

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CONTROL DE DEFECTOS EN SOLDADURA LONGITUDINAL POR ARCO  
SUMERGIDO (SAW) EN ACEROS AL CARBONO API X70.**

**POR**

**SERGIO JAVIER HERRERA HERNÁNDEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA**

**11 DE SEPTIEMBRE DE 2013**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CONTROL DE DEFECTOS EN SOLDADURA LONGITUDINAL POR ARCO  
SUMERGIDO (SAW) EN ACEROS AL CARBONO API X70.**

**POR**

**SERGIO JAVIER HERRERA HERNÁNDEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA**

**11 DE SEPTIEMBRE DE 2013**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **CONTROL DE DEFECTOS EN SOLDADURA LONGITUDINAL POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN ACEROS AL CARBONO API X70**, realizada por el alumno (a) **SERGIO JAVIER HERRERA HERNÁNDEZ**, con número de matrícula **12ES-139** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

**El Comité Tutorial**

---

**M.C. Víctor Hugo López Cortez**

Tutor Académico

---

**M.C. Gabriel García Cerecero**

Tutor en Planta

---

**M.C. Fernando Macías López**

Asesor

---

Vo.Bo.

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**

Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **SERGIO JAVIER HERRERA HERNÁNDEZ**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **CONTROL DE DEFECTOS EN SOLDADURA LONGITUDINAL POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN ACEROS AL CARBONO API X70**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 11 del mes de septiembre del 2013.

---

**Dr. Fernando Martínez Díez**

Presidente

---

**Dra. Gladys Yerania Pérez Medina**

Secretario

---

**MT. Víctor Hugo López Cortez**

Vocal

# Agradecimientos

En el recorrido de la vida siempre he tenido personas, amigos, compañeros, docentes que me han enseñado y guiado durante mi existencia. Por esto, en la realización de este trabajo le extiendo mi más sincero agradecimiento a:

**Dios Todopoderoso.** Por iluminar mi camino y no apartarme de su diestra aún en los momentos difíciles.

**A mis Padres.** Por demostrarme día con día cariño y apoyo incondicional durante mi vida.

**A mis Hermanas.** Por alegrar mis días aún cuando las cosas vislumbraban mal.

**A mis familiares.** Por el apoyo desinteresado que siempre me han prestado.

**Al M.C. Víctor López.** Por sus valiosos consejos para la realización de este documento.

**Al M.C. Fernando Macías.** Por su asesoramiento y apoyo para la realización de esta monografía.

**A la empresa Tubacero S.A. de C.V.** Por el apoyo a un servidor y brindar la posibilidad de realizar el estudio en sus instalaciones, en especial al M.C. Gabriel García Cerecero y al Ing. Samuel Vicente Montoya Laguna.

**A COMIMSA.** Por las facilidades otorgadas tanto en instalaciones, como en el sentido de servicio de su personal para la realización de este documento.

**Al Dr. Fernando Martínez Diez y la Dra. Gladis Y. Pérez Medina,** por su oportuna intervención para el mejoramiento de este documento.

## Agradecimiento especial a CONACyT

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por permitirme colaborar como estudiante incorporado dentro del padrón de becarios nacionales.



Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor Del. Benito Juárez C.P.: 03940, México, D.F.  
Tel: (55) 5322-7700. - Comentarios sobre este Sitio de Internet

CONACYT - DERECHOS RESERVADOS © 2013 - POLÍTICAS DE PRIVACIDAD

# CONTENIDO

Agradecimientos.....	III
Agradecimiento especial a CONACyT .....	IV
CONTENIDO .....	V
SÍNTESIS .....	1
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo general .....	4
1.2.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	5
1.5 Aportación industrial.....	6
1.6 Alcance.....	6
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Aceros .....	7
2.2 Propiedades de los aceros .....	7
2.2.1 Dureza .....	8
2.2.2 Ductilidad.....	8
2.2.3 Fragilidad .....	8
2.2.4 Plasticidad .....	8
2.2.5 Elasticidad .....	8
2.2.6 Maleabilidad.....	9
2.2.7 Tenacidad .....	9

<b>2.3 Clasificación de los aceros.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.1 Aceros al carbono .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.2 Aceros aleados.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.3 Especificación API 5L para tuberías en línea .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 La soldadura .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5 Proceso de soldadura por Arco Metálico Sumergido (SAW).....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.1 Variantes del proceso .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.1.1 Soldadura semiautomática .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.1.2 Soldadura automática .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.1.3 Soldadura mecanizada .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.2 Equipo .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5.2.1 Fuentes de poder .....</b>	<b>19</b>
<b>2.5.2.2 Alimentador de alambre .....</b>	<b>19</b>
<b>2.5.2.3 Equipo para desplazamiento .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5.2.4 Unidades de recuperación de fundente.....</b>	<b>20</b>
<b>2.6 Fundentes para arco sumergido .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6.1 Tipos de fundentes o fluxes .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6.1.1 Fundentes fundidos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6.1.2 Fundentes aglomerados .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6.1.3 Fundentes mezclados mecánicamente .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6.2 Clasificación de los fundentes.....</b>	<b>23</b>
<b>2.6.2.1 Fundentes activos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.2.2 Fundentes neutros .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.2.3 Fundentes aleados .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6.3 Reacciones metal-fundente.....</b>	<b>25</b>
<b>2.6.3.1 Transferencia de manganeso .....</b>	<b>26</b>



<b>2.7 Electrodo para proceso SAW .....</b>	<b>27</b>
<b>2.7.1 Electrodo de acero al carbono y fluxes.....</b>	<b>28</b>
<b>2.7.2 Electrodo de aceros de baja aleación y fluxes .....</b>	<b>28</b>
<b>2.8 Parámetros del proceso SAW.....</b>	<b>28</b>
<b>2.8.1 Corriente de soldadura .....</b>	<b>28</b>
<b>2.8.2 Voltaje de soldadura .....</b>	<b>30</b>
<b>2.8.3 Polaridad.....</b>	<b>31</b>
<b>2.8.4 Velocidad de avance .....</b>	<b>32</b>
<b>2.8.5 Tamaño del electrodo .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.6 Stick-out.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.7 Distancia a la tierra física .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.8 Efecto de los parámetros de soldadura en la estructura del grano .....</b>	<b>34</b>
<b>2.9 Efecto del nitrógeno, oxígeno e hidrógeno.....</b>	<b>36</b>
<b>2.9.1 Técnicas para la protección del aire.....</b>	<b>36</b>
<b>2.9.2 Reacciones de gas-metal .....</b>	<b>37</b>
<b>2.9.2.1 Nitrógeno.....</b>	<b>37</b>
<b>2.9.2.2 Oxígeno .....</b>	<b>38</b>
<b>2.9.2.3 Hidrógeno.....</b>	<b>38</b>
<b>2.10 Defectos en la soldadura .....</b>	<b>39</b>
<b>2.10.1 Discontinuidades .....</b>	<b>39</b>
<b>2.10.1.1 Grietas .....</b>	<b>40</b>
<b>2.10.1.2 Grietas de cráter .....</b>	<b>40</b>
<b>2.10.1.3 Porosidades.....</b>	<b>40</b>
<b>2.10.1.3.1 Porosidad distribuida uniformemente .....</b>	<b>41</b>
<b>2.10.1.3.2 Porosidad agrupada .....</b>	<b>42</b>

2.10.1.3.3 Porosidad alineada .....	42
2.10.1.4 Cavidades de contracción .....	43
2.10.1.5 Inclusiones de escoria .....	44
2.10.1.6 Deformaciones del cordón .....	44
2.10.1.7 Socavado .....	45
2.10.1.8 Fusión incompleta.....	45
2.10.1.9 Desgarre laminar .....	46
2.10.2 Discontinuidades relacionadas con requisitos dimensionales....	47
2.10.2.1 Distorsión .....	47
2.10.2.2 Preparación incorrecta de la junta.....	48
2.10.2.3 Tamaño incorrecto de la soldadura.....	48
2.10.2.4 Perfil incorrecto de la soldadura.....	48
2.11 Zona afectada por el calor (ZAC) .....	49
2.12 Ensayos no destructivos (END) .....	53
2.12.1 Técnicas de inspección superficial. ....	55
2.12.1.1 Inspección visual.....	55
2.12.1.2 Líquidos penetrantes .....	56
2.12.1.3 Partículas magnéticas .....	58
2.12.2 Técnicas de inspección volumétrica .....	60
2.12.2.1 Radiografía .....	60
2.12.2.2 Ultrasonido.....	63
 <b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA</b>	
3.1 Efecto de los parámetros de soldadura.....	68
3.1.1 Efectos de los parámetros de soldadura en las características de la unión .....	68

3.1.2 Efecto de los parámetros de soldadura en la aparición de defectos .....	69
<b>CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO</b>	
4.1 Materiales .....	72
4.1.1 Material base. ....	72
4.1.2 Material de aporte.....	73
4.2 Metodología .....	73
4.3 Resultados .....	75
4.3.1 Discontinuidades .....	75
4.3.2 Microestructura .....	76
4.3.3 Microdureza. ....	79
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>

# SÍNTESIS

Es bien sabido que el petróleo es el energético y combustible más utilizado durante las últimas décadas, debido a la versatilidad de su composición, lo cual permite sea utilizado en diversas aplicaciones. Debido a esto, la importancia de este recurso, su extracción, procesamiento y transporte son temas que han ido de la mano con el desarrollo tecnológico e industrial. En el caso del transporte, la necesidad que existe radica en la eficiencia y seguridad que pueda proveerse al efectuar dicha actividad, satisfaciendo la demanda y evitando riesgos inminentes que puedan surgir.

Actualmente, la manera más eficaz y económica de transporte del petróleo y sus derivados es a través de complejas redes de tuberías ubicadas estratégicamente; la fabricación de estas tuberías son reguladas por entidades reconocidas como el Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés), que brindan normas para la fabricación y los márgenes de aceptabilidad en dichas tuberías. Tradicionalmente se ha utilizado el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) debido a que proporciona cordones de soldadura de buenas propiedades mecánicas, además de altas tasas de deposición y penetración comparadas con otros procesos de arco; sin embargo, el uso de este proceso indica cuidados especiales hacia los consumibles utilizados, la contaminación que pudiera existir en el metal que será soldado y los parámetros principales del proceso, factores que si no son controlados pueden derivar a la aparición de discontinuidades las cuales puedan causar el rechazo del componente.

En este trabajo se evaluaron los parámetros que pueden influir directamente en la aparición de tales discontinuidades y se realizó un caso de estudio en el cual se efectuaron pruebas con variaciones de estos parámetros, evaluando la aparición de defectos y propiedades físicas y mecánicas como lo son la microestructura y microdureza.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

México es un país rico en petróleo; debido a esto, un tema importante del cual se debe tener un amplio conocimiento es la red de ductos para transporte de hidrocarburos. Éstos son de importancia estratégica nacional y, como consecuencia de ello, los fenómenos asociados a esta infraestructura tienen un significado muy especial, tal es el caso de los costos alternativos de transporte, oportunidad en el arribo de productos, riesgos en cuanto a pérdida de los mismos y, sobre todo, daños a la población en la zona de influencia de los ductos e instalaciones complementarias, y al personal operador de los mismos.

Esta red debe transportar de manera segura materia prima para refinerías, así como productos obtenidos de estas para los mercados de consumo. Por esto, es necesario el empleo de aceros capaces de resistir las condiciones de operación a la que los ductos están sometidos.

Para esto, el Instituto Americano del Petróleo desarrolló una norma para aceros con la resistencia mecánica, resistencia a la corrosión por gases

amargos y soldabilidad apropiada para la conducción de hidrocarburos. Estos son conocidos como aceros al carbono API 5L, los cuales deben ser fabricados acorde con los requerimientos de la especificación API-5L 2007, bajo el proceso de soldadura por arco sumergido (en la actualidad todas las soldaduras de tuberías por arco sumergido incluyen pases tanto por el interior como por el exterior) o SAW, lo cual garantiza la penetración de la soldadura al 100%. [1] En México, una de las empresas líderes en la fabricación de tuberías de acuerdo a la norma API 5L es Tubacero S.A. de C.V.

En esta empresa se fabrican tuberías a partir de placas o rollos de acero al carbono grado API 5L-X70; el proceso inicia colocando dichos componentes en roladoras verticales, en las cuales, por medio de deformación en frío, se le da una preforma. Inmediatamente después se realiza una unión de soldadura de resistencia eléctrica (ERW, por sus siglas en inglés), que mantiene unidas las placas. Esto garantiza una fuerte unión provisional, que permite realizar las preparaciones necesarias para la aplicación de la soldadura por arco sumergido.

Ya formado y soldado, el tubo es luego conformado para proporcionarle forma circular, indispensable para la alineación y preparación de futuras uniones soldadas en campo. Por último, se realiza la inspección final, de acuerdo a los parámetros de calidad de la norma API, para garantizar un ensamble soldado totalmente libre de imperfecciones y defectos.

Para este efecto, se hace necesario el estudio de las variables que puedan surgir en la fabricación de uniones soldadas en tuberías de conducción a través del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés) hechas de acero API 5L-X70, para así aumentar la eficiencia el proceso de producción y generar ahorros en tiempo, materiales y mano de obra.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Reunir y analizar la información bibliográfica sobre el control de defectos en soldadura longitudinal para la fabricación de tubería de acero al carbono grado API 5L-X70, en diámetros de 30" y 36" en espesores de pared de 0.500" y 0.750" a través del proceso SAW.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- 1.- Estudiar los parámetros que influyen en la calidad de uniones de soldadura longitudinal por el proceso SAW.
- 2.- Investigar la relación entre el fundente y el electrodo (material de aporte).
- 3.- Analizar bibliografía referente al tratamiento, acondicionamiento y mezclado del fundente granular.
- 4.- Estudiar los efectos de los cambios de voltaje, amperaje y velocidad de avance sobre el calor de entrada y calidad de la soldadura.

## **1.3 Justificación**

Sin duda en México, una de las actividades económicas más importantes, posiblemente la que genera la mayor parte del producto interno bruto (PIB), es la exploración y explotación de los combustibles fósiles en sus diferentes variedades, desde el petróleo hasta el gas natural, y el procesamiento de estos en una amplia gama de derivados, lo que promueve constantemente el desarrollo económico del país.

En consecuencia, resulta crucial tener una red estructurada de tuberías de conducción y transporte de estos recursos de manera segura, rápida y económica.

Es por esto, que el presente documento pretende realizar una recopilación de datos que ayuden a evitar y corregir, en mayor instancia, defectos en las juntas soldadas, tales como porosidades, socavaciones, desalineamiento del cordón, entre otras, en las tuberías de acero al carbono grado API 5L-X70 soldadas por el proceso SAW. Dichas tuberías fabricadas en la planta 1 de la empresa mexicana Tubacero S.A. de C.V.

El control de estos defectos tendría repercusión directa en la productividad, lo que disminuiría costos de materiales y mano de obra.

## **1.4 Planteamiento del problema**

El presente documento surge debido a la existencia de defectos causados durante el proceso de soldadura por el proceso SAW en tuberías fabricadas de acero grado API 5L-X70, principalmente porosidades e inclusiones de escoria. Dichas imperfecciones contribuyen a uniones soldadas con bajas propiedades mecánicas y físicas, lo que resulta perjudicial en la utilización para las cuales fueron diseñadas.

Estos defectos conllevan, cuando se presentan, al desperdicio de material, tanto base como de aporte (electrodos), insumos (fundentes granulados, electricidad), mano de obra y tiempo.

Estos factores derivan pérdidas económicas importantes para la compañía antes mencionada. Por lo tanto, se requiere de un estudio que recopile información destinada a la disminución o erradicación de estos u otros defectos que se puedan presentar en estos tipos de soldaduras realizadas en fábrica.



## **1.5 Aportación industrial**

La presente monografía pretende recopilar información concreta acerca de los parámetros involucrados en el proceso de fabricación de tuberías soldadas a través del proceso SAW, elaborada a partir de acero grado API 5L-X70, además de las imperfecciones que pudieran ser creadas por dicho proceso, lo cual prevendría desperdicios de materiales, tiempo y mano de obra, influyendo directamente en la optimización de la producción y pérdidas económicas importantes.

## **1.6 Alcance**

En este trabajo se realiza una descripción del estado del arte de la fabricación de tuberías para la conducción de hidrocarburos construidas con acero grado API 5L-X70, soldadas por el proceso de arco sumergido (SAW) y los posibles defectos que podrían surgir en estas.

# **CAPÍTULO 2**

## **MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Aceros**

El acero es una aleación de hierro y carbono (máximo 2.11% de carbono), al cual se le adicionan variados elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para su diferente utilización en la industria. Los principales elementos de aleación son: cromo, tungsteno, manganeso, níquel, vanadio, cobalto, molibdeno, cobre, azufre y fósforo. Los productos ferrosos con más de 2.11% de carbono denominan fundiciones de hierro. [2]

### **2.2 Propiedades de los aceros**

Las propiedades mecánicas son las características inherentes que permiten diferencias de un material a otro, desde el punto de vista del comportamiento. Debido a que cada material se comporta diferente, es necesario analizar su comportamiento mediante pruebas experimentales.

Estas propiedades se deben de tomar en cuenta para establecer técnicas, procesos, material de aporte, entre otras variables, al momento de efectuar una soldadura. [3]

### **2.2.1 Dureza**

La dureza es la capacidad que tienen los materiales para resistir a la indentación o penetración. Un material es tanto más duro cuanto mayor tenga que ser la fuerza que lo penetre. [3]

### **2.2.2 Ductilidad**

Es la propiedad que tienen los metales de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión. Un material que no tenga esta propiedad probablemente será duro y frágil, y se romperá al someterlo a un golpe repentino. [4]

### **2.2.3 Fragilidad**

Es la facilidad por la que un cuerpo se rompe por un choque. Es la propiedad opuesta de la tenacidad, los materiales frágiles son los que fallan sin deformación permanente apreciable. Una sustancia tiene baja resistencia al impacto, es decir, a la aplicación rápida de fuerzas. [3]

### **2.2.4 Plasticidad**

Es la propiedad en la cual la deformación se hace permanente. Si sobre un cuerpo plástico se ejerce una fuerza, este sufre deformación, y dicha deformación permanece. [3]

### **2.2.5 Elasticidad**

Es la propiedad de los cuerpos de volver a su forma original al cesar una fuerza deformante. Se consideran perfectamente elásticos si no han rebasado su límite de elasticidad. [4]

### **2.2.6 Maleabilidad**

Es la propiedad de la materia que, junto con la ductilidad, permite que los cuerpos puedan ser trabajados por deformación. Esta permite la obtención de delgadas láminas de material sin que se rompa. [3]

### **2.2.7 Tenacidad**

Los aceros poseen resistencia y ductilidad. Al conjunto de estas acciones se le denomina como tenacidad. También se conoce a la tenacidad como la capacidad de un material para absorber energía en grandes cantidades. [4]

## **2.3 Clasificación de los aceros**

De manera genérica y debido a la abundancia del hierro en la naturaleza, y que a las aleaciones de hierro son más usadas en la industria, los metales y sus aleaciones se clasifican en ferrosos y no ferrosos. [5]

Usualmente, pueden clasificarse como:

- Aceros al carbono.
- Aceros aleados.

### **2.3.1 Aceros al carbono**

Acero al carbono es un nombre incorrecto aplicado a los aceros cuyo principal elemento de aleación es el carbono. Este nombre sobrevive debido al uso popular; el nombre adecuado es acero simple, ya que por definición, acero es una aleación de hierro y carbono. [6]

Los aceros simples, en base a su contenido de carbono pueden clasificarse de la siguiente forma:

- a) Aceros de bajo carbono.- son todos los tipos de acero que contienen entre un 0.05 y 0.30 % de carbono; son conocidos como acero dulce o simplemente hierro dulce.
- b) Aceros de mediano carbono.- son aceros que contiene entre un 0.30 a un 0.45 % de carbono.
- c) Aceros de alto carbono.- son aceros que poseen de un 0.45 a un 0.90 % de carbono.
- d) Aceros grado herramienta.- contienen entre un 0.90 hasta un 1.50 % de carbono; generalmente ya contienen otros elementos de aleación que le proporcionan o mejoran sus propiedades. [7]

**Tabla 2.1. Clasificación de aceros simples al carbono. [5]**

Nombre común	% C	Usos típicos
Hierro descarburizado en rollo	0.005 máx.	Lámina esmaltada y lámina no envejecida para embutido
Lingote de hierro Armco	0.03 máx.	Lámina galvanizada, esmaltada y para embutido profundo
Acero de bajo carbono	0.15 máx.	Chasises y rines de automóviles, electrodos para soldadura
Acero suave o dulce	0.15 – 0.35	Barras y perfiles estructurales
Acero de medio carbono	0.35 – 0.55	Herramientas y partes para máquinas
Acero de alto carbono	0.55 – 1.0	Rieles de ferrocarril, dados y resortes

### 2.3.2 Aceros aleados

Son aquellos en los que el límite especificado de elementos de aleación excede de 1.65% Mn, 0.60% Si o 0.60% Cu, o bien, tienen un intervalo o una cantidad mínima definida de los siguientes elementos: aluminio, columbio, niobio, cromo, níquel, molibdeno, titanio, tungsteno, vanadio o Zirconio. Puede considerarse de manera más o menos arbitraria, que los aceros de baja aleación son aquellos que tienen hasta un contenido total de aleantes de 5% a 10% y los de alta aleación de más de 10% y menos de 50%. [5]

Estos se clasifican como:

- Aceros de baja aleación: contienen menos del 2 % de aleantes.
- Aceros de media aleación: contienen hasta un 5 % de elementos aleantes y no menos de 2 %; son utilizados para tratamiento térmico.
- Aceros de alta aleación: contienen elementos de aleación en una proporción mayor al 5%.
- Aceros microaleados (HSLA): contienen menos de 0.25 % C, elementos aleantes en proporción al 2 % y pequeñas aleaciones de V, Nb, Ti. [8]

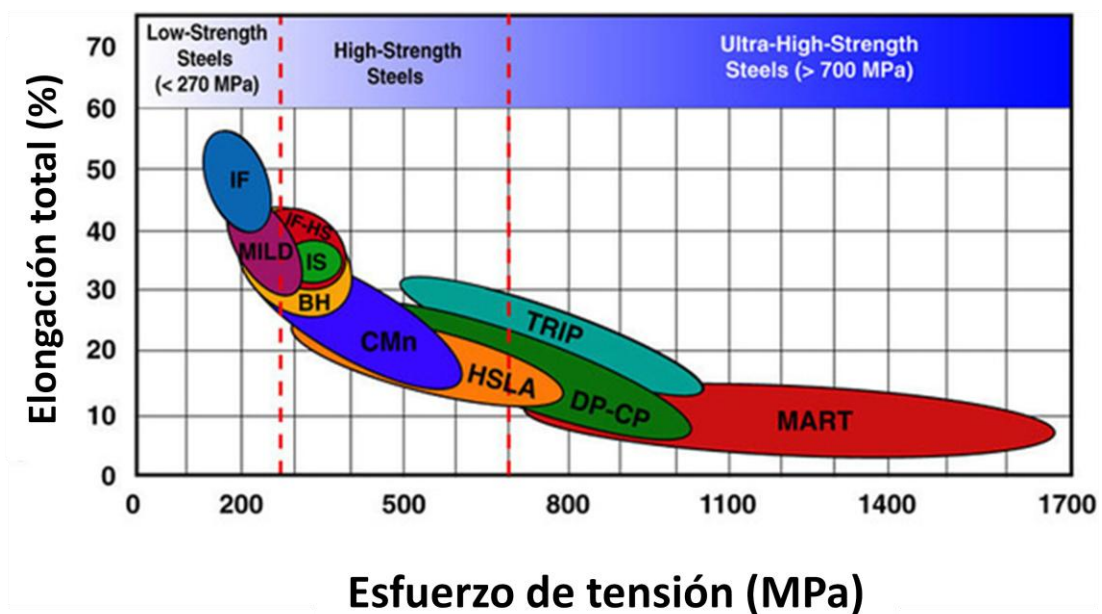


Figura 2.1. Clasificación de aceros aleados en base a su resistencia y % de elongación. [9]

### 2.3.3 Especificación API 5L para tuberías en línea

El propósito de esta especificación es proporcionar estándares para tubos adecuados para uso en conducción de gas, agua o petróleo, en las industrias petroleras y de gas natural. Es aplicable a tubos para líneas, soldados y sin costura. Incluye tubos de línea roscados de peso estándar y de pared extra gruesa y doble, de los extremos planos especiales y también tubos con extremo en campana y tubos de línea de flujo directo (through the flow line – TFL). [5]

**Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de aceros grado API 5L. [10]**

Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia		Esfuerzo mínimo a tracción	
	PSI	MPa	PSI	MPa
A25	25,000	172	45,000	310
A	30,000	207	48,000	331
B	35,000	241	60,000	414
X42	42,000	290	60,000	414
X46	46,000	317	63,000	434
X52	52,000	359	66,000	455
X56	56,000	386	71,000	490
X60	60,000	414	75,000	517
X65	65,000	448	77,000	531
X70	70,000	483	82,000	565

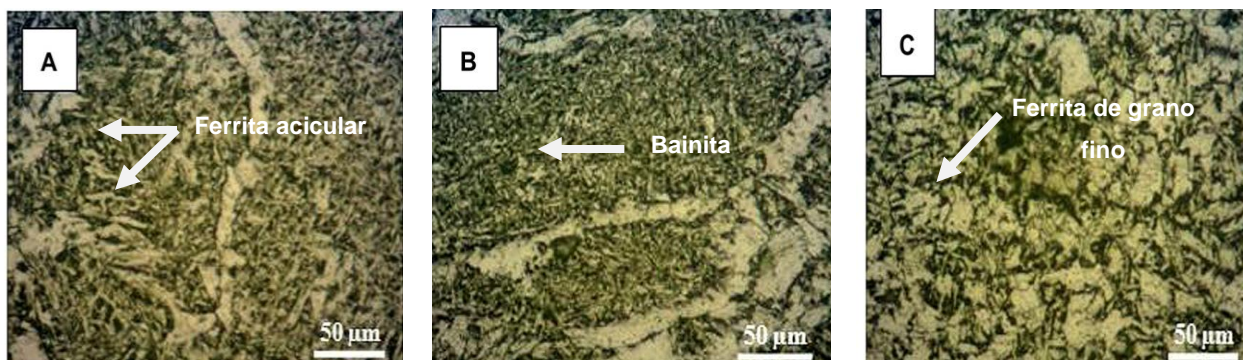
**Tabla 2.3. Composición química (% e.p.) de tuberías para PSL 1 de 25 mm (0,984 in). [10]**

Grado	Porcentaje en peso de análisis químico del producto y de colada							
	C	Mn	P		S	V	Nb	Ti
	Max.	Max.	Min.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
<b>Tubería soldada</b>								
A25	0.21	0.60	-	0.03	0.03	-	-	-
A25R	0.21	0.60	0.045	0.08	0.03	-	-	-
A	0.22	0.90	-	0.03	0.03	-	-	-
B	0.26	1.20	-	0.03	0.03	c, d	c, d	d
X42	0.26	1.30	-	0.03	0.03	d	d	d
X46	0.26	1.40	-	0.03	0.03	d	d	d
X52	0.26	1.40	-	0.03	0.03	d	d	d
X56	0.26	1.40	-	0.03	0.03	d	d	d
X60	0.26	1.40	-	0.03	0.03	f	f	f
X65	0.26	1.45	-	0.03	0.03	f	f	f
X70	0.26	1.65	-	0.03	0.03	f	f	f
c - Salvo otro requerimiento, la suma de los contenidos de niobio y vanadio deberán ser 0,06%.								
d - La suma de las concentraciones de niobio, vanadio y titanio será del 0,15%.								
f - Salvo otro requerimiento, la suma de las concentraciones de niobio, vanadio y titanio será del 0,15%.								

**Tabla 2.4. Requerimientos de esfuerzo de tracción de aceros API 5L. [10]**

Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia		Esfuerzo máximo de fluencia		Mínimo esfuerzo de tracción		Máximo esfuerzo de tracción	
	PSI	Mpa	PSI	MPa	PSI	MPa	PSI	MPa
B	35,000	241	65,000	448	60,000	414	110,000	758
X42	42,000	290	72,000	496	60,000	414	110,000	758
X46	46,000	317	76,000	524	63,000	434	110,000	758
X52	52,000	359	77,000	531	66,000	455	110,000	758
X56	56,000	386	79,000	544	71,000	490	110,000	758
X60	60,000	414	82,000	565	75,000	517	110,000	758
X65	65,000	448	87,000	600	77,000	531	110,000	758
X70	70,000	483	90,000	621	82,000	565	110,000	758
X80	80,000	552	100,000	690	90,000	621	120,000	827

De acuerdo con el trabajo de Hashemi y Mohammadyani en 2010, los aceros grado API están clasificados como aceros de bajo carbono, adicionado con niobio (Nb), titanio (Ti) y vanadio (V), como principales elementos aleantes y endurecedores por precipitación. Estos elementos le proveen una buena combinación de resistencia y tenacidad. Además, éstos aleantes, especialmente los formadores de carburos (Nb, Ti y V), causan transformaciones a bajas temperaturas, formando principalmente bainita y ferrita acicular, que les confieren altos niveles de resistencia. [11]



**Figura 2.2. Microestructura de la unión soldada por el proceso SAW de tuberías API X-65 (A: zona de soldadura; B: interfase; C: zona afectada por el calor). [11]**



## 2.4 La soldadura

La soldadura es un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos (o más) partes mediante la aplicación conveniente de calor o presión. La integración de las partes que se unen mediante soldadura se denomina un ensamble soldado.

Muchos procesos de soldadura se obtienen solamente por calor, sin aplicar presión; otros, mediante una combinación de calor y presión; y algunos más únicamente por presión, sin aportar calor externo. En algunos casos se agrega un material de aporte o relleno para facilitar la fusión. La soldadura se asocia por lo regular con partes metálicas, pero el proceso también se usa para unir plásticos. [12]

La soldadura proporciona una unión permanente, en donde las partes soldadas se vuelven una sola unidad. La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales, si se usa un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores a los materiales originales y se emplean las técnicas de soldadura adecuadas.

En general, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación. Los métodos mecánicos alternativos de ensamble requieren alteraciones más complejas de las formas (por ejemplo, taladrado de orificios) y adición de sujetadores (remaches o tuercas). El ensamble mecánico resultante por lo general es más pesado que la soldadura correspondiente. [12]

La soldadura constituye uno de los recursos tecnológicos de vital importancia para el desarrollo industrial a nivel global. Las industrias de diferentes ramas de la técnica tales como: construcciones, petroquímicas, de generación de energía, de transporte, alimenticias, agrícolas, aeroespacial,

electrónica, automotriz, etc., no podrían haber alcanzado su desarrollo actual si no hubiera estado disponible la tecnología de soldadura.

Hoy, prácticamente no existe emprendimiento tecnológico alguno en el cual la soldadura no intervenga en alguna de sus etapas. [13]

## **2.5 Proceso de soldadura por Arco Metálico Sumergido (SAW)**

El proceso de arco metálico sumergido (SAW, por sus siglas en inglés) produce la coalescencia de los metales calentándolos a través de un arco entre un electrodo de metal desnudo y la pieza de trabajo.

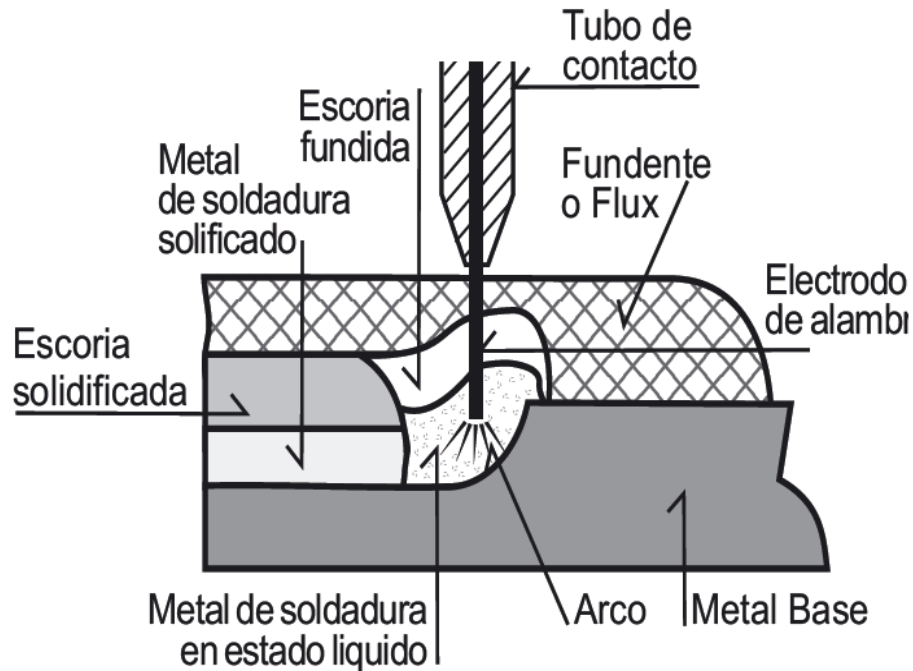
En sus fundamentos físicos, es similar a la soldadura de arco eléctrico manual. En su operación, el electrodo es remplazado por un alambre desnudo que, a medida que se consume, es alimentado por un mecanismo automático. [7] El metal de relleno se obtiene del electrodo y, a veces desde una fuente suplementaria, como varillas de soldadura o gránulos metálicos. [14]

El arco y el metal fundido están sumergidos en una cama de polvo granular sobre la unión. Éstos son protegidos por este polvo granular y fusible, conocido como fundente o flux, que está compuesto de silicatos y otros minerales. [7]

Este juega un papel importante en tres aspectos:

1. La estabilización del arco depende del fundente.
2. Puede controlar las propiedades mecánicas y químicas del metal de soldadura final.
3. La calidad de la soldadura puede ser afectada por el cuidado y manejo del fundente. [14]

La soldadura SAW es un proceso de soldadura versátil, capaz de producir soldaduras con corrientes de hasta 2000 amperes, utilizando corriente alterna o directa, utilizando uno a más electrodos o material de aporte adicional. [15]



*Figura 2.3. Proceso de soldadura por arco sumergido. [7]*

Éste proceso permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de excelente calidad (tasa de deposición de hasta 50 kg/h) a bajo costo para una amplia gama de aplicaciones.

También permite obtener grandes rendimientos en producción. Se puede usar además como un proceso semiautomático, mediante una pistola manual, similar a la que se usa en soldadura MIG-MAG, pero con diámetros de hilos mayores (hasta 2.4 mm) y de forma parecida a como en el proceso GMAW (gas metal arc welding), se aportaría el fundente en vez del gas de protección. El flux viene alimentado de una tolva. [16]

Entre los factores que determinan el uso del proceso SAW se incluyen:

1. Las propiedades químicas y mecánicas requeridas en la unión final.
2. Grosor del material base a ser soldado.
3. Accesibilidad conjunta.
4. Posición de la soldadura.
5. Volumen de la soldadura a realizar. [14]

### **2.5.1 Variantes del proceso**

El proceso de soldadura por arco sumergido puede ser aplicado en tres modalidades: semiautomático, automático y mecanizado. Cada uno de los métodos requiere que la unión se coloque de modo que el fundente y el charco de soldadura fundido se mantengan en su lugar hasta que se haya solidificado.

#### **2.5.1.1 Soldadura semiautomática**

La soldadura semiautomática se realiza con una pistola soldadora de mano que suministra tanto el fundente como el electrodo. El electrodo es impulsado por un alimentador de alambre; el fundente puede suministrarse mediante una tolva de gravedad montada en la pistola o alimentarse a presión a través de una manguera. Este método requiere conducción manual empleando electrodos de diámetro relativamente pequeño y velocidades de recorrido moderadas. El desplazamiento puede ser manual o impulsado por un motor pequeño montado en la pistola. [14]

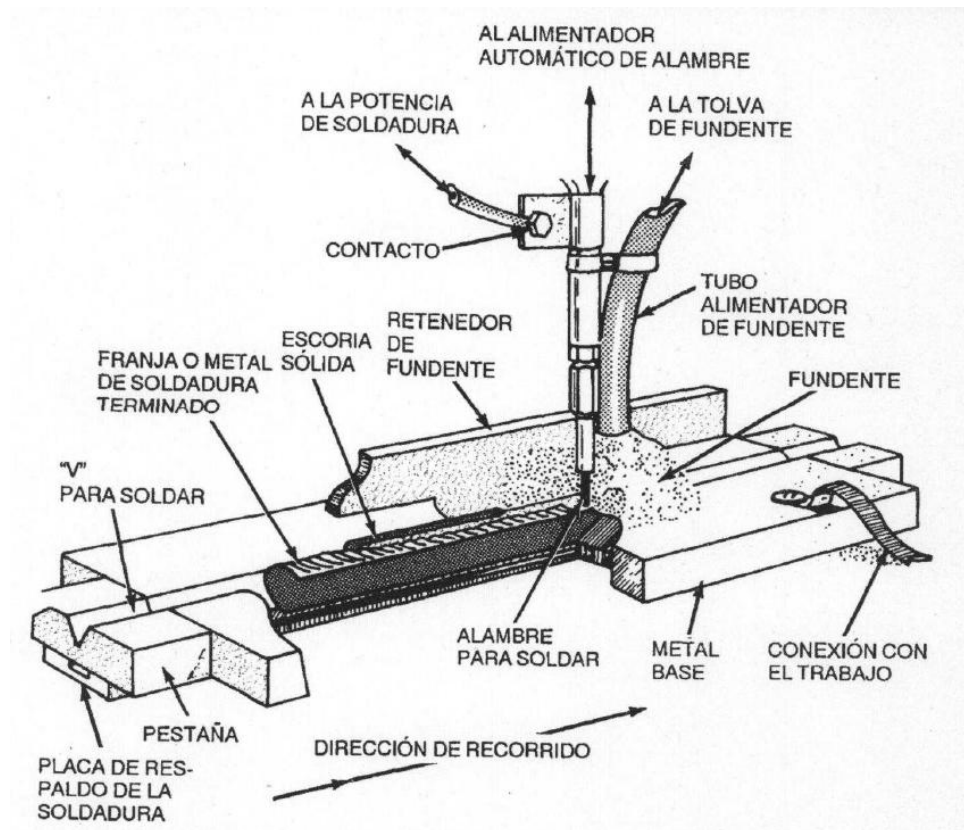
#### **2.5.1.2 Soldadura automática**

La soldadura automática se efectúa con equipo que realiza la operación de soldadura sin que un operador tenga que vigilar y ajustar continuamente los controles. El costoso equipo de autorregulación se puede justificar si se desea alcanzar tasas de producción elevadas. [14]

#### **2.5.1.3 Soldadura mecanizada**

En la soldadura mecanizada se emplea equipo que realiza toda la operación de soldadura, pero bajo la vigilancia de un operador que coloca el

trabajo en su posición, inicia y detiene la soldadura, ajusta los controles y fija la velocidad de cada soldadura. [14]



*Figura 2.4. Esquema básico del proceso de arco sumergido [14]*

## 2.5.2 Equipo

El equipo requerido para soldadura por arco sumergido consiste en:

- (1) Una fuente de potencia,
- (2) Un sistema de suministro de electrodo,
- (3) Un sistema de distribución de fundente,
- (4) Un mecanismo de desplazamiento y
- (5) Un sistema de control del proceso. El equipo opcional incluye sistemas de recuperación de fundente y equipo de posicionamiento o manipulación. [14]

### **2.5.2.1 Fuentes de poder**

Para soldar con arco sumergido son adecuados varios tipos de fuente de energía, sin embargo, para cada aplicación la fuente debe seleccionarse considerando algunos factores, ya que esta juega un papel importante desde el punto de vista operacional. [5]

Las fuentes de potencia de CA por lo general son del tipo transformador, y pueden suministrar una salida de CC o bien de CV de onda cuadrada. [15] Las fuentes de voltaje constante se emplean con el método de aplicación semiautomático, mismo que involucra electrodos de diámetros de 2.4 mm (3/32") y menores, aunque también se emplean para soldadura mecanizada y automáticas con alambres de diámetros mayores y con corrientes de 300 a 1000 amperes. [5]

Como en general el proceso SAW es de corriente elevada con ciclo de trabajo alto, se recomienda una fuente de potencia capaz de suministrar un amperaje alto con ciclo de trabajo del 100%. [14]

### **2.5.2.2 Alimentador de alambre**

Comprende la unidad de motor alimentador y rodillos impulsores del alambre, la unidad de soplete y punta de contacto y accesorios para montar y posicionar la cabeza. Casi siempre se monta una boquilla de fundente en el cabezal de soldadura, con el fin de depositar un poco de fundente por delante del alambre de soldadura o en forma concéntrica a su alrededor.

Los motores alimentadores del alambre por lo regular son del tipo de imán permanente, de trabajo pesado, con caja de engranes reductores integrada, y alimentan el alambre a velocidades del orden de 8 a 235 mm/s (20 a 550 in/min). [14]

### **2.5.2.3 Equipo para desplazamiento**

El desplazamiento del cabezal de soldadura en SAW generalmente se efectúa por medio de un carro tipo tractor, un carro de riel lateral o un manipulador.

Un carro tipo tractor sirve para desplazarse a lo largo de uniones rectas o suavemente curvadas viajando sobre rieles dispuestos a un lado de la unión, o viajando sobre la pieza de trabajo misma. El cabezal de soldadura, el control, el suministro de alambre y la tolva de fundente, por lo general, están montados en el tractor. La velocidad máxima que puede alcanzarse con tractores es de alrededor de 45 mm/s (100 in/min). [14]

Los carros de riel lateral sólo tienen desplazamiento lineal y pueden alcanzar velocidades de más de 85 mm/s (200 in/min). Como estos sistemas generalmente están fijos y la pieza de trabajo debe llevarse a la estación de soldadura, se usan sobre todo para soldar en talleres.

Los manipuladores son similares a los carros de riel lateral, en cuanto a que están fijos y la pieza de trabajo debe llevarse a la soldadora, pero son más versátiles porque pueden moverse linealmente a lo largo de tres ejes. El cabezal de soldadura, el suministro de alambre, la tolva de fundente y a menudo también el control y el operador viajan sobre el manipulador. [14]

### **2.5.2.4 Unidades de recuperación de fundente**

A menudo se usan unidades de recuperación de fundente para optimizar el aprovechamiento del mismo, minimizando la limpieza manual. Este tipo de unidades pueden realizar cualquier combinación de las siguientes actividades:

- (1) Retirar el fundente no fusionado y la escoria fusionada detrás de la soldadura.

- (2) Separar con mallas la escoria fusionada y otros materiales de tamaño grande.
- (3) Eliminar partículas magnéticas.
- (4) Eliminar polvos finos.
- (5) Recircular fundente a una tolva para su reutilización.
- (6) Calentar el fundente en la tolva para mantenerlo seco. [14]

## **2.6 Fundentes para arco sumergido**

Los fundentes (o fluxes) que se emplean en arco sumergido son mezclas fusibles de minerales granulados y otros compuestos químicos de composición complejas y variadas. La composición de estos, su tamaño y distribución de grano, punto de fusión, viscosidad y la actividad química de las escorias que la forman influyen grandemente en la forma de los depósitos de soldadura, el perfil y acabado de los cordones. [5]

### **2.6.1 Tipos de fundentes o fluxes**

Existen varios tipos de fundentes y estos se clasifican en base de diferentes características. A continuación se indican las formas de clasificación y los tipos incluidos en cada una de estas.

En base de los métodos de fabricación, los fundentes pueden ser de los tipos fundido, aglomerado y los mezclados mecánicamente. [5]

#### **2.6.1.1 Fundentes fundidos**

En los fluxes fundidos, la materia prima se mezcla en seco y posteriormente se funde en un horno eléctrico a una temperatura de entre 1500°C y 1700°C. Después de la fusión y de cualquier adición final, la carga del horno es colada y enfriada. El enfriamiento se produce por el paso de la mezcla fundida a través de una corriente de agua. El resultado es un producto con



aparición cristalina que es triturado, cribado para clasificación según tamaño y envasado.

Los fluxes fundidos tienen las siguientes ventajas:

- Buena homogeneidad química.
- Fácil eliminación de los finos, sin que afecte la composición del fundente.
- Normalmente no higroscópicos, lo que simplifica su manejo y almacenamiento, al mismo tiempo que elimina problemas de soldadura.
- Permiten el reciclado, sin cambios significativos en la composición de las partículas.
- Adecuados para las más altas velocidades de trabajo en la operación de soldadura. [17]

#### **2.6.1.2 Fundentes aglomerados**

En la fabricación de un fundente aglomerado, las materias primas son pulverizadas, mezcladas en seco y unidas con silicato potásico, silicato sódico o una mezcla de ambos. Esta parte de la fabricación es similar a la de la pasta de los electrodos revestidos. Después del cohesionado, la mezcla húmeda es sinterizada y cocida a una temperatura relativamente baja. Los “pellets” se trituran, se criban para la clasificación al tamaño deseado y se envasan en sacos de PVC para protegerlos de la humedad. [17]

Las ventajas de los fundentes unidos son:

- Es posible la adición de desoxidantes y elementos de aleación, gracias a la baja temperatura inherente al proceso. Los elementos de aleación pueden añadirse ya sea como ferroaleaciones o como metales elementales, para producir aleaciones que no están disponibles en el mercado como electrodos para uso manual o bien para ajustar la composición del metal depositado.
- Al ser baja la densidad de estos fluxes permiten una capa de flux más gruesa en la soldadura.
- Las escorias solidificadas son fácilmente eliminables. [17]

Sus principales desventajas son su tendencia a absorber humedad y por lo tanto, al riesgo de agrietamiento (de las partes soldadas) debido al hidrógeno, sus escorias pueden generar gases y provocar porosidad, y su composición puede cambiar por la segregación y remoción de partículas finas. [5]

### **2.6.1.3 Fundentes mezclados mecánicamente**

Para producir un fundente de este tipo, el fabricante o el usuario pueden mezclar dos o más fluxes fundidos o aglomerados entre los comercialmente disponibles en la proporción necesaria para conseguir los resultados deseados.

Los inconvenientes son:

- Segregaciones durante su envasado, almacenamiento o manipulación.
- Segregaciones en el sistema de alimentación y recuperación durante la operación de soldeo.
- Posible inconsistencia de flux resultante de la mezcla. [17]

### **2.6.2 Clasificación de los fundentes**

Los fundentes también se clasifican de acuerdo a los cambios de composición química que pueden producir en el metal de soldadura. Cualquier fundente produce metales de soldadura de una composición química diferente a la del electrodo empleado (independientemente de los cambios debidos a la dilución producida por el metal base). Tales cambios se deben a las reacciones químicas que entre fundente, electrodo y metal base al ser fundidos por el arco eléctrico, y dependen de la naturaleza del fundente, en particular de los elementos metálicos contenidos en su composición.

Las variaciones en los parámetros de los procedimientos de soldadura, como el amperaje, la velocidad y principalmente el voltaje, ocasionan cambios en las proporciones de electrodo y fundente que interactúan, y a su vez, cambios del metal de soldadura. En base de estos cambios, los fundentes se clasifican en neutros, activos y aleados. [5]

### **2.6.2.1 Fundentes activos**

Contienen una cantidad controlada de Mn y/o Si que se añaden al fundente para proporcionar mayor resistencia a la porosidad o a la fisuración así como mayores niveles de resistencia mecánica. Su uso está limitado a soldadura por un solo lado, por ambos lados, soldadura en esquina, pero no se recomienda usarlos en multipasadas para uniones de aceros de espesores mayores a 25 mm, ya que la composición química y por tanto las propiedades mecánicas que se obtienen son no homogéneas en cada una de las pasadas. [17]

### **2.6.2.2 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. [5]

Deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones acerca de este tipo de fundentes:

- Su principal aplicación es la producción de soldaduras de pasos múltiples, en particular en placas de espesores mayores de 25.4 mm (1pulg).
- 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.

Ningún fundente es neutro por completo, por lo que también provocan cambios en la composición química. [5]

### **2.6.2.3 Fundentes aleados**

Son aquellos a los que se adicionan elementos de aleación. Normalmente se emplean con electrodos de acero simple al carbono para producir metal de soldadura aleado. Su principal aplicación es la soldadura de aceros de baja aleación y el depósito de recubrimientos duros.

La proporción de elementos de aleación que se incorporan al metal de soldadura depende del voltaje empleado, por lo que este debe ser estrechamente controlado a fin de que la composición química de los depósitos de soldadura resultantes cumpla con las especificaciones aplicables. [5]

### **2.6.3 Reacciones metal-fundente**

Las reacciones de metal-fundente son reacciones termoquímicas que tienen lugar en la interfaz entre la escoria fundida y el metal líquido. Ejemplos de tales reacciones son la descomposición de óxidos metálicos del fundente, la oxidación de los elementos de aleación en el metal líquido por el oxígeno disuelto, y la desulfuración del metal de soldadura. [18]

En ambientes de alta temperatura cerca del charco de soldadura, todos los óxidos son susceptibles a la descomposición. Éstos son las principales fuentes de contaminación por oxígeno. A estas temperaturas, la presencia de FeO (óxido de hierro) es inestable, se descompone y transfiere el oxígeno al metal soldado, al igual que el MnO (óxido de manganeso), aunque este último en menor proporción.

Krishankant, Jindal y Kant (2012), demostraron que las adiciones de CaO (óxido de calcio) disminuyen el grado de transferencia de oxígeno para el metal de soldadura, debido a que el CaO es más estable que el MnO. Por lo tanto, la composición de fundente puede afectar la composición de metal de soldadura y las propiedades mecánicas de manera significativa. [19]

Durante el proceso SAW la cantidad de flux que realmente se funde es la que forma la escoria. La porción no utilizada se separa de la escoria y se reutiliza. El consumo del fundente granular depende del calor en el charco. El calor necesario para fundir el flux procede de tres fuentes:

- i. Conducción del metal fundido,
- ii. La radiación del arco,
- iii. Calentamiento por resistencia de la escoria. [19]

La conducción de metal fundido depende de la temperatura del metal de soldadura y el área de contacto entre el metal y el fundente. Esta área de contacto depende de la forma del cordón y, por lo tanto, de los parámetros de soldadura. Se ha demostrado que el consumo de fundente generalmente aumenta con el aumento de la corriente, alcanza un máximo y luego comienza a disminuir. [19]

### **2.6.3.1 Transferencia de manganeso**

El contenido de manganeso de metal de soldadura depende del contenido de manganeso inicial del alambre, el índice de basicidad y la cantidad de manganeso del fundente. La reacción metal-fundente implica un intercambio de manganeso, pero ningún cambio en el contenido de oxígeno del charco de soldadura.

En 2009 Kulwant, Sahni y Pandey descubrieron que el contenido de manganeso del metal de soldadura se incrementa con la adición de ferromanganeso y con el aumento en el índice de basicidad del fundente. [20]

## **2.7 Electrodo para proceso SAW**

Existen electrodos para soldar aceros al carbono, de baja aleación, de alto contenido en carbono, aleados, inoxidable, para aleaciones de níquel y aleaciones especiales. Estos últimos pueden depositarse mediante el proceso de soldadura de arco sumergido o bien, mediante el proceso de soldadura por electro-escoria, no considerado un proceso de soldadura de arco sino de estado sólido. [21]

Los alambres normalmente se presentan enrollados en carretes de 10 a 500 kg de peso o en barriles de 100 a 1000 kg. Generalmente los electrodos de acero se recubren de cobre, excepto para soldaduras de materiales resistentes a la corrosión, ciertas aplicaciones nucleares, o en la fabricación de reactores para la industria del petróleo y petroquímica.

El recubrimiento de cobre evita la corrosión, mejora el contacto eléctrico y disminuye el rozamiento del hilo con el dispositivo de alimentación. El diámetro del hilo varía normalmente desde 1.6 a 6.4 mm y la gama de intensidades de 150 a 1600 amperios. [16]

De acuerdo con la especificación AWS A5.17 (especificación de electrodos de acero al carbono para el proceso de arco sumergido), la clasificación de la combinación del acero y el fundente se define de la siguiente forma:

**F7A4-EM12K**

Donde cada término significa:

**F:** Fundente.

**7:** 70.000 Psi de resistencia a la tracción mínima.

**A:** Propiedades mecánicas obtenidas sin tratamiento post-soldadura.

**4:** Resistencia al impacto de 27 J mínimo a 20°F.

**E:** Electrodo.

**M:** Contenido medio de manganeso.

**12:** 0.12% de carbono (nominal).

**K:** Acero calmado. [38]

### **2.7.1 Electroodos de acero al carbono y fundentes.**

Los hilos se clasifican por su composición química. Los fluxes, en base a las propiedades del metal depositado obtenido con cada flux específico. [17]

### **2.7.2 Electroodos de aceros de baja aleación y fundentes.**

Los depósitos de baja aleación pueden obtenerse gracias al uso de hilos de acero de baja aleación, fluxes conteniendo los elementos de aleación o hilos tubulares en los que el recubrimiento metálico contiene los elementos de aleación. Los electroodos de acero aleado y los tubulares, se utilizan normalmente con un flux neutro. Los fluxes conteniendo elementos de aleación se usan generalmente con un electrodo de acero al carbono. [17]

## **2.8 Parámetros del proceso SAW**

### **2.8.1 Corriente de soldadura**

Al aumentar la intensidad, aumentan las perdidas por combustión del Mn y del Si, disminuyendo su contenido en el metal aportado. La intensidad de corriente determina el factor de aportación y caracteriza la forma exterior del cordón. También actúa sobre forma interior influyendo en la penetración.

Si se aumenta la intensidad sin variar otros parámetros de la soldadura, se observa un aumento progresivo de la penetración, la densidad de corriente, la velocidad de alimentación del hilo y la tasa de deposición. Si se eleva la intensidad en exceso se producirá un arco errático, mordeduras y el cordón será muy estrecho y alto. [5]

**Tabla 2.5. Composición química (% e.p.) de alambres de acero al manganeso para proceso de soldadura SAW. [38]**

Electrodo	% C	% Mn	% Si	% S	% P	% Cu
<b>Bajo manganeso</b>						
EL8	0.1	0.25/0.60	0.07	0.035	0.035	0.35
EL8K	0.1	0.25/0.60	0.10/0.25	0.035	0.035	0.35
EL12	0.05/0.15	0.25/0.60	0.07	0.035	0.035	0.35
<b>Medio manganeso</b>						
EM12	0.06/0.15	0.80/1.25	0.1	0.035	0.035	0.35
EM12K	0.05/0.15	0.80/1.25	0.10/0.35	0.035	0.035	0.35
EM13K	0.07/0.19	0.90/1.40	0.35/0.75	0.035	0.035	0.35
EM15K	0.10/0.20	0.80/1.25	0.10/0.55	0.035	0.035	0.35
<b>Alto manganeso</b>						
EH14	0.10/0.20	1.70/2.20	0.10	0.035	0.035	0.35

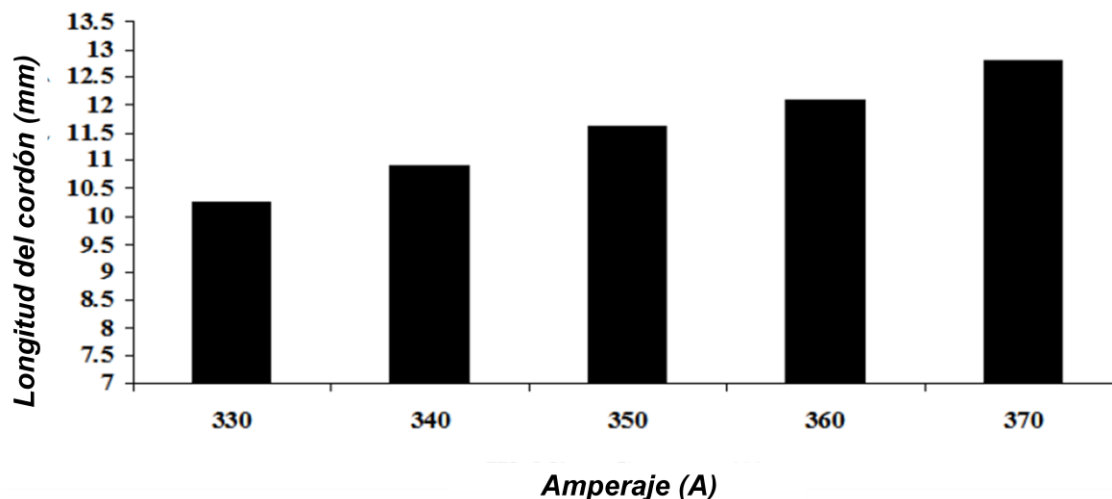
**Tabla 2.6. Rangos de amperaje para alambres utilizados en el proceso SAW. [38]**

Diámetro (mm)	Rango de intensidades de corriente (A)
1.6	150 – 300
2	200 – 400
2.4	250 – 500
3.2	300 – 600
4	400 – 800
4.8	500 – 1000
5.6	600 – 1200
6.4	700 – 1600

En su estudio en 2010, Ghazvinloo utilizó un voltaje y velocidad de avance fijos de 26 V y 52 cm/min, por lo que el cambio en las dimensiones del



cordón se efectuaron por medio del amperaje, el cual varió de 330 a 370 A. Con estos parámetros se presentó un incremento de 10.25 a 12.8 mm en la anchura del cordón de soldadura, que equivale a un tasa de incremento de 0.064 mm por cada amperio. [22]



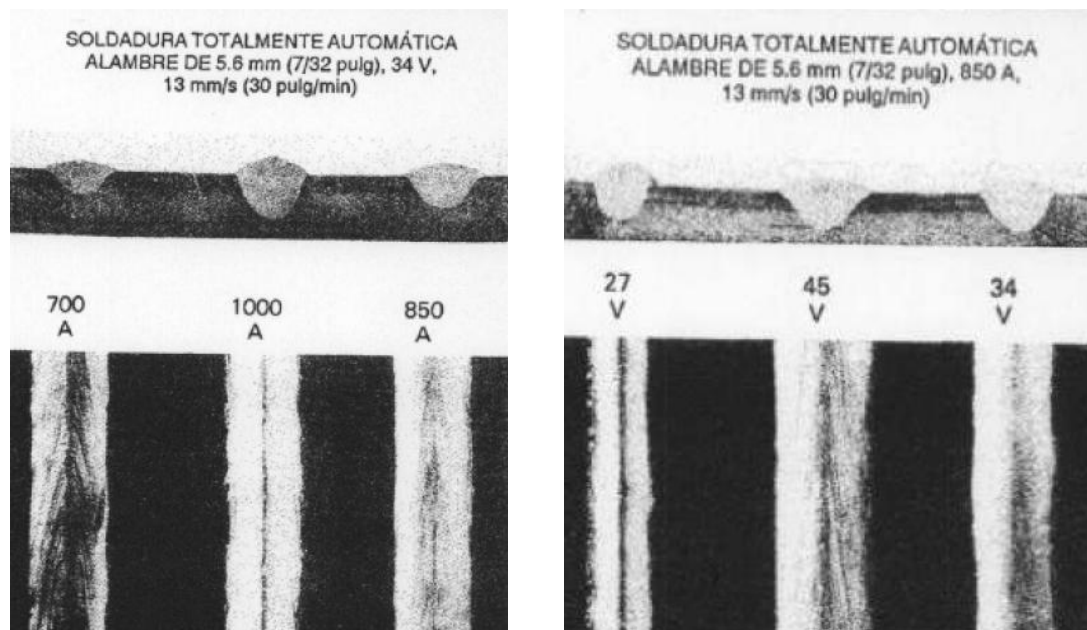
*Figura 2.5. Relación del amperaje y la anchura del cordón de soldadura en el proceso SAW. [22]*

## 2.8.2 Voltaje de soldadura

La tensión de soldadura varía con la longitud del arco entre el electrodo y el metal de soldadura fundido. Con el aumento de la longitud del arco, la tensión de arco aumenta porque el alargamiento del arco expone más de la columna del arco para el límite fresco del arco. [23]

El voltaje determina principalmente la forma de la sección transversal del cordón de soldadura y su aspecto externo. El aumento en la tensión de soldadura con corriente constante produce un cordón más plano y amplio; éstos tienden a reducir la porosidad causada por el óxido.

Un aumento de la tensión de arco aumenta la cantidad de metal transferido, lo que disminuye la pérdida de los elementos de aleación, conservando así las propiedades mecánicas y metalúrgicas del metal de soldadura. [24] También ayuda a interrumpir el arco de forma menos violenta.



*Figura 2.6. Efecto del amperaje y voltaje en el proceso SAW. [14]*

Existe una correlación directa entre el voltaje y el cordón de soldadura. Ghazvinloo utilizó en su experimento corriente y la velocidad de avance fijas de 350 A y 53 cm/min. Cuando se incrementó el voltaje desde 22 hasta 30 voltios, el cordón de soldadura de igual manera se incrementó de 9 a 15.2 mm, por lo que es valor aproximado del incremento fue de 0.78 mm por cada voltio añadido. [22]

### **2.8.3 Polaridad**

El término polaridad se emplea para indicar la conexión eléctrica del electrodo a las terminales de las fuentes de energía de corriente directa. Cuando el cable del electrodo se conecta a la terminal positiva de la fuente, se designa como corriente directa del electrodo positivo, o también, de manera arbitraria, polaridad invertida; cuando el cable del electrodo se conecta a la terminal negativa de la maquina, la polaridad se designa como corriente directa del electrodo negativo.

En la mayoría de los procesos de soldadura, la polaridad tiene el siguiente efecto sobre la penetración: la polaridad invertida está asociada con una mayor penetración que la polaridad directa. [5]

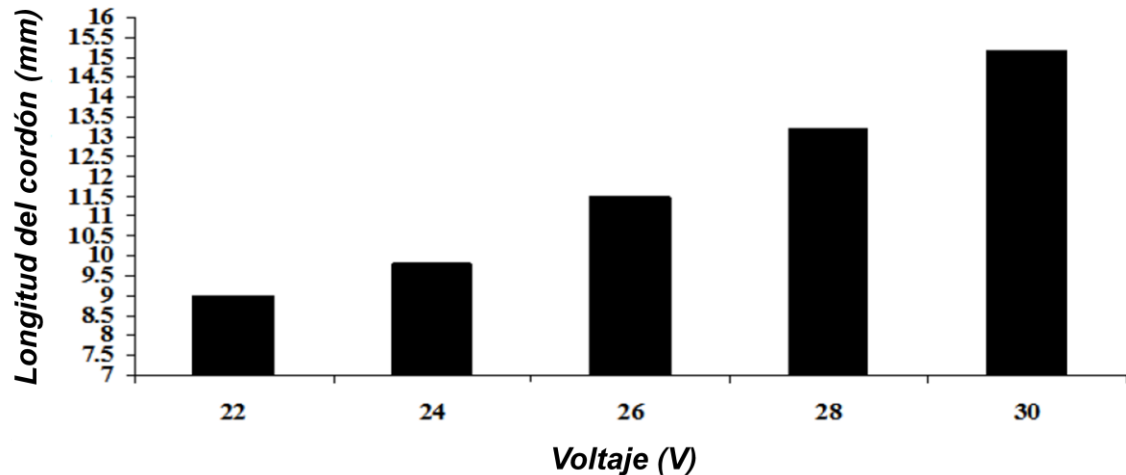


Figura 2.7. Relación del voltaje y la anchura del cordón de soldadura en el proceso SAW. [23]

#### 2.8.4 Velocidad de avance

La velocidad de avance determina cuánto tiempo el arco queda retenido por unidad de longitud. Esto produce un efecto sobre prácticamente todos los parámetros de soldadura que se apliquen en el arco y cómo éste afecta al metal sobre el que dicho arco está establecido. [17] Cuando la velocidad de soldadura aumenta:

- La penetración disminuye
- El tamaño del cordón se hace más pequeño
- Disminuye el mojado del baño sobre el material a soldar [17]

Aumenta la tendencia a:

- Rechupes
- Sensibilidad a soplo magnético
- Porosidad
- Forma irregular del cordón [17]

### **2.8.5 Tamaño del electrodo**

El tamaño del electrodo afecta a la forma del cordón de soldadura y la profundidad de penetración en corriente continua. También influye en la velocidad de deposición. En cualquier corriente dada, un electrodo de diámetro pequeño tendrá una densidad de corriente más alta y una velocidad de deposición más alta que un electrodo más grande. Sin embargo, un electrodo de diámetro más grande puede llevar más corriente que un electrodo más pequeño, y producir una mayor velocidad de deposición en alto amperaje. [23]

### **2.8.6 Stick-out**

La distancia entre la boquilla de salida del alambre y la raíz de arco es llamado stick-out y tiene un efecto considerable sobre la geometría del cordón de soldadura. Normalmente la distancia entre la punta de contacto y el trabajo es de 25 a 40 mm. [23]

La velocidad de fusión del electrodo aumenta con el aumento del stick-out. Este efecto es particularmente más significativo con electrodos de diámetro más pequeño puesto que el calentamiento del electrodo es causado por la resistencia eléctrica del electrodo, lo que aumenta con la disminución en el diámetro. La penetración disminuye con el aumento del stick-out. [23]

### **2.8.7 Distancia a la tierra física**

La pinza de tierra física cierra el circuito eléctrico que establece el arco entre el electrodo y el metal base. A mayor corriente de soldadura, el campo magnético que se genera en el electrodo es de mayor consideración. La posición de la tierra determina el sentido de circulación de la corriente y también la dimensión de la corriente inducida en la pieza que se suelda. [21]

En los casos en que se pueda utilizar corriente alterna, este efecto queda minimizado, pero en soldadura con corriente continua, la posición de la masa supondrá mayor o menor magnetismo en las piezas soldadas e incluso defectos

asociados a lo que se conoce como “soplo magnético”, que es un fenómeno que suele aparecer debido a las grandes intensidades de corriente que se emplean y a las velocidades de soldadura: cuanto más elevados sean estos dos parámetros, más posibilidades hay de que se produzca este fenómeno, sobre todo al final de los cordones de soldadura. Los defectos que causan el soplo magnético, en casos severos, son porosidad, socavados, faltas de fusión, cordón errático, etc. [21]

### 2.8.8 Efecto de los parámetros de soldadura en la estructura del grano.

El baño de soldadura toma forma de “lágrima” en altas velocidades de soldadura y elípticas a bajas velocidades de soldadura. Dado que el límite de fusión del charco en forma de lágrima es prácticamente recto, los granos columnares son también esencialmente rectos para crecer perpendicular al límite de charco. Por otro lado, en el límite de fusión del charco de forma elíptica, los granos columnares están curvados con el fin de crecer perpendicular a la frontera del charco.

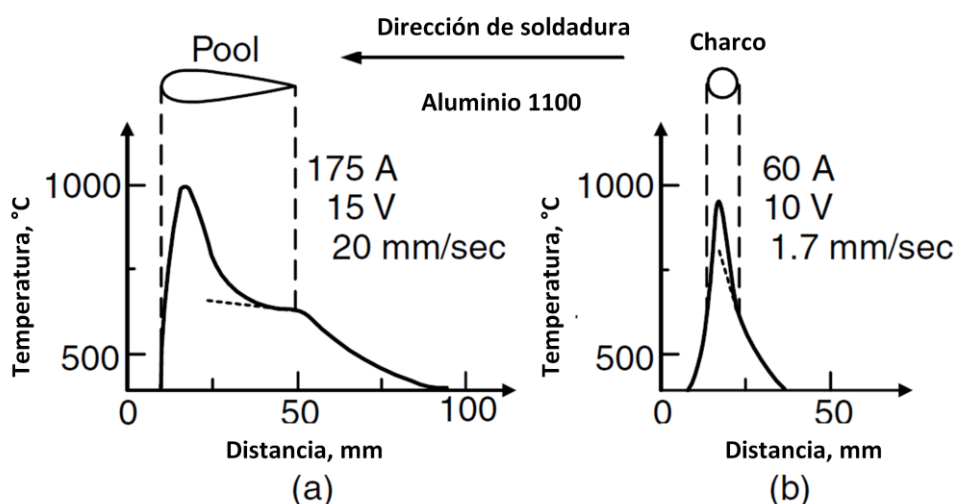
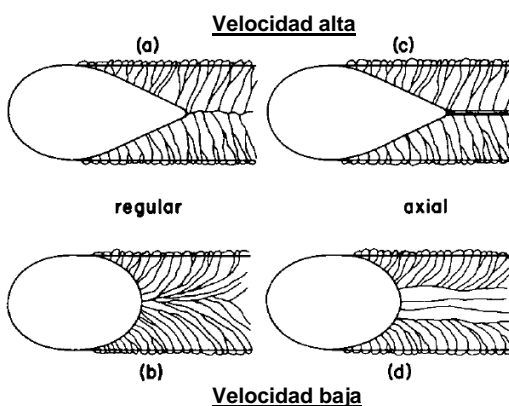


Figura 2.8. Efectos de los parámetros de soldadura en la geometría del charco de soldadura; a) Alta velocidad de avance y entrada de calor, b) Bajas velocidades de avance y entrada de calor. [18]

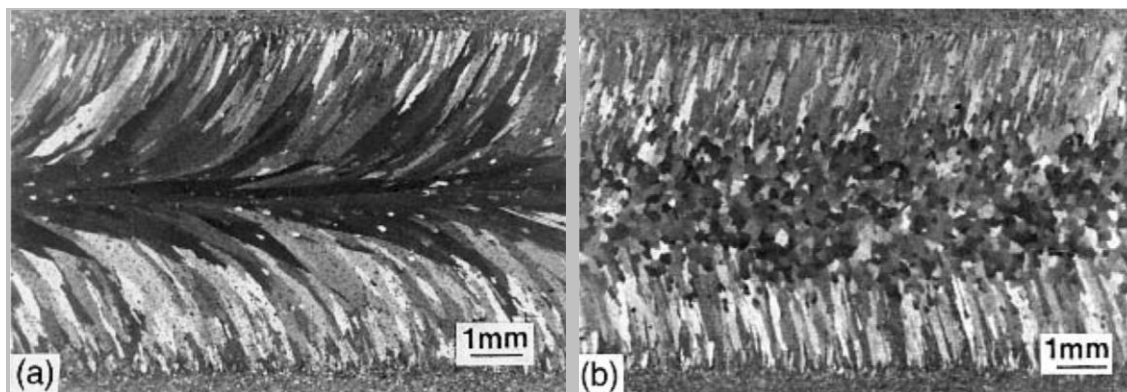
También pueden existir granos axiales en la zona de fusión. Los granos axiales pueden iniciar desde el límite de fusión en el punto de partida de la soldadura y continuar a lo largo de la longitud de la soldadura, el bloqueo de los granos columnares que crecen hacia dentro desde las líneas de fusión. Al igual que otros granos columnares, estos granos axiales también tienden a crecer perpendicular al charco de soldadura.



**Figura 2.9. Efecto de la velocidad de avance en el crecimiento de granos en el metal de soldadura. [18]**

En un charco en forma de lágrima, sólo una sección corta de la frontera puede ser perpendicular a la dirección axial, y por lo tanto, la región de los granos axiales es estrecha. Sin embargo, con un charco de soldadura elíptica, una sección significativamente más larga de la frontera puede ser perpendicular a la dirección axial, y la región de granos axiales puede ser significativamente más amplia. [18]

En la nucleación heterogénea, a medida que se aumenta la entrada de calor y la velocidad de soldadura, se reduce el gradiente de temperatura en el extremo del charco de soldadura.



**Figura 2.10. Formación de granos axiales en charcos de distintas geometrías; a) Charco de soldadura en forma elíptica, b) Charco de soldadura en forma de lágrima. [18]**

Además, a medida que aumenta la velocidad de soldadura, se incrementa también la velocidad de solidificación del metal de soldadura. La relación  $G/R$  disminuye y el sub-enfriamiento constitucional delante de la interfase sólido-líquido avanza, por lo tanto, se incrementa. [18]

## **2.9 Efecto del nitrógeno, oxígeno e hidrógeno**

El nitrógeno, oxígeno e hidrógeno pueden disolverse en el metal fundido durante la soldadura. Estos elementos suelen provenir de aire, los consumibles (tales como el gas y el flux de protección) o de contaminantes en la pieza de trabajo, como la humedad o la suciedad en su superficie. Estos gases pueden afectar significativamente la solidez de la soldadura resultante.

### **2.9.1 Técnicas para la protección del aire**

Se pueden utilizar diversas técnicas para proteger el baño de soldadura durante la soldadura por fusión. Los niveles de oxígeno en soldaduras por arco sumergido puede variar significativamente, dependiendo de la composición del flux; niveles muy altos de oxígeno son asociados con la descomposición de los fundentes ácidos que contienen grandes porcentajes de  $\text{SiO}_2$ . Esto es consistente con el gran aumento en el contenido de silicio en el metal de soldadura cuando se utilizan estos fundentes. Si la contaminación atmosférica

causa un contenido de oxígeno alto en el metal de soldadura, el contenido de nitrógeno también será alto. [18]

## **2.9.2 Reacciones de gas-metal**

Las reacciones gas-metal se refieren a reacciones químicas que tienen lugar en la interfase entre la fase gaseosa y el metal líquido. En ellas se incluyen la disolución de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno en el metal líquido y la evolución de monóxido de carbono.

### **2.9.2.1 Nitrógeno**

Para los metales que no disuelven ni reaccionan con nitrógeno, tales como el cobre y el níquel, el nitrógeno puede ser utilizado como el gas de protección durante la soldadura. Por otro lado, para los metales que sí disuelven nitruros, tales como el Fe, Ti, Mn y Cr, la protección del metal de soldadura a partir de nitrógeno debe ser considerada.

#### Fuentes de nitrógeno

La presencia de nitrógeno en la zona de soldadura es por lo general un resultado de la protección inadecuada contra el aire. El nitrógeno es un estabilizador de austenita para aceros inoxidables austeníticos y dúplex. El aumento del contenido de nitrógeno del metal de soldadura puede disminuir el contenido de ferrita y aumentar el riesgo de agrietamiento por solidificación. [18]

#### Efecto de nitrógeno

La presencia de nitrógeno en el metal de soldadura puede afectar significativamente sus propiedades mecánicas. Este gas tiende a formar nitruros ocasionando fragilidad en el metal.

#### Protección contra el nitrógeno

En el proceso de soldadura por arco protegido, se añade a menudo fuertes formadores de nitruros (tales como Ti, Al, Si, y Zr) al material de aporte.



Los nitruros formados entran en la escoria y, por lo tanto, el nitrógeno en el metal de soldadura se reduce. Sin embargo, el contenido de nitrógeno de las soldaduras de arco protegido puede ser bastante alto. [18]

### **2.9.2.2 Oxígeno**

Fuentes de oxígeno.

El oxígeno en el metal de soldadura puede provenir del aire, el uso de un exceso de oxígeno en la soldadura por oxicorte o el uso de gases de protección que contienen oxígeno o  $\text{CO}_2$ . También puede venir de la descomposición de óxidos (especialmente  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  y  $\text{FeO}$ ) en el flux y las reacciones de escoria-metal en el charco de soldadura. [18]

Efecto de Oxígeno

El oxígeno puede reaccionar con el carbono y otros elementos de aleación en el metal líquido, disminuyendo la templabilidad y produciendo inclusiones.

La oxidación de elementos de aleación, introducidos a través de la escoria, puede permanecer en el metal líquido, convirtiéndose en partículas (inclusiones) en el metal de la soldadura resultante. Si la oxidación provoca excesiva formación de inclusiones o disminución de los elementos aleantes provenientes del flux, las propiedades mecánicas del metal soldado pueden deteriorarse. [18]

### **2.9.2.3 Hidrógeno**

La presencia de hidrógeno durante la soldadura de aceros de alta dureza puede causar agrietamiento por hidrógeno.

Fuentes de hidrógeno

El hidrógeno en la zona de la soldadura puede provenir de diversas fuentes: la combustión de productos en la soldadura oxi-combustible, la

descomposición de compuestos incluidos en el revestimiento de electrodos tipo celulósicos, humedad o grasa en la superficie de la pieza a trabajar, o contaminación en el fundente, recubrimientos o gases de protección.

#### Métodos de reducción de hidrógeno

El contenido de hidrógeno de soldadura se puede reducir de varias maneras. En primer lugar, evitar gases de protección que contengan hidrógeno y revestimientos de electrodos de tipo celulósicos. En segundo lugar, secar el recubrimiento del electrodo o el flux para eliminar la humedad, limpiar el alambre y la pieza para eliminar la grasa. En tercer lugar, si es factible, ajustar la composición de los consumibles. Aumentar el contenido de  $\text{CaF}_2$  en la cubierta del electrodo o el flux reduce el contenido de hidrógeno en la soldadura, debido a la reacción que sucede entre estos compuestos. [18]

## **2.10 Defectos en la soldadura**

### **2.10.1 Discontinuidades**

El rendimiento de la estructura soldada en servicio depende de la presencia o ausencia de defectos en las uniones de soldadura. En un sentido general, el término defecto de soldadura se refiere a cualquier distorsión o discontinuidad en la soldadura que no cumpla los requisitos especificados. [21]

Los problemas de soldadura de acero más comunes están asociados con una mala mano de obra, tales como la falta de fusión, falta de penetración, porosidad, muesca, desviación de arco, y otros. El número y tamaño de las discontinuidades pueden ser causa de rechazo por la mayoría de los códigos y pueden actuar como sitios de concentración de esfuerzos que puede reducir la resistencia de la unión soldada y promover la formación de grietas, como las fallas por fatiga. [25]

### **2.10.1.1 Grietas**

En soldadura, el defecto más importante debido al riesgo que entrañan de fallo catastrófico en los componentes, según su velocidad de crecimiento, es la posibilidad de aparición de fisuras o grietas. Para evitarlo, es necesario seguir recomendaciones básicas: la primera se refiere al cuidado de las temperaturas para evitar gradientes diferencias muy grandes de gradientes térmicos, según el tipo y espesor de acero que se suelde.

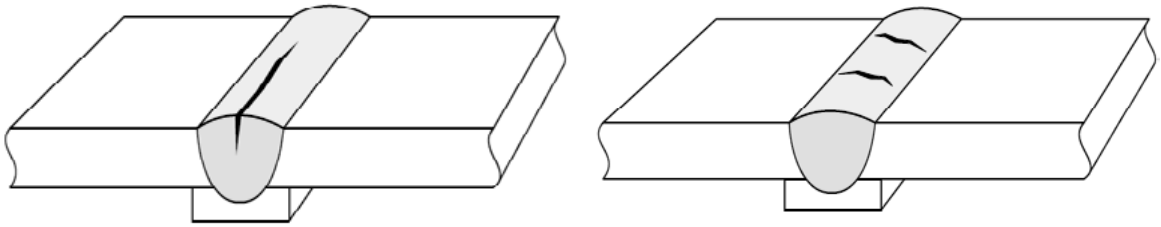
Las soldaduras por arco sumergido pueden tener mucha penetración, por lo que conviene cuidar la relación entre dicha penetración y la anchura del cordón, tanto en soldaduras a tope como en soldaduras en esquina, en donde suele producirse fisuración comúnmente, sobre todo si no se han preparado biseles suficientemente amplios para conseguir un cordón lo suficientemente ancho. [17]

### **2.10.1.2 Grietas de cráter**

Ocurren en los cráteres que se forman debido a una terminación inapropiada de un cordón de soldadura. Se consideran grietas en caliente y normalmente tiene poca profundidad. Algunas veces son denominadas grietas estrella debido a que se propagan en varias direcciones a partir del centro del cráter, pero también pueden tener otras formas. [5]

### **2.10.1.3 Porosidades**

Estas son por lo general los defectos sub-superficiales en juntas de soldadura y en realidad son huecos, agujeros o cavidades formadas por los gases atrapados en el metal de soldadura solidificado. La principal causa de la formación de estos gases es la contaminación de la junta, humedad en el fundente u oxidación de los electrodos.



**Figura 2.11. Grietas longitudinales y transversales. [21]**

Normalmente la porosidad no se considera un defecto grave como las grietas debido a que las cavidades de las porosidades por lo general tienen los extremos redondeados, por lo que no se propagan como grietas. Sin embargo, las porosidades en las juntas de soldadura no están generalmente permitidas para recipientes a presión destinados al almacenamiento y transporte de líquidos, gases u otros fluidos inflamables. La mejor manera de evitar la porosidad en juntas de soldadura es el uso de materiales de base perfectamente limpios y electrodos horneados. [21]

Las porosidades pueden formarse en la soldadura debido a:

- a) Contaminación en el metal base debido a óxidos, humedad, grasas y suciedad
- b) Presencia de hidrógeno, debido a excesiva humedad en el fundente.
- c) Excesiva corriente eléctrica, la cual genera un sobrecalentamiento que evapora los elementos cercanos a la unión, y quedan atrapados en el metal de soldadura.
- d) Velocidad de avance alta que genera una solidificación rápida del charco y evita que los gases atrapados salgan a la superficie. [26]

#### **2.10.1.3.1 Porosidad distribuida uniformemente**

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

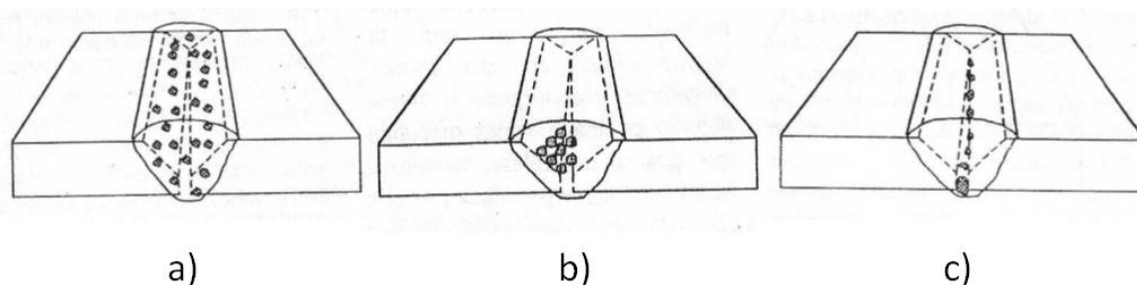
Causas probables: técnicas de soldadura inadecuadas, preparación incorrecta de las juntas o errores en el manejo de los materiales. Prevención: manejo adecuado de los materiales, técnicas correctas de soldadura y de preparación de juntas. Si la soldadura se enfría con suficiente lentitud para permitir que los gases alcancen la superficie antes de la solidificación, se minimizará la porosidad. [5]

### 2.10.1.3.2 Porosidad agrupada

Grupos localizados de poros, separados por longitudes considerables en un metal de soldadura sano. [5]

### 2.10.1.3.3 Porosidad alineada

Es una serie de poros alineados que siguen una trayectoria recta o más o menos recta, frecuentemente a lo largo de los límites del metal de soldadura con el metal base, los límites entre cordones o cerca de la raíz de la soldadura. [5]



**Figura 2.12. Tipos de porosidad: a) porosidad dispersa, b) porosidad agrupada y c) porosidad alineada. [5]**

Devletian y Van Dyke (2011) realizaron un experimento utilizando soldadura por arco sumergido con placas de acero grado A709. El diseño de la junta era una ranura cuadrada de 1.6 mm (1/16) de apertura de la raíz. Fue diseñado para ser soldada en dos pasadas, con una sola pasada en cada lado de la placa. El cordón de soldadura exhibió una cantidad inusualmente grande de refuerzo. Las inspecciones por partículas magnéticas posteriores indicaron amplias discontinuidades en el cordón de soldadura.

Se revelaron una cantidad considerable de porosidad (rechazables de acuerdo con AWS D1.1 Structural Welding Code) en el metal de soldadura, que no era fácilmente visible en la superficie. El electrodo de soldadura y fundente era F7A2-EM12K. [25]

La porosidad excesiva en la soldadura se debe al acero muy oxidado. Basta simplemente con desbastar las superficies de contacto del metal base antes de soldar. Si el desbaste no es posible, se puede elegir un flux más activo, que contienen desoxidantes fuertes, tales como el titanio y el aluminio, pero sólo se deben usar en una sola pasada. [25]



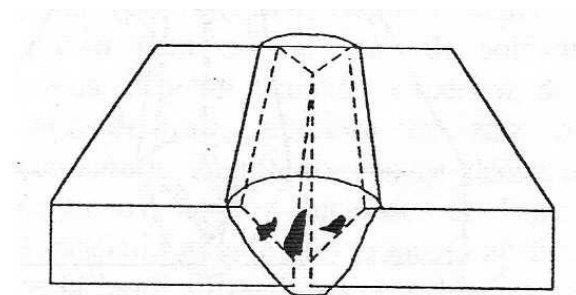
*Figura 2.13. Porosidad en soldadura por arco sumergido en acero ASTM A709. [25]*

#### **2.10.1.4 Cavidades de contracción**

Se forman debido a la contracción del metal de soldadura durante su solidificación. La cavidad de contracción por lo general se produce durante la soldadura de placas gruesas en una sola pasada usando soldadura por arco sumergido o electroescoria. Para evitar este defecto, se tiene que ser suministrada una cantidad apropiada de material de aporte como compensación durante la contracción. [21]

### 2.10.1.5 Inclusiones de escoria

Son materiales sólidos no metálicos que quedan atrapados en el metal de soldadura y el metal base. Una vez que se forma la escoria (a partir del fundente y las reacciones de este con el metal de soldadura fundido), debido a que tiene un peso específico menor que el metal, tiende a subir a la superficie, pero si existen ranuras agudas en los bordes 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, esta puede quedar dentro del metal de soldadura. [5]



*Figura 2.14. Inclusiones de escoria. [5]*

### 2.10.1.6 Deformaciones del cordón

Se producen en virtud de relleno. Como ejemplos de estos defectos están los traslapes, refuerzo o penetración excesiva, etc. También se incluyen los rechupes, que son depresiones desiguales (por ejemplo, un contorno cóncavo), en la cara o en la superficie de la raíz de la soldadura que se extiende por debajo de la superficie del metal base adyacente. Estos defectos reducen el área de la sección transversal de la soldadura por debajo de la cantidad diseñado y, por tanto, un punto de debilidad y un concentrador de esfuerzos que pueden producir una falla. [18]

La penetración y el refuerzo excesivo también son indeseables en las uniones de soldadura. Ambos son causados generalmente por un mal ajuste de avance, una separación muy amplia raíz o una cara de raíz demasiado

pequeña, técnica de soldadura inadecuada y corriente de soldadura excesiva. El refuerzo excesivo tiende a rigidizar la sección de soldadura y hacer muescas que crean concentraciones de esfuerzos. [21]

### **2.10.1.7 Socavado**

Es una ranura dentro del metal base, adyacente al pie o 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. 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 tiene alguna forma de socavado, pero cuando este es controlado, no es muy agudo o profundo y no excede los límites permitidos por las normas, no se considera un factor crítico ni un defecto. [4]



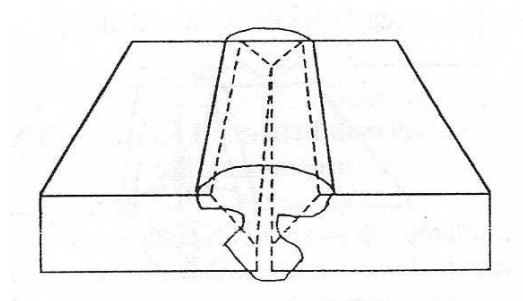
*Figura 2.15. Socavado en el pie del cordón de soldadura. [22]*

### **2.10.1.8 Fusión incompleta**

La fusión incompleta puede ocurrir debido a una corriente de soldadura inadecuada, un desplazamiento de electrodo desde el eje de la soldadura, una velocidad de avance demasiado alta o una preparación inapropiada de la unión.

Se produce entre el metal base y el metal de soldadura y también entre las capas intermedias en la soldadura de múltiples pasadas, reduciendo la





**Figura 2.16. Fusión incompleta. [5]**

resistencia de la unión. La falta de penetración por lo general se produce en la raíz de la soldadura y también contribuye a la formación de grietas. [21]

### **2.10.1.9 Desgarre laminar**

Es una discontinuidad sub-superficial en el metal base. Esta discontinuidad tiene forma similar a un terraplén, con grietas escalonadas; su orientación básica es paralela a la superficie de laminación o forjado y normalmente está localizada dentro de la zona afectada térmicamente o justo por debajo de esta. [5]

Las causas más comunes de formación son por los esfuerzos de tensión a lo largo del espesor del metal base que se generan durante las operaciones de soldadura. El desarrollo del desgarre laminar es favorecido por la presencia de inclusiones no metálicas de forma plana y paralelas a la superficie del metal base. Para prevenir este defecto es necesario reducir la cantidad de soldadura cambiar el diseño de la junta de manera que los esfuerzos de contracción estén alineados con la dirección de laminación. [5]

## **2.10.2 Discontinuidades relacionadas con requisitos dimensionales**

Los equipos y estructuras soldadas, así como las soldaduras involucradas, al igual que cualquier producto fabricado, deben cumplir con el tamaño, forma acabado y otras características dimensionales especificadas.

Los requisitos que deben satisfacer estas características y las tolerancias correspondientes están especificados en los dibujos, contratos y normas aplicables, y los bienes que no cumplen con tales especificaciones deben ser corregidos antes de su aceptación final. [5]

### **2.10.2.1 Distorsión**

El calor que se genera durante las operaciones de unión y la fusión y la solidificación del metal de soldadura provocan la expansión y contracción térmica de las partes soldadas, mismas que generan esfuerzos de gran magnitud.

Tales esfuerzos permanecen en las partes soldadas después de que estas han enfriado y causan algún grado de distorsión, que puede llegar tan severa como para extender las tolerancias dimensionales e inutilizar tales partes. [5]

Las principales acciones que pueden tomarse para minimizar y controlar la distorsión son: seleccionar los procesos de soldadura adecuados, establecer los procesos de soldadura apropiadas, usar los diseños de junta más convenientes y dispositivos de sujeción que permitan fijar rígidamente las partes a soldar.

El trabajo mecánico por medio de pequeños impactos aplicados mediante martillo, si esto es permitido por la norma aplicable y se realiza bajo

condiciones controladas, también es útil para ayudar a reducir, en cierta medida, la distorsión. [5]

### **2.10.2.2 Preparación incorrecta de la junta**

Para soldar satisfactoriamente cada unión se establece los diseños de una junta específica, con la geometría y las dimensiones consistentes con el espesor y tipo de material a soldar y con los procesos de soldadura a emplear.

Si la preparación de los bordes a unir no cumple con el diseño establecido, existirá alto riesgo de ocurrencia de discontinuidades en la soldadura, así como del incremento de distorsión. Como puede apreciarse, es un factor crítico que la preparación de la junta cumpla con el diseño establecido en dibujos y procedimientos. [5]

### **2.10.2.3 Tamaño incorrecto de la soldadura**

Los dibujos detallados, los símbolos de soldadura y las normas referidas en los contratos especifican el tamaño que debe tener toda soldadura, y cada norma establece tolerancias permitidas. Las soldaduras que no tienen el tamaño correcto, particularmente si resultan de tamaño menor al especificado (aunque algunas normas, sobre todo las europeas, tampoco permiten soldaduras de tamaño menor al especificado), se consideran defectuosas y deben ser detectadas y corregidas. Su detección se realiza por medio de su inspección visual y con calibradores de soldadura, y es una de las funciones del inspector realizar tal detención. [5]

### **2.10.2.4 Perfil incorrecto de la soldadura**

El perfil o contorno de las soldaduras ya terminadas influye en el comportamiento durante servicio de las partes soldadas, ya que las cargas involucradas pueden provocar efectos de concentración de esfuerzos en condiciones tales como soldaduras con convexidad o refuerzo excesivos. En soldaduras de pasos múltiples, el perfil inadecuado de un cordón incrementa el

riesgo de ocurrencia de discontinuidades, tales como fusión incompleta, grietas e inclusiones de escoria, al aplicar los pasos subsecuentes.

Los criterios de aceptación relacionados con los perfiles de soldadura también están incluidos en las diferentes normas, y la falta de cumplimiento con respecto a estos criterios constituye defectos de soldadura, mismo que deben ser identificados, rechazados y reportados por el inspector de soldadura a fin de que el fabricante o el contratista procedan a su corrección. [5]

### **2.11 Zona afectada por el calor (ZAC)**

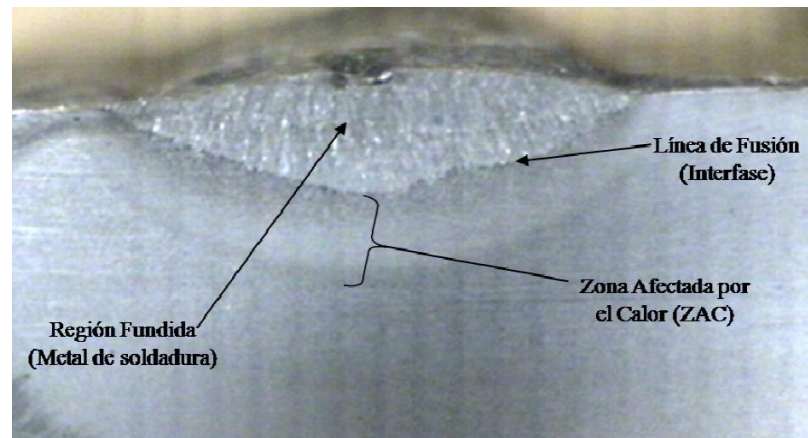
Es la región del metal base que sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento debido al aporte térmico de la soldadura. Las propiedades metalúrgicas y mecánicas de la ZAC son directamente vinculadas con los parámetros de soldadura y los tratamientos térmicos post soldadura. [15]

La resistencia mecánica y la tenacidad de la ZAC depende del tipo del metal base, y del proceso y el procedimiento de soldadura usados. Los metales base en los que más influye la soldadura son aquellos cuya ZAC se ve sometida a recocido o endurecimiento por ciclos térmicos que involucran altas temperaturas. [5]

En esta región se advierten cambios microestructurales a causa de la energía aportada. En función de las magnitudes de los distintos parámetros del proceso, se pueden obtener propiedades mecánicas similares a las del metal base, o bien, se pueden alterar dichas propiedades como consecuencia de cambios de la estructura cristalina. La ZAC engloba la totalidad de las regiones en las que se da lugar a modificaciones de carácter metalúrgico. [15]

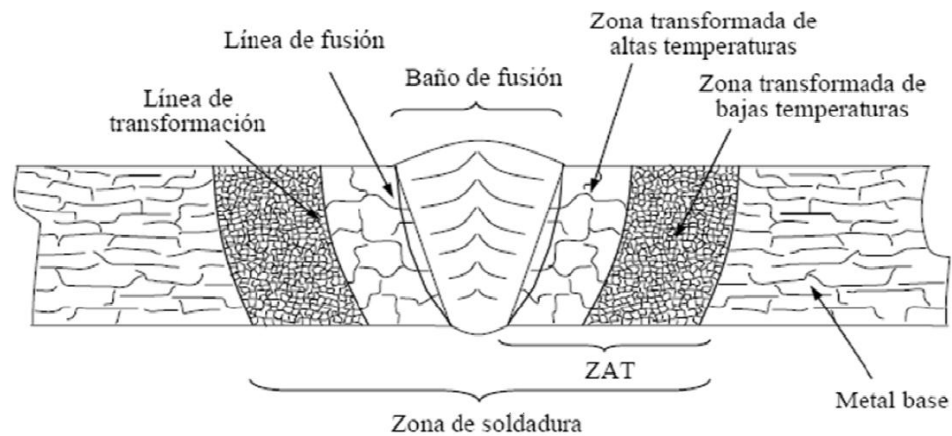
**Tabla 2.7. Defectos en soldadura SAW. [7]**

<b>Defecto</b>	<b>Causa</b>	<b>Solución</b>
Porosidad	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arco corto</li> <li>2. Tiempo insuficiente de fusión</li> <li>3. Amperaje alto</li> <li>4. Material base contaminado</li> <li>5. Fundente contaminado (humedad)</li> <li>6. Avance rápido</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantener un arco largo</li> <li>2. Tiempo suficiente para una fusión adecuada</li> <li>3. Amperaje adecuado con el electrodo y el fundente</li> <li>4. Limpieza del material base</li> <li>5. Almacenar el fundente de manera adecuada</li> <li>6. Velocidad de avance adecuada</li> </ol>
Fusión incompleta	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Velocidad de avance excesiva</li> <li>2. Electrodo muy grueso</li> <li>3. Amperaje alto</li> <li>4. Preparación defectuosa</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Selección de electrodo adecuado</li> <li>2. Amperaje adecuado para el grosor del alambre</li> <li>3. Calcular la penetración del electrodo</li> <li>4. Corregir velocidad de avance</li> <li>5. Limpiar la junta de contaminantes</li> </ol>
Distorsión	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contracción del metal base</li> <li>2. Sujeción inadecuada de las piezas</li> <li>3. Calor excesivo en la junta</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumentar la velocidad de avance</li> <li>2. Sujeción adecuada de las piezas</li> <li>3. Martillar los bordes antes de soldar</li> <li>4. Usar alambres de alta velocidad y penetración moderada</li> </ol>
Socavados	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Amperaje excesivo</li> <li>2. Diámetro incorrecto del alambre</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Empleo de diámetros de alambres adecuados</li> <li>2. Usar amperaje adecuado</li> <li>3. Evitar soldadura excesiva</li> <li>4. Rellenar correctamente el charco de soldadura</li> </ol>
Grietas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodo inadecuado</li> <li>2. Soldadura defectuosa</li> <li>3. Preparación defectuosa</li> <li>4. Unión rígida</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adaptar el diámetro del alambre al espesor de material base</li> <li>2. Calentar la junta previamente</li> <li>3. Utilizar un amperaje bajo</li> <li>4. Calentar el flux antes de ponerlo en la junta</li> <li>5. Limpiar la humedad existente</li> </ol>
Soldaduras frágiles	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodo inadecuado</li> <li>2. No precalentar las piezas</li> <li>3. Enfriamiento brusco del cordón</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tratar térmicamente el flux antes de utilizarlo</li> <li>2. Precalentar la junta</li> <li>3. Efectuar un tratamiento térmico posterior</li> <li>4. Realizar soldaduras de varias capas</li> </ol>
Inclusión de escoria	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arco demasiado corto</li> <li>2. Mal manejo del flux</li> <li>3. Corriente baja</li> <li>4. Limpieza deficiente en soldaduras de varias pasadas</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Emplear amperaje adecuado</li> <li>2. Obtener un charco de soldadura amplio</li> <li>3. Velocidad de avance adecuada</li> <li>4. Remover el resto de escoria en soldadura de varias pasadas</li> </ol>



**Figura 2.17. Estructura de una unión de soldadura de arco. [27]**

La solidificación del charco que se encuentra en el baño de fusión, en muchos casos se caracteriza por una microestructura de forma columnar; la nucleación de los granos se origina en la línea de fusión, lo que facilita el crecimiento ininterrumpido de estos granos hasta completar la fase de solidificación del material. [15]



**Figura 2.18. Regiones afectadas por el calor en una soldadura por arco eléctrico. [15]**

Hasta el momento, se ha determinado que muchas propiedades importantes de la soldadura se pueden deducir de la ZAC, produciéndose en el material mientras se suelda. Por lo tanto, con el fin de estudiar las características de la ZAC, se necesita saber la configuración de los tubos.

Es posible predecir las características básicas de la ZAC, pero aún no es posible controlarla. No hay "ZAC óptima", esto debe ser determinado a través del estudio empírico y "prueba y error". Este proceso utiliza los datos proporcionados por el operador del molino dimensionador para el diámetro del tubo, y los datos obtenidos en tiempo real de la soldadora HF para la energía de soldadura, la frecuencia y la velocidad del molino.

Singh, Garg y Shukla determinaron en 2010 que en la soldadura por arco sumergido la zona afectada por el calor, el tamaño y la calidad del grano pueden ser controlados mediante la selección de las variables de proceso. Se pueden efectuar predicciones desarrollando modelos matemáticos que pueden controlar eficazmente el área de ZAC sustituyendo los valores apropiados de las variables de proceso. [28]

Moeinifar (2009) estudió el efecto de los parámetros del proceso de soldadura por arco sumergido tándem en la zona afectada por el calor de la muestra soldada de acero de baja aleación y alta resistencia, encontrando que los ciclos térmicos de soldadura por arco sumergido tándem tiene un efecto significativo en la morfología de los componentes de martensita y austenita. [29]

Con los modelos matemáticos desarrollados para predecir las características de zonas afectadas por el calor en la soldadura por arco sumergido se ha llegado a la conclusión de que la entrada de calor y la velocidad de alimentación de alambre tienen un efecto positivo considerable en casi todas las dimensiones de la zona afectada por el calor.

La velocidad de enfriamiento de la soldadura tiene un efecto negativo en la zona afectada por el calor, mientras que el voltaje aumenta las diferentes capas de ésta; sin embargo, no hubo un efecto considerable en el stick-out. [29]

## 2.12 Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos (END) son pruebas o exámenes que son utilizadas para encontrar discontinuidades internas o superficiales y para determinar propiedades selectas en materiales, soldaduras, partes y componentes, usando técnicas que no afectan el estado físico o químico y que no dañen o destruyan a dichos materiales. [30]

Los ensayos y su introducción a la tecnología de los materiales se hacen a través del control de calidad, al mantenimiento de equipos y por cuestiones de seguridad. Esto debido a que es esencial asegurar que las condiciones de funcionalidad de un producto se cumplan dentro de las especificaciones de diseño. En consecuencia, el concepto de ensayo no destructivo constituye una herramienta de importancia relevante con un amplio campo de aplicación dentro de la ingeniería. [31]

Hay cinco elementos básicos en cualquier prueba no destructiva:

- **Fuente:** Una fuente que proporciona un medio de sondeo, es decir, algo que puede usarse con el fin de obtener información del artículo bajo prueba.
- **Modificación:** Este medio de sondeo debe cambiar o ser modificado como resultado de las variaciones o discontinuidades dentro del objeto sometido a prueba.
- **Detección:** Un detector que puede determinar los cambios en el medio de sondeo
- **Indicación:** Una forma de indicar o registrar las señales del detector.
- **Interpretación:** Un método de interpretar estas indicaciones. [32]

En el plano internacional, los ensayos son regulados por comités, organizaciones o sociedades. En la industria, es reconocido que la efectividad



de los END depende primordialmente de la capacidad de quienes son responsables de llevar a cabo estos ensayos. [30]

Los ensayos no destructivos contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme y funcional de los sistemas de elementos. Bajo el aspecto de sus aplicaciones, cubren tres amplias áreas:

1. Defectología. Detección de heterogeneidades, discontinuidades e impurezas, evaluación de corrosión y deterioro por efectos ambientales, determinación de tensiones, fugas, etc.
2. Características de los materiales. Propiedades mecánicas, físicas, químicas y estructurales.
3. Metrología. Medición. [30]

Los materiales que se pueden inspeccionar son los más diversos, entre metálicos y no metálicos, normalmente utilizados en procesos de fabricación, tales como: laminados, fundidos, forjados y otras conformaciones. Los ensayos son realizados bajo procedimientos escritos, que atienden a los requisitos de las principales normas o códigos de fabricación, tales como el ASME, ASTM, API y el AWS entre otros. [33]

En la fabricación de y/o construcción de componentes, equipos o instalaciones intervienen una serie de actividades cuya finalidad está bien definida o delimitada; estas son principalmente: el diseño, la fabricación, el montaje y, finalmente, las pruebas e inspección. [31]

De acuerdo con su aplicación, los END pueden clasificarse como:

- Técnicas de inspección superficial,
- Técnicas de inspección volumétricas, y
- Técnicas de inspección de integridad o hermeticidad. [31]

### **2.12.1 Técnicas de inspección superficial.**

Con este tipo de pruebas se pueden determinar la integridad superficial de un material. Por tal razón, su aplicación es conveniente cuando es necesario detectar discontinuidades que están en la superficie, abiertas a esta o a profundidades no mayores a 3 mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de los siguientes métodos de ensayo:

#### **2.12.1.1 Inspección visual.**

Esta es una técnica que requiere de una gran cantidad de información acerca de las características de las piezas a ser examinadas, para realizar una acertada interpretación de las posibles discontinuidades. Cuando se aplica de manera correcta, detecta problemas que pudieran ser mayores en pasos subsecuentes de la producción o durante el servicio del componente. Aunque para ciertas aplicaciones no es recomendable, es posible determinar muchos problemas en casos determinados, mediante la inspección realizada por una persona bien entrenada. [31]

Durante la realización de esta actividad, el factor más importante es el ojo humano; la aplicación básica consiste en que el examinador cumpla con los requerimientos de visión necesarios.

Cuando se realiza un examen visual se debe utilizar una iluminación adecuada; en condiciones generales de inspección (donde sólo se requiere de apreciar a simple vista el componente o pieza) una iluminación de 15 candelas/ft será suficiente, pero si el examen requiere una apreciación más específica de los detalles, tendrá que ser realizada con una intensidad de 50 candelas/ft. Esta puede ser proporcionada con iluminación natural o conseguida por medios artificiales, por medio de lámparas. [30]

## Herramientas de la inspección visual

Tal vez uno de los mayores problemas de la aplicación de la inspección visual es comprender que no se puede ver todo con la observación directa y que es necesaria la comprensión de planos y dibujos técnicos, además de emplear diferentes instrumentos, entre los cuales se encuentran:

- a. Lentes de aumentos o lupas. Normalmente tienen aumentos de 5x a 10x; son utilizados para los estudios denominados macroscópicos. Tienen un bajo costo y abarca una amplia zona de inspección.
- b. Sistemas de interferencias cromáticas. Se utiliza luz polarizada sobre una superficie reflejante, encontrando discontinuidades por medio de patrones cromáticos formados en las zonas donde estas se encuentran.
- c. Endoscopios. Es un sistema que ha sido ampliamente difundido como una técnica nueva de inspección visual, debido a que permite inspeccionar el interior de los componentes sin desarmar los equipos.

### 2.12.1.2 Líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes es un método no destructivo que permite la detección de discontinuidades en materiales sólidos no porosos tales como metales cerámicos, vidrios y plásticos, siempre y cuando las discontinuidades se encuentren abiertas a la superficie. [34]

El método o prueba de líquidos penetrantes se basa en el principio físico conocido como "*capilaridad*" y consiste en la aplicación de un líquido, con buenas características de penetración en pequeñas aberturas, sobre la superficie limpia del material a inspeccionar.

Una vez que ha transcurrido un tiempo suficiente como para que el líquido recién aplicado penetre considerablemente en cualquier abertura superficial, se realiza una remoción o limpieza del exceso de líquido penetrante,

mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.) y, a continuación se aplica un líquido absorbente, comúnmente llamado revelador, de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales.

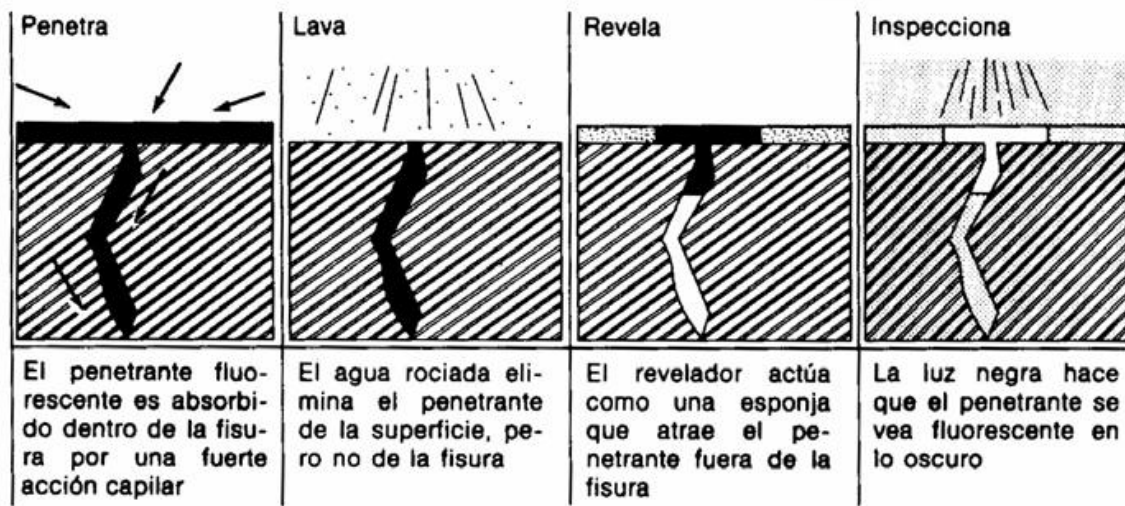


Figura 2.19. Inspección por líquidos penetrantes (técnica fluorescente). [32]

Por consiguiente, las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente, son áreas que contienen discontinuidades superficiales (grietas, perforaciones, etc.)

En general, existen dos principales técnicas del proceso de aplicación de los líquidos penetrantes: la diferencia entre ambas es que, en una se emplean líquidos penetrantes que son observables a simple vista ó con ayuda de luz artificial blanca y, en la segunda, se emplean líquidos penetrantes que solo son visibles al ojo humano cuando se les observa en la oscuridad y utilizando luz negra o ultravioleta, lo cual les da un aspecto fluorescente.

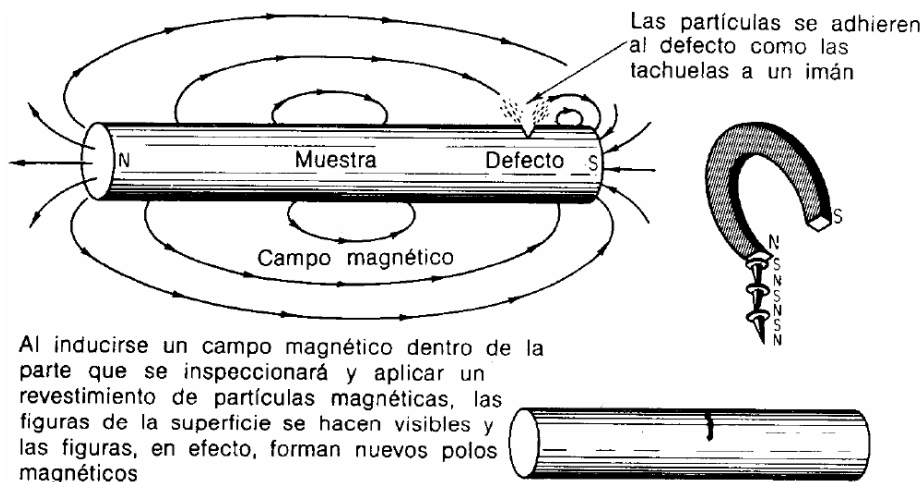
Estas dos principales técnicas son comúnmente conocidas como *líquidos penetrantes visibles* y *líquidos penetrantes fluorescentes*. Cada una de estas, pueden a su vez, ser divididas en tres sub-técnicas: aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con agua, aquellas en las que se utiliza líquidos

removibles con solvente y aquellas en las que se utilizan líquidos post-emulsificables. [35]

### 2.12.1.3 Partículas magnéticas

Este método se basa en el principio físico conocido como *magnetismo*, el cual exhiben principalmente los materiales ferrosos como el acero y, consiste en la capacidad o poder de atracción entre metales.

Si un material magnético presenta discontinuidades en su superficie, éstas actuarán como polos, y por tal, atraerán cualquier material magnético o ferromagnético que esté cercano a las mismas. De esta forma, un metal magnético puede ser magnetizado local o globalmente y se le pueden esparcir sobre su superficie, pequeños trozos o diminutas *Partículas Magnéticas* y así observar cualquier acumulación de las mismas, lo cual es evidencia de la presencia de discontinuidades sub-superficiales y/o superficiales en el metal. [34]



**Figura 2.20. Inspección por partículas magnéticas. [32]**

Este método está limitado a la detección de discontinuidades superficiales y en algunas ocasiones sub-superficiales. Así mismo, su aplicación también se encuentra limitada por su carácter magnético, es decir, solo puede ser aplicada en materiales ferromagnéticos. Aún así, este método es

ampliamente utilizado en el ámbito industrial y algunas de sus principales aplicaciones las encontramos en:

- El control de calidad o inspección de componentes maquinados.
- La detección discontinuidades en la producción de soldaduras.
- En los programas de inspección y mantenimiento de componentes críticos en plantas químicas y petroquímicas (recipientes a presión, tuberías, tanques de almacenamiento, etc.)
- La detección de discontinuidades de componentes sujetos a cargas cíclicas (discontinuidades por Fatiga). [34]

En general, existen dos principales medios o mecanismos mediante los cuales se puede aplicar las partículas magnéticas, estos son: *vía húmeda* y *vía seca*. Cuando las partículas se aplican en vía húmeda, éstas normalmente se encuentran suspendidas en un medio líquido tal como el aceite o el agua. En la aplicación de las partículas magnéticas vía seca, éstas se encuentran suspendidas en aire.

Así mismo, existen dos principales tipos de partículas magnéticas: aquellas que son visibles con luz blanca natural o artificial y aquellas cuya observación debe ser bajo luz negra o ultravioleta, conocidas comúnmente como partículas magnéticas fluorescentes. [34]

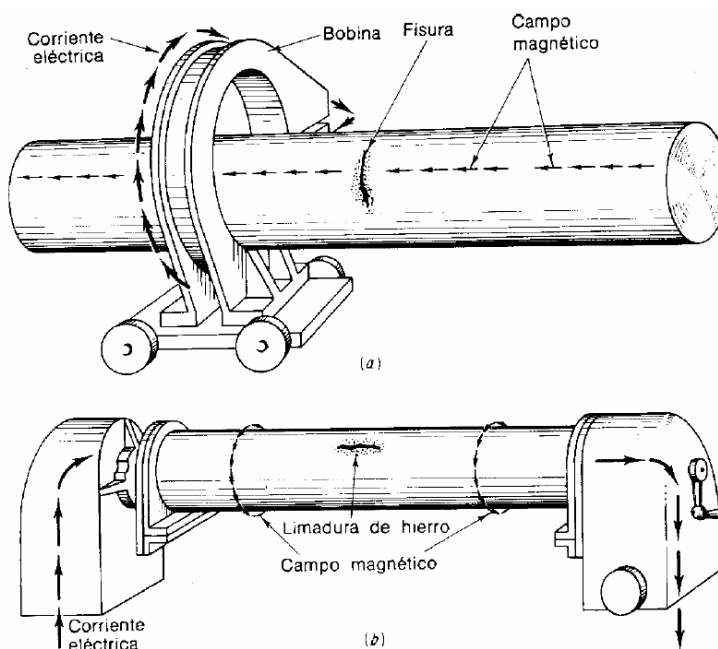
Se puede obtener una magnetización longitudinal, es decir, el campo magnético puede producirse en una dirección paralela a lo largo del eje mayor de la pieza de trabajo colocando la pieza en una bobina excitada por una corriente eléctrica, de modo que el eje más largo de la pieza esté paralelo al eje de la bobina. En el caso de magnetización circular se produce un campo magnético transversal al eje mayor de la pieza de trabajo, pasando corriente de magnetización a través de la pieza y recorriendo todo lo largo de su eje.

La corriente directa, la corriente alterna y la corriente alterna rectificada se emplean con fines de magnetización. La corriente directa es más sensible que la alterna para detectar discontinuidades no abiertas a la superficie. La corriente alterna detectará discontinuidades abiertas a la superficie y se emplea cuando la detección de este tipo de discontinuidad es el único fin de la prueba. Cuando la corriente alterna está rectificada, proporciona un campo magnético más penetrante. [32]

## 2.12.2 Técnicas de inspección volumétrica

### 2.12.2.1 Radiografía

La radiografía como método de prueba no destructivo, se basa en la capacidad de penetración que caracteriza principalmente a los *Rayos X* y los *Rayos Gama*.



**Figura 2.21. Tipos de magnetización: a) Magnetización longitudinal y b) Magnetización circular. [32]**

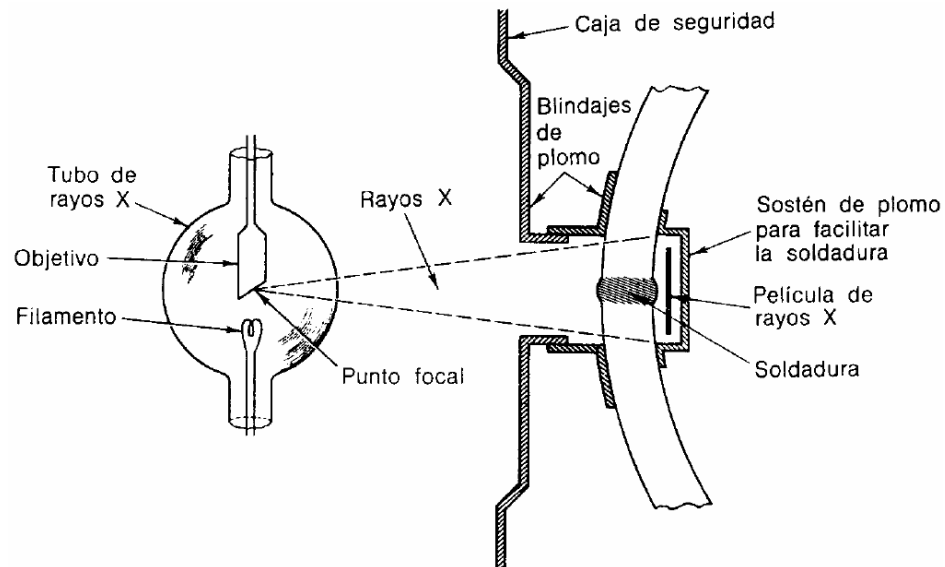
Con este tipo de radiación es posible irradiar un material y, si internamente, este material presenta cambios internos considerables como para dejar pasar, o bien, retener dicha radiación, entonces es posible determinar la presencia de dichas irregularidades internas, simplemente midiendo o caracterizando la radiación incidente contra la radiación retenida o liberada por el material. [34]

Los rayos X se producen cuando la materia es bombardeada por un haz de electrones que se mueven rápidamente. Cuando los electrones se detienen de repente por la materia, parte de su energía cinética se convierte en energía de radiación o rayos X. Las condiciones esenciales para la generación de rayos X son:

- a) Un filamento (cátodo) que proporciona la fuente de electrones que se dirigen hacia el objetivo,
- b) Un objetivo (ánodo) localizado en la trayectoria de los electrones,
- c) Una diferencia de voltaje entre el ánodo y el cátodo, con lo que se regulará la velocidad de los electrones que inciden sobre el objetivo, regulando la longitud de onda de rayos X producidos, y
- d) Un medio de regular la corriente del tubo para controlar el número de electrones que chocan contra el objetivo. Los requisitos a) y b) los proporciona generalmente el tubo de rayos X. [32]

Comúnmente, una forma de determinar la radiación que pasa a través de un material, consiste en colocar una película radiográfica, cuya función es cambiar de tonalidad en el área que recibe radiación. La fuente radiactiva emite radiación a un material metálico el cual, si presenta internamente discontinuidades o defectos, los cuales pueden contener aire, gas u otro elemento metálico o no metálico, deja o impiden pasar más cantidad de radiación que en cualquier otra parte del material. El resultado queda plasmado en la película radiográfica situada en la parte inferior del material metálico. [34]





**Figura 2.22. Esquema del ensayo por radiografías. [32]**

La radiación de la fuente se ve influida por el material sometido a prueba. Conforme el espesor aumenta, la intensidad de radiación que alcanza al detector disminuye. Si la respuesta del detector es calibrada con base en espesores conocidos, la lectura del detector se puede usar para indicar el espesor del material revisado. Con un circuito de retroalimentación adecuado, el detector puede emplearse para controlar el espesor entre límites predeterminados. [32]

Sin embargo, este método también tiene sus limitaciones. El equipo necesario para realizar una prueba radiográfica puede representar una seria limitación si se considera su costo de adquisición y mantenimiento. Más aún, dado que en este método de prueba se manejan *materiales radiactivos*, es necesario contar con un permiso autorizado para su uso, así como también, con detectores de radiación para asegurar la integridad y salud del personal que realiza las pruebas radiográficas. [34]

### 2.12.2.2 Ultrasonido

Un método muy antiguo es utilizar ondas de sonido para determinar defectos. Si una pieza de metal es golpeada con un martillo, producirá ciertas notas audibles, las cuales pueden alterarse en resonancia y tono por la presencia de imperfecciones internas. Sin embargo, esta técnica de golpear con un martillo y escuchar el sonido es útil sólo para detectar grandes defectos. Un método más depurado consiste en utilizar ondas de sonido fuera del intervalo auditivo, con una frecuencia de 1 a 5 millones de Hz (ciclos por segundo)- de aquí el término *ultrasónico*. [32]

El método de ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. Estas ondas de sonido son transmitidas a través de un sensor o transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material. Este sensor, contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de los megahertz (inaudible al oído humano).

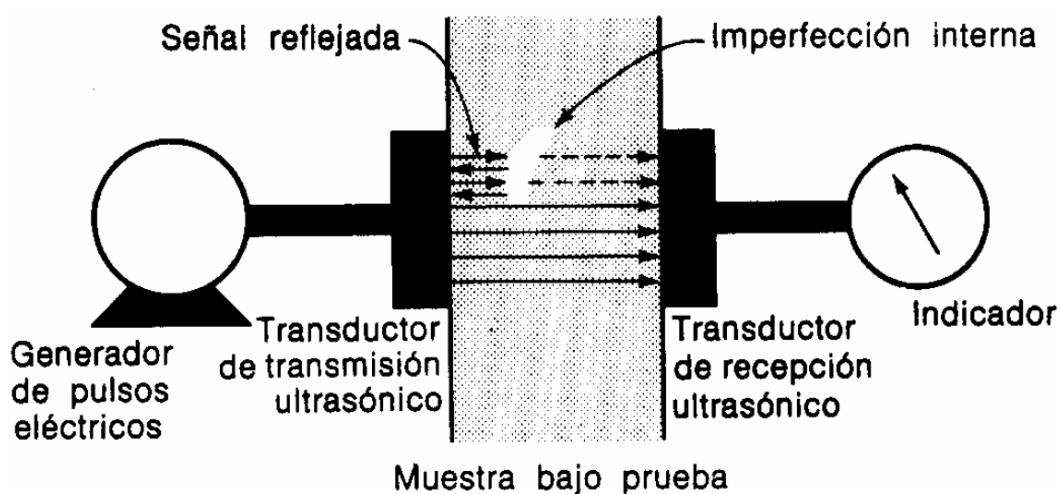


Figura 2.23. Inspección por ultrasonido de transmisión continua. [32]

El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propaga a través del material hasta que pierde por completo su intensidad ó hasta que topa con una *interfase*, es decir algún otro material tal como el aire o el agua y, como consecuencia, las ondas pueden sufrir *reflexión, refracción, distorsión*, etc. Lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales. [34]

Existen dos métodos de prueba ultrasónicos comunes: el de transmisión continua y el de eco-pulsos. El primero utiliza un transductor en cada lado del objeto que va a revisarse. Si al cristal transmisor se le aplica un pulso eléctrico de la frecuencia deseada, las ondas ultrasónicas producidas se desplazarán a través de la muestra hasta el otro lado.

El transductor de recepción situado en el lado opuesto recibe las vibraciones y las convierte en una señal eléctrica que se puede amplificar y observar en el tubo de rayos catódicos de un osciloscopio, un medidor o algún otro indicador. Si la onda ultrasónica viaja a través de la muestra sin encontrar ninguna imperfección, la señal recibida será relativamente grande. Si hay imperfección en la trayectoria de la onda ultrasónica, parte de la energía se reflejará y la señal que recibirá el transductor de recepción se reducirá. [32]

El método del eco-pulso utiliza sólo un transductor que sirve como transmisor y como receptor. Conforme la onda sonora penetra en el material sometido a prueba, parte de ella se refleja de vuelta al cristal, donde se convierte en un impulso eléctrico.

Este impulso se amplía y hace visible, apareciendo como una indicación o señal sobre la pantalla del osciloscopio. Cuando la onda sonora alcanza el otro lado del material, se refleja de regreso al cristal y se ve como otra señal sobre la pantalla hacia la derecha de la primera señal. Si hay imperfección entre las superficies frontal y posterior del material, se delatará sobre la pantalla como

una tercera señal entre las dos indicaciones correspondientes a las superficies frontal y posterior.

Como las indicaciones en la pantalla del osciloscopio miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso desde la superficie frontal y posterior, la distancia entre indicaciones es una medida del espesor del material. Por tanto, la localización de un defecto puede determinarse con exactitud por la indicación que aparece sobre la pantalla. [32]

De esta manera, es posible aplicar el método de ultrasonido para determinar ciertas características de los materiales tales como:

- Velocidad de propagación de ondas.
- Tamaño de grano en metales.
- Presencia de discontinuidades (grietas, poros, laminaciones, etc.)
- Adhesión entre materiales.
- Inspección de soldaduras.
- Medición de espesores de pared.

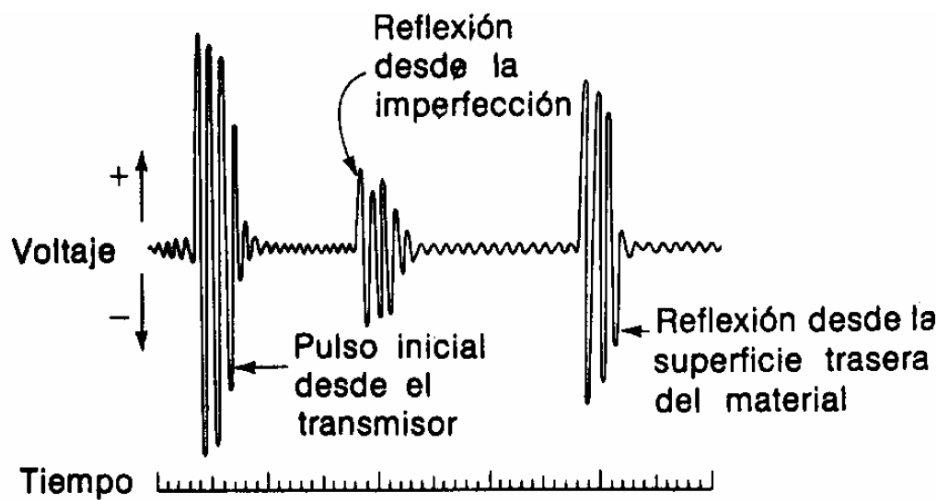


Figura 2.24. Gráfica de un osciloscopio de ultrasonido de eco-pulsos. [32]

Como puede observarse, con el método de ultrasonido es posible obtener una evaluación de la condición interna del material en cuestión. Sin embargo, el método de ultrasonido es más complejo en práctica y en teoría, lo cual demanda personal calificado para su aplicación e interpretación de indicaciones o resultados de prueba. [34]

# **CAPÍTULO 3**

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA**

La industria petrolera se perfila hoy en día como la principal proveedora de combustibles utilizados por industrias de diversas índoles, que van desde el transporte, la producción de materiales sintéticos y su uso como combustibles. Esto ha desencadenado la búsqueda de nuevas tecnologías de exploración, producción y transporte de este recurso, de manera que sean eficientes y a costos de producción y fabricación menores.

La parte medular de esta industria radica en el transporte del petróleo y sus derivados, los cuales son compuestos volátiles que deben ser manejados con meticulosa seguridad. Para esto se utilizan redes de tuberías, generalmente fabricadas con aceros de ciertas características mecánicas, capaces de resistir las condiciones ambientales extremas y de uso.

### **3.1 Efecto de los parámetros de soldadura**

En la fabricación de tuberías por el proceso de arco sumergido (SAW) se ven implicadas distintas variantes que pueden influir en la geometría de las uniones, propiciar la aparición de defectos y así modificar las propiedades del acero debido a diversos factores como la entrada de calor, la velocidad de enfriamiento, así como la adición de elementos de aleación que le confieren características específicas al metal soldado.

La selección de los parámetros de soldadura es determinante para:

- Garantizar altas propiedades de funcionamiento de la unión,
- Evitar el uso excesivo de material de aporte, y
- Repetitividad de la calidad de las soldaduras en un nivel aceptable en términos de imperfecciones de soldadura. [36]

#### **3.1.1 Efectos de los parámetros de soldadura en las características de la unión**

La polaridad, aunada a la corriente, tiene efectos significativos en la geometría del cordón de soldadura, coronas más altas se asocian con polaridades positivas (CDEP) y cordones más anchos en soldaduras de polaridades negativas. Al igual que en cordones efectuados con polaridad negativa, el efecto producido por el aumento del amperaje tiene consecuencias directas en la forma del mismo, debido a que el aumento de este parámetro deriva en el aumento de su anchura.

Esta característica se repite con el aumento de la tensión o voltaje, aunque también tiene que ver con la penetración. Otro parámetro que influye en la geometría del cordón es la velocidad de soldadura, mayores velocidades implican anchuras más grandes y coronas más bajas. Factores en los

consumibles, como el diámetro del alambre, repercute en la cantidad de deposición de metal de aporte además que al aumentarlo, es necesario un incremento en valores como el voltaje y amperaje, teniendo efectos directos en la entrada de calor de la soldadura, que como se ha mencionado, define la microestructura final del metal en la unión. [37]

### **3.1.2 Efecto de los parámetros de soldadura en la aparición de defectos**

De acuerdo con las causas de la formación de la soldadura, las imperfecciones se pueden dividir en:

- Imperfecciones de soldadura que son el resultado de una soldadura o condiciones tecnológicas inadecuadas de soldadura, incluyen discrepancia de forma y superficie, en la penetración de la soldadura, fusión incompleta, inclusiones sólidas metálicas o no metálicas;
- Imperfecciones como grietas o microgrietas, porosidades derivadas de gases, segregación en la composición química y cambios estructurales desfavorables en la zona afectada por el calor. [36]

La selección inadecuada de los parámetros como el amperaje puede ocasionar la aparición de imperfecciones dentro o fuera del cordón de soldadura, en este caso si es demasiado alto, puede causar una excesiva fusión y un charco de soldadura más amplio, lo cual podría disminuir el grado de protección contra el aire causando porosidades; por el contrario, si es muy baja ocasionará que no exista una fusión adecuada entre el metal de aporte y el metal base, causando faltas de fusión; esto último es muy similar cuando se habla del voltaje, menores cantidades de tensión pueden derivar en faltas de fusión.



Una velocidad de avance lenta previene la formación de discontinuidades como porosidades pero aumenta la altura del refuerzo, velocidades más altas no permite el desarrollo adecuado del charco de la soldadura evitando que se funda completamente la escoria o permite un enfriamiento más rápido atrapando gases y evitando su expulsión del cordón.

## **CAPÍTULO 4.**

# **CASO DE ESTUDIO**

En el siguiente caso de estudio, se realizaron uniones soldadas con el proceso de arco sumergido, en tuberías de acero API grado X-70 de 0.500 in. de espesor de pared; el tipo de unión utilizada fue a tope con bisel cuadrado, previamente unida con soldadura por resistencia de alta frecuencia (ERW, por sus siglas en inglés). Las pruebas realizadas consistieron en la variación de parámetros esenciales del proceso de soldadura, los cuales fueron la corriente o amperaje (A), la tensión o voltaje (V) y la velocidad de avance. Dichos parámetros serán descritos a detalle más adelante.

Se realizó una inspección por ultrasonido para determinar la aparición de defectos en el cordón de soldadura; posteriormente se realizó la preparación de las muestras, para conocer la microestructura tanto del metal de soldadura como de la zona afectada por el calor y el metal base a través del microscopio óptico. Por último se realizó un ensayo de microdureza para conocer el grado de dureza de las diferentes zonas de la soldadura.

## 4.1 Materiales

### 4.1.1 Material base.

Se utilizaron placas de acero API X-70, que de acuerdo con la norma API 5L, tiene las siguientes características mecánicas:

**Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del acero API X-70. [10]**

Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia		Esfuerzo máximo de fluencia		Mínimo esfuerzo de tracción		Máximo esfuerzo de tracción	
	PSI	MPa	PSI	MPa	PSI	Mpa	PSI	Mpa
X65	65,000	448	87,000	600	77,000	531	110,000	758
<b>X70</b>	<b>70,000</b>	<b>483</b>	<b>90,000</b>	<b>621</b>	<b>82,000</b>	<b>565</b>	<b>110,000</b>	<b>758</b>
X80	80,000	552	100,000	690	90,000	621	120,000	827

La composición química del material base utilizada queda ilustrada en la siguiente tabla:

**Tabla 4.2. Composición química (% e.p.) del acero API X70. [10]**

Grado	Porcentaje en peso, basado en el calor y el análisis del producto							
	C	Mn	P		S	V	Nb	Ti
	Max.	Max.	Min.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
<b>Tubería soldada</b>								
<b>X70</b>	<b>0.26</b>	<b>1.65</b>	<b>-</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>F</b>	<b>f</b>	<b>F</b>
c - Salvo otro requerimiento, la suma de los contenidos de niobio y vanadio deberán ser 0,06%.								
d - La suma de las concentraciones de niobio, vanadio y titanio será del 0,15%.								
f - Salvo otro requerimiento, la suma de las concentraciones de niobio, vanadio y titanio será del 0,15%.								

### 4.1.2 Material de aporte

Se utilizó un electrodo de contenido medio de manganeso. De acuerdo con la especificación AWS A5.17, la composición química requerida del metal de aporte en combinación con el fundente es la siguiente:

**Tabla 4.3. Composición química (% e.p.) requerida para electrodos sólidos. [37]**

Composición química requerida para electrodos sólidos								
Clasificación	Número UNS	% en peso						
		C	Mn	Si	S	P	Cu	Ti
F7A4M-EM12K	Ko1113	0.05/0.15	0.8/1.25	0.10/0.35	0.03	0.03	0.35	-

## 4.2 Metodología

Se realizaron 4 pruebas con variación de variables esenciales como son características eléctricas y velocidad de avance, posteriormente se evaluó la cantidad de discontinuidades que afectan las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las diversas zonas de la unión.

Se utilizaron placas de acero API X-70 unidas a tope; las dimensiones de las placas antes mencionadas fueron de 10 in. de ancho, 15 in. de largo y un espesor de 0.500 in. Los parámetros utilizados para las pruebas fueron los siguientes:

**Tabla 4.4. Parámetros utilizados en el experimento.**

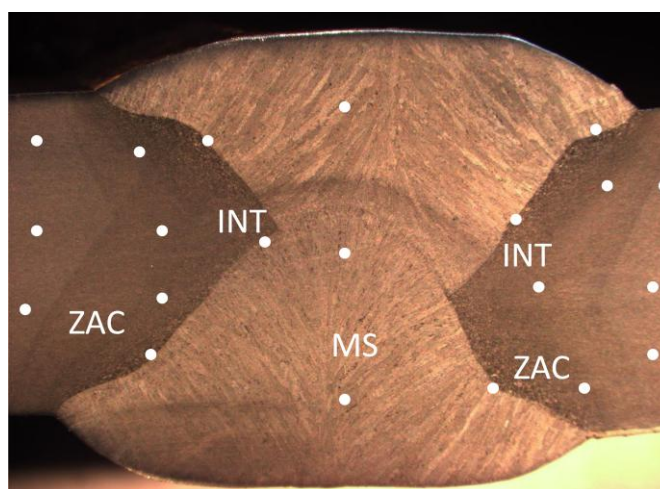
Prueba	Espesor (in.)	Fundente-alambre (AWS)	V	A	Vel. Avance (in/min)
1	0.5	F 7A4-EM12(K)	35	615	21
2	0.5	F 7A4-EM12(K)	37	615	21
3	0.5	F 7A4-EM12(K)	35	800	21
4	0.5	F 7A4-EM12(K)	35	615	23

La prueba 1 fue realizada con parámetros utilizados en la planta 1 de Tubacero S.A. de C.V. En base a esta prueba se fueron variando ciertos parámetros para evaluar los cambios que pudieran haberse realizado en las propiedades del metal en cada parte de la unión soldada así como su repercusión en la aparición de defectos en el cordón longitudinal.

Las pruebas fueron evaluadas para la detección de defectos con ultrasonido, debido a que con esta técnica de inspección es posible detectar discontinuidades superficiales, sub-superficiales además de discontinuidades dentro del metal soldado.

Posterior a la inspección, se prepararon muestras para su evaluación metalográfica, estas fueron atacadas con reactivo nital al 2%. Se observó la zona de soldadura, la zona afectada por el calor, la interfase soldadura-metal base y el metal base a magnificaciones de 100X, 200X y 500X.

Se evaluó la microdureza de cada una de las zonas de la soldadura en las cuatro pruebas; esta medición esquematizada se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1. Ubicación de ensayos de microdureza en la unión soldada: Metal base, metal de soldadura (MS), zona afectada por el calor (ZAC) e interfase (INT).**

## 4.3 Resultados

Después de analizar las soldaduras realizadas, se procedió a recopilar los resultados obtenidos.

### 4.3.1 Discontinuidades

En primera instancia se realizó la recopilación de los resultados de la inspección por ultrasonido en las cuatro pruebas. En la figura 4.2 se muestran las imperfecciones encontradas con el equipo OmniScan MX de la marca Olympus. La figura 4.2 A representa la muestra con los parámetros utilizados en la fabricación de tuberías de la empresa Tubacero S.A. de C.V. (ver tabla 4.4); la figura 4.2 B representa la muestra con una variación de voltaje de 35 a 37 V; la figura 4.2 C representa la muestra con una variación de amperaje de 615 a 800 V; por último, la figura 4.2 D representa la muestra con una variación de velocidad de avance de 21 a 23 in/min.

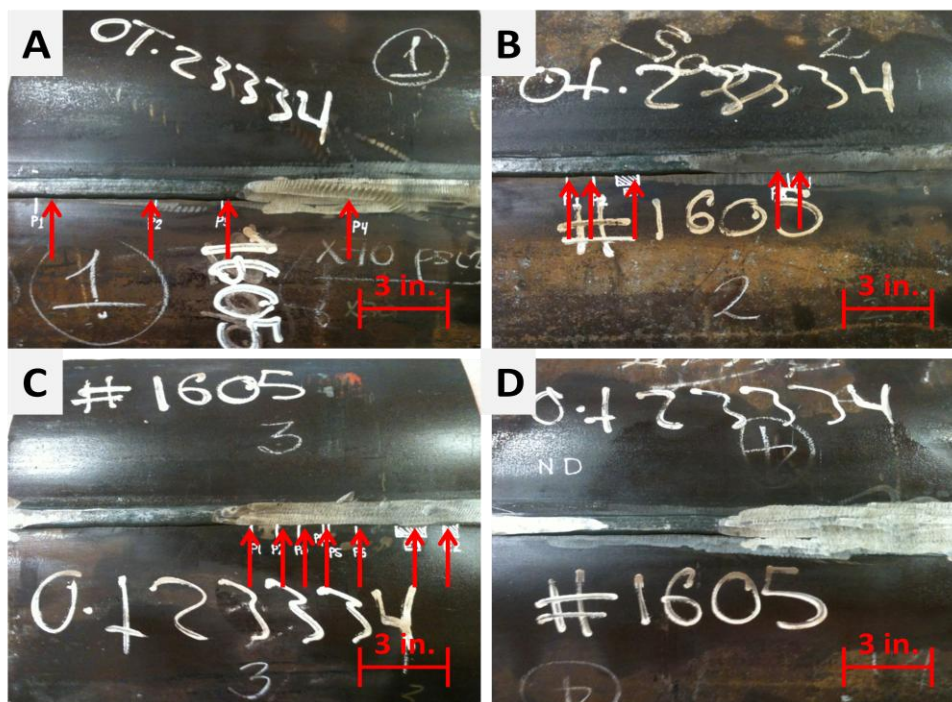
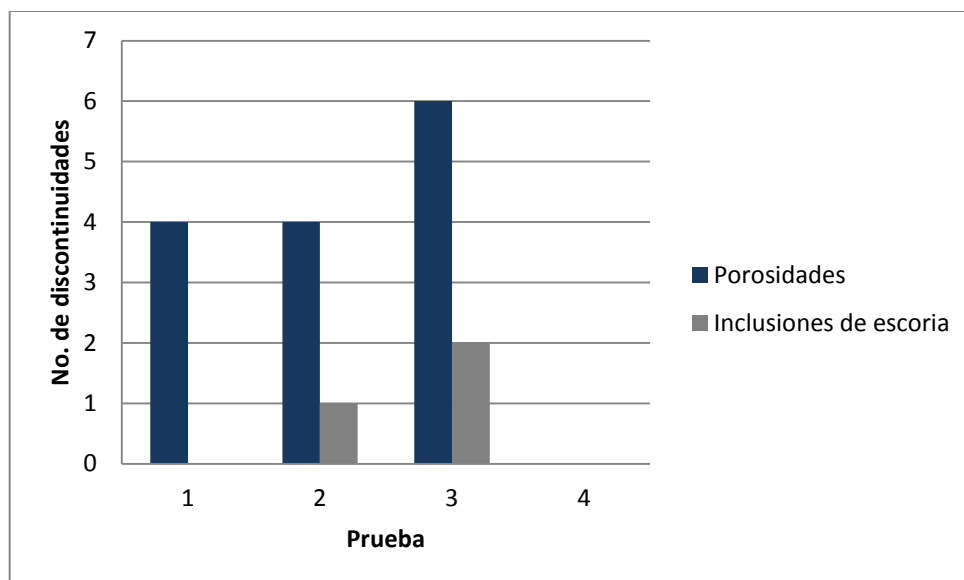


Figura 4.2. Detección de discontinuidades en pruebas con ultrasonido. A) Prueba 1; B) Prueba 2; C) Prueba 3; D) Prueba 4

En relación a la cantidad de discontinuidades manifestadas en las soldaduras, el inciso C presenta porosidades agrupadas e inclusiones de escoria; en el inciso A se presentan porosidades distribuidas uniformemente en la longitud del cordón; el inciso B presenta porosidades agrupadas e inclusión de escoria.

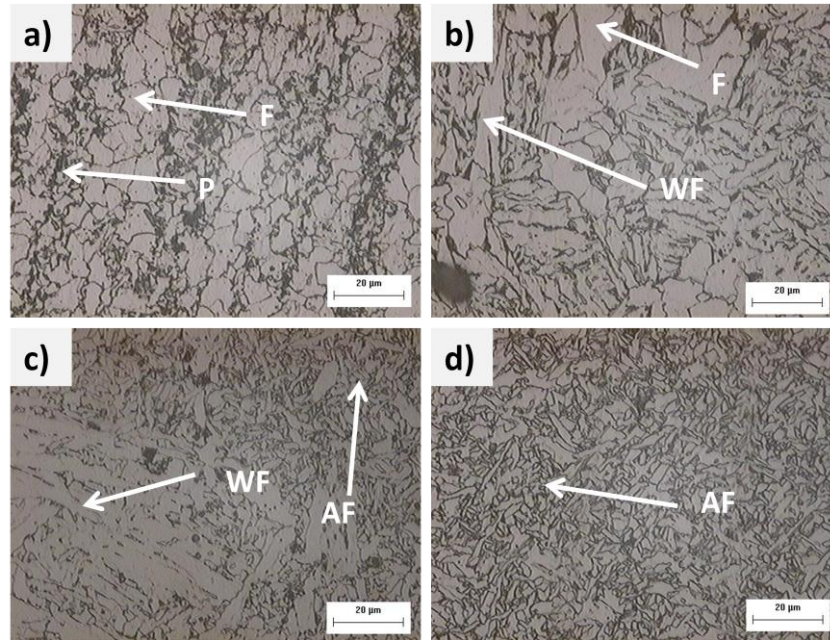
Las discontinuidades detectadas tiene un tamaño que oscila entre 1/32 a 1/16 in. La figura 4.3 presenta una gráfica de comparación de aparición de discontinuidades entre las muestras A, B, C y D.



*Figura 4.3. Gráfica de incidencia de discontinuidades.*

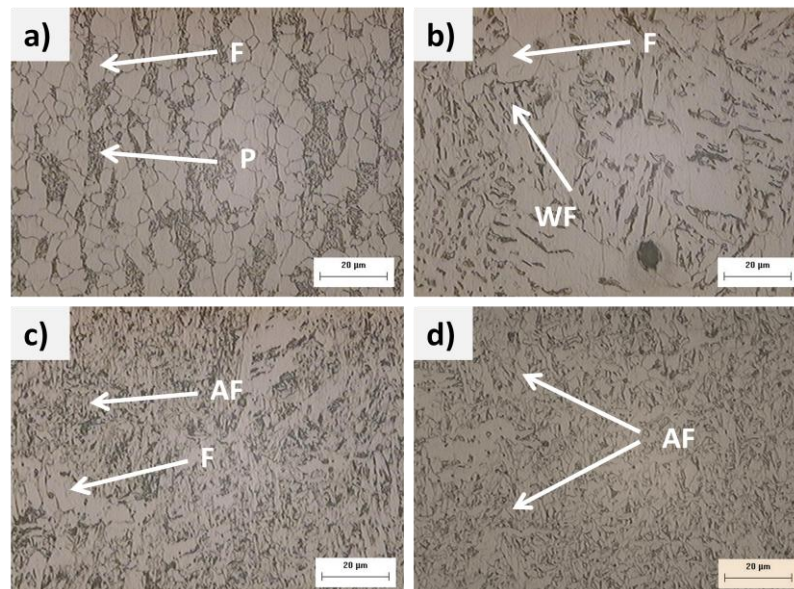
### 4.3.2 Microestructura

Se realizó una prueba de microscopía óptica en cada una de las muestras para determinar la microestructura existente en las distintas zonas de las uniones soldadas. La figura 4.4 muestra la microestructura a magnificación de 500X del metal de soldadura, metal base, ZAC e interfase de la prueba 1.



**Figura 4.4. Microestructura de la prueba 1: a) Metal base; b) ZAC; c) Interfase; d) Metal de soldadura.**

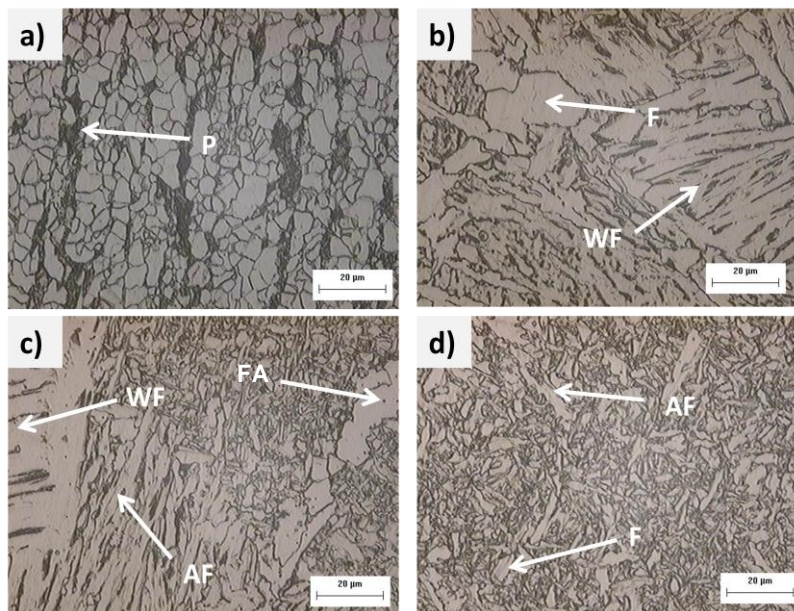
En la figura 4.5 se muestra la microestructura a magnificación de 500X del metal de soldadura, metal base, ZAC e interfase de la prueba 2.



**Figura 4.5. Microestructura de la prueba 2: a) Metal base; b) ZAC; c) Interfase; d) Metal de soldadura.**

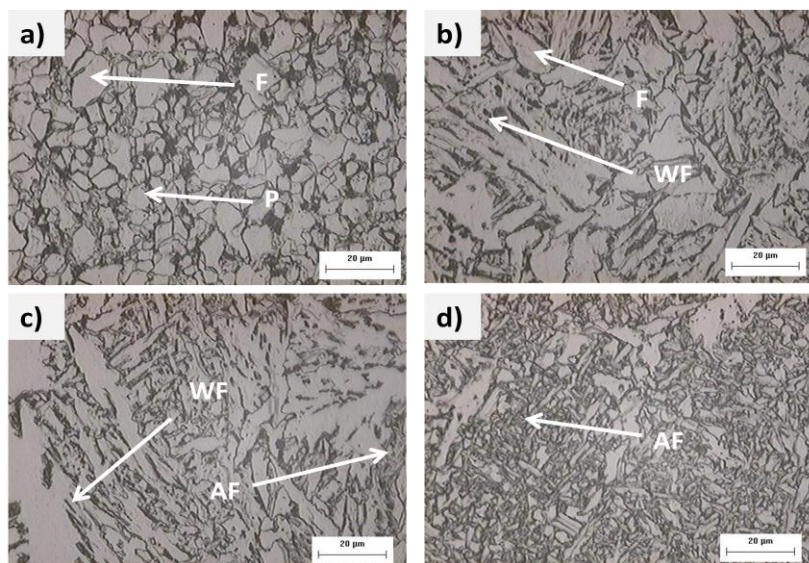


La figura 4.6 muestra la microestructura a magnificación de 500X del metal de soldadura, metal base, ZAC e interfase de la prueba 3.



**Figura 4.6. Microestructura de la prueba 3: a) Metal base; b) ZAC; c) Interfase; d) Metal de soldadura.**

Por último, en la figura 4.7 se muestra la microestructura a magnificación de 500X del metal de soldadura, metal base, ZAC e interfase de la prueba 4.



**Figura 4.7. Microestructura de la prueba 4: a) Metal base; b) ZAC; c) Interfase; d) Metal de soldadura.**

### 4.3.3 Microdureza.

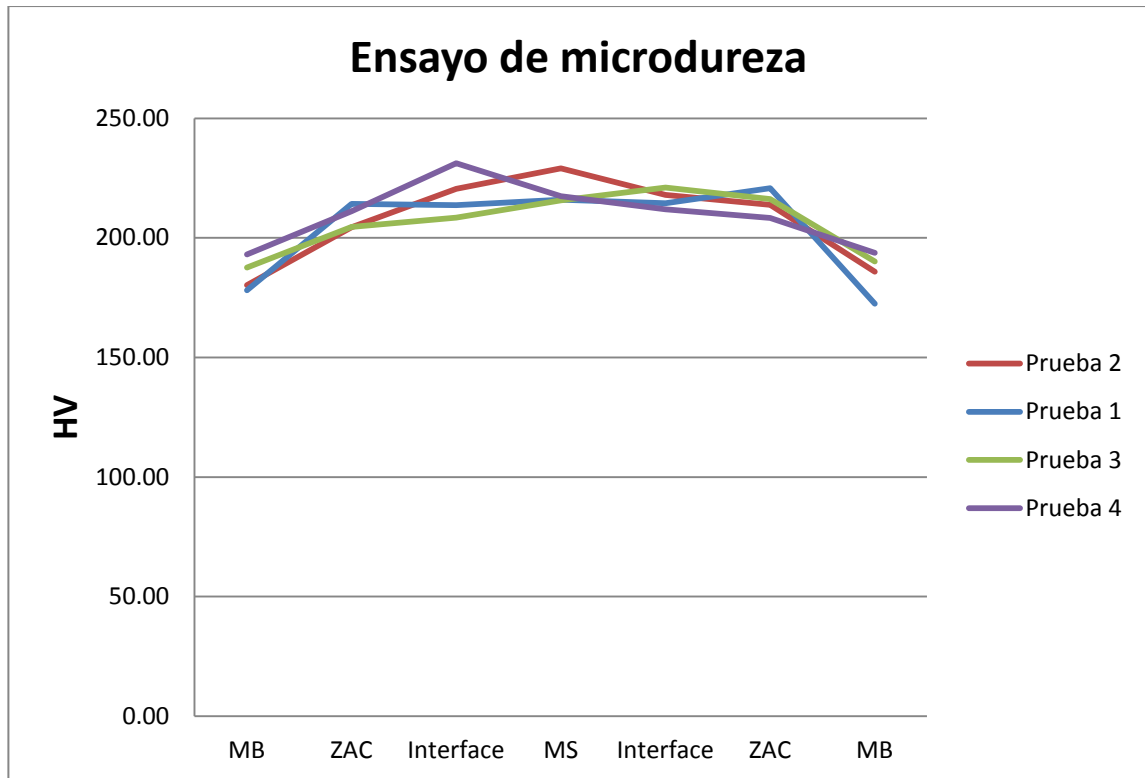
Se efectuaron pruebas de dureza tal y como se indica en la figura 4.1, recopilándose los siguientes datos.

**Tabla 4.5. Resultados de microdurezas en pruebas.**

Microdurezas promedio (HV)							
Prueba	Zona						
	MB	ZAC	Interfase	MS	Interfase	ZAC	MB
1	184.1	211.5	224.2	228.5	205.9	220.8	169.3
	180.8	220.4	199.6	200.8	214.1	220.8	171.8
	169.5	210.9	217.4	218.7	223.5	220.8	176.3
	178.13	214.27	213.73	216.00	214.50	220.80	172.47
2	183.9	184.9	221.4	227.7	221.1	212.8	197.8
	185.7	211.2	215.4	220.8	217.4	206.2	185.2
	171.3	217.1	224.6	238.8	215.4	222.5	174.4
	180.30	204.40	220.47	229.10	217.97	213.83	185.80
3	195.8	190	209.9	219.4	225.6	215.7	186.8
	187.6	210.9	207.1	218.1	230.3	225.3	200.2
	179.3	212.8	208.4	209.6	207.1	207.7	183.4
	187.57	204.57	208.47	215.70	221.00	216.23	190.13
4	203.5	226.3	238.8	222.1	210.6	211.2	189.7
	183.9	200.2	241.9	222.5	209	210.2	196.1
	191.9	206.8	213.1	207.7	216.4	203.8	195.5
	193.10	211.10	231.27	217.43	212.00	208.40	193.77

Los números en color rojo representan la dureza promedio (medida en dureza Vickers) de las probetas. Las mediciones que se obtuvieron denotaron una consistencia en los datos obtenidos, con variaciones máximas promedio de 15 HV aproximadamente, considerándose despreciables. La mayor medición de dureza fue localizada en la zona de interfase de la prueba 4; dicha zona obtuvo una dureza promedio de 231.27 HV. La zona de menor dureza fue el metal base en la prueba 1, con una dureza promedio de 172.47 HV.

En la figura 4.6 se muestra una gráfica de las durezas promedio en las cuatro pruebas, en la cual se aprecian valores similares entre cada gráfico, por lo que se considera que la variación de parámetros no afectan en gran medida la dureza de las pruebas.



**Figura 4.8. Gráfico de durezas promedio en pruebas soldadas con SAW.**

# CONCLUSIONES

De acuerdo con expuesto en los capítulos anteriores, las conclusiones que se obtuvieron fueron las siguientes:

## **Causas de defectos en soldadura por arco sumergido**

Entre los aspectos que determinan la cantidad de defectos en mayor o menor medida se encuentra el control de la variabilidad de los parámetros. De acuerdo al caso de estudio, las placas soldadas con aumento de amperaje de 615 a 800 A presentaron una mayor cantidad de defectos en comparación a otros parámetros, esto debido a la gran cantidad de calor aplicado, causante de una fusión excesiva del charco dando más tiempo al atrapamiento de gases o disminuyendo la protección recibida del fundente; por lo tanto, es el parámetro que más repercute en la formación de porosidades e inclusiones de escoria.

El cambio de voltaje de 35 a 37 V, aunque en menor medida, ocasionó la aparición de porosidades aisladas en el cordón, las cuales están dentro de los límites establecidos por la norma.

Con el aumento en la velocidad de avance de 21 a 23 in/min. se obtuvieron excelentes propiedades, la porosidad fue casi inexistente al igual que inclusiones de escoria o faltas de fusión, con lo que se concluye que hubo una mejoría versus a los parámetros utilizados en planta.

## **Efecto de los parámetros en la microestructura de la unión de soldadura**

De acuerdo a lo marcado en la literatura, las fases que generalmente se presentan en condiciones normales de enfriamiento en soldaduras por arco sumergido tienden a ser ferritas aciculares, bainita y ferrita Widmstätten primaria y secundaria (figura 2.2). De esta analogía se desprende la conclusión

de que las fases presentes en las pruebas realizadas presentaron similitudes en este aspecto. La zona de soldadura (MS) presenta una matriz de ferrita acicular originada principalmente por la nucleación a partir de inclusiones de manganeso y titanio, siendo una característica esencial en la formación de esta fase; conforme se fue analizando en dirección hacia el metal base, la metamorfosis que se propició en la microestructura fue notoria, ya que en la zona de interfase, aunque se encontraban ferritas aciculares, comenzó el crecimiento de fases como ferrita Widmstätten primaria, a partir de estas mismas inclusiones, además de trazas de bainita secundaria, estas últimas en mucho menor medida; ya dentro de la zona afectada por el calor, la proporción de ferrita acicular era mínima, aun se presentaba ferrita Widmstätten y comenzaba un crecimiento de granos ferríticos. La diferencia entre la zona de soldadura y el metal base es muy contrastante. Éste último presenta microestructura ferrítica y perlítica en toda su proporción.

Cabe destacar que las cuatro pruebas presentaron similitud entre ellas; se hallaron virtualmente las mismas fases dentro de las distintas zonas evaluadas en la soldadura, por lo que se puede determinar que los cambios debido a la variación de parámetros (principalmente en la entrada de calor) no tuvieron repercusiones significativas en la microestructura final del cordón.

### **Efecto de los parámetros en la microestructura de la unión de soldadura**

Al igual que la microestructura, la microdureza se vio poco afectada por los parámetros de la soldadura. Los resultados obtenidos se mostraron consistentes en las 4 pruebas, mostrando durezas que oscilaban entre 170 a 230 HV de dureza (en promedio). La zona de metal de soldadura sufrió un incremento de 30 HV en promedio con respecto al metal base; la zona de interfase mostró un comportamiento similar, con un aumento promedio de 20 a 25 unidades de dureza promedio. La zona afectada por el calor obtuvo valores de entre 15 a 20 HV en comparación a la dureza del metal base, este último con una dureza mínima de 172.47 HV.

Con esto se concluye que existió un incremento de dureza mínimo y consistente en las cuatro pruebas realizadas; dicho incremento se dio de manera gradual desde el cordón de soldadura en dirección al metal base, por lo que fue disminuyendo hasta llegar a este, tal efecto fue causado por los cambios microestructurales ocasionados por la entrada de calor del baño de fusión de la soldadura.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Salazar, Andrés Eloy. **Uso de tubería de acero al carbono con soldadura helicoidal en la fabricación de oleoductos.** Informe técnico SP-MAT-001-2011. Houston, Texas. Octubre de 2011.
- [2] Valencia, Asdrúbal. **Tecnología del tratamiento térmico de los metales.** Edit. Universidad de Antioquia, España, 1992
- [3] Aguirre Revelo, Lenin X. **Construcción de un ensayo de juntas soldadas.** Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2008.
- [4] Gatica Galina, José Carlos. **Serie de problemas resueltos de obtención de capacidad resistente de miembros de acero estructural por el método LRFD utilizando la aplicación MathCad Professional 2001.** Universidad de las Américas, Puebla, México. Abril de 2004.
- [5] Oliva Minilo, Carlos. **Curso de inspector de soldadura AWS QCI: 2007.** Instituto Chileno de la soldadura. 2007.
- [6] American Society of Metals (ASM). **Handbook vol. 1. Properties and selection: irons, steels and high performance alloys.**
- [7] EXSA-OERLIKON. **Manual de soldadura y catálogo de productos.** Lima, Perú. 1995.
- [8] Nieco, Horacio. **Curso de selección de aceros. Facultad de ingeniería.** Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- [9] Edgar, Julian. **Steel Identification Using Hardness Testing.** Melbourne, Australia. [http://www.autospeed.com/cms/title\\_Steel-Identification-Using-Hardness-Testing/A\\_109717/article.html](http://www.autospeed.com/cms/title_Steel-Identification-Using-Hardness-Testing/A_109717/article.html)
- [10] Specification for line pipe. **ANSI-API specification 5L. 44<sup>th</sup> edition.** Washington D.C. October 1, 2007.
- [11] Hashemi, S.H. Mohammadyani, D. **Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel.** International Journal of Pressure Vessels and Piping. 9 September 2010

- [12] Grooven, Mikell P. **Fundamento de manufactura moderna moderna: materiales, procesos y sistemas**. 3ra. Edición. Edit. McGraw Hill. 1997
- [13] Asta, Eduardo. **Fundamentos de soldadura por arco eléctrico**. 1ra. edición. **Fundación latinoamericana de soldadura**. Buenos Aires, Argentina. 2006.
- [14] American Welding Society. **AWS Welding handbook, eighth edition**. Miami, Florida. 2007
- [15] Askeland, Donald R. **Ciencia e ingeniería de los materiales**. 3ra. Edición. Editorial International Thompson. 1998.
- [16] Guirvernau, José M. **Procesos de soldadura aplicados en la construcción naval**. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Octubre de 2011.
- [17] Lázaro Martín, Ángela. **Soluciones industriales y soldadura**. 2008. Madrid, España.
- [18] Kou, Sindo. **Welding metallurgy**. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2003.
- [19] Krishankant. Jindal, Sandeep. Kant Shekhar, Shashi. **Determination of Flux Consumption in Submerged arc Welding by the Effect of Welding Parameters by Using R.S.M Techniques**. University of Mullana, Ambala, India, 2012.
- [20] Singh, Kulwant. Sahni, V. Pandey, S. **Slag Recycling in Submerged Arc Welding and its Influence on Chemistry of Weld Metal**. Asian Journal of Chemistry Vol. 21, No. 10 (2009).
- [21] Indian Institute of Technology Bombay. **Módulo 4. Desing for assembly**. Bombay, India.
- [22] Reza Ghazvinloo, Hamid. **Experimental Study on Bead Width Changes of St 52-2 Carbon Steel Welds Produced by Submerged Arc Welding Process**. Islamic Azad University of Semnan Branch, Semnan, Iran, 2010.
- [23] Kumar, Vinod. Mohan, Narendra. Khamba, J.S. **Development of cost effective agglomerated fluxes from waste flux dust from submerged arc welding**. World congress of engineering. 2009



- [24] Pandey, S. Mohan, N. **“Investigation into flux consumption”**, International conference on CAD, CAM, Robotics and Autonomous Factories, Indian Institute of Technology. Delhi, India. 2003.
- [25] Devletian, J.H. Van Dyke, D. **Failure Analysis of Steel Welds**. Portland State University - MEI-Charlton, Inc. 2011.
- [26] Ingeniería de manufactura 1. **Apuntes de procesos de soldadura**. Universidad de Cádiz, España.
- [27] Gerbec, Dan. **Minimizing Defects in Submerged Arc Welding**. The American Welder Magazine. September, 2009.
- [28] Scott, Paul. **Controlling the Heat Affected Zone (HAZ) in HF Pipe and Tube Welding**. Thermatool Corp, East Haven, CT 06512, USA. 2010.
- [29] Singh, Ravinder Pal. Garg, R.K. Shukla, D.K. **Parametric Effect on Mechanical Properties in Submerged arc welding process - A review**. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2009.
- [30] Flores Barrera, Leonel Gerardo. **Medición de espesores por ultrasonido y requisitos necesarios para el personal que lleva a cabo ensayos no destructivos en la central nucleoelectrica Laguna Verde**. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacan. Instituto Politécnico Nacional. Mexico D.F. Junio, 2009.
- [31] Sistendca. **Manual Introduccion a los Ensayos No Destructivos (END)**. Sistend Testing C.A.
- [32] Ordoñez, Stela. **Técnicas experimentales en metalurgia**. Depto. de Ingeniería Metalurgica. Universidad de Santiago de Chile, Chile.
- [33] **Ensayos No Destructivos (END) - Nondestructive Testing (NDT)**. Thermoequipos Heating & Cooling Technologies. Venezuela, 2008.
- [34] Correa, Julio. Pruebas no destructivas (PND) - **Apuntes Técnicos para todos**. [juliocorrea.files.wordpress.com/2007/10/pruebas-no-destructivas.pdf](http://juliocorrea.files.wordpress.com/2007/10/pruebas-no-destructivas.pdf)

- [35] Sandoval, Juan Carlos. Idrovo, Carolina. **Ensayos no destructivos: líquidos penetrantes**. Universidad Técnica de Ambato, Quito, Ecuador. 2009.
- [36] Nowacki, Jerzy. Rybicki, Paweł. **The influence of welding heat input on submerged arc welded duplex steel joints imperfections**. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier. 2005.
- [37] Murugan, N. Parmar, R.S. Sud, S.K. **Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing**. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier. 1993.
- [38] American Welding Society. **AWS A5.17/A5.17M - Specification for Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding**. Miami, Florida. 2007.

# CONTENIDO DE TABLAS

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

Tabla 2.1. Clasificación de aceros simples al carbono .....	10
Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de aceros grado API 5L.....	12
Tabla 2.3. Composición química (% e.p.) de tuberías para PSL 1 de 25 mm (0,984 in).....	12
Tabla 2.4. Requerimientos de esfuerzo de tracción de aceros API 5L.....	13
Tabla 2.5. Composición química de alambres (% e.p.) de acero al manganeso para proceso de soldadura SAW .....	29
Tabla 2.6. Rangos de amperaje para alambres utilizados en el proceso SAW.....	29

## CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del acero API X-70 .....	72
Tabla 4.2. Composición química (% e.p.) del acero API X70 .....	72
Tabla 4.3. Composición química (% e.p.) requerida para electrodos sólidos .....	73
Tabla 4.4. Parámetros utilizados en el experimento.....	73
Tabla 4.5. Resultados de microdurezas en pruebas. ....	79

# CONTENIDO DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Figura 2.1. Clasificación de aceros aleados en base a su resistencia y % de elongación.....	11
Figura 2.2. Microestructura de la unión soldada por el proceso SAW de tuberías API X-65 (A: zona de soldadura; B: interfase; C: zona afectada por el calor) .....	13
Figura 2.3. Proceso de soldadura por arco sumergido.....	16
Figura 2.4. Esquema básico del proceso de arco sumergido .....	18
Figura 2.5. Relación del amperaje y la anchura del cordón de soldadura en el proceso SAW .....	30
Figura 2.6. Efecto del amperaje y voltaje en el proceso SAW .....	31
Figura 2.7. Relación del voltaje y la anchura del cordón de soldadura en el proceso SAW .....	32
Figura 2.8. Efectos de los parámetros de soldadura en la geometría del charco de soldadura; a) Alta velocidad de avance y entrada de calor, b) Bajas velocidades de avance y entrada de calor .....	34
Figura 2.9. Efecto de la velocidad de soldadura en el crecimiento de granos en el metal de soldadura .....	35
Figura 2.10. Formación de granos axiales en charcos de distintas geometrías; a) Charco de soldadura en forma elíptica, b) Charco de soldadura en forma de lágrima.....	36
Figura 2.11. Grietas longitudinales y transversales.....	41
Figura 2.12. Tipos de porosidad: a) porosidad dispersa, b) porosidad agrupada y c) porosidad alineada.....	42
Figura 2.13. Porosidad en soldadura por arco sumergido en acero ASTM A709 .	43
Figura 2.14. Inclusiones de escoria.....	44
Figura 2.15. Socavado en el pie del cordón de soldadura.....	45
Figura 2.16. Fusión incompleta .....	46
Figura 2.17. Estructura de una unión de soldadura de arco.....	51
Figura 2.18. Regiones afectadas por el calor en una soldadura por arco eléctrico .....	51
Figura 2.19. Inspección por líquidos penetrantes (técnica fluorescente).....	57

<b>Figura 2.20. Inspección por partículas magnéticas .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 2.21. Tipos de magnetización: a) Magnetización longitudinal y b) Magnetización circular .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 2.22. Esquema del ensayo por radiografía.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 2.23. Inspección por ultrasonido de transmisión continua.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 2.24. Gráfica de un osciloscopio de ultrasonido de eco-pulsos.....</b>	<b>65</b>

#### **CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO**

<b>Figura 4.1. Ubicación de ensayos de microdureza en la unión soldada: Metal base, metal de soldadura (MS), zona afectada por el calor (ZAC) e interfase (INT) .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.2. Detección de discontinuidades en pruebas con ultrasonido. ....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4.3. Gráfica de incidencia de discontinuidades. ....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 4.4. Microestructura de la prueba 1: a) Metal de soldadura; b) Interfase; c) ZAC; d) Metal base. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 4.5. Microestructura de la prueba 2: a) Metal de soldadura; b) Interfase; c) ZAC; d) Metal base. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 4.6. Microestructura de la prueba 3: a) Metal de soldadura; b) Interfase; c) ZAC; d) Metal base. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 4.7. Microestructura de la prueba 4: a) Metal de soldadura; b) Interfase; c) ZAC; d) Metal base. ....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4.8. Gráfico de durezas promedio en pruebas soldadas con SAW. ....</b>	<b>80</b>

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

**NOMBRE:** SERGIO JAVIER HERRERA HERNÁNDEZ

**GRADO A OBTENER:** ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL.

**TÍTULO DE MONOGRAFÍA:** CONTROL DE DEFECTOS EN SOLDADURA LONGITUDINAL POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN ACEROS AL CARBONO API X70.

**TÍTULOS OBTENIDOS:** INGENIERO CIVIL.

**UNIVERSIDAD:** INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA.

**EXPERIENCIA PROFESIONAL:** SUPERVISIÓN DE OBRA TRAMO CARRETERO A POZO RABASA, COATZACOALCOS, VERACRUZ.

**LUGAR Y FECHA DE NACIMIENTO:** VILLA VICENTE GUERRERO, CENTLA, TABASCO; 21 DE AGOSTO DE 1989.