubulares Cargadas Estáticamente..... 170
Gráfica C.5.2 - Requerimientos en la Calidad de la Soldadura para Discontinuidades que ocurren en Soldaduras a Tensión en Estructuras No Tubulares Cargadas Cíclicamente..... 173

Gráfica C.5.3 - Requerimientos en la Calidad de la Soldadura para Discontinuidades que ocurren en Soldaduras a Compresión en Estructuras No Tubulares Cargadas Cíclicamente..... 174

Tabla D.1.1 - Numero de Especimenes para los Ensayos Destructivos de Tracción y Doblez de Lado..... 198
Tabla D.1.2 - Condiciones en las dimensiones del Espécimen de Tracción..... 200
Tabla D.1.3 - Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A-36..... 203
Tabla D.2.1 - Dimensiones que corresponden al equipo con rodillo..... 207

Tabla E.1 - Ciclo de Trabajo en el Proceso con Arco Sumergido..... 222
Gráfica E.1 - Peso del metal depositado..... 226
Gráfica E.2 - Peso del fundente depositado..... 226
Tabla E.2 - Peso del metal depositado (WW) y peso del fundente..... 227
Tabla E.3 - Rata de deposición para Soldadura con Arco Sumergido..... 227
Gráfica E.3 - Máximo voltaje en Procesos con Arco Sumergido..... 227
Tabla E.4 - Peso del Metal de Soldadura Depositado (WW) en el diseño de Juntas a Tope del Puente Matiyure..... 236
Tabla E.5 - Rata de deposición para electrodos E7018 con Soldadura de Arco Metálico Protegido (SMAW) 236

Tabla F.1 - Proceso de Soldadura SAW – Mecanizado..... 245
Tabla F.2 - Proceso de Soldadura SMAW para filetes en posición vertical..... 245
Tabla F.3 - Proceso de Soldadura SMAW para filetes en posición plana..... 246
Tabla F.4 - Proceso de Soldadura SMAW en juntas a tope en posición vertical..... 246
Tabla F.5 - Precios del alambre Lincolweld L-61 de acuerdo a su contenido..... 247
Tabla F.6 - Precios del fundente Licolnweld 860 de acuerdo a su contenido..... 247
Tabla F.7 - Precios del electrodo Licolnweld Jetweld LH 78 MR..... 248
Tabla F.8 - Tabulador de oficios y salarios básicos de la convención colectiva de trabajo 2003-2006..... 248

Índice de Figuras

Pág.

Parte I

Fig. 1.1 - Diagrama Fe-C y partes de las juntas soldadas..... 4

Fig. 2.1 - Proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido..... 5
Fig. 2.2 - Esquema del equipo para el Proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido..... 5
Fig. 2.3 - Variaciones de la velocidad de la soldadura en diferentes posiciones de la junta..... 8
Fig. 2.4 - Variación de la corriente, velocidad de viaje y longitud de arco en Proceso con Arco Metálico Protegido (SMAW)..... 8
Fig. 2.5 - Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW)..... 9
Fig. 2.6 - Máquinas de soldar para Proceso SAW..... 11
Fig. 2.7 - Esquema del equipo para el Proceso SAW..... 11

Fig. 2.8 - Variación de la penetración y el ancho del cordón de soldadura con el diámetro del electrodo..... 13
Fig. 2.9 - Variación de la penetración y el ancho del cordón de soldadura con la velocidad (IPM) y con el amperaje..... 15

Fig. 4.2.1 - Características de humectabilidad determinadas por el ángulo de contacto.. 22
Fig. 4.2.2 - Variación de la altura o depresión de un líquido en un tubo capilar vertical. 23
Fig. 4.2.3 - Etapas de aplicación del Ensayo con Líquidos Penetrantes..... 24
Fig. 4.2.4 - Aplicación del Penetrante..... 26
Fig. 4.3.1 - Corriente Continua, Alterna y Rectificada de Media Onda..... 31
Fig. 4.3.2 - Curva de histéresis..... 32
Fig. 4.3.3 - Principio de acción del flujo magnético sobre una discontinuidad..... 33
Fig. 4.3.4 - Magnetización Longitudinal con Yugo..... 35
Fig. 4.3.5 - Grietas en el cordón de soldadura, inspeccionadas con partículas secas de color rojo y partículas húmedas fluorescentes..... 36
Fig. 4.4.1 - Equipo de Ultrasonido. Palpador angular de 70° y palpador Normal..... 37
Fig. 4.4.2 - Onda Longitudinal o de Compresión y Onda Transversal o de Corte..... 39
Fig. 4.4.3 - Descripción del Comportamiento del haz ultrasónico..... 40
Fig. 4.4.4 - Tipos de impulso de acuerdo al grado de amortiguamiento del palpador..... 43
Fig. 4.4.5 - Representación gráfica de incidencia normal entre dos medios..... 44
Fig. 4.4.6 - Representación gráfica de incidencia angular..... 45
Fig. 4.4.7 - Esquema de un palpador normal y angular..... 46
Fig. 4.4.8 - Método por pulso-eco en un palpador que trabaja como emisor y receptor.. 47
Fig. 4.5.1 - Esquema y fotografía de una fuente de Iridio 192 de 100 Curies..... 51
Fig. 4.5.2 - ICI tipo alambre..... 54

Fig. 5.1 - Traslape producido en la cara de la soldadura de una junta a tope..... 55
Fig. 5.2 - Socavado y Llenado incompleto producidos en la interfase de la soldadura de juntas a tope con bisel..... 56
Fig. 5.3 - Porosidad distribuida uniformemente y porosidad agrupada..... 58
Fig. 5.4 - Radiografía de una Soldadura con Proceso Manual (SMAW) con inclusiones de escoria..... 59
Fig. 5.5 - Fusión y penetración incompleta en juntas a tope con bisel..... 60
Fig. 5.6 - Grietas longitudinales y transversales en juntas a tope..... 62
Fig. 5.7 - Grietas en el pie de la soldadura y grietas bajo el cordón en Juntas T..... 63

Parte II (Anexos)

Fig. B.1 - Etapas del Proceso de Soldadura SMAW en una junta a tope..... 86
Fig. B.2 - Proceso de Soldadura SAW en una junta a tope con una máquina LT-7..... 86
Fig. C.0.1 - Discontinuidades en una Soldadura con Ranura en Doble V en una Junta a Tope..... 95
Fig. C.0.2 - Discontinuidades en una Soldadura con Pase Simple y Doble Filete en una Junta en T..... 95
Fig. C.1.1 - Perfiles Aceptables e Inaceptables de Soldadura..... 102
Fig. C.1.2 - Soldadura de filete con Proceso SAW en probeta G1A1..... 103
Fig. C.1.3 - Soldadura de filete en juntas "T" con Proceso SMAW..... 104
Fig. C.1.4 - Probetas con Proceso SAW..... 105
Fig. C.1.5 - Probetas con Proceso SMAW soldadas en posición 3G..... 106

Fig. C.1.6 - Medición del espesor del material de acero A-36..... 107
Fig. C.1.7 - Medición del ángulo del bisel con una galga Universal Cambridge..... 107
Fig. C.1.8 - Galga Cambridge Universal, utilizada en la medición del tamaño de la pierna y de la garganta real en una soldadura de filete..... 108
Fig. C.1.9 - Galga para filetes, utilizada en la medición del tamaño de la pierna y convexidad en una soldadura de filete..... 108
Fig. C.1.10 - Galgas para filetes y Cambridge, utilizadas en la medición del refuerzo de la soldadura..... 109
Fig. C.1.11 - Medición de socavación con una Galga V-WAC..... 109
Fig. C.1.12 - Tamaños de las Soldaduras de Filete..... 110
Fig. C.1.13 - Criterio utilizado para medir la convexidad en las soldaduras de filete..... 111
Fig. C.1.14 - Probetas con Juntas a tope y en "T"..... 112
Fig. C.2.1 - Limpieza con solvente..... 125
Fig. C.2.2 - Aplicación del penetrante y revelador a probetas con juntas a tope..... 125
Fig. C.2.3 - Ausencia de discontinuidades en las probetas con Proceso SAW..... 126
Fig. C.2.4 - Aplicación del penetrante a probetas con juntas a tope..... 126
Fig. C.2.5 - Ausencia de discontinuidades en las probetas con Juntas a tope y en "T" con proceso SMAW..... 127
Fig. C.3.1 - Aplicación de partículas secas a las probetas con junta a tope (Proceso SAW) y junta en "T" con soldadura de filete (Proceso SMAW)..... 136
Fig. C.3.2 - Emisión de luz ultravioleta de una lámpara UV..... 141
Fig. C.3.3 - Inspección con partículas húmedas fluorescentes a probetas con juntas a tope..... 141
Fig. C.4.1 - Desplazamiento del palpador y trayectoria de haz ultrasónico..... 147
Fig. C.4.2 - Tipos de Juntas..... 148
Fig. C.4.3 - Bloque referencial de Ultrasonido (IIW)..... 151
Fig. C.4.4 - Calibración del equipo de ultrasonido con palpador angular..... 152
Fig. C.4.5 - Calibración del equipo de ultrasonido con palpador normal..... 153
Fig. C.4.6 - Vista de planta de los modelos de exploración en el ensayo de ultrasonido 154
Fig. C.4.7 - Determinación de la distancia (d) y profundidad (P) a la cual se encuentra una heterogeneidad..... 155
Fig. C.4.8 - Pulso de ultrasonido en probetas con junta a tope..... 159
Fig. C.5.1 - Distorsión Geométrica (Ug) en la técnica de PS-VS..... 163
Fig. C.5.2 - Identificación de la Radiografía y ubicación del Indicador de Calidad de Imagen (ICI - tipo Alambre)..... 164
Fig. C.5.3 - Indicador de Calidad de Imagen (ICI - tipo Alambre)..... 165
Fig. C.5.4 - Máxima aceptación de las Imágenes Radiográficas..... 171
Fig. C.5.5 - Requerimientos en la Calidad de la Soldadura para Juntas a Tensión en Estructuras Cargadas Cíclicamente..... 175
Fig. C.5.6 - Presencia de exceso de refuerzo de soldadura en la probeta G1A3 con Proceso SAW y ranura recta..... 176
Fig. C.6.1 - Detección de grietas finas y pequeñas con ayuda de un lente de aumento... 178
Fig. C.6.2 - Probeta D2 con Proceso SAW examinada con diferentes Ensayos No Destructivos Superficiales..... 179
Fig. C.7.1 - Calibración de la sensibilidad en un equipo Krautkrämer USD 10..... 190
Fig. C.7.2 - Determinación de la discontinuidad (falta de penetración) en la probeta G1B3 con ranura recta y proceso SMAW..... 190
Fig. C.7.3 - Esquema del recorrido del haz ultrasónico para la determinación de la discontinuidad..... 191
Fig. C.7.4 - Trayectoria Total del sonido (H)..... 192

Fig. C.7.5 - Equipo de ultrasonido EPOCH III con su bloque de calibración y la probeta G1B3 con proceso SMAW..... 194
Fig. C.7.6 - Resultado de la inspección con el equipo EPOCH III..... 194
Fig. C.7.7 - Radiografía y corte longitudinal a la soldadura de la probeta D2..... 195
Fig. C.7.8 - Radiografía de una probeta con proceso SMAW de ¾" de espesor con presencia de grietas y escoria en la soldadura..... 196
Fig. C.7.9 - Radiografía de una falta de penetración en la probeta G1B3 con ranura recta y Proceso SMAW..... 196

Fig. D.1.1 - Localización de los especimenes de ensayo a tensión y doblez de lado sobre una probeta soldada correspondiente a la Calificación del EPS..... 199
Fig. D.1.2 - Localización de los especimenes sobre la probeta soldada utilizada para el Control de Calidad..... 200
Fig. D.1.3 - Espécimen de Tracción..... 200
Fig. D.1.4 - Espécimen de Tracción con medidas de acuerdo a la tabla D.1.2..... 201
Fig. D.1.5 - Especimenes de tracción correspondientes a un Proceso SMAW con ranura en "V"..... 201
Fig. D.1.6 - Entalla en el material base en la probeta G1A3 con proceso SAW y ranura recta..... 202
Fig. D.1.7 - Delineamiento de la probeta para conocer el porcentaje de alargamiento... 202
Fig. D.1.8 - Formación de cintura en el material base del espécimen de tracción poco antes de llegar al punto de rotura..... 202
Fig. D.1.9 - Curva de Ingeniería de Esfuerzo-Deformación en un Acero de Bajo Carbón..... 203
Fig. D.1.10 - Curva Nominal de Esfuerzo-Deformación de Varios Aceros..... 203
Fig. D.2.1 - Espécimen de doblamiento de lado..... 206
Fig. D.2.2 - Alternativa de equipo con rodillo para Ensayos de Doblez..... 206
Fig. D.2.3 - Inspección con líquidos penetrantes a los especimenes de doblez..... 207
Fig. D.2.4 - Espécimen de doblez con penetración completa durante el Ensayo de Doblamiento. 207
Fig. D.2.5 - Especimenes de doblez con penetración completa después del Ensayo de Doblamiento..... 208
Fig. D.3.1- Ensayo de Macroataque para soldaduras de filete correspondiente a la Calificación del EPS..... 211
Fig. D.3.2 - Macrografía en filetes de soldadura..... 215
Fig. D.4.1 - Inspección con un palpador normal en la soldadura utilizando un equipo digital Krautkrämer..... 216
Fig. D.4.2 - Resultados del ensayo de ultrasonido en una junta en T con soldadura de filete utilizando un palpador normal..... 217
Fig. D.4.3 - Discontinuidad inherente al tipo de junta en T con soldadura de filete, inspeccionado con un palpador angular..... 217

Fig. E.1 - Máquina de soldar industrial con doble cabezal para Proceso SAW..... 221
Fig. E.2 - Distorsión Angular..... 224
Fig. E.3 - Distorsión longitudinal..... 224
Fig. E.4 - Pandeo y Torsión..... 225
Fig. E.5 - Tipos de juntas que presentan los perfiles SS 350x121 y SS 350x144..... 236
Fig. E.6 - Miembros soldados utilizados en el Puente Matiyure..... 244

Sinopsis

El presente trabajo Especial de Grado tiene por objeto desarrollar un *"Manual de Control de Calidad"* a las conexiones soldadas de miembros estructurales de acero fabricados en talleres de construcción metalmecánica por medio de Ensayos No Destructivos, así como el estudio de los dos principales procesos de soldadura aplicados, los cuales son:

1. Proceso de soldadura con electrodo revestido y Arco Metálico Protegido (SMAW) aplicado en forma manual en talleres y trabajo de campo
2. Proceso de soldadura con Arco Sumergido (SAW) aplicado en forma mecánica en talleres solamente.

La inspección de la soldadura ha sido hecha utilizando los cinco Ensayos No Destructivos que tienen más aplicación en la industria metalmecánica los cuales son:

a. Inspección Visual de la Soldadura (VT), utilizando diferentes tipos de galgas
b. Inspección con Líquidos Penetrantes (PT), aplicado por medio de aerosoles utilizando método visible removible con solvente
c. Inspección con Partículas Magnéticas (MT), utilizando como equipo un Yugo Magnaflux con corriente alterna (C.A.), aplicando métodos seco y fluorescente
d. Inspección con Radiografía Industrial (RT), con exposición de isótopo radioactivo Iridio 192
e. Inspección con Ultrasonido (UT), utilizando un equipo digital A-SCAN USD 10 Krautkrämer con palpador normal y angular

Los primeros tres VT, PT y MT corresponden a los Ensayos Superficiales y los dos últimos RT y UT, a los Ensayos Volumétricos. Todos estos Ensayos han sido aplicados utilizando procedimientos preparados y aprobados por un Inspector certificado como Nivel III de acuerdo a la Práctica Escrita Recomendada por la Asociación Americana de Ensayos No Destructivos (ASNT). Los procedimientos contemplan los criterios de aceptación y rechazo utilizados para la evaluación de la soldadura los cuales luego se asentaran en lo registros correspondientes. Para esto se diseñaron y fabricaron probetas de acero al carbón

ASTM A-36 con diferentes juntas soldadas, espesor constante de 3/8" (10 mm) y en diferentes posiciones de soldadura como por ejemplo:

- Junta en "T" con soldadura de filete, en posición 2F y 3F
- Junta a Tope con ranura en "V", en posición 1G y 3G
- Junta a Tope con ranura recta, en posición 1G y 3G

Todas las juntas se fabricaron con los Procesos de Soldadura ya antes mencionado SMAW y SAW; se elaboraron, como parte de los registros que conforman el diseño de la junta, las *"Especificaciones del Procedimiento de Soldadura"* (EPS) de acuerdo al Código de Soldadura Estructural AWS D.1.1. Las juntas a tope fueron calificadas mediante Ensayo Destructivo, es decir, se evalúan previamente las probetas con Ensayos No Destructivos; de ser aceptadas se prepara un RCP "Registro de Calificación del Procedimiento" mediante Ensayos Destructivos en el cual los ensayos de Tensión y Doblez son determinantes para la calificación del diseño de la junta, de no ser aceptadas no es necesario elaborar un EPS.

Debido a que después de preparar siete probetas soldadas solamente se detectó una con defecto (falta de penetración) en forma aleatoria, fue necesario generar discontinuidades en las probetas, agregando cobre o por la acción de un electrodo húmedo en el proceso de soldadura, con la finalidad aplicar los criterios de aceptación y rechazo de los Ensayos No Destructivos (END) establecidos por el Código AWS D.1.1 al momento de evaluar una soldadura.

Para el análisis de los costo en los proceso de soldadura se consideró un caso real de estudio, el cual corresponde al "Punte de Acero del Caño Matiyure". Se utilizó el método del Manual de la Lincoln (The Procedure Handbook of Arc Welding) mediante selección de alternativas. Conociendo los costos de los insumos, la mano de obra al precio del mercado actual, el peso del material depositado y las ratas de deposición de los electrodos, y considerando algunas variables tales como: velocidad de viaje, espesor del material y diámetro del electrodo, se obtiene una alternativa que no necesariamente es la más económica pero que tiene que ser aceptable de acuerdo a lo establecido por los planos de diseño y a lo especificado por el Código AWS 1.1 2000 al momento de inspeccionarse durante la etapa de Control de Calidad.

Introducción

Normalmente y como parte de nuestra realidad la inspección para el Control de la Calidad en las obras de Ingeniería Civil está más orientada en el área de concreto que el de las estructuras metálicas. Es poco común ver a los Ingenieros Civiles que ejerzan como Ingenieros Inspectores en el Control de Calidad de Conexiones Soldadas de acero bien sea en el taller o en el trabajo de campo, por esta razón es conveniente dar a conocer a los futuros ingenieros o recién egresados, *mediante la elaboración de un Manual*, los métodos de inspección No Destructivas más usados en juntas soldadas de acuerdo con el Código de Soldadura Estructural en Acero AWS D.1.1, bien sea para la fabricación de perfiles estructurales de acero en planta como en construcciones de conexiones soldadas en campo.

Se puede decir que los Ensayos No Destructivos resultan ser una herramienta rápida y confiable en el Control de Calidad en las juntas soldadas de acero pero poco conocido en el campo de la Ingeniería Civil, en cuanto al porque y donde aplicarlo, así como las responsabilidades que debe tener el Ingeniero Inspector en el cumplimiento del diseño del proyecto de acuerdo a los planos de ingeniería o a las especificaciones de diseño del Código de Soldadura Estructural en Acero AWS D.1.1.

Como la inspección en campo y en planta es una limitante en esta investigación, se diseñaron y fabricaron probetas de acero al carbón ASTM A-36 con diferentes juntas soldadas y espesor constante. Cada una de la juntas soldadas se fabricarán en diferentes posiciones para tratar de simular con la realidad la ejecución de un proyecto bien sea en taller o campo, y de acuerdo a los grados de dificultad que se presenten con las posiciones, proceder a evaluar las soldaduras con diferentes Métodos de Inspección No Destructiva y determinar los posibles defectos.

El análisis de los costo en los proceso de soldadura forma una parte esencial en la ejecución del proceso. No se necesita solamente estimar las alternativas con menor costo en la producción de miembros estructurales de acero, sino que deben cumplir con las

"Especificaciones del Procedimiento de Soldadura" (EPS) de tal forma que no se generen defectos durante el Proceso como consecuencia de:

- Elevadas velocidades de viaje en la máquina con Proceso SAW
- Diámetro excedido en el alambre para soldar con Proceso SAW, el cual admite alto amperaje pero que no corresponden con el espesor del material.

Al no cumplir con estas condiciones se tiene que reparar en forma manual (Proceso SMAW) con lo cual se retraza la producción, debido a un mayor tiempo de soldadura, incrementando el Costo de Mano de Obra y por lo tanto un aumento en el Costo Directo.

1. Metalurgia de la soldadura

En las operaciones de soldadura por fusión, con o sin metal de aporte, las partes soldadas son sometidas a un ciclo térmico que consta de las siguientes etapas:

1. Calentamiento localizado muy rápido de los metales (base y de aporte)
2. Aparición de metal fundido que, por lo menos en una parte, proviene del metal base
3. Formación de una zona o charco de metal de metal fundido
4. Enfriamiento rápido del conjunto (metal base y de soldadura)
5. Gradientes de temperatura a lo largo de toda la junta soldada

Durante las operaciones de soldadura ocurren fenómenos metalúrgicos tales como la fusión, reacciones de gases (nitrógeno, oxígeno e hidrógeno) con el metal líquido, reacciones de fases líquidas no metálicas con el metal fundido, interacciones de fases líquidas y sólidas, solidificación, segregación y reacciones en el estado sólido. Las características del ciclo térmico de soldadura y los fenómenos que ocurren durante ésta influyen grandemente en la microestructura, propiedades y sanidad de las uniones soldadas.

1.1. Ciclo térmico de las juntas soldadas

Al efectuarse las operaciones de soldadura, las juntas experimentan un ciclo de calentamiento y enfriamiento en el que sus diferentes partes se ven sometidas a un amplio intervalo de temperatura, que oscila desde temperaturas superiores a la de fusión, en el metal de soldadura, hasta prácticamente la ambiente, en el metal base, pasando por el intervalo de transformación. La porción del metal base que no se funde durante la soldadura, pero que es calentada a temperaturas en las que se alteran la microestructura y las propiedades mecánicas del metal base, es llamada zona afectada térmicamente (ZAT). La resistencia mecánica y la tenacidad de la zona afectada térmicamente depende del tipo del metal base, del proceso y el procedimiento de soldadura usado.

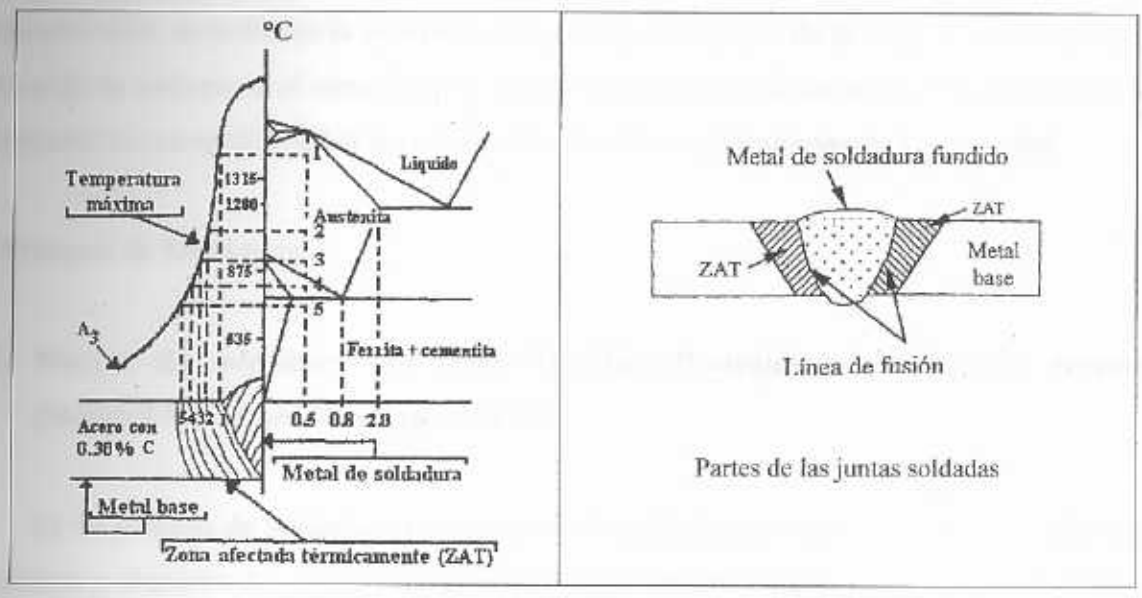


Fig. 1.1 - Diagrama Fe-C y partes de las juntas soldadas

Las regiones de la zona afectada térmicamente en los aceros que se endurecen por transformaciones de fase durante la soldadura, así como su relación con las temperaturas pico alcanzadas y el diagrama Fe-C se muestra en la figura 1.1. La región 1 de la ZAT de la figura anterior es la más próxima a la línea de fusión y contiene grano grueso que creció rápidamente debido al calentamiento a temperaturas cercanas a la de fusión; el tamaño de grano grueso aumenta la templabilidad, de manera que esta región puede transformarse rápidamente en martensita durante el enfriamiento. La región 2 también se austenitiza, pero la temperatura que alcanza es demasiado baja para producir crecimiento de grano, por lo que su templabilidad no se incrementa significativamente, pero aún puede transformarse en martensita si la velocidad del enfriamiento es suficientemente rápida o si el contenido de aleación es suficientemente alto. En la región 3, algunos granos se transforman en austenita otros no, y el tamaño de grano es muy fino. En la región 4 no ocurre transformación austenítica, pero los granos de ferrita se ven sometidos a un efecto de revenido por el calor de soldadura.

El calor aportado por paso influye en forma directa en la velocidad de enfriamiento, por lo que determina los productos finales de transformación y el ancho de cada región de la ZAT.

Debido a que la martensita de alto contenido de carbono es dura y frágil, puede crear problemas de alta dureza y agrietamiento en la ZAT. La martensita por sí sola, generalmente no provoca agrietamiento, pero si contiene hidrógeno disuelto o está sometida a esfuerzos

residuales altos, es probable la ocurrencia de grietas. La dureza de la ZAT es una función del contenido de carbono en el metal base, y cuando el contenido de carbono aumenta, también se incrementa la susceptibilidad al agrietamiento y la dureza, disminuyendo la tenacidad.

2. Procesos de Soldadura

2.1. Proceso de soldadura por Arco Metálico Protegido con electrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding - SMAW)

Es un proceso de soldadura por arco, en el cual el arco se produce entre un electrodo recubierto y el charco de soldadura. La protección se obtiene a partir de la descomposición del recubrimiento, no se aplica presión y el metal de aporte procede principalmente del electrodo. También se le conoce con los nombres de "soldadura manual", "soldadura de varilla" y "soldadura eléctrica". La siguiente figura ilustra de manera esquemática la operación de este proceso.

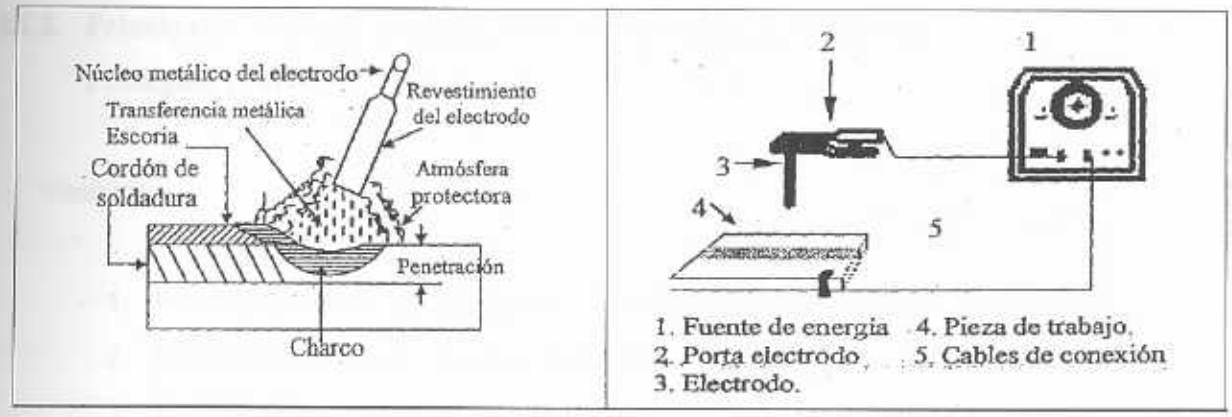


Fig. 2.1 - Proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido

Fig. 2.2 - Esquema del equipo para el Proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido

2.1.1. Funciones del núcleo metálico y del revestimiento de fundente del electrodo

Funciones del núcleo metálico

1. Conducir la corriente eléctrica para establecer el arco con el metal base.

2. Suministrar la totalidad o la mayor parte del metal de aporte.

Funciones del revestimiento de fundente del electrodo

1. Suministrar la atmósfera protectora al arco y al charco de metal
2. Suministrar agentes desoxidantes y limpiadores al metal de soldadura fundido
3. Formar una capa de escoria para proteger al metal fundido y evitar enfriamientos bruscos y oxidación del metal sólido caliente.
4. Suministrar elementos de aleación al metal de soldadura.
5. En algunos electrodos, suministrar parte del metal de aporte, en forma de polvo de hierro.
6. Fijar características de operación tales como tipo de corriente y la polaridad con que deben ser empleados los diferentes tipos de electrodo, así como la profundidad de la penetración, la posición de soldadura y otras características.
7. Estabilizar el arco.

2.1.2. Principales ventajas y limitaciones del Proceso de Soldadura con Arco Metálico Protegido (SMAW)

Ventajas

1. Puede emplearse en cualquier posición (dependiendo del electrodo usado)
2. Puede emplearse en campo y en taller.
3. Es aplicable a un intervalo amplio de espesores (aproximadamente de 1.2 mm en adelante)
4. Se pueden emplean cables largos para tener acceso a sitios ubicados a gran distancia de la fuente de energía
5. Es útil para soldar ensambles estructurales complejos.

Limitaciones

1. La calidad de las uniones depende en gran medida de la habilidad del personal.
2. La escoria debe ser removida completamente antes de aplicar el siguiente paso.
3. Debido a que los electrodos tienen una longitud fija, las operaciones deben detenerse después de que se consume cada electrodo.
4. Tiene una eficiencia de depósito relativamente baja.
5. La porción del electrodo que sujeta el porta electrodo no se aprovecha.
6. La corriente de soldadura está limitada por el calentamiento, por resistencia del electrodo y por el hecho que la temperatura del electrodo no debe exceder la de la desintegración del recubrimiento

2.1.3. Influencia en las Posiciones de la Junta, la Corriente y el Diámetro del Electrodo en el Proceso de Soldadura con Arco Metálico Protegido (SMAW)

Posiciones en las Juntas: la posición de la junta es con frecuencia el primer factor en la selección del electrodo y por lo tanto es responsable en la velocidad y los costos de la soldadura. Donde sea posible se debería trabajar en posición plana para soldar con mayor velocidad.

Las planchas de acero con un espesor de 3/16" o más grandes son soldadas más rápidamente en la posición plana. Esta posición permite una manipulación más fácil del electrodo y permite usar electrodos de llenado y enfriamiento rápido. Las variaciones en la velocidad con diferentes posiciones de juntas se ilustran en la figura 2.3

Corriente: usar DCRP (Corriente Directa y Polaridad invertida) cada vez que el tamaño del electrodo es de 5/32" o menor. Para electrodos de diámetro mayores use preferiblemente AC (Corriente Alterna) para mejorar las características operacionales. La corriente Directa (DC) elevada aumenta el "soplo de arco" como alternativa a este problema se usa la Corriente Alterna (CA) o se limita la corriente.

Muchas de las variables de operación pueden afectar la calidad y apariencia de la soldadura. El efecto producido por la mayoría de estas variables se ilustra en la figura 2.4

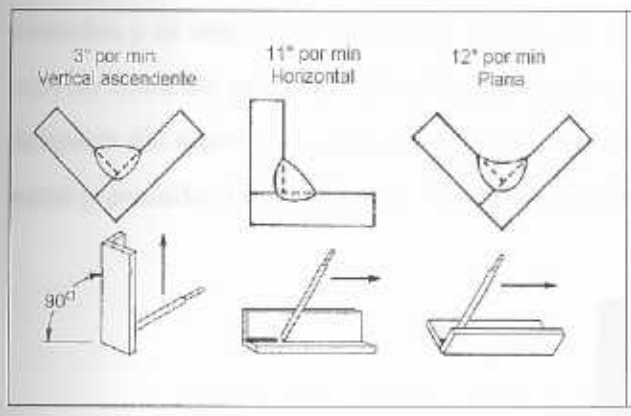


Fig. 2.3 – Variaciones de la velocidad de la soldadura en diferentes posiciones de la junta

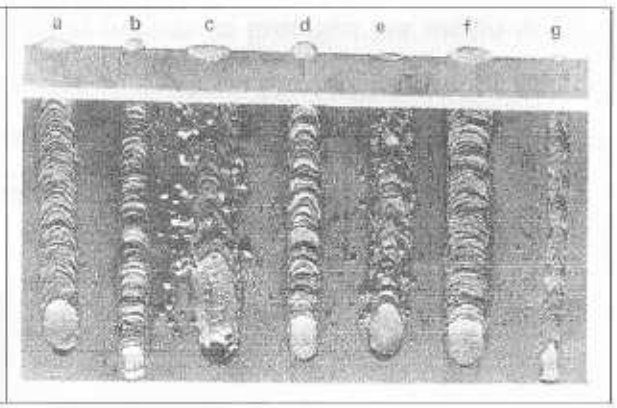


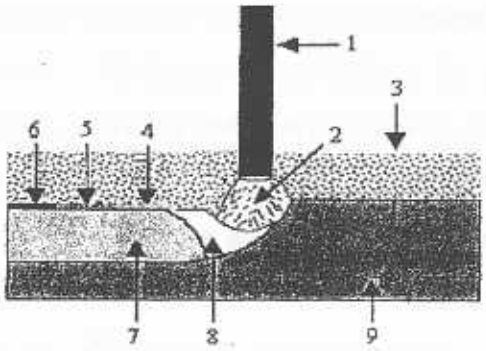
Fig. 2.4 - (a) apropiada corriente, velocidad de viaje y longitud de arco (b) corriente muy baja (c) corriente muy alta (d) longitud del arco muy corta (e) longitud del arco muy larga (f) velocidad de viaje muy lenta (g) velocidad de viaje muy rápida

Diámetro del Electrodo: los electrodos de mayor diámetro permiten soldar con corrientes altas y alta rata de deposición. Por esta razón el uso práctico de electrodos de gran diámetro es consistente con una buena calidad de la soldadura. El tamaño del electrodo es limitado por muchos factores, pero las más importantes consideraciones, usualmente son:

1. Elevada corriente aumenta la penetración. Por esta razón el tamaño del electrodo es limitado para láminas y con pases en la raíz donde las "quemaduras" pueden ocurrir.
2. El tamaño práctico del diámetro del electrodo para soldadura vertical y sobrecabeza es 3/16", y 5/32" es el tamaño máximo para electrodos de bajo hidrógeno.
3. Las dimensiones de la junta algunas veces limita el diámetro del electrodo que se colocará en la junta.

2.2. Proceso de Soldadura con Arco Sumergido (Submerged Arc Welding - SAW)

Proceso en el que se emplea uno o más arcos entre el o los electrodos metálicos desnudos y el charco de soldadura. El arco y el metal fundido se protegen por medio de una capa de fundente granular sobre las piezas de trabajo; no se aplica presión y se emplea metal de aporte del alambre (electrodo) y algunas veces de fuentes adicionales, tales como varillas o metal granulado. En la siguiente figura se muestra de manera esquemática este proceso



1. Electrodo, 2. Arco, 3. Fundente, 4. Escoria fundida, 5. Escoria solidificando, 6. Escoria sólida 7. Metal de soldadura sólido, 8. Charco de metal de soldadura, 9. Metal base

Fig. 2.5 - Proceso de Soldadura por Arco Sumergido

Al iniciarse la operación de soldadura, el extremo del alambre (electrodo) toca la pieza de trabajo, el fundente granular procedente de la tolva cubre el área a soldar y se inicia el arco. El electrodo se alimenta a velocidad controlada por medio de un alimentador de alambre y el fundente también sigue adicionándose durante toda la operación, de manera que el alambre, el arco y el charco de soldadura siempre permanecen cubiertos por el fundente, por lo que el arco no es visible y la soldadura se realiza sin la radiación intensa característica de los procesos de arco abierto, y genera muy poco humo.

Aunque el fundente líquido puede conducir algo de corriente entre el alambre y el metal base y generar calor debido a la resistencia eléctrica, la principal fuente de calor la suministra el arco, el cual progresivamente funde una parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base debajo de la capa de escoria líquida. El metal fundido

cercano al arco está en un estado de alta turbulencia y las burbujas de gas que pudieran generarse son arrastradas rápidamente hacia la superficie del charco de soldadura.

El fundente o escoria líquida flota sobre el metal fundido y protege de la atmósfera a la zona de soldadura, disuelve las impurezas del metal base y del electrodo y las hace flotar sobre la superficie. El fundente también puede adicionar o remover algunos elementos de aleación. Cuando el metal de soldadura y el fundente líquidos solidifican, se forman el cordón y una capa de escoria protectora, respectivamente.

El desplazamiento se realiza manual o mecánicamente a lo largo de la junta o bien, las piezas de trabajo se pueden desplazar por debajo de un alimentador estacionario de alambre. Además de proteger al arco y al charco de soldadura, la escoria evita que el cordón solidificado, pero aún caliente, se oxide y enfríe bruscamente, suministra agentes limpiadores, estabiliza al arco e influye en la forma de los cordones. Otras funciones del fundente, dependiendo de su tipo, son: proporcionar agentes desoxidantes y elementos de aleación y ayudar a controlar el tamaño de grano y la composición química, así como algunas de las propiedades de los depósitos de soldadura, tales como resistencia a la tensión y al impacto.

La soldadura con arco sumergido puede realizarse con muchas variantes para cubrir las necesidades impuestas por los requisitos de calidad o producción. Se presta a una gran variedad de combinaciones de fundentes y electrodos para proporcionar las propiedades mecánicas y composición química requeridas, y puede aplicarse con fuentes de corriente alterna y directa, con voltaje constante y con voltaje variable, con un solo electrodo o con varios, y éstos, pueden estar conectados a una misma fuente de energía o cada uno a una fuente independiente.

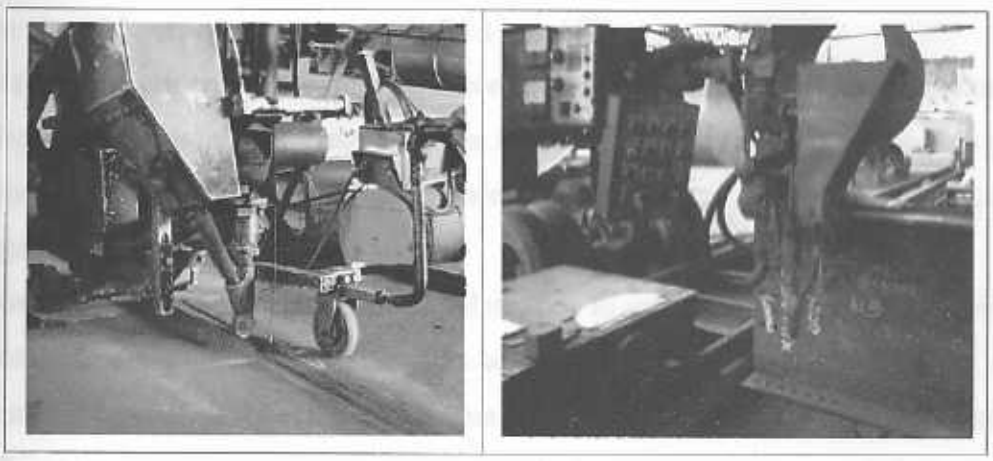


Fig. 2.6 - Máquinas de soldar para Proceso SAW. Izquierda, LT-7 y derecha, máquina industrial para soldaduras con juntas a tope.

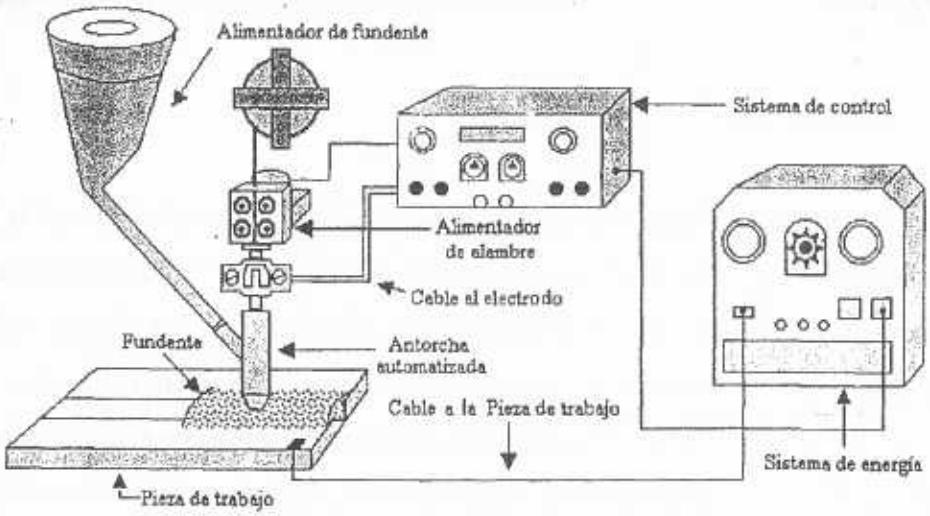


Fig. 2.7 – Esquema del equipo para el Proceso SAW

2.2.1. Fundentes neutros

Son aquellos que no producen cambios significativos en el análisis químico del metal de soldadura como resultado de cambios en las variables, en especial del voltaje del arco. Deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones acerca de este tipo de fundentes:

1. Su principal aplicación es la producción de soldaduras de pasos múltiples, en particular

en placas de espesores mayores de 25.4 mm (1")

2. Ya que no contienen desoxidantes o contienen muy pocos, la acción desoxidante depende solamente del electrodo, por lo que en las soldaduras de un solo paso con desoxidación insuficiente o en metales base oxidados, hay riesgo de porosidad y agrietamiento longitudinal
3. Ningún fundente es neutro por completo, por lo que también provocan cambios en la composición química. Estos cambios se originan por la descomposición del fundente, durante la cual se libera oxigeno que se combina con el carbono del electrodo, o liberan manganeso y silicio procedentes de los óxidos presentes. Tales cambios son más o menos consistentes y las variaciones relativamente altas del voltaje no los afectan en gran medida.

2.2.2. Principales ventajas y limitaciones del Proceso con Arco Sumergido (SAW)

Ventajas

1. Alta penetración: pueden soldarse juntas a tope con ranura cuadrada de espesores hasta de 13 mm (1/2") con un solo paso y con electrodo sencillo, y hasta de 19 mm (3/4") soldando por los dos lados, con un paso por lado y con electrodo sencillo, lo que reduce grandemente los trabajos, tiempos y costos relacionados con la preparación de los bordes y con la aplicación de soldadura.
2. Altas tasas de depósito (de 27 a 45 Kg/h) al soldar espesores medianos y gruesos
3. El calor aportado y la distorsión resultan relativamente moderados.
4. Requiere poco entrenamiento y habilidad manual por parte del soldador y del operador.

Limitaciones

1. Prácticamente está limitado a la posición plana y para filetes en posición horizontal.
2. El equipo es relativamente costoso
3. El uso de fundentes activos y aleados requieren que los procedimientos de

soldadura sean rigurosamente controlados, ya que variaciones pequeñas en el voltaje, el amperaje o la velocidad, pueden provocar cambios grandes en la composición química y en las propiedades mecánicas del metal depositado

4. En soldaduras de pasos múltiples es necesario remover la escoria a fin de evitar inclusiones.

2.2.3. Influencia del Diámetro del Electrodo, la Corriente, el Voltaje, la Polaridad y la Velocidad de Viaje en el Proceso de Soldadura con Arco Sumergido (SAW)

Diámetro del electrodo: generalmente electrodos de 1/16", 5/64" y 3/32" de diámetro son usados en la soldadura semiautomática y de 1/8" a 3/16" en la soldadura mecanizada.

Cuando otras condiciones son mantenidas constantes, un aumento en el diámetro del alambre aumenta el ancho del pase y disminuye la penetración y la rata de deposición como lo ilustra la figura 2.8. Sin embargo un aumento en el diámetro del alambre incrementa la capacidad máxima de corriente (tabla 2.1), produciendo altas ratas de deposición. Un cambio a un tamaño de diámetro mayor con ningún incremento de la corriente, une las aberturas mejor si son detectados ensambles muy pobres.

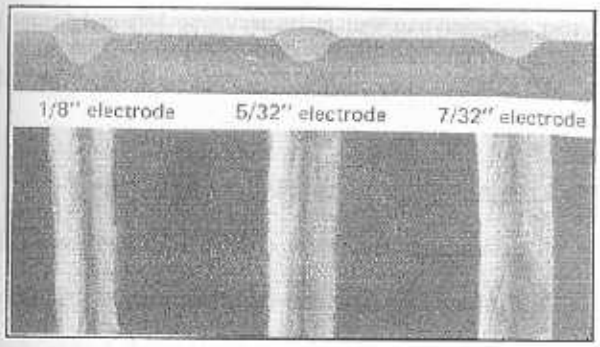


Fig. 2.8 – Variación de la penetración y el ancho del cordón de soldadura con el diámetro del electrodo

Diámetro del alambre (Pulg.)	Corriente (Amp.)
5/64	200 - 600
3/32	230 - 700
1/8	300 - 900
5/32	420 - 1000
3/16	480 - 1100
7/32	600 - 1200
1/4	700 - 1600

Tabla 2.1- Rangos de corriente para electrodos con Proceso SAW

Corriente: la corriente de la soldadura determina la rata a la cual el electrodo es fundido, la profundidad de penetración del charco de la soldadura dentro del metal base, y la cantidad de metal base fundido. Un aumento en el incremento la corriente incrementa la penetración y la rata de fusión, pero una corriente sumamente alta produce un pase angosto y

alto, un arco errático y socavaciones. Una corriente excesivamente baja produce un arco inestable.

Voltaje: un incremento del voltaje produce un pase ancho y plano, aumenta el consumo del fundente, la resistencia a la formación de porosidades causada por óxidos y ayuda a unir las juntas cuando el ensamble de estas es muy pobre. Pero un voltaje excesivamente alto, produce pases en forma de "sombrero" y filetes de soldadura cóncavos que están sujetos al agrietamiento, hace difícil la remoción de escoria, y en soldaduras con múltiples pases, incrementa el contenido de aleación, produciendo una soldadura susceptible al agrietamiento

Polaridad: la Polaridad Positiva con Corriente Directa (CD +) es recomendada para la mayoría de la soldadura con arco sumergido donde una penetración profunda y un seguimiento rápido son importantes. La Polaridad Negativa da una rata de fusión cercana a una tercera parte más grande que cuando se usa polaridad Positiva, pero produce menos penetración.

El costo de las soldaduras de filete puede ser reducido a través del uso de CDRP (corriente directa polaridad invertida) en lugar de CDSP (corriente directa polaridad directa) porque da la penetración adicional proporcionada por la polaridad positiva. Las condiciones inestables del arco pueden ser corregidos por un aumento de la corriente o una reducción del tamaño del alambre.

Velocidad de Viaje: es utilizada para controlar el tamaño de cada pase y la penetración. En un pase simple o sencillo, la corriente y la velocidad de viaje deberán ajustarse para obtener la penetración deseada sin producir quemaduras. Para pases múltiples, la corriente y la velocidad de viaje deberán ajustarse hasta obtener el tamaño de filete deseado. Los cambios en la velocidad de viaje tienen los siguientes efectos:

1. La velocidad de viaje excesivamente alta disminuye la acción de la humedad y aumenta la tendencia por socavaciones, soplo de arco, porosidad, agrietamientos y formas de pases no uniformes. La velocidad de viaje lenta tiende a reducir las porosidades, debido a que el material gaseoso tiene tiempo para hervir y salir fuera de

la soldadura fundida.

2. Velocidad excesivamente lenta produce: pases en forma de "sombrero" que son muy susceptibles al agrietamiento, excesivo destello en ambos lados, el cual no es confortable para el operador y un charco fundido grande que fluye alrededor del arco resultando un pase rugoso, con salpicaduras e inclusiones de escoria

La figura 2.9 muestra el efecto de variación de la corriente y de la velocidad de viaje cuando otras condiciones son mantenidas constantes.

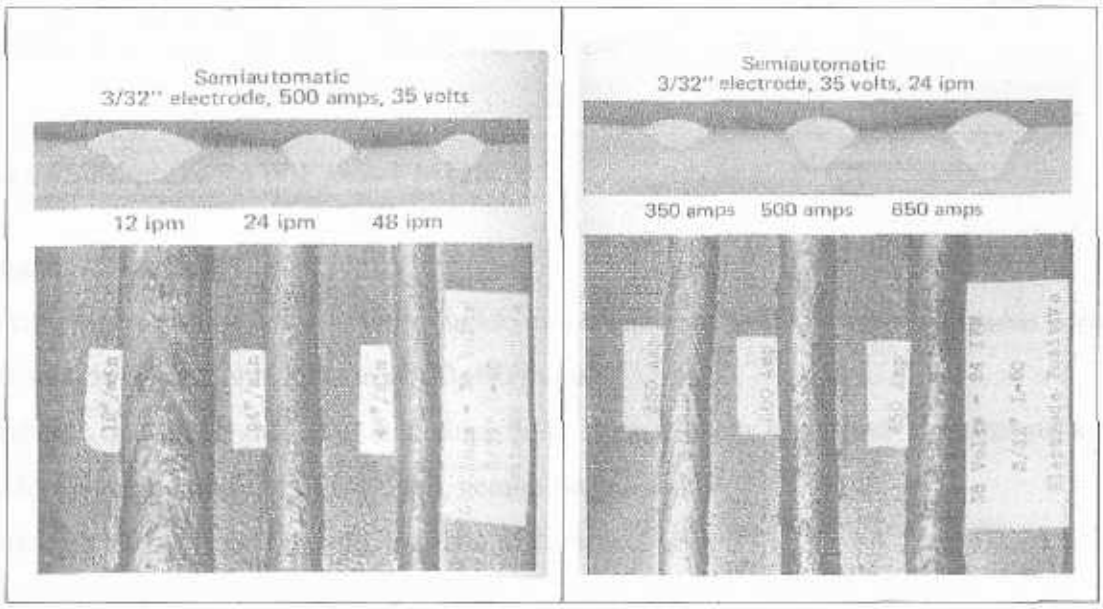


Fig. 2.9 – Variación de la penetración y el ancho del cordón de soldadura con la velocidad (IPM) y con el amperaje

Significado de la nomenclatura de los electrodos utilizado en ambos Procesos de Soldadura.

Proceso de Soldadura SMAW E7018

E: Electrodo

70: Indica 70,000 lb/pulg.^{2} (PSI) de resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura

1: Significa que el electrodo puede usarse en posiciones plana, vertical, horizontal y sobre cabeza

8: Revestimiento de bajo hidrógeno con potasio y polvo de hierro; electrodo para ser empleado con corriente alterna o corriente directa electrodo positivo.

Proceso de Soldadura SAW F7AZ-EM12K

F: designa un fundente

7: indica que el metal de soldadura producido con el fundente y el electrodo indicados tiene una resistencia mínima a la tensión de 70,000 lb/pulg^2

A: establece que dicho metal de soldadura tiene la resistencia la tensión indicada sin ser sometido a tratamiento térmico, es decir, "como fue soldado"

Z: Indica que no hay requisitos de resistencia al impacto

E: indica que se trata de un electrodo sólido

M: que el electrodo tiene un contenido medio de manganeso

12: que el contenido nominal de carbono es de 0.12%

K: establece que el electrodo fue fabricado con una colada de acero calmado (killed)

3. Conceptos Básicos

a) Indicación: es una señal que puede ser producida por una alteración en el material o pieza sujeta a inspección y es generada por el método de inspección no destructivo empleado. Las indicaciones pueden ser:

- Falsas: es aquella que aparece durante la inspección y puede ser provocada por una mala aplicación del método.
- No Relevantes: es producida por la estructura del material o por la configuración de la pieza o por cambios en algunas características del material como su tamaño de grano, los tratamientos de endurecimiento a que ha sido sometido.
- Relevantes: son producidas por una discontinuidad. Para determinar su importancia se debe interpretar la indicación y evaluar la discontinuidad.

b) Discontinuidad: Es la falta de homogeneidad o interrupción en la estructura física normal de un material. Las discontinuidades pueden ser:

- No relevantes: es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada, pero no es necesario evaluarla.
- Relevantes: es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada y evaluada.

c) Defecto: Es toda discontinuidad o indicación de una discontinuidad que por su tamaño, forma o localización ha excedido los límites de aceptación establecidos por el código, norma o especificación aplicable.

d) Interpretación: Es la determinación del tipo de discontinuidad que ha provocado la indicación y la predicción del posible origen de la misma.

e) Evaluación: Es la ponderación de la severidad de la discontinuidad después de que la indicación se ha interpretado; es decir, si la pieza debe ser aceptada, reparada o rechazada.

Clasificación de las Discontinuidades de Acuerdo a su Origen

a) Discontinuidades inherentes: son aquellas que se forman durante la solidificación del metal fundido, incluyendo aquellas que son producidas por las variables del proceso primario, tales como una alimentación inadecuada, vertedero en mal estado, temperatura alta de vaciado, inclusiones no metálicas y gases atrapados.

b) Discontinuidades de proceso: se relacionan con el proceso de manufactura como, maquinado, tratamientos térmicos, recubrimientos metálicos, conformado en caliente (forja o rolado), en frío (doblado o prensado) y soldadura. Durante este proceso, muchas discontinuidades que son subsuperficiales se pueden convertir en superficiales.

c) Discontinuidades de Servicios: Se generan por los esfuerzos de tensión, compresión, corrosión, fatiga o fricción a la cual está sujeta la pieza.

Las discontinuidades en las Juntas Soldadas ocurren como parte inherente de las operaciones de soldadura y normalmente se describen en términos de la interrupción de la integridad física del metal de soldadura o la zona afectada térmicamente

4. Ensayos No Destructivos

4.1. Inspección visual

La inspección o examen visual es el método no destructivo más ampliamente usado en la industria; aproximadamente un 80% de las discontinuidades, defectos y deficiencias identificadas por medio de exámenes no destructivos se detectan con esta técnica.

Para muchos objetos a examinarse, la inspección visual puede emplearse para determinar aspectos como la cantidad y forma, el tamaño, el acabado superficial, la reflectividad, características de color, adecuación, características funcionales y la detección de discontinuidades e imperfecciones superficiales.

Desde un punto de vista práctico, la mayoría de los Ensayos No Destructivos involucran en una o más de sus etapas a la inspección visual. Para corroborar esta afirmación, a manera de ejemplo, considérese la interpretación de una placa radiográfica o la evaluación de las indicaciones producidas por las partículas magnéticas que se acumulan sobre una grieta, o por el líquido penetrante extraído de una discontinuidad por el revelador.

4.1.1. Principios y Descripción de la Técnica

En términos sencillos, la inspección visual consiste en la observación cuidadosa de las partes sujetas a examen durante las diferentes etapas de sus procesos de su producción, desde la recepción de las materias primas hasta el producto terminado.

Para que el examen visual resulte efectivo, es necesario que el personal encargado en su ejecución posea ciertos conocimientos, habilidades y atributos, entre estos, estar familiarizado con los materiales y procesos de fabricación involucrados, con las características, discontinuidades o deficiencias posibles o típicas del producto bajo inspección y los criterios de aceptación aplicables; también debe tener conocimientos sobre las características y propiedades de la luz, la iluminación y la visión y los factores que afectan a ésta última durante la inspección.

4.1.2. Aplicaciones

En el campo de la inspección de soldadura, las discontinuidades típicas que se detectan con este método son: socavados, faltas de llenado, porosidad superficial, grietas abiertas a la superficie, traslapes, tamaños y gargantas de soldadura menores a los especificados, convexidades y alturas de refuerzos excesivos, distorsión y falta de alineación. Es importante destacar que además de ser el método de examen no destructivo más barato, la inspección visual tiene la ventaja de poder ayudar a reducir grandemente los costos de fabricación.

Una inspección visual adecuada antes y durante el depósito de metal de soldadura ayuda a evitar que se suelden juntas mal preparadas (abertura de raíz, ángulo de ranura o cara de raíz de tamaños menores o mayores a los especificados, por ejemplo), o permite detectar discontinuidades y defectos en un cordón de soldadura (y repararlos) antes de depositar el siguiente paso; en ambos casos, la inspección visual permite identificar y evitar condiciones que pueden causar defectos y problemas, o identificarlos en el momento en que ocurren y solucionarlos antes de que siga su curso el proceso de fabricación. De no efectuarse tal inspección visual, los problemas y los defectos potenciales ocurrirán y podrían no ser detectados posteriormente, o bien, detectados si está especificado algún otro método de examen no destructivo (radiografía por ejemplo), y entonces proceder a realizar las reparaciones y reinspecciones necesarias, con los consecuentes incrementos de tiempo y costos de fabricación. Esta posibilidad de poder eliminar muchas discontinuidades y problemas antes de terminar los trabajos es quizá la característica más importante de la inspección visual.

Una vez que se termina el trabajo de soldadura, tiene lugar la inspección de aceptación, que incluye la detección de discontinuidades y condiciones tales como la distorsión, la verificación de dimensiones y de la conformidad con respecto a los planos, así como la apariencia de la soldadura (chisporroteo y rugosidad, por ejemplo). La minuciosidad de esta revisión se debe apoyar con otros métodos de END, según el juicio del inspector o las especificaciones fijadas.

4.1.3. Equipo de Inspección y Niveles de Iluminación

La mayor parte de las aplicaciones de inspección visual se hace a simple vista y por lo

tanto no requiere de equipo alguno, aunque a veces se hace necesario o conveniente el empleo de linternas, espejos, lupas, endoscopios y métodos de registro fotográfico o en video. Así como el uso de galgas para la medición de la altura de refuerzo de la soldadura en juntas a tope, altura y convexidades de los filetes de soldadura y evaluación de las socavaciones presentes.

Niveles de Iluminación: la intensidad de la iluminación está determinado por la naturaleza de la inspección a realizar. Para discontinuidades densas o gruesas, donde las indicaciones son grandes, por lo general es suficiente un nivel de iluminación de 300 a 550 luxes sobre la superficie de la muestra; para inspecciones críticas, se requieren intensidades mayores, donde los niveles de iluminación deben estar alrededor de 1000 luxes.

4.2. Inspección con Líquidos Penetrantes

4.2.1. Principios y Descripción de la Técnica

La inspección por Líquidos Penetrantes es un método no destructivo capaz de detectar discontinuidades tales como grietas y porosidades que estén abiertas a la superficie de un material. El método está basado en la habilidad que tiene un líquido (penetrante) para introducirse en cavidades angostas, permaneciendo en esta hasta después de la remoción del exceso del líquido sobre la superficie; pudiendo revelarse posteriormente la presencia de pequeñas cantidades que permanecen en la cavidades mediante la aplicación de un producto revelador (material absorbente). Los líquidos penetrantes tienen la propiedad de filtrarse a través de las discontinuidades que presentan los materiales, basándose en la Acción Capilar, la que origina que un líquido ascienda o descienda a través de dos paredes cercanas entre sí; también está basada en los principios de cohesión, viscosidad, adherencia y tensión superficial. Dicha técnica no es recomendable en materiales porosos pero puede ser aplicado en una superficie que no sea absorbente y compatible con el penetrante.

A continuación se describen los conceptos de Humectabilidad y Capilaridad para ayudar a comprender mejor el principio básico del funcionamiento de los Líquidos Penetrantes.

Humectabilidad: es la capacidad de un líquido de mojar un sólido y que afecta las características de penetración y sangrado de los líquidos penetrantes. Está controlado por el ángulo de contacto y la tensión superficial del penetrante.

La figura 4.2.1 muestra las características de humectabilidad dependiendo del ángulo de contacto entre el líquido y la superficie de un sólido. Cuando $\theta < 5°$ (A) se obtiene una buena humectabilidad, como es el caso de los líquidos penetrantes. Cuando $\theta \geq 90°$ la humectabilidad es mínima (B y C).

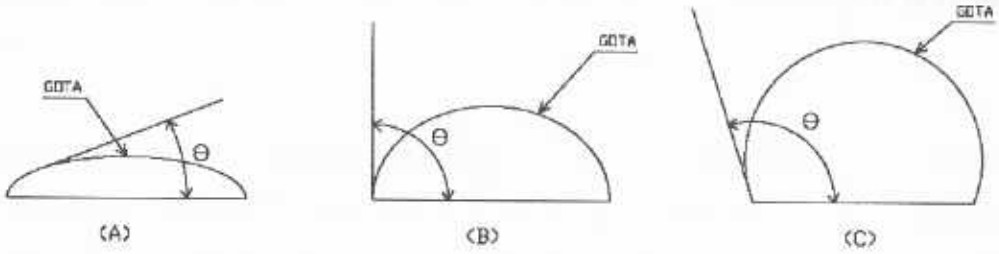


Fig. 4.2.1- Características de humectabilidad determinadas por el ángulo de contacto θ

Capilaridad: la capilaridad y la humectabilidad determinan el poder de penetración de un líquido a través de las discontinuidades. Cuando existe contacto entre un líquido y una pared sólida, como se muestra en la figura 4.2.2, la altura o depresión en un tubo capilar vertical está determinado por el ángulo de contacto ϕ formado entre el líquido y la pared del tubo. Si $\phi < 90°$ (A) el menisco del líquido en el tubo es cóncavo; entonces el líquido asciende por el tubo. Si $\phi = 90°$ (B) no existe aumento ni disminución capilar. Si $\phi > 90°$ (C) el menisco del líquido en el tubo es convexo; entonces el líquido desciende por el tubo.

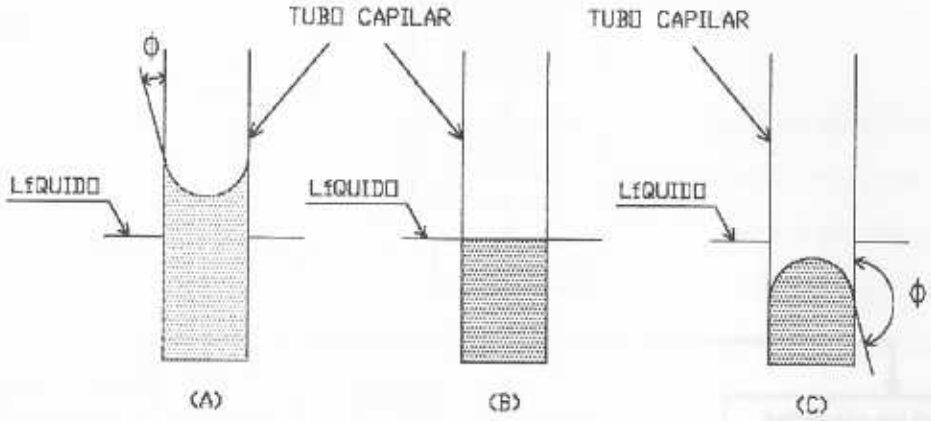


Fig. 4.2.2 – Variación de la altura o depresión de un líquido en un tubo capilar vertical

Viscosidad: es la propiedad que presentan los líquidos de oponerse al flujo, como resultado de la fricción molecular o interna. Esta propiedad no produce efecto alguno en la habilidad de un líquido para introducirse en las discontinuidades, pero si afecta la velocidad de penetración.

Tensión Superficial: es la fuerza que tiende a disminuir la superficie libre de un líquido. La fuerza de cohesión entre las moléculas de un líquido genera la tensión superficial. Los líquidos con baja viscosidad y tensión superficial presentan buenas propiedades de penetración.

En la inspección por Líquidos Penetrantes se requiere realizar los siguientes pasos, que también se ilustran en la Fig. 4.2.3, el cual puede ser empleado con los métodos de Líquidos Penetrantes tanto Visibles como Fluorescentes. El método resaltado en negro, penetrante removible con solvente, es el que se ejecutó en forma práctica en este Proyecto de Grado (ver Anexo C.2, Procedimiento y Reporte de Inspección de Soldaduras con Líquidos Penetrantes).

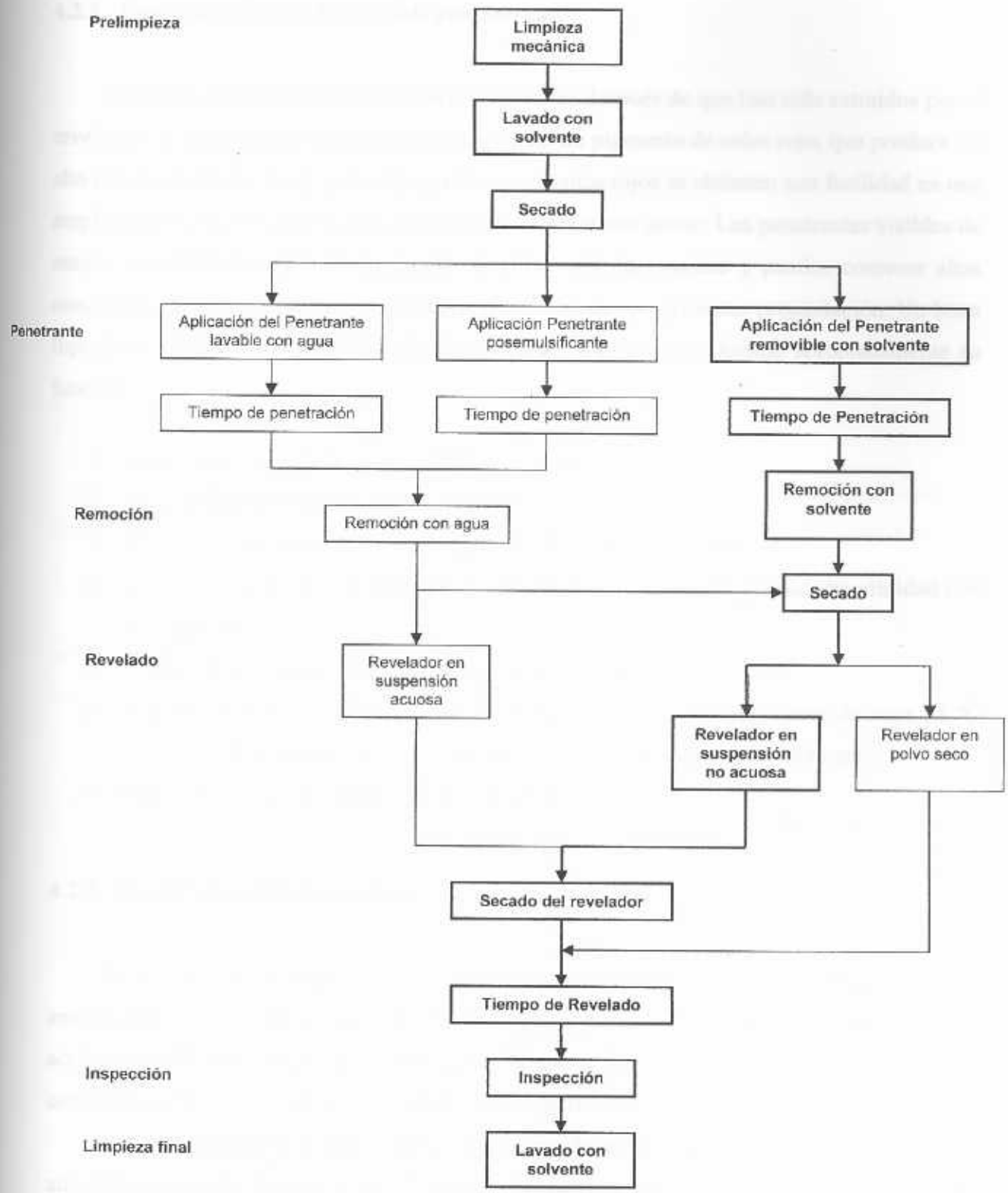


Fig. 4.2.3 - Etapas de aplicación del Ensayo con Líquidos Penetrantes

4.2.2. Penetrante Visible Removible con Solvente

Debido a que los penetrantes deben ser visibles después de que han sido extraídos por el revelador, en este método se emplea por lo general un pigmento de color rojo, que produce un alto contraste con un fondo color blanco. Los pigmentos rojos se obtienen con facilidad en una amplia gama de tonos, son baratos y fáciles de mezclar con aceite. Los penetrantes visibles de mayor sensibilidad contienen pigmentos de color rojo muy oscuro y pueden contener altas concentraciones de pigmentos suspendidos en el vehículo sin presentar precipitación. Un buen líquido penetrante debe reunir las siguientes características para efectuar apropiadamente su función:

1. Alta penetración en discontinuidades muy finas
2. Baja pérdida de solvente por evaporación
3. De fácil remoción de la superficie pero no de la discontinuidad
4. Permanecer en estado líquido para formar películas muy finas y tener alta afinidad con el revelador
5. No debe reaccionar con el material sujeto a inspección
6. Inodoro, atóxico y con alto punto de inflamabilidad aproximadamente de unos 51 °C como mínimo de acuerdo a especificaciones y 57 °C de acuerdo al fabricante
7. Estable bajo condiciones de almacenamiento

4.2.3. Preparación de la Superficie

La inspección por Líquidos Penetrantes requiere, además de que las discontinuidades se encuentren en la superficie, que estén abiertas a ésta, para que el penetrante tenga una vía de acceso; por lo que es esencial una buena limpieza de la pieza para obtener resultados confiables. Debe tenerse extremo cuidado para asegurar que las piezas estén limpias y secas.

Las indicaciones y la detección de discontinuidades dependen del flujo del penetrante, aun en las pequeñas fisuras. Es evidente que el penetrante no puede fluir si la discontinuidad se encuentra tapada con aceite, agua, pintura, óxido o cualquier otra materia extraña.

4.2.4. Métodos de Limpieza.

En la selección del método de limpieza se debe tener especial cuidado de que éste no enmascare cualquier indicación o que los residuos de los productos de limpieza actúen como contaminantes, influyendo en la sensibilidad del método. Los métodos se clasifican como: limpieza por medios químicos, mecánicos y por solventes, este último es ampliamente utilizado, ya que es capaz de disolver y remover casi cualquier tipo de componente orgánico que se encuentre sobre la superficie.

4.2.5. Aplicación del Penetrante

El penetrante se aplica sobre la superficie limpia y seca de la pieza a inspeccionar por cualquier método que la humedezca totalmente; por ejemplo: por inmersión, brocha o rodillo, y por aspersión empleando aire a presión o mediante aerosoles.

Para el caso del método por aspersión, debe tenerse cuidado en que el rocío sea homogéneo. Se recomienda para la inspección esporádica de lotes pequeños o piezas ya instaladas en su ensamble final, en superficies planas o relativamente grandes; pero debe evitarse en piezas pequeñas porque se desperdicia demasiado penetrante.

Todas las superficies deben cubrirse totalmente para permitir que mediante la acción capilar el penetrante se introduzca en las discontinuidades, como se muestra en la siguiente figura.

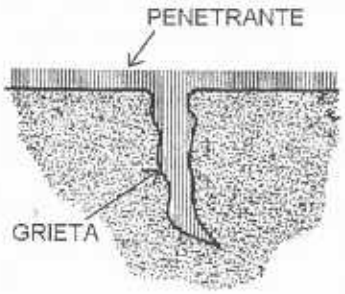


Fig. 4.2.4 - Aplicación del Penetrante

4.2.6. Tiempo de Penetración.

Se define como el tiempo necesario para qué el penetrante se introduzca en las discontinuidades. Este tiempo varía de acuerdo a los siguientes factores: tipo de penetrante utilizado, características del material a inspeccionar, el proceso de fabricación del material, las posibles discontinuidades a detectar y la temperatura. Existen tablas de tiempos de penetración para diferentes materiales y discontinuidades, recomendados por los fabricantes; aquí se mencionará únicamente para el caso del acero.

Material	Forma o Proceso	Tipo de Discontinuidad	Tiempo de Penetración (minutos)
Acero	Soldadura	Falta de Fusión	7
		Porosidad	7
	Cualquier forma	Falta de Fusión	7
		Porosidad	7
		Grieta	7
		Grietas por fatiga	15

Tabla 4.2.1 - Tiempo de Penetración según el tipo de discontinuidad en material de acero de bajo carbón

Los tiempos sugeridos son tiempos mínimos, y debe verificarse que en este período la superficie de la pieza permanezca cubierta con el penetrante. En caso de que la aplicación inicial de penetrante sea insuficiente, éste se puede aplicar nuevamente, asegurando así que se introduzca en la discontinuidad. Así mismo los tiempos de penetración se elaboraron tomando como base el rango de temperaturas de 15° a 50 °C. El penetrante no debe utilizarse a temperaturas menores al límite inferior, porque disminuye su actividad y no se introduce en las discontinuidades, a pesar de cumplir con el tiempo de penetración establecido en la tabla.

El empleo de tiempos de penetración mayores a los recomendados no afecta la sensibilidad de la inspección, a menos que se permita que el penetrante se seque sobre la superficie de prueba. Si la superficie comienza a secarse, debe reaplicarse penetrante, de otra forma será difícil su remoción.

4.2.7. Remoción del Exceso de Penetrante

La remoción del exceso de penetrante es el paso más importante en el procesamiento de

las piezas para su inspección; por ello debe mantenerse estricto control en cuanto a los diferentes parámetros que esta parte del proceso encierra, y de este modo asegurar resultados confiables.

Después de transcurrido el tiempo de penetración, se elimina el exceso de penetrante que queda en la superficie de la pieza. Se debe evitar que el penetrante se seque sobre ésta, ya que puede impedir que el penetrante emerja de las discontinuidades al aplicar el revelador. En caso de que el penetrante se seque, la inspección debe reiniciarse desde el paso de la Prelimpieza.

El exceso de penetrante se elimina mediante algún material absorbente, frotando la superficie de inspección (preferentemente en una sola dirección); después, con el material absorbente, ligeramente humedecido en el solvente, se remueve el exceso de penetrante que haya quedado en la superficie. Para verificar que la pieza se encuentra libre de penetrante, es recomendable pasar un material absorbente limpio sobre la superficie, el cual debe estar exento de color

4.2.8. El Revelador

La cantidad de penetrante que emerge de una discontinuidad superficial es muy reducida, por lo que es necesario ampliar su visibilidad. Los reveladores están diseñados de tal forma que extraen el penetrante atrapado en las discontinuidades, para que sean visibles al ojo humano. La acción del revelador es una combinación de tres efectos: solvencia, adsorción y absorción. El polvo revelador ejerce un efecto adsorcivo y absorcivo sobre los residuos del penetrante, llevándolos hacia la superficie de la pieza. Cuando el penetrante se dispersa a través del polvo revelador, puede ser fácilmente observado.

Reveladores en suspensión no acuosa. La técnica de la suspensión en solvente es un medio efectivo para proporcionar una capa ligera de revelador sobre la superficie, ya que los solventes usados son de secado rápido.

El solvente puede disolver o no al penetrante. En ocasiones, puede servir como solvente parcial para los penetrantes coloreados visibles. Tiene la función de ayudar a extraer el penetrante de la discontinuidad y lo disuelve dándole mayor movilidad y producido una indicación del penetrante más grande y clara. En superficies rugosas, este tipo de reveladores

no es adecuado, ya que extrae todo indicio de penetrante de la superficie.

Los reveladores suspendidos en solventes, generalmente se emplean para mostrar discontinuidades muy finas. Si el rociado se hace en forma rápida y ligera sobre la superficie, el penetrante es extraído de las discontinuidades, pero su difusión es minimizada por la rápida evaporación del solvente. Los solventes utilizados con mayor frecuencia son el alcohol o los solventes clorinados, que tienen la ventaja de no ser inflamables.

Debe tenerse especial cuidado de que las suspensiones estén perfectamente bien agitadas para conservar las partículas en suspensión. Sin lo anterior no es posible controlar el espesor de capa, lo que es de gran importancia para asegurar una inspección uniforme. La principal ventaja del revelador no acuoso es la evaporación rápida del solvente. Es recomendable en superficies largas y lisas, ya que su rápido secado mejora la tersura superficial del revelador. Este tipo de revelador no se recomienda para rociado electrostático. El revelador debe poseer las siguientes características para efectuar de forma adecuada su función:

1. Alto poder de absorción del penetrante.
2. Ser de fácil aplicación y remoción después de la inspección.
3. Deben formar una capa delgada y uniforme sobre la superficie para que el revelador se disperse y exponga el penetrante sobre la mayor área posible
4. No deben ser tóxicos para el operador ni dañar la parte inspeccionada
5. Presentar alto contraste con el penetrante visible con luz normal.

4.2.9. Inspección

Después de transcurrido el tiempo de revelado, se efectúa la inspección y evaluación de la superficie de la pieza. El tipo de iluminación empleado depende del proceso utilizado; ya que debe usarse luz normal (luz blanca) de suficiente intensidad para los penetrantes visibles y luz ultravioleta (luz negra) para los fluorescentes. Esta parte del proceso es sumamente importante; por lo que es necesario verificar que la indicación en examen sea válida y no falsa, dando la impresión equivocada a causa de iluminación inadecuada, un proceso erróneo, etc.

Cuando se tenga duda sobre la inspección, es preferible limpiar la pieza y repetir el proceso completo, después se determinará el tipo, localización y tamaño de la discontinuidad;

así como la especificación aplicable para su evaluación.

La calidad de la inspección está directamente relacionada con la habilidad del Inspector para encontrar y evaluar las indicaciones que aparezcan en la superficie de prueba, pero también por las condiciones en que ésta se realice.

4.2.10. Limpieza Final

Es importante que esta parte del proceso se efectúe con un limpiador volátil y que ninguno de los limpiadores previos quede alojado en las discontinuidades. La poslimpieza o limpieza final es la última parte del proceso por Líquidos Penetrantes y se lleva a cabo en las muestras que se encuentren libres de discontinuidades. Es necesaria, ya que el penetrante y el revelador tienden a acumular humedad, lo cual puede producir corrosión; o bien, interferir en el uso o proceso posterior a la inspección.

4.3. Inspección con Partículas Magnéticas

4.3.1. Corriente Alterna (CA) y Continua (CC)

Corriente Alterna (CA): los campos magnéticos creados por la corriente alterna se limitan al metal situado en la superficie y próximo a la superficie de la pieza. El fenómeno responsable de que la corriente alterna tienda a fluir solamente a lo largo de las capas superficiales del metal se conoce como "efecto pelicular" en donde la profundidad de penetración depende de la frecuencia, siendo casi de 2 mm a 50 Hz. El método de corriente alterna es, en consecuencia, el más eficaz para la localización de discontinuidades superficiales y no es apropiado para la detección de discontinuidades más profundas. El campo alterno añade también movilidad a las partículas y facilita una mejor indicación.

Corriente Continua (CC): la corriente continua produce un campo que penetra en la pieza y es, por ello, más sensible que la corriente alterna para la detección de discontinuidades internas. Una corriente monofásica rectificada de media onda permite máxima sensibilidad. Esto se debe a que el campo pulsante aumenta la movilidad de las partículas permitiendo que

éstas se alineen más fácilmente en los campos de fuga. Además, las crestas de los impulsos producen una mayor fuerza imanadora.

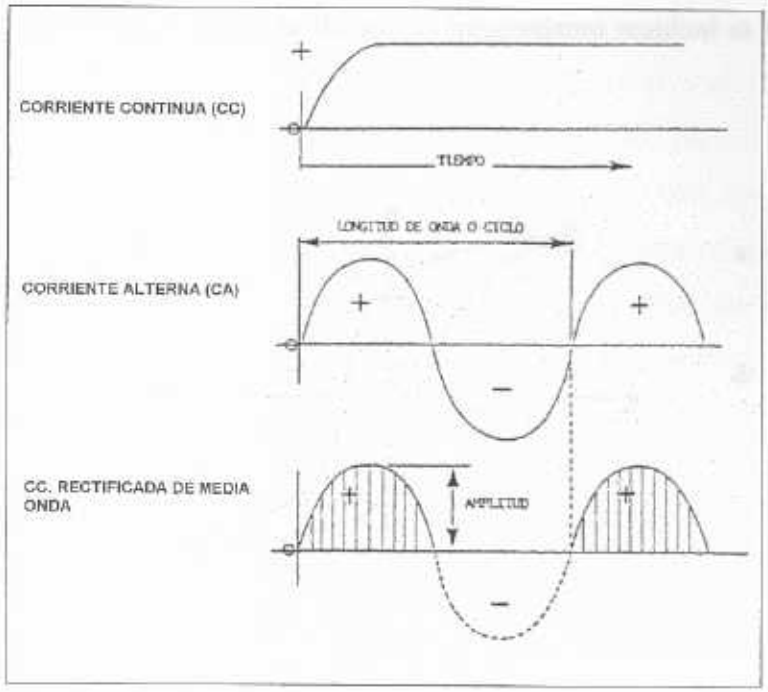


Fig. 4.3.1 – Corriente Continua, Alterna y Rectificada de Media Onda

4.3.2. Curva de Histéresis

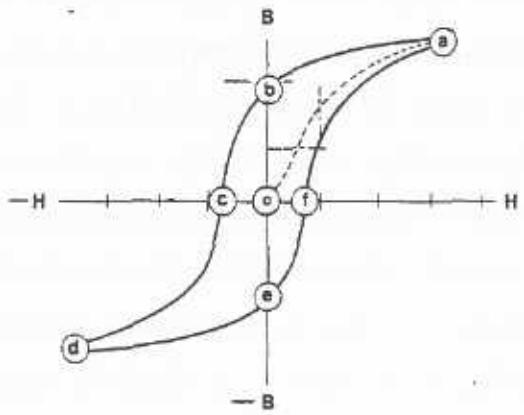
Permeabilidad: Todo material que resulta fuertemente atraído por un imán se dice que es ferromagnético y la medida en que tal material es ferromagnético se denomina su permeabilidad (μ). Esta es la facilidad con la que un campo magnético puede introducirse en un material; no es constante, sino que cambia considerablemente a medida que aumenta la densidad de flujo. La densidad de flujo en cualquier punto de cualquier material depende de la fuerza magnética presente y de la permeabilidad del material.

$$B = \mu * H \qquad (4.1)$$

Donde:

B = densidad de flujo en teslas
H = fuerza imanadora en amperios por metro
μ = permeabilidad en henrios por metro

Retentividad: es la expresión empleada para indicar la tendencia de un material a retener el magnetismo residual. En la curva de histéresis de la figura 4.3.2, la retentividad se representa por la distancia o-b y o-e cuando se invierte la corriente imanadora. Esta distancia indica la intensidad del campo presente debido al magnetismo residual si se retira la fuerza imanadora H.



a: punto de saturación con fuerza imanadora (H) y flujo máximo (B).

d: punto de saturación con fuerza imanadora (-H) y flujo máximo (-B).

Fig. 4.3.2 - Curva de histéresis

Fuerza Coercitiva: es la expresión empleada para indicar la facilidad con la que el magnetismo residual de un material puede contrarrestarse por la aplicación de una fuerza imanadora. En la curva de histéresis (Fig. 4.3.2) la fuerza coercitiva se representa por la distancia o-e y o-f cuando se invierte la corriente. Esta es la intensidad de la fuerza imanadora H que se requiere para reducir a cero el campo magnético B en el material una vez imanado.

4.3.3. Principios y Descripción de la Técnica

La pieza a inspeccionarse se magnetiza induciendo en ella un campo magnético y se aplican partículas ferromagnéticas a la superficie sometida a ensayo, si ésta contiene discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este se distorsiona formando polos que atraen a las partículas como se muestra en la figura 4.3.3 (A), mismas que delinean el contorno de las discontinuidades.

Si sobre la superficie del objeto mostrado en la figura 4.3.3 (B) rociamos partículas

ferromagnéticas muy pequeñas, resultarán atraídas y retenidas por el campo de fuga en la región de la discontinuidad. Aún cuando esta pudiera ser muy pequeña para ser visible al ojo desnudo, el campo magnético podría aún resultar suficientemente perturbado como para atraer un número suficiente de pequeñas partículas que permitan formar una indicación visible.

Una discontinuidad de orientación paralela al campo magnético en el objeto producirá un efecto mucho menor sobre el campo que una discontinuidad que sea perpendicular al campo. Como quiera que la discontinuidad "b" en la figura 4.3.3 (B) apenas interrumpe la continuidad del campo magnético, las partículas magnéticas atraídas al mismo serían muy pocas, si es que lo son. No obstante, la discontinuidad "a" produce una alteración considerable en el campo magnético haciendo que algunas líneas de flujo salgan fuera del material. Las partículas magnéticas serían mas fácilmente atraídas a la superficie cerca de "a", haciendo así que la discontinuidad sea mucho más detectable. La sensibilidad de este método de inspección será mucho mejor para aquellas discontinuidades que tengan una orientación de 90° con relación al campo, produciendo resultados aceptables aún cuando el ángulo de tal orientación se reduzca hasta unos 75°

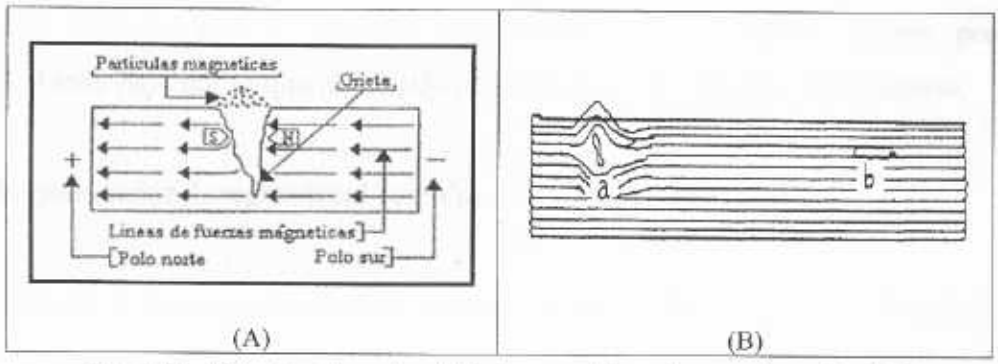


Fig. 4.3.3 - Principio de acción del flujo magnético sobre una discontinuidad

4.3.4. Preparación de la Superficie

Donde vaya a usarse el método seco (ver punto 4.3.7) debe ser eliminada toda la grasa; de otro modo se sacrificará la movilidad de las partículas, adhiriéndose tenazmente una capa de polvo a la superficie entera, ocultando completamente la indicación algunas veces, y haciendo más difícil la interpretación.

El óxido debe ser eliminado con cepillo de alambre, aunque una capa delgada y uniforme

de óxido usualmente no interfiere con la localización sino de muy pequeños defectos. La pintura hace el efecto de convertir las discontinuidades de superficie en subsuperficiales. Para decir si la pintura debe ser o no quitada, debe considerarse el grueso de la capa de pintura y el tamaño de las discontinuidades más pequeñas que se buscan en las inspección

4.3.5. Magnetización Continua y Residual

Magnetización Continua: para la inspección de piezas con alta permeabilidad y baja retentividad, como es el caso de los aceros al carbono o sin tratamiento térmico de endurecimiento, es recomendada la técnica de magnetización continua, esto es, mantener el paso de la energía eléctrica mientras se efectúa la inspección.

Magnetismo Residual: cuando las piezas son de alta retentividad, se acostumbra emplear el campo residual. En este caso se hace pasar la corriente de magnetización y posteriormente se aplican las partículas. En el método residual el intervalo entre la descarga de corriente imanadora y la inspección deberá ser lo más corto posible. Por lo general, la retentividad aumenta con el aumento en dureza, aunque algunos aceros poseen una retentividad muy baja por lo que el método residual no es enteramente satisfactorio.

4.3.6. Magnetización Longitudinal con Yugo

El método de imanación con yugo consiste en la creación de un campo longitudinal entre los polos magnéticos de un material tal como hierro dulce, conformado en forma de herradura. Alrededor de la porción comprendida entre ambos brazos se enrolla una bobina, que puede alimentarse con corriente continua, alterna, o ambas, generando un campo que se completa en el material inspeccionado al establecer el contacto. El campo de distribución es longitudinal entre los brazos y un tanto radial alrededor de los polos; por lo tanto, la orientación probable de las discontinuidades detectables será transversal al campo magnético tanto en la soldadura como en el material base como se muestra en la figura 4.3.4.

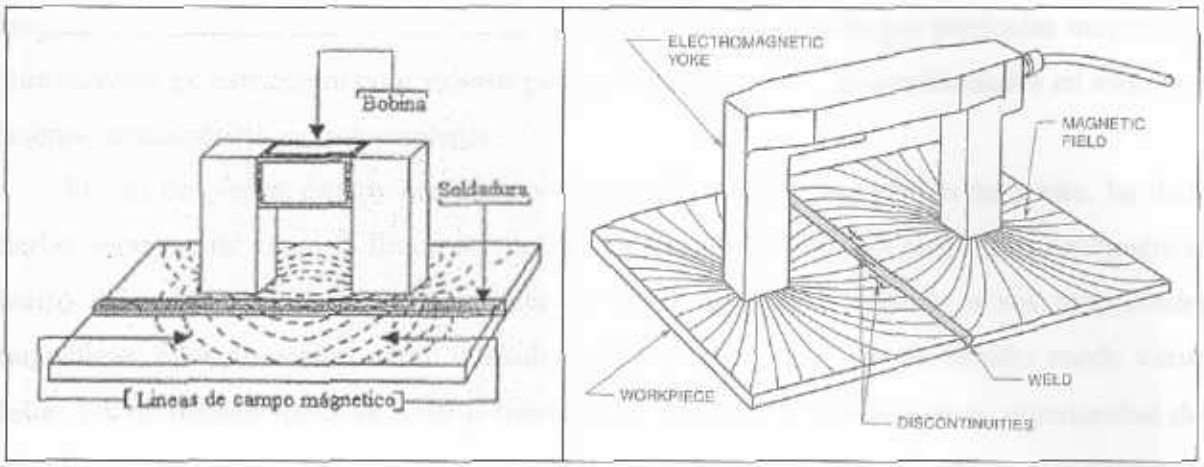


Fig. 4.3.4 – Magnetización Longitudinal con Yugo

4.3.7. Método con Partículas Secas

El polvo deberá aplicarse lentamente con la fuerza necesaria para dirigir las partículas a los puntos deseados. Esto permite que las partículas se agrupen formando imágenes indicadoras a medida que se aproximan a la superficie de la pieza imanada como se muestra en la figura 4.3.5. El exceso de polvo deberá eliminarse con aire suficiente sin alterar o perturbar las imágenes ligeras formadas por las partículas.

El tamaño de las partículas es de alrededor de 180 μ (micrones) y los límites de temperatura de la superficie en la cual puede ser aplicada varía entre 316 °C a 399 °C de acuerdo al tipo de polvo, 1 Gris, 8A Rojo ó 3A Negro.

El método seco es el más fácil sobre las superficies ásperas o rugosas, es cómodo de usar y no es sucio para el trabajo como el método húmedo. Al usar el método seco sobre superficies verticales o en el lado inferior de superficies horizontales, la fuerza de gravedad trabaja sobre las partículas contra la atracción del campo de dispersión debilitando su efecto de red y disminuyendo la sensibilidad del método.

4.3.8. Método con Partículas Húmedas Fluorescentes

El medio de obtener movilidad de las partículas por uso de una sustancia en suspensión en aceite ha venido a llamarse "método húmedo". La inspección fluorescente detectará discontinuidades muy pequeñas o finas y permitirá la rápida inspección de superficies

irregulares u oscuras como se muestra en la figura 4.3.5. El método por partículas magnéticas fluorescentes es particularmente valioso para la localización de discontinuidades en esquinas, ranuras, acanaladuras y otros similares.

El uso de ciertos óxidos magnéticos mantenidos en una suspensión de aceite, ha dado ciertas ventajas, tal como la finura del tamaño de las partículas y las propiedades magnéticas dentro de orden utilizable. Las partículas se unen en cadenas debido a sus propiedades magnéticas, ellas no actúan como unidades individuales y su rango de tamaño puede variar desde 1/8 de micrón hasta 40 ó 60 μ (micrones). De aquí se deriva que la superioridad del método húmedo para localizar defectos menudos está basada en el hecho de que las partículas comprendidas en la pasta comercial en uso en la actualidad son, en promedio, considerablemente más pequeñas que las usadas en el polvo seco. Las partículas para métodos húmedos son también de colores para proporcionar el contraste con la superficie inspeccionada.

En el trabajo sobre superficies verticales y en el lado inferior de superficies horizontales con el método húmedo, se experimenta poca o ninguna dificultad, siendo esta una de las ventajas posibles del método húmedo sobre el seco.

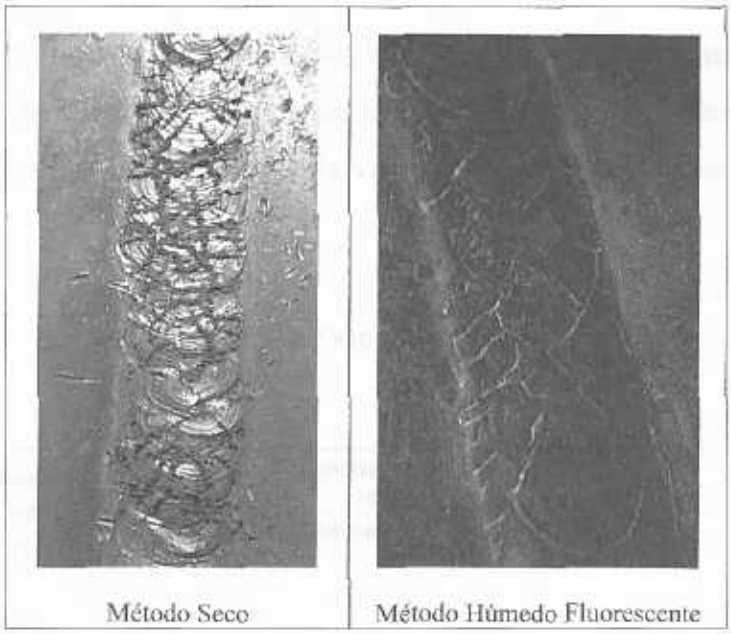


Fig. 4.3.5 – Grietas en el cordón de soldadura, inspeccionadas con partículas secas de color rojo y partículas húmedas fluorescentes

4.4. Inspección con Ultrasonido

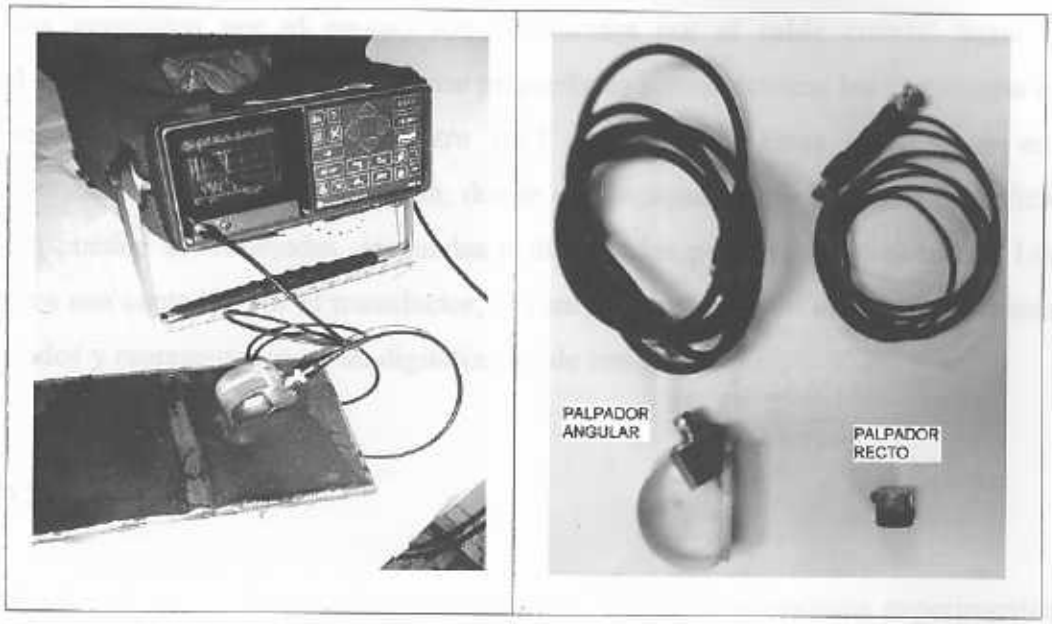


Fig. 4.4.1 – Equipo de Ultrasonido krautkrämer USD 10, palpador angular de 70° con zapata de plexiglass y palpador recto o normal con sus respectivos cables coaxiales.

4.4.1. Principio del Método

El principio en el que se basa el método de inspección por ultrasonido es la impedancia acústica (Z); que es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica y es igual al producto su densidad (ρ) por la velocidad máxima de vibración de un material (Vm).

$$Z = \rho * Vm \qquad (4.4.1)$$

Material	Densidad 10^3 Kg/m^3 ρ	Velocidades Acústicas 10^3 m/s		Impedancia Acústica 10^6 Kg/m^2*s Z = ρ*VL
		Velocidad Longitudinal (VL)	Velocidad Transversal (Vt)	
Acero de baja aleación	7,85	5,82	3,19	45,7

Tabla 4.4.1 - Impedancia Acústica (Z) en acero de baja aleación

El equipo electrónico de ultrasonido genera pulsos eléctricos muy breves, del orden de microsegundos, con una frecuencia de repetición entre los 125 y 5000 pulsos por segundo. Los pulso eléctricos generados por el equipo son conducidos por el cable coaxial hasta el transductor, el cual mediante un cristal que tiene propiedades piezoeléctricas los transforma en vibraciones mecánicas con frecuencias entre 0.25 y 25 MHz. Estas vibraciones son transmitidas al material durante la inspección, donde se propagan y reflejan en la superficie opuesta, o bien pueden ser reflejadas, atenuadas o dispersadas por una discontinuidad. Los pulsos reflejados son captados por el transductor, el cual lo transforma en impulsos eléctricos que son analizados y representados en un digitalizador de imágenes

4.4.2. Modos y Tipos de Ondas

Las partículas de un medio en el que se propaga una onda ultrasónica experimentan diversos desplazamientos, lo que da lugar a diferentes tipos de ondas. Los casos en estudio son los siguientes:

Ondas Longitudinales o de Compresión: Se caracterizan porque los desplazamientos de las partículas son paralelos a la dirección de propagación del ultrasonido, creando zonas de compresión y de dilatación, separadas entre sí media longitud de onda dentro del material en el que se propagan (ver Fig. 4.4.2). Si las partículas están situadas muy próximas unas de otras la amplitud de la oscilación es muy pequeña, y por lo tanto son sumamente elevadas las velocidades de las partículas y la presión sonora

Ondas Transversales o de Corte: Son denominadas de esta manera, debido a que el movimiento de las partículas es transversal a la dirección de propagación, para lo cual es necesario que la partícula exhiba una gran fuerza de atracción hacia sus vecinas, con lo que al moverse hacia atrás y hacia delante provoque un oscilación de la demás (ver Fig. 4.4.2).

Una onda de corte viaja aproximadamente a la mitad de la velocidad de una onda longitudinal cuando se desplazan en el mismo material, y por lo tanto tienen longitudes de ondas más cortas que las ondas longitudinales de la misma frecuencia.

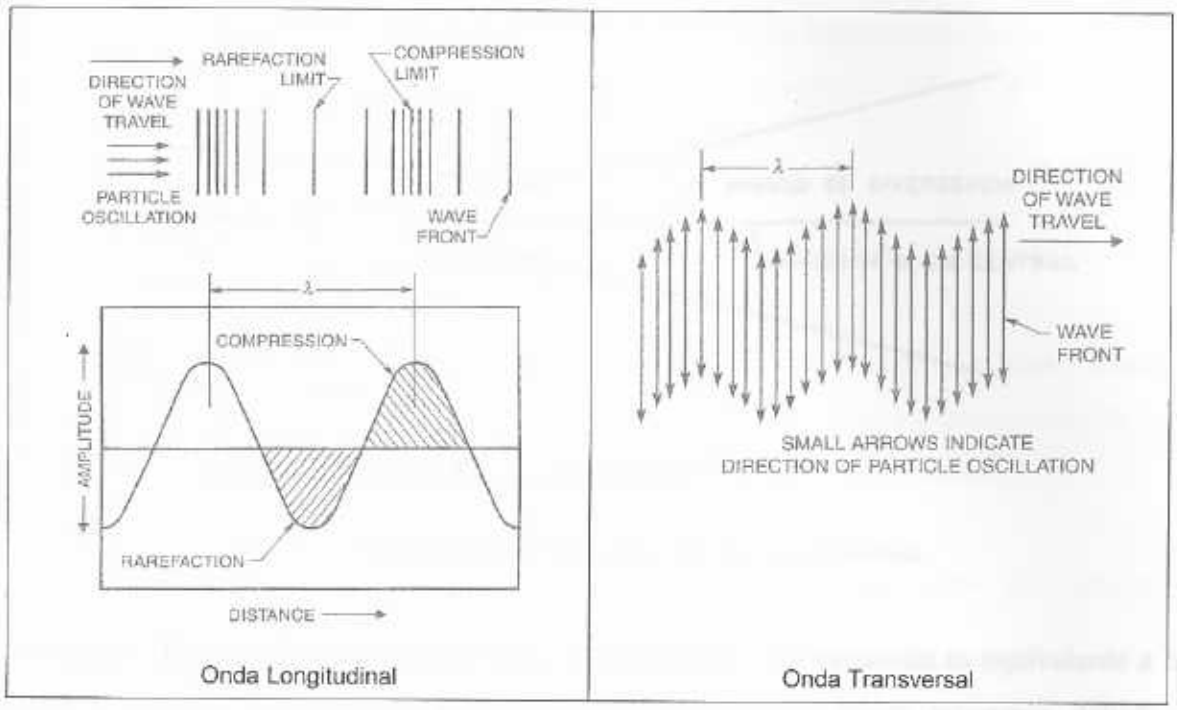


Fig. 4.4.2 – Onda Longitudinal o de Compresión y Onda Transversal o de Corte.

Medios de acoplamiento acústico: Debido a que el aire atenúa fuertemente el sonido se deduce la conveniencia del empleo de un medio acústicamente conductor interpuesto entre el palpador y la muestra de ensayo que desplace la fina película de aire existente y permita la transmisión de la [1]presión acústica incidente. A estos medios se le denominan acoplantes acústico los cuales son líquidos más o menos viscosos y en general se trata de compuestos orgánicos pastosos.

4.4.3. Descripción del Comportamiento del Haz Ultrasónico

El comportamiento del haz ultrasónico puede modificarse en función de la geometría, frecuencia y características específicas del transductor; sin embargo independientemente de estas variables siempre presentará las siguientes características: un campo o zona muerta, un campo cercano o zona de Fresnel y un campo lejano o zona de Fraunhofer. Lo anterior está representado gráficamente en la siguiente figura:

[1] La presión acústica (P) y la amplitud máxima de oscilación están relacionadas por: $P = Z^* Vm$

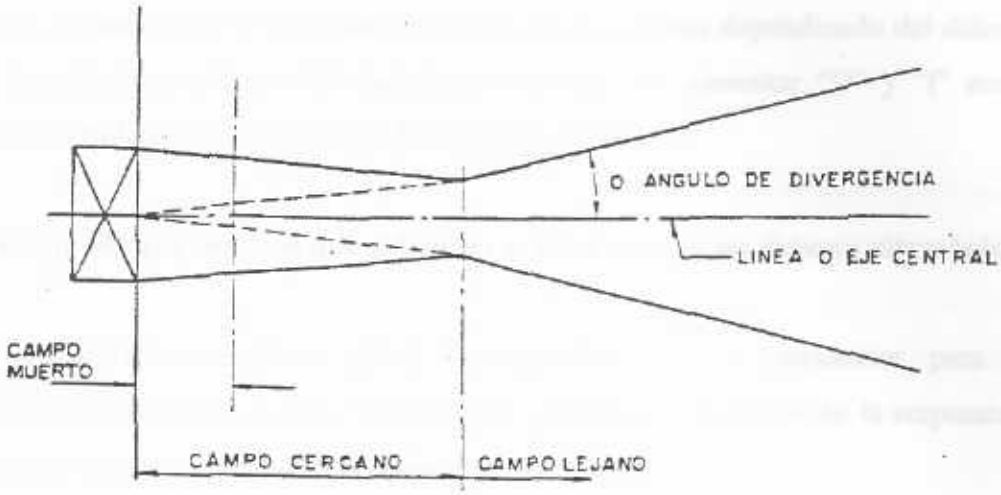


Fig. 4.4.3 - Descripción del Comportamiento del haz ultrasónico

Campo Muerto: Es la distancia frente al transductor y su extensión es equivalente a la longitud de un pulso completo. En esta zona ninguna indicación puede detectarse, debido a que existe un lapso en el cual el transductor ha dejado de vibrar pero está saturado y en consecuencia no detecta la señal que puede generarse en el material a inspeccionar.

El campo muerto es importante porque limita ciertas aplicaciones del ultrasonido, especialmente cuando se está inspeccionando materiales delgados o se requiere localizar indicaciones muy cercanas a la superficie en la que se introduce el haz ultrasónico

Campo Cercano o Zona de Fresnel: Es una zona de interferencia originada por la vibración irregular del material que se encuentra frente al transductor. La cara del cristal de un transductor ultrasónico no vibra uniformemente bajo la influencia del pulso eléctrico, sino que lo hace en forma compleja, ya que su estructura es la de un mosaico formado por cristales individuales que vibran en la misma dirección, pero ligeramente fuera de fase con sus vecinos. Por esta razón en la zona de Fresnel, la presión acústica varía irregularmente y se puede detectar una discontinuidad, pero no se puede evaluar porque se tiene variaciones en la amplitud de la indicación que depende de la frecuencia, de la velocidad del sonido en el material y del diámetro del transductor.

Campo lejano o zona de Fraunhofer: Es la región después del campo cercano y se caracteriza porque la haz ultrasónico disminuye proporcionalmente a la distancia del

transductor. En esta zona se detectan y evalúan las indiaciones dependiendo del diámetro (D) y de la frecuencia central (f) del transductor (cristal). Al aumentar "D" y "f" aumenta la sensibilidad debido a que el ángulo de divergencia disminuye.

4.4.4. Principales parámetros que deben ser controlados en un sistema ultrasónico

1. **Sensibilidad:** se define como la capacidad de un transductor para detectar discontinuidades pequeñas. Se mide por medio de la amplitud de la respuesta de una discontinuidad artificial en un bloque de referencia.

2. **Resolución:** es la capacidad para separar dos señales cercanas en tiempo o profundidad. Puede dividirse en dos tipos:

   - Resolución en Superficie cercana: es la habilidad para separar una señal de un reflector en una distancia mínima cercana a la superficie, sin presentar interferencia de la señal de entrada inicial.

   - Resolución en Superficie de Pared Posterior: es la capacidad de un transductor de proporcionar indicaciones separadas de discontinuidades con una profundidad muy cercana a la superficie de pared posterior; esta resolución depende del ancho del pulso y de la frecuencia.

3. **Frecuencia Central:** Los transductores deben utilizarse en su rango de frecuencia especificado para obtener una aplicación óptima.

Otro aspecto importante a considerar es la **atenuación del haz**, que es la pérdida de energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material. Las causas principales son la dispersión y absorción.

a) *Dispersión del haz ultrasónico:* se debe a que los materiales no son estrictamente homogéneos. Contienen pequeñas interfases en las que la impedancia acústica cambia

bruscamente por la diferente densidad o velocidad acústica de los materiales en dichas interfases.

b) *La absorción de las ondas ultrasónicas:* es el resultado de la conversión de energía sonora en calor. La absorción es directamente proporcional a la frecuencia; debilita la energía transmitida o la amplitud del eco de una heterogeneidad (discontinuidades), para contrarrestar este efecto es recomendable el empleo de bajas frecuencias. En general para los metales, la atenuación por absorción es considerablemente menor que la producida por la dispersión el haz.

4.4.5. El Palpador

En la inspección ultrasónica se define como transductor a aquel elemento que tiene por función transformar energía mecánica (vibraciones) en energía eléctrica o viceversa, que es el caso de los cristales piezoeléctricos. Así mismo, se define como palpador (sonda o unidad de búsqueda) al arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar la inspección.

La técnica de impulsos de sonido utiliza casi exclusivamente placas piezoeléctricas (cristales) para la generación y la recepción de ondas sonoras. Estos cristales son excitados, mediante breves impulsos eléctricos, para producir oscilaciones mecánicas. Mediante un amortiguador dispuesto en la parte posterior del convertidor la oscilación de la placa piezoeléctrica es amortiguada. De esta forma es producido el impulso de ultrasonido

Clasificación de los palpadores.

Existen diferentes formas de clasificar los palpadores, algunas de estas son según:

a) El grado de amortiguamiento del transductor
b) La forma de propagación del haz
c) La técnica de Inspección

a) **En el caso del grado de amortiguamiento**. Este determina si el transductor es de banda

ancha o de banda angosta. El ancho de la banda significa la gama de frecuencias que son iguales o mayores al 70% de la frecuencia central

- **Palpador de banda ancha:** cuando el cristal está fuertemente amortiguado en el cual obtienen pulsos cortos como se muestra en la figura (4.4.4). Las características principales de este tipo son: reducción del campo muerto, pulsos acústicos de corta duración, de uno o dos ciclos de vibración; elevado poder de resolución que permite realizar mediciones de tiempo de recorrido sumamente exactas, menor sensibilidad, menor poder de penetración y mayor atenuación.

- **Palpador de banda angosta:** cuando el cristal está poco amortiguado el pulso es largo y en consecuencia, su espectro de frecuencias es más amplio y se encuentra situado cerca de la frecuencia de resonancia del cristal (ver figura 4.4.4). Las características principales de este tipo de palpadores son: incremento del campo muerto, pulsos acústicos de larga duración (de dos a cinco ciclos de vibración), mayor sensibilidad, mayor poder de penetración y menor atenuación.

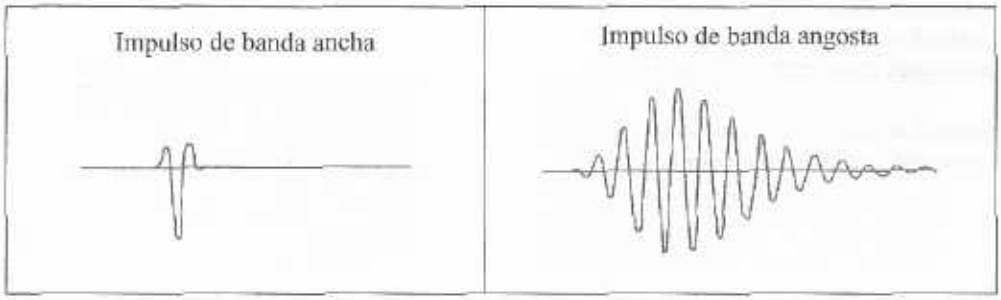


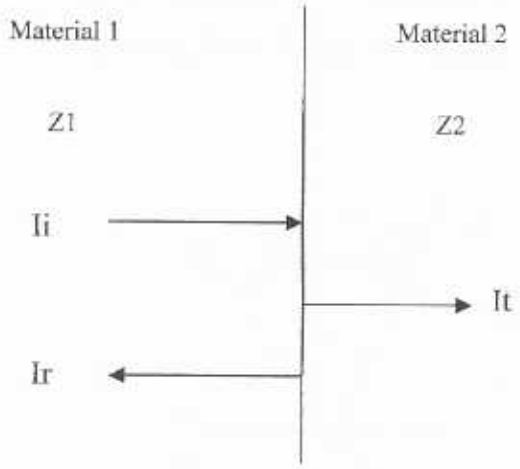
Fig. 4.4.4 - Tipos de impulso de acuerdo al grado de amortiguamiento del palpador

El amortiguador del cristal es un elemento indispensable en los equipos que operan por el método pulso-eco y sus finalidades son: Reducir el tiempo de oscilación del cristal, Absorber las ondas que pudieran interferir el oscilograma y soportar mecánicamente el cristal piezoeléctrico. Posiblemente de estas tres finalidades, sea la primera la más importante; ya que la duración del pulso acústico define la llamada zona muerta la cual no será posible detectar la presencia de heterogeneidades, puesto que las indicaciones ecos quedarían enmascaradas.

b) Forma de propagación del haz. De acuerdo a la dirección de propagación del haz con relación a la superficie de las muestras, se clasifican en:

- **Palpadores de incidencia normal o de haz recto.** Emite ondas longitudinales con frecuencias de 0.5 a 10 MHz. Se emplea generalmente para la inspección de piezas en las que se puede colocar directamente la unidad de prueba sobre el área de interés y las discontinuidades son paralelas a la superficie de contacto.

  Si una onda acústica plana incide perpendicularmente sobre una superficie plana y uniforme que separa dos medios diferentes, una parte de la energía de la onda se refleja y vuelve en la misma dirección de la onda incidente, mientras que la otra parte se propaga en el segundo medio manteniendo su dirección y sentido, como se muestra en la figura 4.4.5



Donde:

Ii = Intensidad de la onda incidente
Ir = Intensidad de la onda reflejada
It = Intensidad de la onda transmitida

Z1 = Impedancia acústica del medio 1
Z2 = Impedancia acústica del medio 2

Fig. 4.4.5 – Representación gráfica de incidencia normal entre dos medios.

$$R = \frac{Ir}{Ii} \qquad T = \frac{It}{Ii}$$

Coeficiente de Reflexión Coeficiente de Transmisión

Ambos términos son adimensionales y expresan el porcentaje de la [2]intensidad acústica reflejada y transmitida, en relación con la intensidad de energía incidente. El balance de energía expresada en intensidad nos da:

$$Ii = Ir + It \qquad (4.4.2)$$

y por consiguiente:

$$R + T = 1 \qquad (4.4.3)$$

- **Palpadores de incidencia angular.** Generan ondas de corte, de superficie y de placa. Se construye acoplando una unidad de haz recto a una de las caras de una zapata de plástico (plexiglass), la cual presenta determinado ángulo de refracción. Se emplea en los equipos Pulso-Eco y su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie de prueba.

  Cuando una onda sonora longitudinal o transversal cruza oblicuamente la interfase entre dos materiales de diferente velocidad o impedancia acústica, una porción del sonido se refleja y la otra se refracta.

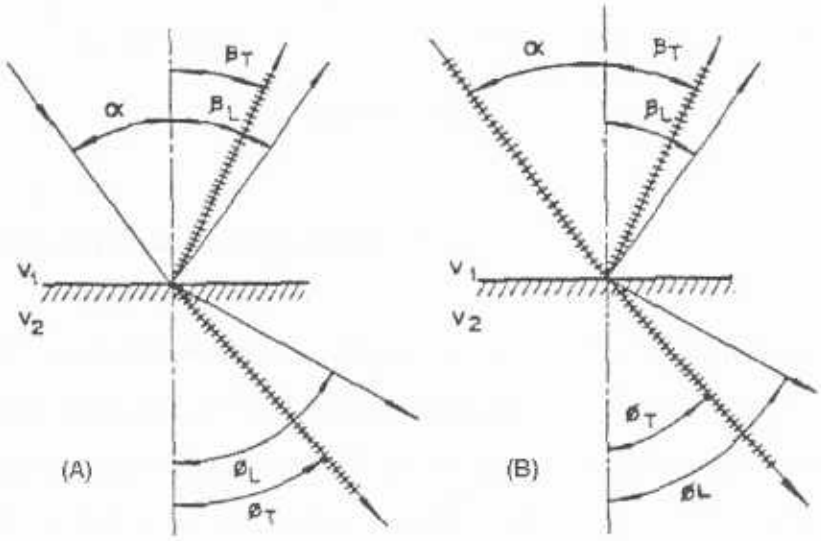


Fig. 4.4.6 - (A) Onda incidente longitudinal y (B) Onda incidente transversal

[2] **Intensidad Acústica:** Es la cantidad de energía que pasa por unidad de área en unidad de tiempo y viene expresada como $I = \frac{1}{2} * Z * Vm^2$

Donde:

α = ángulo de incidencia
V1 y V2 = velocidades de los medios 1 y 2
βL = ángulo de reflexión de la onda longitudinal
βT = ángulo de reflexión de la onda transversal
ϕL = ángulo de refracción de la onda longitudinal
ϕT = ángulo de refracción de la onda transversal

Las direcciones de las ondas reflejadas y transmitidas se determinan por la ley de Snell:

$$\text{sen}\alpha/\text{sen}\phi = V1/V2 \qquad (4.4.4)$$

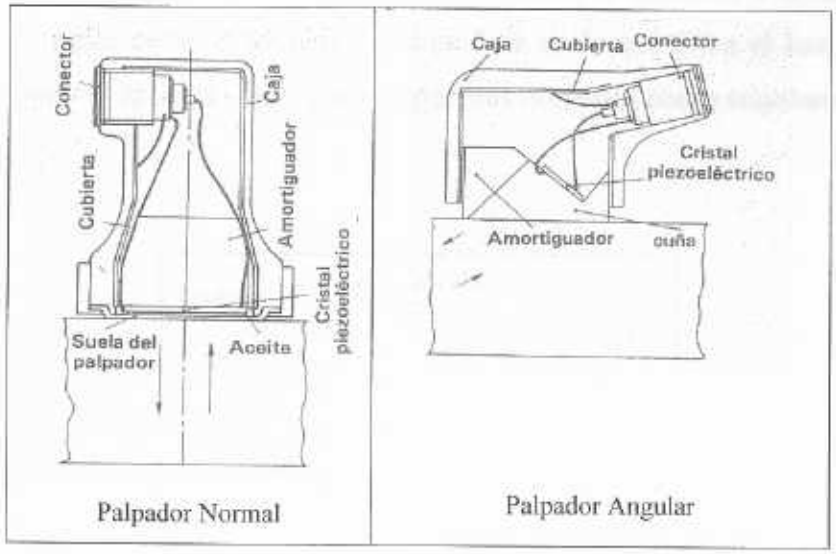


Fig. 4.4.7 - Esquema de un palpador normal y angular.

c) De acuerdo a las Técnicas de Inspección

Técnica por Contacto Directo: se denomina así esta técnica, cuando el transductor se coloca directamente sobre la superficie del material sujeto a inspección y la transmisión del ultrasonido se logra por medio de una película de acoplante para crear una continuidad en esta.

Su principal ventaja es que sólo requiere acceso por un lado de la pieza a examinarse, se puede aplicar sobre partes y componentes ya ensamblados o de difícil movimiento. Presenta como inconveniente, la dependencia de la indicación con respecto a la orientación y a la forma de las discontinuidades, ya que cuando se trata de discontinuidades alargadas, éstas deben estar orientadas perpendicularmente al haz ultrasónico de tal forma que lo reflejen parcial o

totalmente. Además, esta técnica se ve fuertemente influida por las características del acabado superficial de la pieza; por otra parte, la inspección de grandes áreas puede ser lenta al compararse con otros métodos de inspección.

4.4.6. Método de Inspección por Pulso-Eco (impulsos).

Consiste en transmitir la energía ultrasónica en impulsos cortos, estos se transmitirán al cuerpo de tal forma que el tiempo que tarde en recibirse la energía reflejada en la discontinuidad o en la pared posterior, permitirá determinar la distancia a la cual se encuentra ésta, tomando para ello como referencia la superficie en la que entra el haz ultrasónico. El método de pulso-eco es aplicado tanto para palpadores normales como angulares.

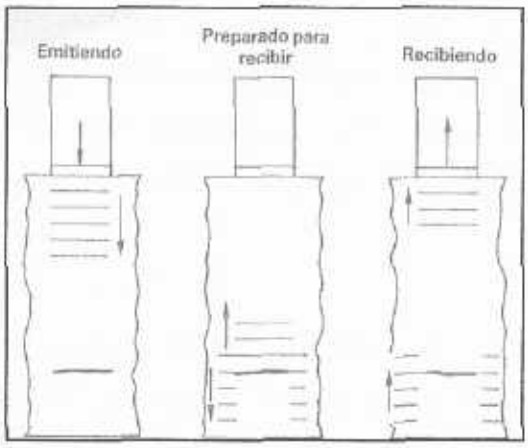


Fig. 4.4.8 - Método por pulso-eco en un palpador que trabaja como emisor y receptor

4.5. Inspección con Radiografía

4.5.1. Principio del Método

El principio físico en el que se basa la radiografía es la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, siendo esta última de una longitud de onda muy corta y de alta energía. Durante la exposición radiográfica, la energía de los rayos gamma es absorbida o atenuada al atravesar un material. Esta atenuación es proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado. La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión en una placa fotosensible, que posteriormente se somete a un proceso de revelado. La Técnica Radiográfica pude ser realizada por un equipo de Rayos X o por un Isótopo artificial, en este caso se ha aplicado la Técnica Radiográfica por Isótopo artificial.

Isótopos: son átomos de un elemento que tienen el mismo número de protones en el núcleo, pero diferente peso atómico. Puesto que el número de electrones es igual para los diferentes isótopos de un mismo elemento, sus propiedades químicas son las mismas, pero difieren en sus propiedades físicas.

Radioisótopos: existen alrededor de 100 elementos diferentes con aproximadamente 300 isótopos estables y más de 500 que son inestables. La inestabilidad surge porque algunos isótopos tienen un desequilibrio de neutrones; por lo que intentan alcanzar una relación más estable entre éstos y los protones, por medio de la emisión de radiaciones alfa, beta o gamma.

4.5.2. Tipos de Radiación

Los isótopos radioactivos se desintegran emitiendo espontáneamente radiación y partículas subatómicas que se conocen como: partículas alfa (α), partículas beta (β) y partículas gamma (γ). La más importante en la inspección radiográfica es la radiación gamma (γ) la cual es la de mayor poder de penetración; a diferencia de las partículas alfa o beta, la radiación gamma no es corpuscular y tiene las siguientes características:

- Se comporta como onda electromagnética y como fotón
- Es emitida por el núcleo
- No posee masa ni carga eléctrica
- No es desviada por un campo magnético
- Tiene relativamente bajo poder ionizante
- Presenta un elevado poder de penetración en materiales sólidos
- Viaja en línea recta a la velocidad de la luz
- Presenta una corta longitud de onda

4.5.3. Fuentes de Rayos Gamma.

Existen una gran variedad de radioisótopos que se emplean en la radiografía industrial como: Cobalto 60, Cesio 137 e Iridio 192, este último el más empleado en la Industria de la Construcción Metalmecánica es el que se va a tratar en esta investigación.

Vida Media: la vida media de un radioisótopo, es el tiempo necesario para que su actividad inicial quede reducida a la mitad.

Actividad: Es la expresión de la velocidad de desintegración de un radioisótopo, es decir el número de desintegración que ocurre en un material radioactivo por unidad de tiempo medido en Becquerelio (Bq) o Curie (Ci). La equivalencia entre ambas unidades es:

$$1\ Ci = 3{,}7*10^{9}\ Bq$$

La actividad específica de cualquier radioisótopo, se define como la actividad en Bq que presenta un gramo de radioisótopo, esto es Bq/g.

Intensidad de la Radiación: Se refiere al grado de ionización que una fuente puede proporcionar en un tiempo determinado, su unidad es el roentgen/hora y puede ser calculada multiplicando la actividad de la fuente por la constante específica de emisión. La intensidad de la fuente puede variar, debido a que esta característica está en función del tamaño de la fuente,

diseño de encapsulación y del grado de concentración del radioisótopo (actividad específica) al momento en que fue encapsulado.

Roentgen: es aquella cantidad de radiación X o gamma que producirá $2{,}083*10^9$ pares de iones por centímetro cúbico de aire a una presión de 760 mmHg y a una temperatura de 0 °C.

Constante Específica de emisión: es una medida de la energía de radiación que considera al tiempo, al tipo de radioisótopo y la distancia a partir de la fuente. Normalmente se expresa en Roentgen por hora por Curie a una distancia a partir de la fuente R/h-Ci como se muestra en la tabla 4.5.1.

Isótopo	Vida Media	Actividad Específica	Cte Específica R/h-Ci	Penetración (acero)
Cobalto 60	5,3 años	Media	1,30	1 a 7 "
Cesio 137	30 años	Baja	0,32	1 a 3 "
Iridio 192	75 días	Muy alta	0,55	1/4 a 3 "

Tabla 4.5.1 - Constante Específica de Emisión con una actividad de 1 Curie a una distancia de 1metro

Nivel Energético: La energía emitida por un radioisótopo es constante y no cambia aun cuando la actividad y la intensidad de la emisión del radioisótopo disminuyen. Este hecho no debe pasar inadvertido, ya que influye la calidad de la imagen que se obtenga. A mayor energía emitida, menor será el contraste en la imagen radiográfica. Para ciertos radioisótopos, como el cobalto y el iridio, el valor de la energía emitida es un valor promedio de los diferentes rayos y de la cantidad presente durante la emisión.

Iridio 192

Es un metal muy duro y frágil de color blanco y pertenece a la familia del platino. Su punto de fusión es de 2340 °C y su densidad 22.4 gr/cc. El iridio en forma natural se encuentra como dos isótopos estables en una porción del 38% del Iridio 191 y 62% de Iridio 193. El

isótopo más ligero es el adecuado para su activación.

El Iridio 191 tiene una sección transversal de captura de neutrones lentos de 1000 barns, por lo que no sólo es mejor para producir Iridio 192, sino que también lo hace un buen material para absorber neutrones; como elemento (en mezcla isotópica); tiene una sección transversal de captura de 470 Barns. Por esta razón, la forma y tamaño de las cápsulas de activación deben ser reducidos para minimizar el efecto de absorción, ya que la mayoría de los neutrones son absorbidos en las capas externas de las pastillas sin lograr activarse en su interior.

El Iridio 192 tiene una vida media de 74.3 días; su mecanismo de decaimiento es complejo y hasta el momento se conoce la emisión de 24 posibles rayos gamma, de los cuales los de 310, 470 y 600 KeV son los más importantes durante su proceso de desintegración. Tiene una energía media de emisión de 0.355 Mev. Su actividad específica máxima es de 20000 MBq/gr (500 Ci/gr). Comúnmente se prepara en forma de lentejuelas, las cuales se introducen en una cápsula de acero inoxidable.

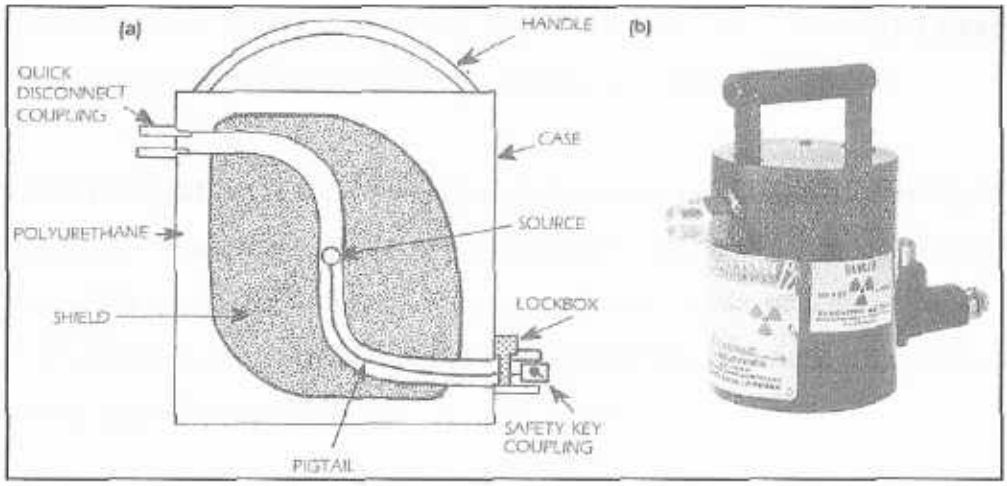


Fig. 4.5.1 – (a) Esquema y (b) fotografía de una fuente de Iridio 192 de 100 Curies

4.5.4. Películas Radiográficas

Uno de los elementos de gran importancia en la radiografía industrial es el medio de registro de la imagen radiográfica. Actualmente con las innovaciones tecnológicas se cuenta con una gama más amplia de medios de registros, como la cinta de video o los registros polaroid en papel fotográfico; aunque hasta la fecha sigue siendo la película radiográfica el medio más empleado como registro permanente.

La película radiográfica consiste de una hoja delgada de plástico o acetato transparente, cubierta por uno o ambos lados por de una emulsión de bromuro de plata aproximadamente 0,0254 mm (0,001 pulg.) de espesor. Las características más importantes de una película son: velocidad de la película, tamaño de grano y gradiente o contraste de la película (ver tabla 4.5.2)

Exposición: se refiere a la medida de radiación que llega a cierta área de la película, es decir la cantidad de energía que llega de una zona específica de la película y a la cual se debe la formación de una determinada densidad en la película procesada. La exposición puede especificarse en unidades absolutas (erg/cm^2 o bien roentgen de rayos gamma). La exposición equivale a la intensidad de la radiación multiplicada por el tiempo.

Densidad Fotográfica: la acción de la radiación en una película se hace evidente solo en grados variables de "ennegrecimiento" de la película procesada. La densidad fotográfica se refiere a la medida cuantitativa de dicho ennegrecimiento de la película. Cuando no hay posibilidad de confusión, la densidad fotográfica generalmente se conoce solo como densidad y se define con la siguiente ecuación:

$$D = \log (Io/It) \qquad (4.5.1)$$

Donde:

D = Densidad de la película en el área de interés.
Io = Es la intensidad de la luz incidente
It = Es la intensidad de la luz transmitida

Selección de Películas para Radiografía Industrial

La selección de una película para la radiografía de cualquier pieza en partículas depende del espesor y del material del espécimen. En adición, la escogencia es afectada por la importancia de la calidad de la radiografía o de un corto tiempo de exposición, como consecuencia no es posible presentar reglas definitivas en la selección de una película. Si la alta calidad es el factor decisivo, una película lenta y de grano muy fino deberá sustituir a una rápida.

Tipo de Película	Velocidad	Gradiente	Tamaño de grano
1	Lenta	Muy alto	Muy fino
2	Media	Alto	Fino
3	Muy alta	Muy Alto	Grueso
4	Media	Medio	Medio

Tabla 4.5.2 - Clasificación de las películas Radiográficas según ASTM E-94

Densidad de las Radiografías: los gradientes promedio de las películas radiográficas industriales se evalúan en una escala de densidades de 1.5 a 2.5 pudiendo llegar hasta 4,0. Los especimenes radiográficos industriales, por lo general son bastante uniforme en espesor y producen radiografías con escalas de densidad muy limitadas.

4.5.5. Pantallas Intensificadoras

Son láminas delgadas de metal o de sustancias cristalinas, fluorescentes a los rayos X y gamma, entre las que se coloca la película radiográfica. Las pantallas intensificadoras se emplean para:

- Filtrar la radiación incidente y así eliminar la radiación dispersa y de baja energía
- Intensificar la acción fotográfica de la radiación ionizante por la emisión de electrones libres o de luz ultravioleta o visible que imprime la placa
- Reducir el tiempo de exposición a valores prácticos

Normalmente, la película se coloca entre dos pantallas. Cuando se emplean pantallas metálicas, el espesor de las pantallas intensificadoras, por lo general, es de 0.12 mm para la frontal y de 0.25 mm para la posterior.

4.5.6. Indicador de la Calidad de Imagen (ICI)

Debe aclararse que los indicadores de calidad de imagen no garantizan la detección de discontinuidades de iguales dimensiones al valor de la sensibilidad hallada, por lo que no se deben tomar como referencia las dimensiones del indicador de calidad de imagen para determinar el tamaño mínimo del defecto que se pueda observar.

Independientemente de la selección de un tipo particular de indicador de imagen, estos tienen las siguientes finalidades:

1. Establecer un método común para determinar el valor mínimo de sensibilidad que se considera aceptable en una imagen radiográfica.
2. Señalar la sensibilidad obtenida en distintas zonas de una radiografía.
3. Establecer cual puede ser la variación mínima de espesor que se puede observar en la radiografía

ICI tipo alambre (ASMT): están formados por una serie de hilos metálicos cuyos diámetros varían en forma creciente y los cuales están protegidos por una envoltura de plástico transparente.

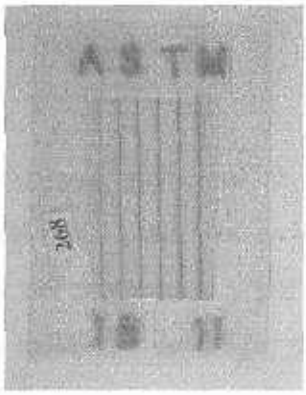


Fig. 4.5.2 - ICI tipo alambre

5. Discontinuidades en las Juntas Soldadas.

Traslape o cordón traslapado (overlap)

Es la protuberancia del metal depositado que se extiende más allá del pie o la raíz de la soldadura. Es una discontinuidad superficial que constituye una muesca mecánica que actúa como concentrador de esfuerzos y casi siempre se considera rechazable.

Causas probables: control insuficiente de las operaciones de soldadura, oscilación excesiva del electrodo, velocidad de avance lenta asociada con corriente alta, posición de soldadura incorrecta (por ejemplo, soldaduras de filete de tamaño relativamente grande depositadas con cordón sencillo en posición horizontal o vertical), selección inapropiada de los consumibles de soldadura, preparación inapropiada de la junta y óxidos firmemente adheridos al metal base, mismos que pueden interferir con la fusión

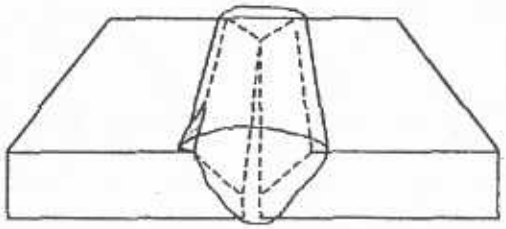


Fig. 5.1 – Traslape producido en la cara de la soldadura de una junta a tope

Socavado (Undercut)

Es una ranura dentro del metal base, adyacente al pie o a la raíz de la soldadura. Tal ranura se forma debido a la fusión del metal base, y no es llenada por el metal de soldadura.

Esta ranura reduce el espesor del metal base y por lo tanto, la resistencia de la junta, particularmente con respecto a los esfuerzos de fatiga; también crea una muesca que actúa como un concentrador de esfuerzos.

Todas las soldaduras tienen alguna forma de socavado, pero cuando éste es controlado,

no es muy agudo o profundo y no excede los limites permitidos por las normas, no se considera un factor critico ni un defecto.

Causas probables: corriente excesiva de soldadura y longitud de arco (voltaje) muy alto, técnica incorrecta del soldador (manipulación inadecuada del electrodo y velocidad excesiva de desplazamiento), posición de trabajo incómoda, falta de acceso a la junta y soplo de arco.

Llenado incompleto

Es una depresión de la junta soldada en la cual la cara de la soldadura o la superficie de la raíz se extienden por debajo de la superficie del metal base; algunas veces queda descubierta una porción de la cara de la ranura.

Causas probables: falla del soldador para llenar completamente la junta, no seguir el procedimiento de soldadura establecido.

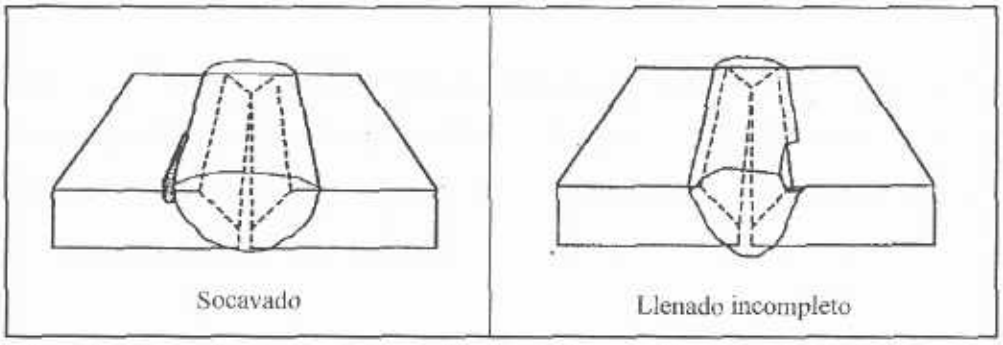


Fig. 5.2 – Socavado y Llenado incompleto producidos en la interfase de la soldadura de juntas a tope con bisel

Porosidad

Cavidad o cavidades formadas por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura o en un depósito aplicado por rociado térmico. Los poros generalmente tienen forma más o menos esférica pero también pueden ser alargados. Si la porosidad no es excesiva o el tamaño de los poros no es relativamente grande, su presencia no es crítica y pueden ser aceptados por los criterios aplicables, debido a que no tienen bordes agudos que pudieran causar concentraciones de esfuerzo.

Las causas principales de la porosidad son la suciedad, la herrumbre y la humedad en la

superficie del metal base, contaminación en los electrodos, fundentes, una mala preparación de las juntas e incompatibilidad entre el metal de aporte y los metales base

Porosidad distribuida uniformemente: porosidad esparcida de manera uniforme en el metal de soldadura; también se le llama porosidad distribuida al azar.

Causas probables: técnicas de soldadura inadecuadas, preparación incorrecta de las juntas o errores en el manejo de los materiales.

Prevención: manejo adecuado de los materiales, técnicas correctas de soldadura y de preparación de juntas. Si la soldadura enfría con suficiente lentitud para permitir que los gases alcancen la superficie antes de la solidificación, se minimizará la porosidad

Porosidad agrupada: grupos localizados de poros separados por longitudes considerables de metal de soldadura sano.

Causas probables: iniciación o terminación inadecuada del paso de soldadura, soplo de arco.

Prevención: el soplo de arco se puede evitar o disminuir al reducir la intensidad de la corriente directa, soldando con corriente alterna, mediante la disminución de la longitud del arco, cambiando la conexión del cable al otro extremo de la pieza de trabajo o haciendo conexiones en varios puntos.

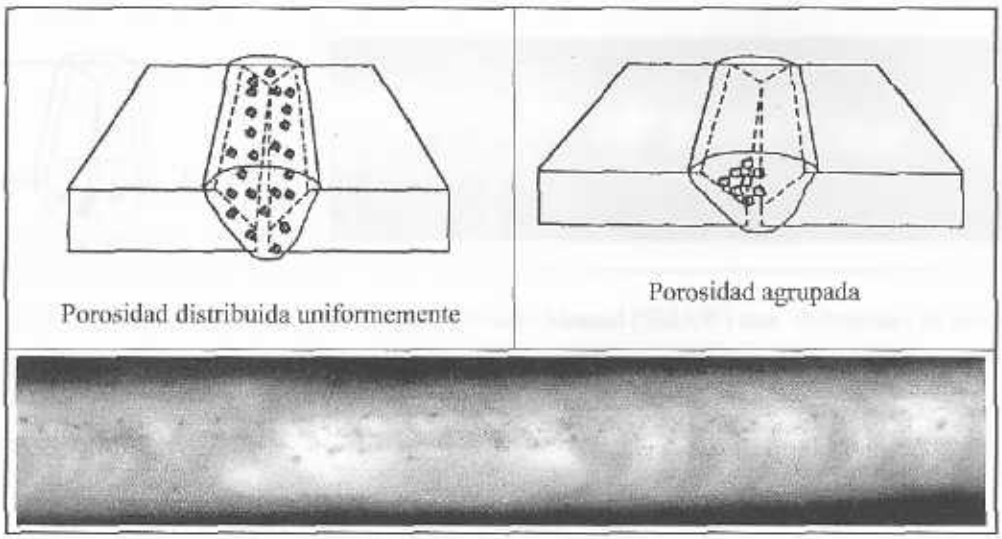


Fig. 5.3 - Porosidad distribuida uniformemente y porosidad agrupada. A bajo, Radiografía de una Soldadura con Proceso Manual (SMAW) con porosidad distribuida uniformemente

Inclusiones de escoria.

Materiales sólidos no metálicos que quedan atrapados en el metal de soldadura entre el metal de soldadura y el metal base. Una vez que se forma la escoria (a partir del fundente y las reacciones de éste con el metal de soldadura fundido), debido a que tiene un peso especifico menor que el metal, tiende a subir a la superficie de este, pero si existen ranuras agudas en los bordes a unir del metal base, la escoria puede quedar atrapada mecánicamente. Después de depositar un cordón, si no se remueve adecuadamente la capa de escoria formada antes de aplicar el siguiente paso, ésta puede quedar dentro del metal de soldadura.

Causas probables: técnicas erróneas de soldadura, mal diseño de las juntas o preparación incorrecta de éstas, falta de limpieza de los bordes a soldar, acceso restringido para soldar la junta, bordes y ranuras agudos entre metal base y de soldadura o entre cordones y, con frecuencia, limpieza deficiente entre pasos.

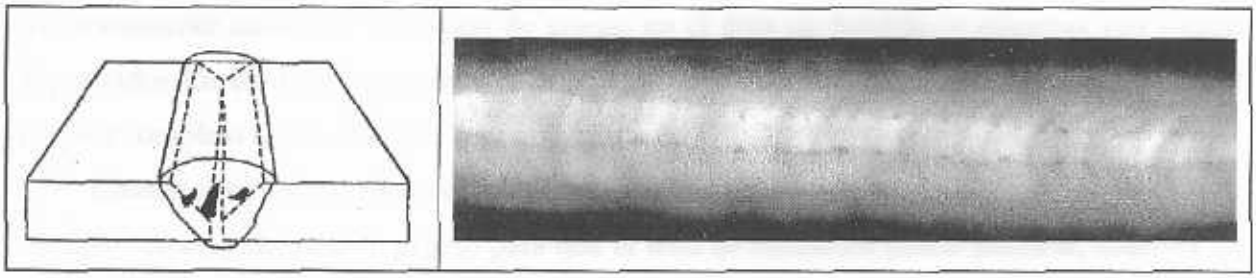


Fig. 5.4 - Radiografía de una Soldadura con Proceso Manual (SMAW) con inclusiones de escoria.

Fusión incompleta.

Falta de unión entre el metal de soldadura y las caras del metal base o la superficie de otros cordones en las que no ocurrió la fusión. Esta discontinuidad es también conocida con el término no estandarizado de falta de fusión.

Causas probables: calor de soldadura insuficiente (baja intensidad de corriente o alta velocidad), falta de acceso a todas las caras de fusión, capas de óxido adheridas al metal base y manipulación inapropiada del electrodo.

Prevención: emplear corrientes y velocidades de soldadura adecuadas, remover óxidos y otros contaminantes de las superficies a unir y asegurar diseños y preparación de juntas que permitan el acceso a todas superficies de fusión.

Penetración incompleta en la junta.

Es una condición de la raíz de la junta de las soldaduras de ranura en la cual el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. Esta discontinuidad puede presentarse en soldaduras de ranura soldadas por un solo lado o por ambos. Las soldaduras aplicadas en tuberías son especialmente susceptibles a este tipo de discontinuidad, ya que generalmente el interior de los tubos es inaccesible.

La penetración incompleta en la junta es indeseable, en particular cuando la raíz de la soldadura va a estar sujeta a esfuerzos de tensión o doblez, ya que las áreas no fundidas permiten la concentración de esfuerzos que podrían causar una falla sin deformación apreciable. Aunque los esfuerzos durante el servicio no involucren tensión o doblez, los esfuerzos de contracción y la consecuente distorsión que sufren las partes durante la soldadura

frecuentemente causan la iniciación de grietas en el área no fundida, y mientras van siendo depositados los cordones sucesivos, tales grietas pueden crecer hasta extenderse a través del espesor completo de la soldadura o gran parte de éste[3].

Causas probables: calor de soldadura insuficiente, diseño inadecuado de la junta (por ejemplo, espesor demasiado grueso para que el arco de soldadura pueda penetrar, abertura de raíz muy pequeña o ángulo de ranura demasiado pequeño), uso de electrodos de diámetro demasiado grande con respecto al diseño de la junta, velocidades de soldadura muy altas, corriente de soldadura insuficiente, control lateral inadecuado del arco y óxidos o impurezas en las superficies a ser soldadas, particularmente en la cara de la raíz.

Prevención: usar diseños de junta adecuados, electrodos del diámetro apropiado y con la intensidad de corriente correcta, condiciones de operación que proporcionen el calor de soldadura adecuado, ejercer un buen control lateral del arco y esmerilar la ranura de la junta antes de soldar el segundo lado a fin de asegurar una penetración completa

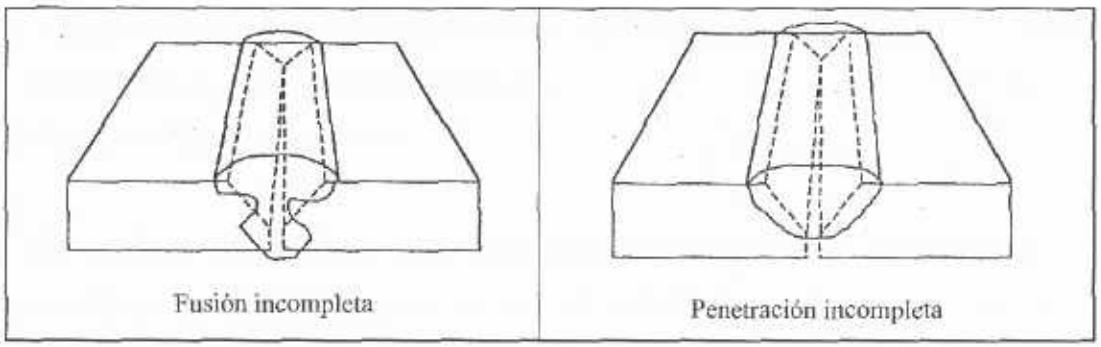


Fig. 5.5 - Fusión y penetración incompleta en juntas a tope con bisel

Grietas

Discontinuidades de tipo fractura que se caracterizan por sus puntas agudas y la relación de su longitud con respecto de su ancho.

Las grietas ocurren en los metales de soldadura y base cuando los esfuerzos localizados exceden la resistencia última del material. Su ocurrencia está asociada con la amplificación de los esfuerzos cerca de discontinuidades de soldadura y metal base, o cerca de muescas

[3] Las consideraciones anteriores son aplicables a las situaciones en las que se especifica penetración completa, y no a las uniones diseñadas específicamente como juntas de penetración parcial.

mecánicas relacionadas con el diseño del ensamble soldado. Algunos de los factores que favorecen su aparición son los esfuerzos residuales altos y la fragilización debida al hidrógeno.

Las grietas que ocurren durante la soldadura o como resultado de ésta generalmente son de naturaleza frágil y muestran muy poca deformación plástica en sus límites. Este hecho se debe a que, si bien los metales de soldadura y base tienen alta ductilidad bajo esfuerzos uniaxiales, no la tienen cuando son sometidas a esfuerzos biaxiales o triaxiales, y la contracción causada por las operaciones de soldadura normalmente genera sistemas de esfuerzos que actúan en varias direcciones.

Hay varios tipos de grieta y éstos se clasifican generalmente en base de su orientación con respecto a la soldadura y también por la temperatura a la que se desarrollan; desde este punto de vista se agrupan en grietas en caliente y grietas en frío.

- **Las grietas en frío:** se desarrollan después de que ha concluido el proceso de solidificación y normalmente están asociadas con la fragilización por hidrógeno (cuando se trata de microestructuras susceptibles al agrietamiento al estar sometidas a esfuerzos). Estas grietas pueden propagarse a través de la microestructura en forma intergranular o transgranular.

- **Las grietas en caliente:** se desarrollan a altas temperaturas, durante el proceso de solidificación o a temperaturas cercanas al punto de fusión. Frecuentemente se originan en sitios de solidificación preferencial de aleantes a temperaturas cercanas a su punto de fusión y se propagan entre los granos (intergranularmente), cuando tiene lugar la solidificación preferencial.

En soldaduras de capas múltiples, es más probable que el agrietamiento ocurra en la primera capa, y si no es reparado, frecuentemente se propagara a través de las otras capas, mientras van siendo depositadas.

Dependiendo de su orientación, las grietas se clasifican como longitudinales y transversales. A continuación se describen los tipos de grieta que ocurren con mayor frecuencia en soldadura.

Grietas longitudinales: son aquellas paralelas al eje de la soldadura, ya sea que estén en la línea de centro del metal de soldadura o bien, en el pie de esta, en la zona térmicamente afectada del metal base.

Causas probables: en soldaduras de longitud relativamente pequeña entre secciones de espesor grueso, las grietas longitudinales frecuentemente son originadas por altas velocidades de enfriamiento y condiciones severas de sujeción o restricción; en soldaduras de gran longitud depositadas mecanizada o automáticamente, este tipo de grietas está asociado con altas velocidades de soldadura y algunas veces con porosidad que no aflora a la superficie.

Grietas transversales: son grietas perpendiculares al eje de la soldadura, pueden estar localizadas exclusivamente en el metal de soldadura o pueden propagarse de éste a la zona afectada térmicamente y aún dentro del metal base. En algunos casos las grietas transversales se forman sólo en la zona afectada térmicamente y no en la soldadura

Causas probables: estas grietas se deben principalmente a esfuerzos de contracción longitudinales que actúan sobre el metal de soldadura de baja ductilidad y juntas que tienen un alto grado de sujeción o restricción.

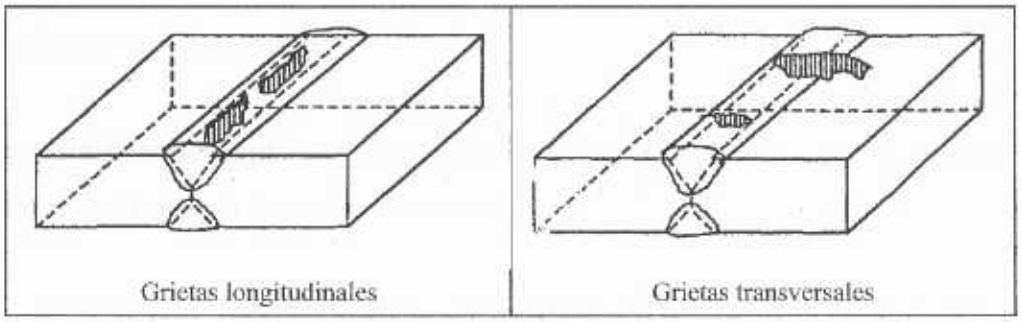


Fig. 5.6 - Grietas longitudinales y transversales en juntas a tope.

Grietas en el pie de la soldadura: estas se inician y se propagan a partir del pie de la soldadura, donde los esfuerzos de contracción están concentrados; su ocurrencia se ve favorecida por la convexidad excesiva del cordón o por un refuerzo de soldadura muy alto, lo que amplifica los esfuerzos. Se inician en dirección aproximadamente normal a la superficie del metal base, pero su trayectoria puede curvarse y tienden a propagarse a través de la zona

afectada térmicamente; por lo general son grietas enfrío

Causas Probables: altos esfuerzos de contracción que actúan sobre la zona afectada térmicamente, algunas veces ocurren debido a que las propiedades transversales de tensión del metal base no pueden transmitir los esfuerzos de contracción producidos por la soldadura.

Prevención: evitar soldaduras con refuerzo o convexidad excesiva.

Grietas debajo del cordón y en la zona afectada térmicamente: generalmente son grietas en frío que se forman en la zona afectada térmicamente; pueden ser longitudinales o transversales. Con frecuencia no se presentan de forma aislada y se las encuentra distribuidas a intervalos regulares debajo del cordón, delineando los límites de la soldadura donde los esfuerzos residuales son más altos. Con mucha frecuencia son pequeñas, pero pueden unirse para formar grietas largas continuas. Pueden llegar a convertirse en un problema serio, particularmente cuando se presentan de manera simultánea las siguientes condiciones:

- Presencia de hidrógeno
- Micro-estructuras susceptibles al agrietamiento (las que tienen una ductilidad relativamente baja y alta resistencia y dureza - dureza Rockwell "C" de 30 o superior)
- Esfuerzos residuales altos.

Las grietas debajo del cordón son discontinuidades internas y no pueden detectarse mediante inspección visual (a no ser que la junta se seccione).

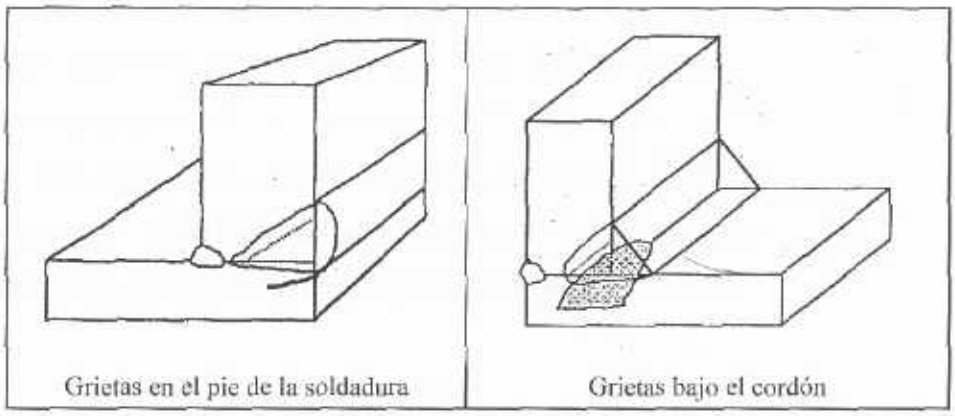


Fig. 5.7 - Grietas en el pie de la soldadura y grietas bajo el cordón en Juntas T

6. Estimaciones de Costos en los Procesos de Soldadura

Para la estimación de los costos en los Procesos de Soldadura hay que considerar dos aspectos esenciales los cuales son:

1. La cantidad de electrodo o fundente consumido dependiendo del tipo de proceso de soldadura (SMAW o SAW).
2. El tiempo necesario para producir una longitud de soldadura y el cual influye directamente en los costos laborables y personales.

Los cálculos de los costos para los procesos de soldadura son simples y confiables, debido a que la información básica necesaria puede ser seleccionada directamente de las tablas de los procedimientos.

La única información requerida es el costo del electrodo por kilogramo, determinado en el momento de su compra, el costo de labor del personal por hora, establecido por el sistema de contabilidad propio de la compañía y un factor estimado operacional. Los costos entonces pueden ser calculados por fórmulas simples.

6.1. Costo del Material Consumido por metro de soldadura (CM)

La mayoría de los métodos de cálculo del consumo del electrodo (WE) están basados en un estimado del peso del metal de soldadura depositado (WW). El método más directo es seleccionar los valores de WW de la tabla 6.2, para el caso de juntas con soldadura de filete, o en forma general calculando el área transversal (A) en [cm^2] de la sección de la soldadura multiplicado por un factor de conversión aproximado de 0,786 en kg/mL (3,4 en lb/pie) para soldaduras en acero, determinando así el peso del metal de soldadura depositado. Entonces el peso del electrodo consumido (WE) es determinado por la ecuación:

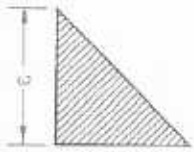
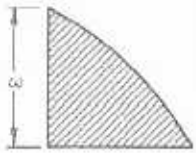
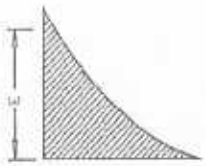
$$WE = \frac{WW}{DE} \qquad (6.1)$$

Donde (DE) es la eficiencia de deposición, un factor que compensa la pérdida del material del electrodo como vapor de protección (gas), escoria y salpicaduras. Los valores típicos de este factor para los Procesos con Soldadura Manual (SMAW) y con Arco Sumergido (SAW) se muestran en la siguiente tabla:

Procesos de Soldadura	DE
Soldadura con Arco Manual Protegido	0.65
Soldadura de Arco Sumergido	1.00

Tabla 6.1- Eficiencia de Deposición DE

La soldadura por Arco Sumergido tiene una eficiencia de deposición de 1.00, debido a que el fundente es aplicado separadamente y la salpicadura esencialmente no existe.

Tamaño de la Pierna del Filete (ω) (pulg.)	 Plano	 Convexo	 Cóncavo
	Peso del Metal (WW) (lb/pie)		
3/16	0,072	0,087	0,083
1/4	0,129	0,155	0,147
5/16	0,201	0,242	0,230
3/8	0,289	0,349	0,331
7/16	0,394	0,475	0,451
1/2	0,514	0,620	0,589

Los valores son para un tamaño de pierna del filete (ω) del 10% de sobredimensión, consistentes con las prácticas normales de taller

Tabla 6.2 – Peso del metal depositado (WW) en juntas con soldadura de filete.

La ecuación definitiva de costo de material consumido por metro lineal de soldadura quedaría representada por:

$$CM = WE*CE + WF*CF \qquad (6.2)$$ [4]

Donde:

WE = peso del electrodo consumido en kg/mL
CE = costo del electrodo en Bs/kg
WF = peso del fundente requerido en kg/mL
CF = costo del fundente en Bs/kg

6.2. Costo Personal y de Labor

Los porcentajes de labor directa más todos los factores personales, como lo establecido por la compañía individual, puede ser representado por costos personales y de labor por hora. Los costos personales y de labor por pie lineal de soldadura estarán dados por:

$$CL = \frac{T * CR}{OF} \qquad (6.3)$$

Donde:

T = tiempo requerido para 1 mL de soldadura, h/mL
CR = Costo de mano de obra por hora, Bs/h
OF = Factor de Operación

6.2.1. Estimando el Tiempo (T) de soldadura o Tiempo de Arco

La estimación puede realizarse de una medida directa, como por ejemplo del tiempo que se tarda en depositar en un ensayo 1 metro lineal de soldadura, o si el tipo de electrodo y corriente es conocido, el tiempo (T) puede ser calculado por la rata de deposición (D) dadas en la tabla E.3 para Soldadura con Arco Sumergido (SAW) ó en la tabla E.5 para Soldadura con Arco Metálico Protegido (SMAW) de los Anexos (Parte II de esta investigación). Una vez conocido el valor de WW, el tiempo en horas por metro lineal requerido para completar la soldadura está expresado por la ecuación:

[4] La ecuación (6.2) se cumple únicamente en el proceso con máquina (SAW), para procesos manuales (SMAW) las variables WF y CF no existen.

$$T = \frac{WW}{D} \qquad (6.4)$$

6.2.2. Estimando el Factor de Operación

Como las horas totales que el soldador trabaja son siempre mayores que las horas que suelda, la relación de las horas gastadas en soldadura y horas totales trabajadas es conocido como el Factor de Operación el cual puede se definido por la relación:

$$\text{OF} = \frac{\text{Tiempo de Arco}}{\text{Tiempo Total}} \qquad (6.5)$$

El Tiempo del Arco es considerado solamente durante el tiempo en el cual el soldador está aplicando el metal de soldadura productivo, mientras el Tiempo Total es el Tiempo del Arco más el tiempo que el soldador gasta en las operaciones diferentes a soldar, incluyendo para propósitos personales.

El Factor de Operación (OF) puede ser expresado en forma porcentual o decimal con valores menores que 1.0 y usualmente en un rango entre 0.2 y 0.6 (20 % – 60 %), pero pueden ser más altos para soldadura con máquina o más bajo para soldadura en construcciones en campo. Sin embargo el Factor de Operación deberá ser cuidadosamente determinado ya que este tiene un considerable soporte en el costo estimado final de la soldadura. Los rangos porcentuales del Factor de Operación están dados en la tabla 6.3 de acuerdo a los Métodos de Soldadura aplicado y la tabla 6.4 muestra los porcentajes de OF por el tipo de Proceso de Soldadura empleado; ambas tablas fueron extraídas del Manual de "Soldadura, Ciencia y Tecnología" de la AWS.

Métodos de Soldadura	% de Rango del OF
Manual	5 a 30
Mecanizado	40 a 90
Semiautomático	10 a 60
Automático	50 a 100

Tabla 6.3 – Factor de Operación (OF) para diferentes Métodos de Soldadura

Proceso de Soldadura	Factor de Operación (OF) Promedio
Arco Metálico Protegido (SMAW)	25 %
Arco Sumergido (SAW)	50 %

Tabla 6.4 – Factor de Operación (OF) de acuerdo al tipo Proceso de Soldadura

Sumando los valores calculados para CM y CL, determinamos el costo de soldadura por metro lineal y si lo multiplicamos por el número de metros soldados (L) nos da el costo calculado de la soldadura.

$$\text{Costo de la Soldadura} = (CM + CL)*L \qquad (6.6)$$

Algunos cálculos pueden ser más convenientes si la velocidad de soldadura (S) es usada en reemplazo de (T). Las ecuaciones quedarían expresadas en la siguiente forma:

$$T = \frac{1}{S} \qquad WW = \frac{D}{S} \qquad CL = \frac{CR}{S * OF}$$

7. Conclusiones y Recomendaciones

Con los resultados obtenidos en los reportes de los Ensayos No Destructivos (END), de las siete probetas soldadas a las cuales se les elaboró una Especificación del Procedimiento de Soldadura – EPS (Anexo B), se observa que la Inspección Visual a alcanza a tener un índice de rechazo mayor que otros Ensayos No Destructivos, llegando a 0,57 es decir 4 de 7 probetas no deberían ser aceptadas por presentar falta de material de aporte y perfiles de soldadura inaceptables tales como:

- *Convexidades Excesivas:* debido a bajas velocidades, sobre todo en juntas de filete con procesos de Arco Metálico Protegido (SMAW) y al diseño de juntas a tope sin bisel, en procesos de Arco sumergido (SAW), los cuales además presentan una alta rata de deposición del material de soldadura
- *Socavaciones:* debido a velocidades moderadamente altas que son difíciles de controlar, por parte del soldador, en el proceso SMAW

El grado de rechazo dependerá de los casos exigidos por el Código; si son Cargados Cíclicamente la tolerancia es menor y la tendencia de rechazo será mayor que los Cargados Estáticamente, como es el caso de las socavaciones en la Inspección Visual

La correcta preparación de los EPS (Especificaciones del Procedimiento de Soldadura), RCP (Registro de Calificación del Procedimiento) y la calificación de los soldadores y operadores de máquina de soldar, dan una mayor garantía de una adecuada aplicación de los Procesos de Soldadura con Arco Metálico Protegido (SMAW) y Arco Sumergido (SAW) minimizando en gran medida la formación de discontinuidades y controlando una serie de variables algunas de las cuales son:

- Diámetro y tipo de electrodo o alambre
- Tipo de fundente (solo en proceso SAW)
- Características eléctricas tales como: el amperaje, voltaje y tipo de polaridad
- Separación de la boquilla de la máquina y el material soldado (Stickout - solo en

proceso SAW)

- Variación de la velocidad de viaje
- Separación entre juntas y ángulo del bisel

Los Costos en los Procesos de soldadura tanto de Arco Sumergido (SAW) como Arco Metálico Protegido (SMAW) varían inversamente con el diámetro del electrodo o alambre, es decir al aumentar el diámetro también lo hace su capacidad de corriente, lo que trae como consecuencia un aumento de la rata de deposición y de la velocidad, disminuyendo el tiempo del Arco y por lo tanto los costo laborables. Sin embargo esto es válido en pequeñas variaciones de diámetro del electrodo o alambre, ya que existen parámetros y condiciones en cada caso particular de juntas soldadas que inciden de una u otra forma en los costos de soldadura como lo son:

- La separación entre juntas a tope (máximo 1/8"); limitando el diámetro del electrodo en proceso SMAW
- La posición de las juntas: puede incidir en el Factor de Operación OF, disminuyendo el rendimiento del soldador, cuando se suelda con proceso SMAW en posición vertical (3F ó 3G)
- La aparición de defectos por un procedimiento inapropiado y su posterior reparación en la soldadura y el material base. Defectos tales como: falta de material de aporte, convexidades excesivas o insuficientes, socavaciones, distorsiones angulares y longitudinales en los perfiles soldados, entre otros.

Algunas recomendaciones relacionadas con la experiencia de esta investigación son:

1. Es preferible y en cierta medida obligatorio, realizar la inspección visual antes que cualquier otro ensayo no destructivo, no solo por ser el más económico, sino porque de acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo del Código AWS D.1.1-2000 se considerará o no hacer los correctivos correspondientes antes de continuar con el proceso de soldadura. Además el ensayo visual nos dará un indicio de la necesidad o no de aplicar otros ensayos y la cantidad de los mismos, disminuyendo de esta forma los costos

por inspección.

2. La inspección con Partículas Magnéticas Secas en posición vertical presenta limitaciones, ya que las mismas por efecto de la gravedad tienden a caer fuera de la soldadura o se desvían a los pies del yugo. De igual forma al inspeccionar el pase de raíz en las juntas a tope, independientemente del método de partículas magnéticas utilizadas, el campo magnético se debilita debido a la ranura hecha por el esmerilado o "backgouge". Es preferible usar Líquidos Penetrantes cuando se presentan estos casos, además de no necesitar corriente eléctrica, puede inspeccionarse casi cualquier área con relativa comodidad.

3. Se puede y en cierta forma debe de hacerse ensayo por ultrasonido en Juntas T con soldadura de filete, cuando una serie de condiciones pongan en duda el correcto desempeño del proceso; como por ejemplo: conexiones soldadas en campo que se sometan a grandes esfuerzos por carga de servicio y ameriten filetes de gran tamaño (con dos o más pases de soldadura), y con posiciones del soldador 3F y 4F (sobrecabeza). De esta forma, mediante la inspección, hay mayor garantía de evitar defectos por falta de fusión entre el metal de aporte y el metal base, y entre pases de soldadura.

4. Eliminar el exceso de refuerzo que se presentan en juntas con ranura recta y Proceso de Soldadura de Arco Sumergido (SAW), ya que el mismo podría dificultar la inspección con radiografía, ocultando algunas discontinuidades internas.

5. La elaboración de reportes, correspondientes a cada uno de los Ensayos No Destructivos, deben ser lo más completo posible; conteniendo las variables necesarias, tales como: tipo, ubicación, tamaño y cantidad de las discontinuidades, instrumentos o equipos utilizados para detectarlas, así como el método empleado, entre otros, para determinar índices de rechazo aplicables a los soldadores involucrados en un proyecto metalmecánico. Este seguimiento representa la trazabilidad de cada soldador y según su índice de rechazo, permite alertar al Ingeniero de la real calidad de las soldaduras del Proyecto.

8. Referencias Bibliográficas

1. **"Welding Handbook - Welding, Science & Technology"**, Volumen 1, 9na edición. Publicado por la AWS, American Welding Society. Miami, Florida, USA 2001.

2. Conam Inspection, Inc. **"Welding Inspection Handbook"**. Publicado por GAF Corporation. USA 1972.

3. **"Structural Welding Code – Steel ANSI/AWS D.1.1-2000"**

4. Darrel McGuire. **"WELDPERFECT"**. 1ª edición. Publicado por la AWS, American Welding Society. Miami, Florida, USA 1996.

5. **"The Procedure Handbook of Arc Welding"** 12va edición. Publicado por The Lincoln Electric Company. Cleveland, Ohio, USA 1973.

6. **"Submerged Arc Welding Products"**. The Lincoln Electric Company. Cleveland, Ohio, USA.

7. Héctor García G. **"Inspección de Soldadura"**. 1ª edición. Ediciones Técnicas México, D. F. 2001.

8. Alfonso R. García C. **"Ensayos No Destructivos por la Técnica de Líquidos Penetrantes"**. 1ª edición. Publicado por el ICAEND, S. C. México, D. F.1993

9. **"Manual de Entrenamiento para el Curso de Partículas Magnéticas Nivel I y II"**. Asociación Canadiense para los Ensayos No Destructivos. Publicado por el ICAEND, S. C. México, D. F. 1994.

10. F. B. Doane y C. E. Betz. **"Principios de Magnaflux"**. 1ª edición española. Industrias Gráficas España, S. L. España 1952.

11. Alfonso R. García C. **"Ensayos No Destructivos por la Técnica de Ultrasonido Industrial"**. Publicado por el ICAEND, S. C. México, D. F.1989.

12. Krautkrämer GmbH **"Manual de la Krautkrämer"**. Gráficas Lucentum, S. A. España.

13. Alfonso R. García C. **"Ensayos No Destructivos por la Técnica de Radiografía Industrial"**. Publicado por el ICAEND, S. C. México, D. F.1990.

14. **"Nondestructive Testing Hanbook"**, 2da edición. **"Radiography ξ Radiation"**. Volumen 3. Publicado por la ASNT, American Society for Nondestructive Testing. USA 1985.

15. Francisco Ramírez Gómez **"Métodos de Ensayos No Destructivos"**. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Madrid, España 1986.