

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**IMPACTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN EL ACERO AL CARBONO API 5L X70, EN UNIONES SOLDADAS DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS AMARGOS.**

**POR**

**NORMA VIRIDIANA GARCÍA CUSTODIO.**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO COAHUILA A NOVIEMBRE DEL 2010.**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**IMPACTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN EL ACERO AL CARBONO API 5L X70, EN UNIONES SOLDADAS DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS AMARGOS.**

**POR**

**NORMA VIRIDIANA GARCÍA CUSTODIO**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO COAHUILA A NOVIEMBRE DEL 2010.**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“IMPACTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN EL ACERO AL CARBONO API 5L X70, EN UNIONES SOLDADAS DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS AMARGOS.”**, realizada por el alumna **NORMA VIRIDIANA GARCÍA CUSTODIO**, con número de matrícula **ES-09-100** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

**El Comité Tutorial**

---

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Tutor Académico

---

**Ing. Eduardo Frías Treviño**  
Tutor en Planta

---

**M.C. Víctor Hugo López  
Cortez**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**M.C. Claudia Aracely González Rodríguez**  
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 **NORMA VIRIDIANA GARCÍA CUSTODIO** una vez leída y revisada la Monografía titulada “**IMPACTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN EL ACERO AL CARBONO API 5L X70, EN UNIONES SOLDADAS DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS AMARGOS.**”, 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 [días] del [mes] del [año].

---

**Dr. Fidel Zapata Gómez**  
Presidente

---

**M.C Gabriel García**  
**Cerecero**  
Secretario

---

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Vocal

# AGRADECIMIENTOS.

El logro de cada una de mis metas propuestas; sin lugar a dudas han sido cumplidas gracias al apoyo incondicional de mis padres Adelino García Fulgencio y Crescencia Custodio Pérez, que sin condición apoyaron mis decisiones y jamás detuvieron mi impulso de seguir cumpliendo mis sueños, mis expectativas y sobre todo mi desarrollo profesional. Gracias se que sin su apoyo no hubiera sido lo mismo, gracias por ser ese gran pilar del cual aun sigue siendo mi pilar para seguir siempre de pie y no mirar atrás.

También quiero agradecer a mis hermanos César, Hugo, Berenice y Beatriz que aunque lejos, fueron mi inspiración para seguir adelante, gracias César porque tu gran ejemplo de superación y el no dejar de soñar por cumplir mis metas es el que me ha ayudado a ser siempre mejor.

A mis amigos Alfonso, Álvaro, Gilberto, Fidencio y Luis que rodearon este sueño y que ahora ven y comparten conmigo la dicha y felicidad de ver cerrar una etapa más de mi vida con grandes éxitos.

A Juan Francisco Buendía porque es un gran ejemplo de perseverancia, habilidad y competencia, por su protección, amor, cariño y respeto.

A mi asesor Dr. Arturo Reyes Valdés, por su apoyo y sus enseñanzas.

Al Dr. Jorge Leobardo Acevedo, porque sus críticas siempre fueron de forma constructiva para mejora de esta monografía.

A una gran persona por su dedicación incondicional para el desarrollo y revisión de este documento, M.C. María Eugenia Herrera, gracias sin lugar a dudas su apoyo tomó un gran peso en el éxito de este proyecto.

A COMIMSA, por su apoyo para desarrollo académico.

A CONACYT por su apoyo económico para desarrollo profesional.

# ÍNDICE.

|   |    |
|---|----|
| <b>SÍNTESIS</b> .....   | 1  |
| <b>CAPÍTULO I.INTRODUCCIÓN</b> .....                                      | 3  |
| 1.1 ANTECEDENTES.....   | 3  |
| 1.2 OBJETIVOS.....  | 4  |
| 1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....  | 4  |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 4  |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN.....  | 5  |
| 1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....                                      | 6  |
| <b>1.5 APORTACIÓN.</b> .....  | 7  |
| 1.6 ALCANCE.....  | 8  |
| <b>CAPÍTULO II.MARCO TEORÍCO</b> .....                                    | 9  |
| 2.1 PROCESOS DE SOLDADURA.....  | 9  |
| 2.2 SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO (SAW). ....                               | 10 |
| 2.2.4 EQUIPO PARA LA SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO (SAW). 20                |    |
| 2.2.5 VARIABLES DEL PROCESO.....  | 20 |
| 2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN.....                  | 26 |
| 2.4. ESFUERZOS RESIDUALES.....  | 27 |
| 2.4.1 DEFINICIÓN.....   | 27 |
| 2.4.2 IMPORTANCIA DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES. ....                       | 29 |
| 2.4.3 ORIGEN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES EN LA SOLDADURA. ....            | 30 |
| 2.4.4 DETECCIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES. ....                         | 33 |
| 2.4.5 TÉCNICAS DESTRUCTIVAS DE MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.....      | 35 |
| 2.4.6 TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES..... | 37 |

|  |    |
|--|----|
| 2.5 CORROSIÓN.....   | 38 |
| 2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN.....  | 39 |
| 2.5.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA FORMA.....  | 39 |
| 2.5.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL MEDIO.....  | 41 |
| 2.5.4 REACCIONES QUE TIENEN LUGAR DURANTE LA CORROSIÓN.....                                  | 43 |
| 2.5.5 CONSIDERACIONES DE CORROSIÓN EN SOLDADURA DE<br>ACEROS AL CARBONO Y BAJA ALEACIÓN..... | 44 |
| 2.5.6 CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO SOLDADOS.....   | 45 |
| 2.5.7 INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA SOLDADA.....  | 45 |
| 2.5.8 FACTORES GEOMÉTRICOS.....  | 47 |
| 2.5.9 CORROSIÓN PREFERENCIAL EN ZAC.....   | 47 |
| 2.5.10 AGRIETAMIENTO INDUCIDO POR HIDRÓGENO (HIC).....                                       | 49 |
| 2.5.11 AGRIETAMIENTO ASISTIDO POR EL MEDIO AMBIENTE (EAC).....                               | 53 |
| 2.5.12 AGRIETAMIENTO BAJO ESFUERZOS Y CORROSIÓN (STRESS<br>CORROSION CRACKING SCC).....      | 55 |
| 2.5.13 SCC EN REFINERÍAS DE PRETRÓLEO.....   | 55 |
| 2.5.14 COMPORTAMIENTO DEL HIC EN ACERO X70.....  | 59 |
| 2.5.15 PERMEACIÓN DE HIDRÓGENO.....  | 65 |
| 2.6 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....  | 68 |
| 2.6.1 ESPECTRO.....  | 68 |
| 2.6.2 PROPIEDADES.....   | 70 |
| 2.6.3 PROPIEDADES DE LOS RAYOS X.....  | 71 |
| 2.6.4 INTERACCIÓN CON LA MATERIA.....  | 72 |
| 2.6.5 TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA MEDICIÓN DE<br>ESFUERZOS RESIDUALES.....         | 73 |
| 2.6.6 MÉTODOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....  | 76 |
| 2.6.7 LA LEY DE BRAGG.....   | 77 |

|   |            |
|---|------------|
| 2.6.9 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....   | 81         |
| 2.6.10 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ....                           | 82         |
| 2.6.11 TÉCNICAS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA MEDICIÓN DE<br>ESFUERZOS RESIDUALES. .... | 84         |
| <b>CAPÍTULO III.DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA .....</b>                          | <b>90</b>  |
| <b>CAPÍTULO IV.CASO DE ESTUDIO .....</b>  | <b>93</b>  |
| 4.1 RESULTADOS .....  | 98         |
| <b>CAPÍTULO V.CONCLUSIONES.....</b>   | <b>104</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA. ....</b>   | <b>105</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>  | <b>108</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS. ....</b>  | <b>109</b> |
| RESUMEN AUTOBIBLIOGRÁFICO.....  | 113        |



# SÍNTESIS

Este proyecto muestra el desarrollo y los resultados de la investigación realizada, para determinar el efecto de los parámetros del proceso de soldadura por arco sumergido; (SAW) por sus siglas en inglés, en la medición de esfuerzos residuales y la susceptibilidad a la corrosión de los aceros al carbono API 5L X70, en uniones soldadas de tubería de conducción de hidrocarburos amargos, así como las técnicas destructivas o no destructivas que se emplean en la actualidad, para la determinación de los esfuerzos residuales que permanecen en las estructuras después del proceso de fabricación. Existe una variedad de técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas de estas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales.

Considerando el efecto de las principales variables del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) como lo son el voltaje, el amperaje, la velocidad de avance, y el fundente, en la generación de defectos y principalmente en la producción de esfuerzos residuales durante el enfriamiento, considerando al calor de entrada como variable principal causante de la generación de los esfuerzos residuales y debido a la presencia de éstos en uniones soldadas, tiene como consecuencia un aumento en la susceptibilidad a la corrosión.

La investigación se realizó utilizando la técnica de difracción de Rayos X, la cual se sustenta en la ley de Bragg, para la determinación de esfuerzos residuales.

La ventaja de la técnica, es que es un ensayo no destructivo y mediante ésta, el esfuerzo que se encuentra presente en la red cristalina puede ser medido. La energía producida debido a los esfuerzos residuales puede ser calculado asumiendo una distorsión elástica lineal en la celda del cristal, además éste

método es utilizado en campo y puede ser adaptado en diversas geometrías que presente la pieza a medir.

La velocidad de corrosión medida mediante la técnica electroquímica de curvas de polarización, en las diferentes muestras soldadas por el método de arco sumergido, presentan valores de  $E_{corr}$  más catódico; es decir, más alejados del valor característico de los aceros al carbono (0.44mV), dado que no evidencia zona de pasivación, por lo que es susceptible a la corrosión uniforme.

Para el caso de la medición de esfuerzos residuales muestra que la técnica de difracción de Rayos X, es muy sensible al hacer mínima variación en movimiento de incidencia del haz, y que efectivamente, las muestras analizadas presentan zonas de concentración de esfuerzos; principalmente en el cordón de soldadura, los cuales aumentan la susceptibilidad a la corrosión, debido a que actúan como zonas de atrapamiento de hidrógeno atómico, causando el inicio, propagación de grieta y hasta el colapso de la tubería, a este fenómeno se le conoce con el nombre de corrosión inducida por hidrógeno (HIC), que se presenta principalmente en las tuberías de conducción de hidrocarburos amargos.

La técnica de difracción de Rayos X, para la medición de esfuerzos residuales, muestra que coexisten zonas de concentración de esfuerzos residuales a niveles de -210 MPa y -295 MPa, en los cuales se inicia la corrosión y se eleva la velocidad de la misma respectivamente.

# CAPÍTULO I.

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1 ANTECEDENTES.

Después de algunos años de contacto con la tierra algunas tuberías que conducen hidrocarburos, exhiben deterioro apreciable como resultado de la corrosión. Eventualmente, se presentan pérdidas que requieren una atención inmediata; de otra manera se puede perder mucho petróleo por filtración en la tierra.

La corrosión es un fenómeno inevitable a largo plazo si no se toman las precauciones adecuadas. Pueden debilitar la integridad estructural de la tubería y convertirla en un vehículo inseguro para el transporte de cualquier tipo de fluidos. La corrosión es la principal causa de falla en las conducciones de fluidos. El fallo de la tubería puede tener múltiples consecuencias como pérdida de fluido, daños en las instalaciones, contaminación e incluso puede llegar a suponer un riesgo para las vidas humanas.

La presencia de esfuerzos residuales es un factor muy importante que debe de considerarse; si se habla de corrosión, ya que aunado a ésta, los esfuerzos residuales pueden aumentar la velocidad de la misma, debido a que actúan como trampas de hidrógeno y pueden provocar el colapso de la tubería en servicio. Cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza tensiones residuales de valor generalmente igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente.

## **1.2 OBJETIVOS.**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Recopilación de información que permita profundizar en el estudio de la medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de difracción de Rayos X, así como determinar el impacto de las variables del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) y el efecto del contenido de esfuerzos residuales, generados durante el enfriamiento de la soldadura en la susceptibilidad a la corrosión en acero al carbono API 5L X 70 para tubería de conducción de hidrocarburos amargos.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- ✓ Identificar qué efecto tiene el calor de entrada en la generación de los esfuerzos residuales.
- ✓ Medir el impacto tienen los esfuerzos residuales en la susceptibilidad a la corrosión.
- ✓ Determinar la confiabilidad de la técnica de difracción de Rayos X, para la medición de esfuerzos residuales.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN.**

El conocimiento de la corrosión, y propiedades mecánicas dentro de los materiales, así como de los mecanismos generados por la combinación de esfuerzos residuales y ambiente amargo, y su interacción, ayuda a mejorar la calidad de producción de tubería y disminuir los costos por fallas, además de evitar tragedias ecológicas y sociales derivadas del derrame del crudo.

En el pasado, la obtención de petróleo era más fácil para las industrias ya que los yacimientos no presentaban grandes niveles de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y se encontraban a menor distancia del suelo. Sin embargo hoy en día la sobreexplotación de esos yacimientos ha llevado a la búsqueda de nuevos pozos, los cuales se encuentran a mayores niveles de profundidad y con altas concentraciones de compuestos sulfurados.

La corrosión es el principal factor que deteriora la tubería, teniendo un gran impacto microestructural; debido a su efecto en el inicio y propagación de grietas principalmente en la zona de soldadura, en la cual se lleva a cabo la disolución del material, disminuyendo la funcionalidad de la tubería en esa zona.

La mejora de las propiedades mecánicas, no solo depende de la composición química y dimensión de la tubería de conducción, sino también del proceso de manufactura, ya que en éste van involucrados los esfuerzos residuales, expansión mecánica y tratamientos térmicos.

## 1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La industria petrolera en México tiene una gran importancia ya que es la principal aportación al Producto Interno Bruto Nacional, de ahí la relevancia en la mejora de sus procesos, ya sean administrativos, de producción, o de servicio. Concretamente este trabajo está enfocado en el impacto de los parámetros del proceso de soldadura en las tuberías empleadas en la conducción del crudo y su susceptibilidad a corrosión bajo esfuerzos en ambiente amargo (ácido sulfhídrico) la cual se determinará mediante la técnica “Difracción de Rayos X”.

La técnica de difracción de Rayos X está normada por la ASTM (American Society for Testing Materials), el cual es un método no destructivo puntual y superficial. La vía de transporte más económica para el petróleo sigue siendo la tubería de conducción, sin embargo éstas pueden presentar problemas en servicio causando grandes pérdidas económicas y sobretodo ecológicas. A lo largo del tiempo se han mejorado estas tuberías, aumentando sus propiedades mecánicas, ya sea por el empleo de nuevos materiales, el aumento en el espesor, así como técnicas nuevas de manufactura. Cuando se refiere a la mejora de las tuberías no sólo indica la mejora de las propiedades, sino también que estas mejoras no impliquen altos costos, teniendo un equilibrio en el costo-beneficio.

Uno de los mecanismos de daño de materiales en este tipo de industria se refiere al daño por hidrógeno. La corrosión, por soluciones acuosas de ácido sulfhídrico o fluidos amargos, de aceros al carbono y baja aleación dan como resultado uno o más tipos de daño por hidrógeno. Éstos incluyen la pérdida de ductilidad, formación de ampollas o cavidades internas y agrietamiento espontáneo de aceros de alta resistencia o de alta dureza.

## **1.5 APORTACIÓN.**

El presente trabajo busca mediante la técnica de difracción de Rayos X se pueda determinar con fiabilidad los esfuerzos residuales que quedan presentes después del proceso de soldadura, y no son completamente eliminados en etapas posteriores del proceso de fabricación.

## **1.6 ALCANCE.**

Determinar los esfuerzos residuales que se generan después el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW), y del impacto de las variables del proceso, variando el calor de entrada, mediante la técnica de difracción de Rayos X, aplicada a las uniones soldadas de tubería de 0.812 in de espesor, y 24 in de diámetro de acero al carbono API 5L X70.



# **CAPÍTULO II.**

## **MARCO TEÓRICO.**

### **2.1 PROCESOS DE SOLDADURA.**

La soldadura es en realidad un proceso metalúrgico, en donde existe un cambio de microestructura, por eso entender cómo los metales se comportan durante su producción y fundición es fundamental para entender el proceso de solidificación después de la aplicación de soldadura.

La mayoría de los procesos de soldadura; al igual que en la fundición de los metales, requieren la generación de altas temperaturas para hacer posible la unión de los metales involucrados. El tipo de fuente de calor es básicamente lo que describe el tipo de proceso, por ejemplo: Soldadura autógena (gas), soldadura de arco (eléctrica). Uno de los principales problemas en soldadura, es el comportamiento de los metales ante la combinación de los agentes atmosféricos y los cambios en su temperatura. El método de protección del metal caliente del ataque de la atmósfera, es el segundo del mayor problema a resolver. Las técnicas desarrolladas desde "Protección por fundente" (Flux Covering), hasta la de protección por gas inerte, son más que solo escudos protectores en muchos casos, pero básicamente es para lo que fueron creados.

En algunas instancias la atmósfera se basa en sistemas de vacío, sustituyendo a las protecciones de gases inertes.

Algunos de estos procesos han sido desarrollados para algunas aplicaciones específicas, mientras otros se mantienen muy flexibles, cubriendo un amplio rango de actividades en la soldadura. Introducido en las últimas décadas del siglo XIX, el proceso de arco se mantiene como el más usado de todos los grupos de las técnicas de soldadura. Como el mismo nombre lo sugiere, es un arco eléctrico que se establece entre las partes a ser soldada y un electrodo metálico. La energía eléctrica; convertida en calor, genera una temperatura en el arco cerca de 7,000 grados centígrados (10,000 F), causando la fundición de los metales y después la unión. El equipo puede variar en tamaño y complejidad, siendo la diferencia principal entre el proceso de arco, el método usado para separar la atmósfera o crearla y el material consumible empleado para ser aportado al proceso.

Entre los procesos de Arco se incluyen la soldadura de electrodo cubierto, conocido como MAA/SMAW (Manual Metal Arc/ Shielded Metal Arc Weldng), soldadura por arco de metal y gas GMAW (Gas Metal Arc Welding) o también conocido como soldadura de gas inerte MIG (Metal Inert Gas) y el sistema de alta deposición por Arco Sumergido SAW (Submerged Arc Welding).

Existen otras variantes como la soldadura de plasma PAW (Plasma Arc Welding) Soldadura por Plasma, soldadura por electroescoria ESW (Electro Slag) y la soldadura (sin arco eléctrico) por fricción FSW (Friction Stir Welding) que forman parte de los nuevos avances tecnológicos que se adelantan en los procesos de soldaduras para crear alternativas adaptadas a los procedimientos de alta producción y limitaciones especiales de ciertos procesos o materiales [14].

## **2.2 SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO (SAW).**

La soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding SAW) produce coalescencia de metales calentándolos con un arco entre un electrodo de metal

desnudo y la pieza de trabajo. El arco y el metal derretido están “sumergidos” en un manto de fundente granular fusible sobre la pieza de trabajo. No se aplica presión, y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones de un suministro complementario como una varilla para soldar o gránulos metálicos. En la soldadura de arco sumergido, el arco está cubierto por fundente, el cual desempeña un papel preponderante porque (1) la estabilidad del arco depende del fundente, (2) las propiedades mecánicas y físicas del depósito de soldadura final se pueden controlar con el fundente y (3) la calidad de la soldadura puede ser afectada por la forma como se maneja el fundente. La soldadura de arco sumergido es un proceso de soldadura de producción versátil capaz de soldar con corrientes hasta de 2000 amperes de corriente alterna CA o corriente continua CC, empleando uno o varios alambres. Es posible usar fuentes de potencia tanto de CA como de CC en la misma soldadura simultáneamente [24].

### **2.2.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.**

En la soldadura de arco sumergido, el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en un montículo de fundente que cubre el área de la unión que se va a soldar. A continuación, un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el electrodo en la unión a una velocidad controlada, y el alimentador se desplaza manual o automáticamente a lo largo de la soldadura. En todo momento, se alimenta fundente adicional adelante del electrodo y a su alrededor, y se distribuye continuamente sobre la unión. El calor producido por el arco eléctrico derrite progresivamente parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base, creando un charco de metal fundido debajo de una capa de escoria líquida. El fundente flota sobre el metal fundido y protege por completo de la atmósfera la zona de soldadura, éste evita que los gases atmosféricos contaminen el metal de soldadura y disuelve las impurezas del metal base y del electrodo. Además el fundente puede agregar ciertos elementos de aleación al metal de soldadura. Al

solidificar la unión se forma un franja de soldadura con una capa protectora de escoria encima [24].

Entre los factores que determinan si conviene o no usar soldadura por arco sumergido están:

- (1) La composición química y las propiedades mecánicas que debe de tener el depósito final.
- (2) El espesor del metal base que se va a soldar
- (3) La accesibilidad de la unión
- (4) La posición en que se va a soldar
- (5) La frecuencia o cantidad de soldaduras que se van a efectuar [24].

El proceso de arco sumergido es, principalmente llevado a cabo con equipo totalmente automático, aunque hay algunas pistolas de mano para el proceso. Para incrementar la productividad puede ser implementado un arreglo con varios electrodos o multi-alambre. Por su alto poder de deposición de metal de aporte, es particularmente conveniente para las soldaduras rectas de gran longitud con excelente calidad en posición de piso, siendo muy usado en la fabricación de grandes tanques, plantas químicas, pesadas estructuras y en la industria de la fabricación y reparación de barcos [12].

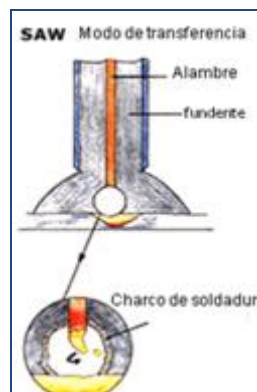


Figura 2.1. Muestra esquemática del modo de transferencia del proceso de soldadura SAW [15].

## 2.2.2 VARIACIONES DEL PROCESO.

La soldadura por arco sumergido se presta a una amplia variedad de combinaciones de alambre y fundente, disposiciones de uno o varios electrodos, y empleo de fuentes de potencia de CA o CC, se ha empleado a una amplia gama de materiales y espesores. Es posible usar diversas configuraciones de múltiples arcos para controlar el perfil de la soldadura e incrementar las tasas de deposición respecto a las de la operación con un solo arco. Parte de la versatilidad se debe al empleo de CA. Los principios que favorecen el empleo de CA para minimizar el golpe de arco cuando se suelda con un solo arco a menudo se aplican a la soldadura de múltiples arcos para crear una desviación de arco favorable.



Figura 2.2 Proceso de soldadura SAW [15].

Tabla 2.1. Parámetros recomendados para alambres de soldadura de Arco Sumergido "SAW" [15].

| <b>Díámetro de alambre<br/>plg (mm).</b> | <b>Rango de amperaje en<br/>Amperios.</b> | <b>Rango de tensión en<br/>Voltios.</b> |
|--|---|---|
| 1/16 (1.6)                               | 150-500                                   | 22-30                                   |
| 5/64 (2.0)                               | 175-600                                   | 24-32                                   |
| 3/32 (2.4)                               | 250-700                                   | 26-34                                   |
| 5/32 (4.0)                               | 400-1000                                  | 28-38                                   |

Tabla2.2 Datos de Deposición para alambres de soldadura de Arco Sumergido (SAW) [15].

| <b>Diametro del electrodo<br/>plg/mm</b> | <b>Amperaje</b> | <b>Rango de deposición<br/>Lbs/hr (Kg/hr)</b> | <b>Eficiencia</b> |
|--|-----------------|---|-------------------|
| 1/16 (1.6)                               | 400             | 13.0 (5.90)                                   | 99%               |
|  | 500             | 17.0 (7.71)                                   |                   |
| 5/64 (2.0)                               | 300             | 10.8 (4.90)                                   | 99%               |
|  | 400             | 14.5 (6.58)                                   |                   |
|  | 500             | 18.2 (8.26)                                   |                   |
| 3/32 (2.4)                               | 400             | 13.2 (5.99)                                   | 99%               |
|  | 500             | 17.0 (7.71)                                   |                   |
|  | 600             | 22.0 (9.98)                                   |                   |
| 1/8 (3.2)                                | 400             | 11.0 (4.99)                                   | 99%               |
|  | 500             | 14.5 (6.58)                                   |                   |
|  | 600             | 18.0 (8.16)                                   |                   |
|  | 700             | 21.2 (9.62)                                   |                   |
| 5/32 (4.0)                               | 500             | 12.5 (5.67)                                   | 99%               |
|  | 600             | 16.0 (7.26)                                   |                   |
|  | 700             | 19.5 (8.85)                                   |                   |
|  | 800             | 23.0 (10.43)                                  |                   |
|  | 900             | 26.0 (11.79)                                  |                   |
| 3/16 (4.8)                               | 600             | 13.0 (6.31)                                   | 99%               |
|  | 700             | 17.5 (7.94)                                   |                   |
|  | 800             | 21.0 (9.53)                                   |                   |
|  | 900             | 25.0 (11.34)                                  |                   |
|  | 1000            | 29.0 (13.25)                                  |                   |
|  | 1100            | 34.0 (15.42)                                  |                   |

Entre las ventajas de este método, se incluyen:

- Alta productividad
- Bajo costo en la etapa de preparación.
- El hecho de que se puede ejecutar en un solo pase, hasta en materiales de gran diámetro.
- Es muy confiable si los parámetros de operación son los correctos.
- Muy poca tensión transversal.
- Muy bajo riesgo de grietas por hidrógeno.

La desventaja del proceso es que los equipos son muy costosos, así como la instalación (Figura 2.3) que se puede convertir en algo compleja, en donde grandes estructuras metálicas son fabricadas para poder instalar las cabezas de soldadura que tendrán que moverse transversal, horizontal, vertical, orbital, y a veces hasta diagonalmente. Aunque también hay casos en que el proceso solo se puede ejecutar si el movimiento de traslación está en la pieza a ser soldada [14].



Figura 2.3. Instalación de proceso SAW en la industria.

### **2.2.3. EL FUNDENTE.**

Los fundentes protegen el charco de soldadura de la atmósfera al cubrir el metal con escoria. Los fundentes limpian el charco de soldadura, modifican la

composición química del metal de soldadura e influyen en la forma que adquirirá la el cordón de soldadura y las propiedades mecánicas que tendrá. Los fundentes son componentes minerales granulados que se mezclan de acuerdo a diversas formulaciones. Dependiendo del método de fabricación elegido, los diferentes tipos de fundentes se fusionan, aglomeran o mezclan por medios mecánicos.

Existen dos métodos importantes para elaborar los fundentes, granulados y fundidos [24].

2.2.3.1. Fundentes granulados aglomerados: Para fabricar un fundente aglomerado, las materias primas se pulverizan se mezclan en seco y se aglomeran con silicato de potasio, silicato de sodio o una mezcla de ambos. Ya aglomerada, la mezcla húmeda se convierte en pelotillas y se cuece a una temperatura menor que la empleada con los fundentes fusionados, éstas se disgregan, se pasan por mallas para uniformar el tamaño [24]. Este tipo de fundente puede contener partículas metálicas desoxidantes, las cuales pueden favorecer a la buena operación sobre oxido y escamas metálicas (Figura 2. 4).

Entre sus ventajas están las siguientes:

- (1) Es fácil añadir desoxidantes y elementos de aleación; estos últimos se agregan como ferroaleaciones o como metales elementales para producir aleaciones que no están fácilmente disponibles como electrodos, o para ajustar la composición del metal de soldadura.
- (2) Se puede usar una capa de fundente más gruesa al soldar
- (3) Se pueden identificar por su color [24].

Sus desventajas son las siguientes:

- (1) Tendencia a algunos fundentes a absorber humedad como lo hacen los recubrimientos de algunos electrodos para soldadura por arco de mtal sumergido.



- (2) Posible generación de gases a partir de la escoria fundida
- (3) Posibles cambios en la composición del fundente debido a segregación o eliminación de partículas de grano fino [24].

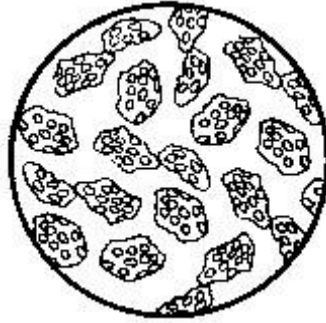


Figura 2.4. Fundente granulado aglomerado [15].

2.2.3.2. Fundentes fundidos: Para fabricar un fundente fusionado, las materias primas se mezclan en seco y luego se funden en un horno eléctrico de alta temperatura hasta formar un líquido homogéneo. Este fundente líquido al enfriarse vuelve a su estado sólido para luego ser triturado en un molino hasta lograr la granulometría adecuada al formato requerido (Figura 2.5). [15].

Los fundentes fusionados tienen las siguientes ventajas:

- (1) Buena homogeneidad química
- (2) Fácil eliminación de polvos finos sin afectar la composición del fundente.
- (3) Normalmente no son higroscópicos, lo que significa que simplifica el manejo de almacenamiento, y evita problemas al soldar.
- (4) Se recicla fácilmente mediante sistemas de alimentación y recuperación sin que cambie significativamente el tamaño de las partículas o su composición [24].

Su desventaja principal es la dificultad para añadirles desoxidantes y ferroaleaciones durante la fabricación sin segregación ni pérdidas muy elevadas. Las temperaturas tan altas necesarias para fundir los ingredientes limitan la gama de composiciones de los fundentes [24].



Figura 2. 5. Fundentes fundidos[15].

2.2.3.3. Fundentes mezclados mecánicamente: Para producir un fundente de mezcla mecánica, dos o mas fundentes fusionados o aglomerados se mezclan en la proporción necesaria para producir los resultados deseados.

La ventaja de los fundentes mezclados mecánicamente es la posibilidad de combinar varios fundentes comerciales para operaciones de soldadura extremadamente críticas o patentadas [24].

Los fundentes producidos por mezclas mecánicas tiene las sigueintes ventajas:

- (1) Segregación de los fundentes combinados durante el embarque, el almacenamiento y el manejo.
- (2) Segregación denteo de los sistemas de alimentación y recuperación durante la operación de soldadura.
- (3) Inconsistencia del fundente combinadode una mezcla a otra [24].

2.2.3.4. Clasificación según sus efectos operacionales: Los fundentes también se clasifican según su efecto en los resultados finales de la operación de soldadura, existen dos categorías en este sentido y son los Activos y los Neutros:

a) Activos: Los fundentes activos son aquellos que causan un cambio sustancial en la composición química final del metal de aporte, cuando el voltaje de soldadura (y por consiguiente la cantidad de fundente) cambia. Los fundentes fundidos generalmente aportan grandes cantidades de Magnesio y Silicio al

material de aporte, incrementando la resistencia, pero cuando se usa fundente activo para hacer soldaduras de multipases, puede ocurrir una excesiva acumulación de estos componentes resultando en una soldadura muy vulnerable a las grietas y las fracturas, los fundentes activos deben ser usados limitadamente en las soldaduras con pasos múltiples, especialmente sobre óxido y escamas metálicas. Un cuidado especial en la regulación del voltaje es recomendado cuando se usa este tipo de fundentes en el procedimiento de soldadura con pasos múltiples, para evitar la saturación de Magnesio y Silicio. En líneas generales, no es recomendado el uso de fundentes activos en soldaduras de pasos múltiples en láminas de un diámetro superior a los 25 mm (1").

b) Neutros: Como su clasificación misma lo dice, este tipo de fundentes no causan cambios significativos en la composición química del metal de aporte, ni siquiera con variaciones de voltaje. Los fundentes neutros no afectan la fuerza de la soldadura independientemente al voltaje o número de pases de soldadura que se apliquen. Como regla general, los fundentes neutros deben ser parte de las especificaciones de las soldaduras con pases múltiples [14].

2.2.3.5. Tamaño y distribución de partículas: El tamaño de las partículas del fundente y su distribución uniforme dentro del material en cantidad, son importantes porque afectan la alimentación y la recuperación, el nivel de amperaje y su tersura y forma del cordón de soldadura. Si se incrementa el amperaje, es recomendable reducir el tamaño medio de las partículas de los fundentes fusionados y aumentar el porcentaje de partículas pequeñas. Si el amperaje es demasiado alto con un tamaño de partículas dado, el arco puede ser inestable y producir cordones con bordes irregulares y discontinuos [24].

2.2.3.6. Unidades de recuperación de fundente: A menudo se usan unidades de recuperación de fundente para optimizar su aprovechamiento y minimizar 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 una tolva para mantenerlo seco [24].

#### **2.2.4 EQUIPO PARA LA SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO (SAW).**

El equipo requerido para soldadura por arco sumergido consiste en:

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

#### **2.2.5 VARIABLES DEL PROCESO.**

El control de las variables de operación en la soldadura por arco sumergido es indispensable para obtener tasas de producción elevadas y soldaduras de buena calidad. Estas variables, en orden aproximado de importancia, son las siguientes:

- 1) Amperaje de soldadura

- 2) Tipo de fundente y distribución de partículas
- 3) Voltaje de soldadura
- 4) Velocidad de avance
- 5) Tamaño del electrodo
- 6) Extensión del electrodo
- 7) Tipo de electrodo
- 8) Anchura y espesor de la capa de fundente [14].

2.2.5.1 Amperaje: controla la velocidad de depósito y profundidad de penetración. Si la corriente es muy alta, a cierta velocidad de avance dada, la profundidad de penetración puede ser excesiva o bien se puede provocar un desperdicio de los electrodos en forma de refuerzos de soldadura, ya sea en la cara o en la raíz. Una gran cantidad de refuerzo provoca una mayor cantidad de distorsión y por ende de esfuerzos residuales. Sin embargo un amperaje bajo provoca inestabilidad en el arco. En la Figura 2.6 se puede ver una gráfica de cantidad de depósito contra la corriente en amperes, donde se observa una mayor cantidad de depósito conforme aumenta el amperaje [14].

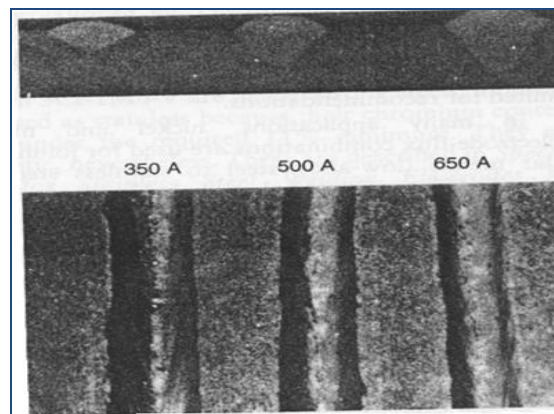


Figura 2. 6. Efecto del amperaje en la forma y penetración del cordón [15].

2.2.5.2. Tipo de fundente y distribución de partículas: El fundente es la principal característica del proceso SAW que, aunque le impide ser versátil, brinda protección al charco de soldadura, dándole una mayor penetración y mejorando

el acabado del cordón. Los componentes del fundente granular pueden ser de diversos materiales, los cuales al combinarse con el charco de soldadura mejoran las propiedades mecánicas de la unión.

El ancho y la profundidad de la capa de fundente son de gran importancia ya que una falta de éste, deja el arco desprotegido, y con susceptibilidad a porosidad, como se observa en la Figura 2.7, donde el cordón izquierdo fue hecho con un arco sumergido en fundente y el derecho fue obtenido con un arco desprotegido debido a la falta de fundente [14].



Figura 2.7. Falta de fundente en el proceso de arco sumergido (SAW) [15].

2.2.5.3 Voltaje de soldadura: Los ajustes del voltaje varían la longitud del arco entre el electrodo y el charco de soldadura, donde a mayor voltaje existe un incremento en la longitud. Dependiendo de la longitud del arco se controla la forma del cordón en su sección transversal y apariencia exterior. En la Figura 2.8 se observa que a mayor voltaje, la longitud de arco aumenta, afectando la penetración del cordón.

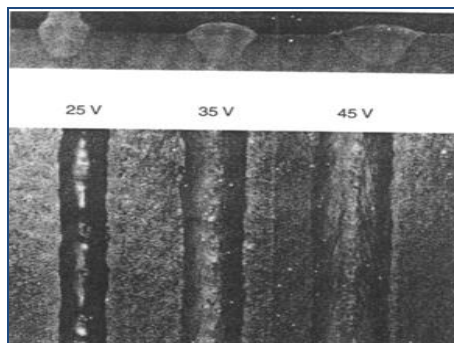


Figura 2.8. Efecto del voltaje en el proceso de soldadura (SAW) [15].

Un incremento del voltaje y la velocidad de avance a corriente constante, producen un cordón cóncavo y ancho, lo que incrementa el consumo de fundente [15].

Un incremento del voltaje provoca:

1. Cordón ancho, el cual provoca fractura.
2. Dificultad para remover escoria en soldaduras de garganta
3. Forma cóncava de la soldadura la cual está sujeta a fractura
4. Incremento en socavados en los bordes de soldaduras de filete [15].

2.2.5.4. Velocidad de avance: Es una de las variables más importantes ya que con amperaje y voltaje constante, un incremento en la velocidad de avance reduce la penetración, aumentando la probabilidad de porosidad y cordones no uniformes. Mientras que a velocidades bajas la forma del cordón es incierta, debido a un largo charco de soldadura que promueve un cordón áspero y con inclusiones de escoria. En la Figura 2.9 se observa el efecto de la velocidad de avance, con respecto a la penetración con amperaje y voltaje constantes [15].

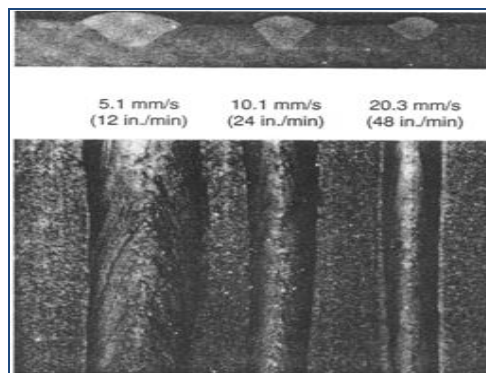


Figura 2.9. Efecto de la velocidad de avance considerando voltaje y amperaje constantes [15].

2.2.5.5 Electrodo: Puede ser de diversas morfologías y composiciones, por ejemplo un electrodo de diámetro pequeño da una mayor densidad de corriente con lo que aumenta la velocidad de deposición Figura 2.10. También la

extensión del electrodo; que es la distancia entre la punta de éste y el metal base, afecta el cordón de soldadura ya que si ésta distancia aumenta, el amperaje cae con lo que se produce una baja penetración y un cordón más estrecho. Una regla técnica para determinar la distancia de extensión es que ésta sea 8 veces el diámetro del electrodo [15].

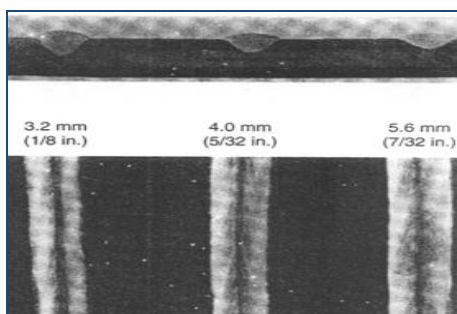


Figura 2.10. Efecto del tamaño del electrodo [15].

a) Materiales: Los materiales a los que se puede aplicar este proceso de soldadura son los siguientes:

- ✓ Aceros al carbono con contenido de carbono de hasta 0.29%
- ✓ Aceros de baja aleación (con resistencia de hasta 100Ksi (690 Mpa).
- ✓ Aceros al cromo-molibdeno (0.5% de Cr y 0.5 a 1% de Mo.).

b) Electrodo: Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base de acero al carbono, aceros baja aleación, aceros alto carbono, de baja aleación, inoxidable, etc. Estos electrodos se suministran como alambre sólido desnudo y como electrodos compuestos con núcleo metálico. El diámetro de los electrodos para soldadura por arco sumergido varía de 1.6 a 6.4 mm (1/16 a 1/3 plg).

La composición química del electrodo consumible, utilizado en el proceso de soldadura de la tubería se muestra en la Tabla2.3.

Tabla2.3. Porcentaje en peso de la composición química del electrodo.

| Mn   | Si    | Mo   | Cu  | C   | Nb    | Al    | P    | Ni  | S    | Cr  | V    | Ti.  |
|------|-------|------|-----|-----|-------|-------|------|-----|------|-----|------|------|
| 2.55 | 0.903 | .494 | .46 | .18 | .0338 | 0.031 | .026 | .02 | .013 | .01 | .003 | .003 |



Es importante destacar la composición química del material de aporte, en la cual podemos apreciar un alto contenido de Cu y Mo. Estos elementos protegen contra la corrosión, el primero contra la corrosión atmosférica y el segundo con la formación de carburos.

#### **2.2.6. APLICACIONES GENERALES DEL PROCESO.**

El SAW se usa en una amplia gama de aplicaciones industriales. La alta calidad de la soldadura, las elevadas tasas de deposición, la penetración profunda y la adaptabilidad a la operación automática hacen que el proceso sea apropiado para la fabricación de ensamblajes soldados grandes. El SAW se usa mucho en la fabricación de recipientes a presión, la construcción de barcos, barcazas y carros de ferrocarril, la fabricación de tuberías y la manufactura de miembros estructurales que requieren soldaduras largas. Algunas instalaciones de SAW automáticas producen en masa ensamblajes unidos con soldaduras cortas repetitivas.

El proceso se emplea para soldar materiales que van desde láminas de 1.5mm (0.06 plg) de espesor hasta elementos gruesos y pesados. La soldadura por arco sumergido no es apropiada para todos los materiales y aleaciones. Se utiliza mucho en aceros al carbono, aceros estructurales de baja aleación y aceros inoxidable. Una algunos aceros y aleaciones de alta resistencia mecánica, aceros alto carbono y aleaciones de níquel, pero es posible obtener mejores propiedades de unión en esos metales empleando un proceso de menor aporte de calor al metal base, como la soldadura de arco de metal y gas. La soldadura por arco sumergido se emplea para soldar uniones a tope en posición plana, para soldaduras de filete en las posiciones plana y horizontal, y para recubrimientos en la posición plana. Si se cuenta con herramienta y fijaciones especiales, es posible soldar uniones traslapadas y a tope en las posiciones horizontal [24].

## 2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN.

El material utilizado para la tubería de conducción es un acero micro aleado API 5L X70, (ver Tabla2.4) con un esfuerzo de cedencia de 70,000 Psi (545 Mpa). El acero proviene en forma de placa, la cual se lamina para obtener una forma cilíndrica propia de una tubería.

Tabla2. 4. Composición química % en peso del acero API 5L X70.

| C     | Mn   | Si   | S      | P      | Al   | Nb   | Cu   | Cr   | Ni   | Ti    | Ca     | N <sub>2</sub> |
|-------|------|------|--------|--------|------|------|------|------|------|-------|--------|----------------|
| 0.037 | 1.50 | 0.14 | <0.003 | <0.014 | 0.03 | 0.09 | 0.27 | 0.26 | 0.16 | 0.010 | 0.0025 | 0.0040         |

En términos generales el proceso se puede dividir en tres etapas: formado, soldadura y acabado. Durante el proceso de formado las placas de acero son sometidas a prensas para obtener una forma cilíndrica, después la tubería es punteada mediante el proceso de soldadura de resistencia eléctrica, o mediante el proceso MIG o MAG.

El proceso de soldadura por resistencia eléctrica solamente es usado para mantener la geometría de la tubería, ya que posteriormente se suelda por el proceso de arco sumergido. Aunque el proceso por resistencia eléctrica posee un bajo calor de entrada, no es ideal para grandes espesores.

La tubería se suelda inicialmente por su diámetro interior y después por su diámetro exterior, asegurando una buena unión y penetración con arco sumergido (SAW) [8].

En el diagrama de procesos; Figura 2.11, se puede ver el ingreso de la placa de API 5L X 70, al proceso de laminado en el cual se da la forma cilíndrica de tubería. Después se suelda mediante el proceso de resistencia eléctrica, para mantener la forma. Posteriormente se hacen dos cordones de soldadura con arco sumergido, el primero en la cara interior de la tubería y el segundo en la exterior. En este proceso el calor inducido distorsiona el tubo, a esta distorsión

se le conoce como “efecto banana” por la forma que adquiere. Para eliminar este efecto, se realiza una expansión mecánica en frío; posterior a la etapa de soldadura con el objetivo de recuperar la forma lineal y reducir los esfuerzos residuales. Esta expansión se hace con un mandril el cual puede expandir las tuberías de .33% a 1.5% de su diámetro nominal [9].

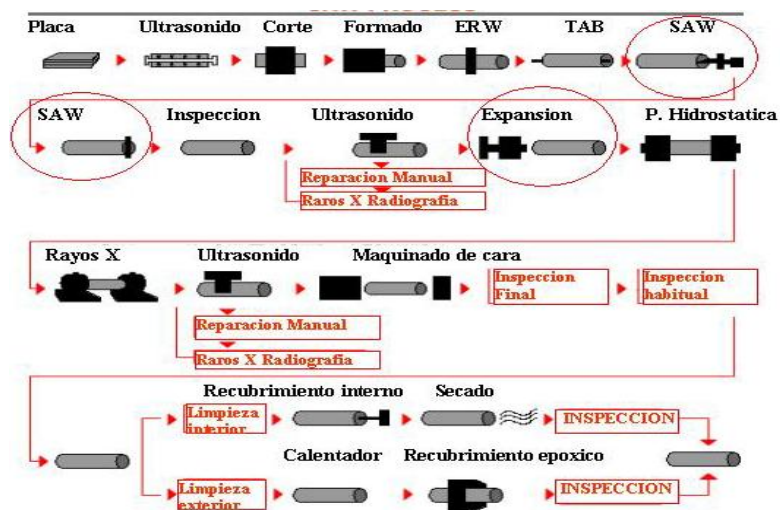


Figura 2.11. Diagrama de producción de tubería por el proceso de soldadura SAW [8].

## 2.4. ESFUERZOS RESIDUALES.

### 2.4.1 DEFINICIÓN.

Los esfuerzos residuales pueden ser definidos como los esfuerzos que permanecen en un material o cuerpo después de la fabricación y transformación de la materia en ausencia de fuerzas externas o gradientes térmicos. Los esfuerzos residuales pueden ser producidos también por cargas en servicio, conduciendo a deformaciones plásticas no homogéneas en la pieza o en el espécimen. Los esfuerzos residuales se pueden definir como cualquier macro o micro tensiones y ambos pueden estar presentes en un componente en un momento dado.

Los esfuerzos residuales pueden ser clasificados como:

Tipo I: Macro esfuerzos residuales, que se desarrollan en el cuerpo del componente en una escala mayor que el tamaño del grano del material.

Tipo II: Micro esfuerzos residuales, que varían en la escala de un grano individual.

Tipo III: Micro esfuerzos residuales, que existen dentro del grano, esencialmente como resultado de la presencia de la dislocación y otros defectos cristalinos [19].

Los esfuerzos principales, pueden estar presentes en materiales metálicos cerca de la superficie, debido a los tratamientos termo mecánicos asociados con el proceso de manufactura (laminado en caliente, estirado en frío, soldadura, etc.). Muchas veces los campos de esfuerzos residuales internos son indeseables, aunque inevitables, como consecuencia de la producción industrial [17]. La distribución de las fuerzas internas dentro de una sección de un sólido se puede caracterizar por la una magnitud que denominaremos *tensión* (que posee dimensiones de presión de Mpa). Podemos definir el *estado de tensión* de la muestra como el conjunto de tensiones en distintos puntos de la misma.

El conocimiento detallado del estado *de tensión* es vital en el diseño y estudio de estructuras. Por ello existen técnicas que permiten medir, visualizar y aún predecir este estado para muestras concretas. Estas técnicas van desde algunas de carácter experimental, ensayos no destructivos hasta simulaciones numéricas.

En algunos casos los esfuerzos residuales son unos de los principales factores que determinan las propiedades mecánicas de los componentes estructurales. Este factor juega un papel significativo, por ejemplo en fatiga de elementos soldados. La influencia de los esfuerzos residuales en la resistencia a la fatiga de multi ciclos soldaduras de a tope y de filete puede ser comparado con los efectos de concentración de esfuerzos [19].

## 2.4.2 IMPORTANCIA DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES.

Los esfuerzos residuales pueden afectar significativamente las propiedades mecánicas de los materiales y componentes estructurales, en particular a la resistencia a la fatiga, distorsión, estabilidad dimensional, resistencia a la corrosión y fractura frágil. Estos efectos suelen dar lugar a importantes gastos en reparaciones y restauraciones de piezas, equipos y estructuras. Por esta razón, el análisis de esfuerzos residuales es una etapa obligatoria en el diseño de piezas y elementos estructurales y en la estimación de su fiabilidad en condiciones de servicio real.

Los estudios sistemáticos han demostrado que, por ejemplo, los esfuerzos residuales en la soldadura podrían dar lugar a una drástica reducción de la resistencia a la fatiga de los elementos soldados. En fatiga multi ciclo ( $N > 10^6$  ciclo), el efecto de los esfuerzos residuales pueden ser comparados con el efecto de la concentración de los esfuerzos residuales. Aun más significativo son los efectos de los esfuerzos residuales en la resistencia a la fatiga de los elementos soldados en el caso de aliviar los esfuerzos residuales nocivos a la tensión y la introducción de esfuerzos residuales de compresión beneficiosos en las zonas de pie de soldadura. Los resultados de los ensayos de fatiga de muestras soldadas en la condición de soldadura y después de la aplicación de martilleo ultrasónico, demostraron que en el caso uniones soldadas con filete sin carga en aceros de alta resistencia, la redistribución de los esfuerzos residuales produjeron aumentos aproximadamente del doble del rango límite de tensión.

Los esfuerzos residuales son unos de los principales factores que determinan las propiedades mecánicas de los materiales, partes y elementos soldados y debe ser tomado en cuenta durante el diseño y la fabricación de los diferentes productos. A pesar de cierto progreso que se ha logrado con el desarrollo de técnicas para el manejo de los esfuerzos residuales, sigue siendo necesaria para desarrollar métodos eficaces y rentables de la medición de estas fuerzas, así como las tecnologías para su redistribución beneficiosa [19].

### 2.4.3 ORIGEN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES EN LA SOLDADURA.

La naturaleza de los esfuerzos en estructuras soldadas es discutida en términos de su magnitud, direccionalidad, distribución espacial, rango y variabilidad. Los efectos de los siguientes factores en los esfuerzos residuales son considerados: propiedades del material, manufactura del material, geometría estructural, proceso de fabricación, proceso de soldadura, tratamientos post soldadura y condiciones de servicio [7]. Los esfuerzos residuales habitualmente son identificados como uno de los factores que influyen en el deterioro de las construcciones soldadas. El hecho de aplicar soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido; de ésta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de esta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento de volumen libre será función directa del gradiente de temperatura " $\Delta T$ " y del coeficiente " $\alpha$ " de dilatación del material calentado. En el caso de una unión soldada, en la zona afectada por el calor (ZAC), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, esfuerzos térmicos de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material.

Cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza tensiones residuales de valor generalmente

igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente (Figura 2.12) [7].

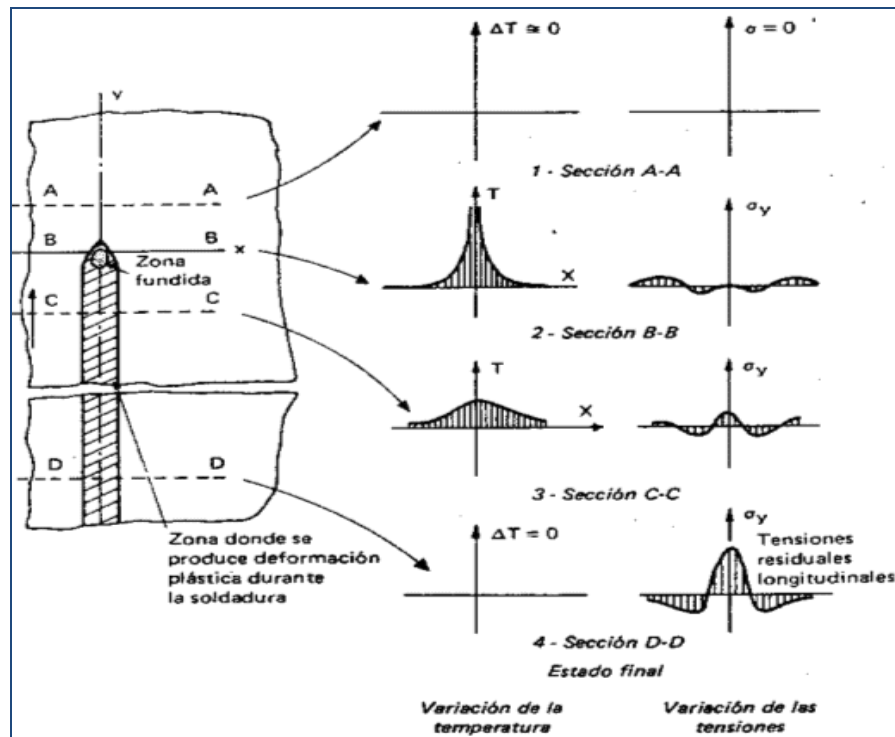


Figura 2.12. Estados transitorios y finales durante la soldadura [7].

Los esfuerzos residuales se clasifican de acuerdo al mecanismo que la producen:

1. Las producidas por diferencias estructurales.
2. Las producidas por una desigual distribución de los esfuerzos no-elásticos, incluyendo los esfuerzos plásticos y térmicos:

Factores que contribuyen a los esfuerzos residuales:

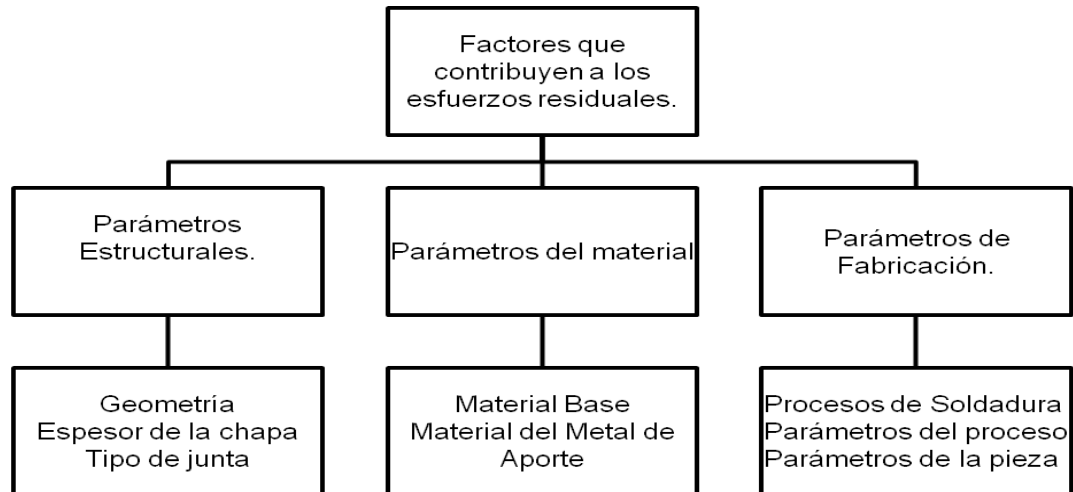


Figura 2.13 Factores que contribuyen a los esfuerzos residuales [7].

Lo anteriormente expuesto demuestra que cuando se utiliza el proceso de soldadura, ya sea para construir o reparar puede traer alteraciones en los materiales y/o estructuras y que numerosos autores coinciden con sus análisis de la problemática por lo que es considerar sus consecuencias nocivas.

Los esfuerzos residuales afectan en forma significativa a fenómenos que suceden a bajos niveles de aplicación de tensión, tales como:

- ✓ Fractura frágil.
- ✓ Fisuración por tenso corrosión.
- ✓ Carga crítica de piezas expuestas a colapso elástico.
- ✓ Estabilidad dimensional después del mecanizado [7].

Desconocer esta influencia puede traer consecuencias fatales o daños incalculables en la utilización de un determinado mecanismo, pieza y en ocasiones plantas completas [7].



#### 2.4.4 DETECCIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES.

En general se han propuesto y utilizado muchas técnicas para medir los esfuerzos residuales en los metales.

En la actualidad estas técnicas para medir los esfuerzos residuales, se dividen en los grupos siguientes:

- ✓ Relajación de esfuerzos (*stress-relaxation*).
- ✓ Difracción de Rayos-X.
- ✓ Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos.
- ✓ Técnica de agrietamiento.

Estos grupos a su vez tienen diferente campo de aplicación y utilizan diferentes elementos sensibles para la medición como muestra la Tabla 2.5.

En las técnicas de relajación de esfuerzos, los esfuerzos residuales son determinados midiendo las deformaciones elásticas liberadas. Esto ocurre cuando los esfuerzos residuales son liberados mediante el corte de la muestra en pedazos o por la extracción de un pedazo de la muestra. En la mayoría de los casos se utilizan; para medir la deformación liberada, defómetros mecánicos o galgas eléctricas. Existe una variedad de técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas técnicas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales.

Las deformaciones elásticas en los metales que tienen estructuras cristalinas pueden ser determinadas por la medición de sus parámetros reticulares utilizando técnicas de difracción por Rayos-X. Puesto que el parámetro reticular de un metal en estado no tensionado es conocido o puede ser determinado de forma separada, las deformaciones elásticas en el metal pueden ser determinadas no destructivamente sin maquinarse o barrenarse. En la actualidad se tienen disponibles dos técnicas: la de película de Rayos-X y la del difractor

por Rayos-X. Con la técnica de difracción de rayos-x, la deformación superficial puede ser determinada en un área pequeña, a una profundidad y diámetro de 0,003 mm. Las técnicas de difracción de Rayos-X son las únicas técnicas aplicables para medir tales esfuerzos residuales como los de cajas de bolas (rodamientos) y dientes de engranes y esfuerzos residuales superficiales posterior al maquinado o rectificado [17].

Tabla2.5. Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales [7].

|  |  |   |
|--|--|---|
| A-1Relajación de esfuerzos utilizando defórmetros mecánicos y galgas eléctricas. | Aplicable principalmente a placas.                   | Técnica de seccionado utilizando resistencias eléctricas (strain gauges)<br>Técnica de Gunnert<br>Técnica de barrenado de Mathar-Soete<br>Técnica de fresado sucesivo de Stablein |
|  | Aplicable principalmente a Cilindros sólidos y tubos | Técnica de maquinado sucesivo de Heyn-Bauer<br>Técnica de trepanación de Mesnager-Sachs   |
|  | Aplicable principalmente a sólidos tridimensionales  | Técnica de barrenado de Gunnert<br>Técnica de seccionado de Rosenthal-Norton  |
| A-2 Relajación de esfuerzos utilizando aparatos diferentes a los anteriores.     |  | Técnica utilizando sistema divisor de retícula.<br>Técnica de barrenado con capa frágil.<br>Técnica de barrenado con capa fotoelástica  |
| B Difracción por Rayos-X   |  | Técnica de película de rayos-x<br>Técnica de difractómetro de rayos-x.  |
| C Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos.                          | Técnicas ultrasónicas                                | Técnicas de ondas ultrasónicas polarizadas<br>Técnica de atenuación Ultrasónica   |
|  |  | 16. Técnica de durezas  |
| D Técnica de agrietamientos.   |  | Técnica de agrietamiento Hidrógeno-inducido<br>Técnica de agrietamiento Esfuerzo-corrosión.   |

#### 2.4.5 TÉCNICAS DESTRUCTIVAS DE MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.

Las primeras series de métodos están basadas en la destrucción del estado de equilibrio de los esfuerzos residuales después de seccionar la muestra, malearla, remoción de la capa o hole drilling. La redistribución de las fuerzas

internas conduce a esfuerzos locales, los cuales son medidos para evaluar el campo de los esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales son deducidos de la medición del esfuerzo usando la teoría elástica con el uso de un acercamiento analítico o del cálculo mediante elemento finito. Los ensayos destructivos usualmente utilizados son:

- ✓ El método de orificio negro (hole drilling)
- ✓ El método de núcleo de anillo. (Ring core)
- ✓ Método de deformación por doblez.
- ✓ Método de corte.

La aplicación de estos ensayos destructivos, o los llamados parcialmente destructivos, se limitan principalmente a las muestras de laboratorio [19].

2.4.5.1 Orificio negro.: El método de hole drilling, requiere de una pequeña perforación típicamente de 1-4 mm de diámetro de profundidad aproximadamente igual a este diámetro, con una profundidad de aproximadamente igual a su diámetro. Un dispositivo especializado de tres elementos es utilizado como se muestra en la Figura 2.14 para mediciones de alivio de esfuerzos en la superficie alrededor y fuera del orificio. El método ring core es similar excepto que el hole drilling es perforado con una diámetro de 15-150 mm. Las mediciones de alivio de los esfuerzos son hechos en la superficie del material permaneciendo dentro del anillo como se muestra en la Figura 2.14. La profundidad típica del la huella del método de ring core es de 25-150% de diámetro interno. En ambos métodos, los esfuerzos residuales existentes en el material antes de la perforación, pueden ser calculados a partir de las tensiones de alivio medidas. A pesar de algunas deficiencias, la técnica del orificio ciego sigue siendo un medio popular para medir la tensión residual.

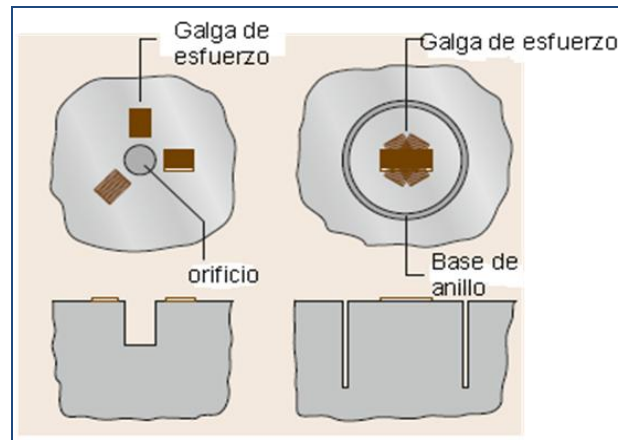


Figura 2.14. Profundidad de anillo de la muestra, para medición de esfuerzos residuales [19].

#### 2.4.6 TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.

El segundo grupo de métodos para la medición de esfuerzos residuales están basados en la relación entre los parámetros físicos y cristalográficos y los esfuerzos residuales que no requieren de la destrucción de la parte o del elemento estructural; estos pueden ser utilizados en mediciones de campo. Los métodos no destructivos más desarrollados son los siguientes:

2.4.6.1 Método difracción de Rayos X, y neutrones: Estos métodos están basados en el uso del espaciamiento interatómico como el medidor de deformación. Permite el estudio y la separación de tres tipos de tensiones residuales. Actualmente, el método de Rayos X es la técnica más utilizada para la medición no destructiva de los esfuerzos residuales.

El método de Rayos X es una técnica no destructiva para la medición de esfuerzos residuales en la superficie de los materiales. También se puede combinar con algún tipo de técnica de remoción de capa de manera que se pueda generar un perfil de esfuerzo, pero al utilizar este tipo de técnica, se convertiría en un método destructivo. Para la medición de esfuerzos residuales

la geometría tiene que ser tal que, un Rayo X pueda golpear tanto el área de medición y aún así ser difractado al detector sin golpear ningún obstáculo. Ya están disponibles difractómetros portátiles que pueden emplearse en campo para las mediciones en estructuras tales como tuberías, soldaduras y puentes.

La velocidad de las mediciones depende de varios factores; incluyendo el tipo de material que está siendo examinado, fuente de Rayos X y el grado de corriente requerida. Con una selección cuidadosa de la fuente de Rayos X y la velocidad de la medición puede ser reducida al mínimo. La nueva tecnología del detector también ha reducido grandemente el tiempo de medida. La difracción de Rayos X tiene una resolución de 1-2 mm hasta decenas de micras y una profundidad de penetración de alrededor de 10-30  $\mu\text{m}$ . dependiendo del material y de la fuente [19].

2.4.6.2 Técnicas de ultrasonido: Estas técnicas están basadas en las variaciones de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en los materiales bajo la acción de esfuerzos mecánicos.

2.4.6.3. Métodos Magnéticos: Estos métodos se basan en la interacción entre la magnetización y deformación elástica en los materiales ferromagnéticos. Varias técnicas pueden ser estudiadas, tales como la permeabilidad, magnetostricción e histéresis [19].

## **2.5 CORROSIÓN.**

La corrosión es un ataque químico o electroquímico que sufren los materiales metálicos como resultado de la acción de agentes que se encuentran en el medio ambiente que los rodea y que se traduce en una disminución de su valor de uso.

Se llaman agentes agresivos a aquellos que producen la corrosión, estos pueden ser: la atmósfera, el agua de mar, el aire húmedo, los vapores ácidos, etc. El fenómeno de corrosión se extiende a todos los materiales; pero

solamente se tendrá en cuenta la corrosión metálica. Todos los metales pueden ser usados siempre que su velocidad de deterioro sea aceptablemente baja. De este modo en corrosión se estudia la velocidad con que se deteriora los metales y las formas en que dicha velocidad puede ser controlada [23].

### 2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN.

La corrosión se puede clasificar según su morfología o según el medio en que se desarrolla es decir:

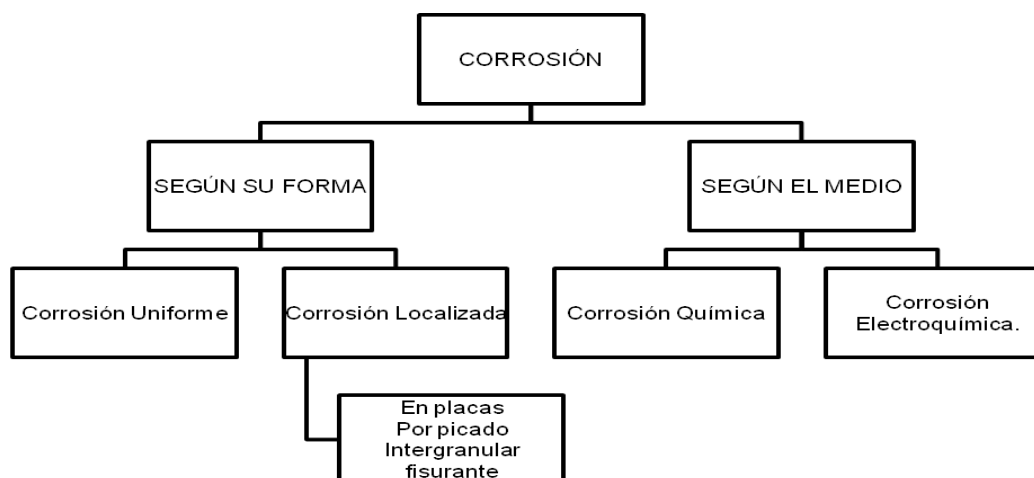


Figura 2.15 Clasificación de la corrosión [23].

### 2.5.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA FORMA.

Cuando se quiere evaluar los daños producidos por la corrosión, resulta muy conveniente la clasificación según la forma Figura 2.16

2.5.2.1 Corrosión uniforme: El ataque se extiende en forma más o menos uniforme sobre toda la superficie metálica, con penetración constante y la penetración media, es igual en todos los puntos. Esta es la forma más benigna de corrosión, pues permite calcular fácilmente la vida útil de los materiales

corroídos y se podría aumentar el tiempo de vida de un material con solo aumentar sus dimensiones.

2.5.2.2 Corrosión en placas: Incluye los casos intermedios entre corrosión uniforme y corrosión localizada. El ataque se extiende más en algunas zonas, pero se presenta aún como un ataque general.

2.5.2.3 Corrosión por picado: Es el caso más crítico de ataque uniforme. Durante el picado, el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas, propagándose hacia el interior del metal en forma de canales cilíndricos, formando túneles microscópicos que son capaces de almacenar solución de electrolito convirtiéndose en un proceso autocatalítico altamente destructivo ya que puede perforar la estructura. Este tipo de ataque, así como el intergranular y el fisurante, son las formas más peligrosas bajo las cuales se puede presentar la corrosión.

2.5.2.4 Corrosión intergranular: Se presenta como una franja estrecha de ataque que se propaga a lo largo de los límites de grano.

2.5.2.5 Corrosión fisurante: Se conoce como corrosión bajo tensiones. Se presenta cuando un metal está sometido simultáneamente a la acción de un medio corrosivo y de tensiones mecánicas de tracción. Se forman fisuras que pueden ser intergranulares o transgranulares y que se propagan hacia el interior del metal, se puede llegar hasta la fractura del metal. La velocidad de propagación oscila en general entre 1 y 10 mm/hora [23].



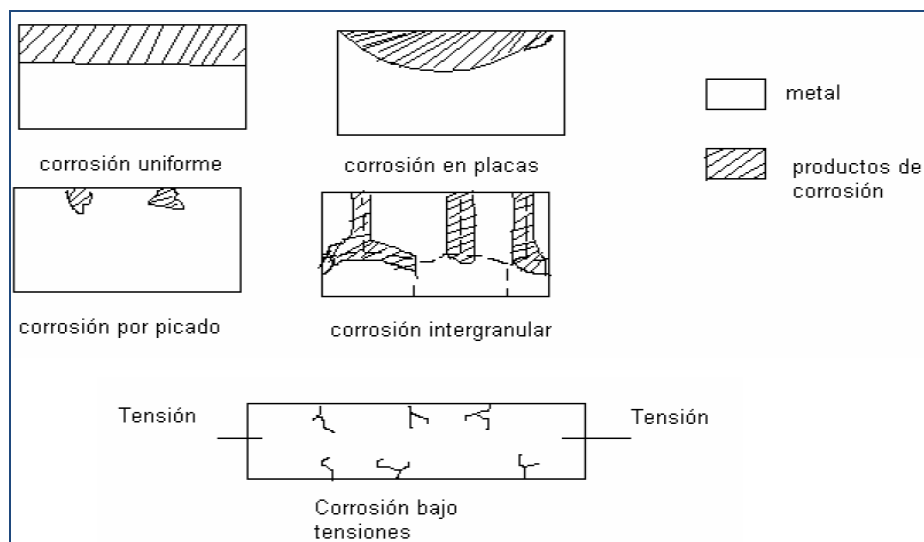


Figura 2.16 Clasificación de corrosión según su forma [23].

### 2.5.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL MEDIO.

2.5.3.1 Corrosión química: Bajo esta denominación se estudian aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no-iónico (por ejemplo oxidación en aire a altas temperaturas) reacción con una sola solución que no contenga iones (solución de yodo en tetracloruro de carbono). Supongamos que exponemos una superficie metálica limpia a la acción del oxígeno, el metal comenzará a reaccionar con el oxígeno formando óxidos, calentada al aire seco, por encima de  $500^{\circ}\text{C}$  se oxida a una velocidad apreciable formando una película con la siguiente estructura:

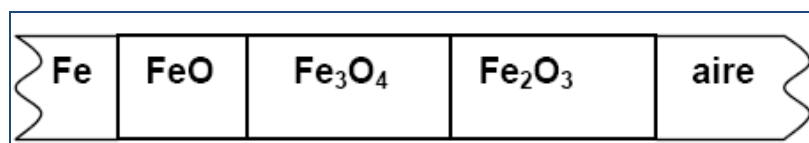


Figura 2.17. Corrosión en placa metálica [23].

Se han producido reacciones redox sin la intervención de iones en solución y no ha habido corrientes eléctricas recorriendo el metal. Si el grado de corrosión se expresa como aumento de peso (por el óxido formado) por unidad de área, se

observa que la corrosión se propaga en forma lineal con el tiempo, esto se puede observar en la Figura 2.18

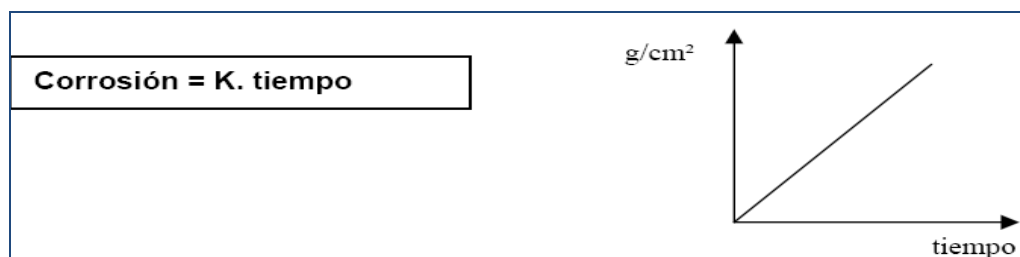


Figura 2.18. Corrosión por unidad de área [13].

2.5.3.2 Corrosión electroquímica: Se denomina corrosión electroquímica a aquella que implica necesariamente un flujo de corriente a través de un electrolito. A temperatura ambiente la forma de corrosión más frecuente y más seria es de índole electroquímica. Ejemplo corrosión en soluciones salinas, en agua de mar, en la atmósfera, en suelos, etc. Para que la corrosión electroquímica se produzca es necesario que existan dos elementos de diferente naturaleza en contacto con la solución conductora “electrolito” y que un elemento actúe como ánodo y otro como cátodo, es decir que se forme una celda natural. En los procesos de corrosión electroquímica circulan, sobre el material expuesto a corrosión, corrientes eléctricas, durante la corrosión se cumplen las leyes de Faraday [13].

Las causas más frecuentes de estas corrientes eléctricas son:

- 1) El contacto de dos materiales diferentes, tal como ocurre con el hierro en contacto con el cobre, el aluminio en contacto con el cobre, el cobre en contacto con el zinc, etc. La unión de dos partes de un mismo metal mediante un material de soldadura (Ejemplo: Fe con Sn-Fe).
- 2) Presencia de fases diferentes de una misma aleación. Ejemplo: aceros inoxidable.
- 3) Presencia de óxidos conductores de electrones. Por ejemplo óxido de laminación en chapas de Fe.

- 4) Diferentes grados de aireación de una pieza metálica.
- 5) Corrientes inducidas por circuitos eléctricos mal aislados. Tal es el caso de corrientes vagabundas en estructuras metálicas enterradas.
- 6) Impurezas, tensiones en el metal, etc.

Los factores anteriormente mencionados hacen que en el metal existan zonas de diferente potencial, es decir aparecen zonas anódicas y zonas catódicas (microelectrodos) que convierten al cuerpo metálico junto con el medio agresivo en un gran conjunto de micropilas electroquímicas. El medio agresivo puede ser la delgada capa de humedad que casi inevitablemente recubre a todo cuerpo expuesto al aire atmosférico [23].

#### **2.5.4 REACCIONES QUE TIENEN LUGAR DURANTE LA CORROSIÓN.**

##### 2.5.4.1 Reacciones anódicas: (en zonas anódicas)

Las reacciones anódicas que interesan son las de disolución del material afectado, o sea, el pasaje de iones metálicos de la red metálica al medio corrosivo.



Los electrones originan una corriente eléctrica que circula dentro del metal (conducción metálica).

##### 2.5.4.2 Reacciones catódicas: (en zonas catódicas).

Una de las reacciones catódicas más importantes que se produce en los procesos de corrosión es la reducción del oxígeno.



Esta reacción ocurre en casi todos los procesos de corrosión en medio acuoso. Otra reacción catódica importante, en especial en los casos de corrosión en

ácidos o en ausencia de oxígeno es la de desprendimiento de hidrógeno:  $\text{pH} < 4.3$ .

El hidrógeno formado en esta reacción puede desprenderse y pasar al medio ambiente o puede ser absorbido por un metal en proceso de corrosión. En el segundo caso, el metal puede formar hidruros o fragilizarse. Otra reacción catódica en zona bastante oxigenada puede ser [12]:



### **2.5.5 CONSIDERACIONES DE CORROSIÓN EN SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO Y BAJA ALEACIÓN.**

Los aceros al carbono y baja aleación usados para aplicaciones estructurales no son comúnmente utilizados en medios ambientes de corrosión severos. Sin embargo, estos son usados en condiciones moderadas a la corrosión, como las instalaciones de refinería de petróleo y oleoductos de gas/aceite amargo. La presencia de soldadura a menudo conduce a una reducción a la corrosión causada por las siguientes circunstancias:

- ✓ Variaciones de composición en el metal base, ZAC y en el metal de soldadura que favorece a la corrosión galvánica.
- ✓ Susceptibilidad a ambientes con contenido de hidrógeno, que promueven el agrietamiento.
- ✓ Presencia de esfuerzos residuales que conduzcan a la corrosión asistida por esfuerzos (SCC).
- ✓ Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) de la soldadura.
- ✓ Presencia de discontinuidades en la soldadura tales como defectos de superficie, las cuales actúan como sitios preferenciales para el ataque por corrosión localizado [11].

### **2.5.6 CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO SOLDADOS.**

El comportamiento de la corrosión en los aceros al carbono soldados, producidos por una soldadura de fusión, es dependiente de una serie de factores. La corrosión de aceros al carbono soldados puede ser debido a los efectos metalúrgicos, tales como corrosión preferencial en la ZAC o el metal de soldadura, o puede estar asociada con aspectos geométricos, como concentrador de esfuerzos en la punta de soldadura o creación de grietas debido al diseño de uniones. Adicionalmente, las condiciones específicas del medio ambiente pueden inducir a corrosión localizada tales como la temperatura, conductividad del fluido corrosivo o el espesor de la película del líquido corrosivo en contacto con el metal. En algunos casos tanto la geometría como el factor metalúrgico influirán en el comportamiento, como en el SCC. Preferencialmente la corrosión en aceros al carbono soldados ha sido investigada desde los 50s [15].

### **2.5.7 INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA SOLDADA.**

Debe de tenerse en cuenta el efecto de la composición del metal base, el consumible de soldadura y los diferentes procesos de soldadura utilizados. El metal base experimenta temperaturas que van desde temperatura ambiente en distancias lejos del charco de soldadura hasta elevadas temperaturas en el límite de fusión durante la soldadura. Por lo tanto, las transformaciones metalúrgicas ocurren alrededor del metal de soldadura y la ZAC, estas microestructuras pueden alterar significativamente la velocidad característica de la corrosión del acero. La fusión de la soldadura produce un metal de soldadura que, debido a las altas velocidades de enfriamiento, es efectivamente una fundición enfriada que contiene alta densidad de defectos de red y elementos de segregación. Una amplia gama de microestructuras pueden ser desarrolladas en las soldaduras, basadas en las velocidades de enfriamiento, y estas microestructuras son dependiente de la energía de entrada,

precalentamiento, espesor del metal (efectos de disipación de calor), tamaño del cordón de soldadura y efectos de recalentamiento debido a multifase de la soldadura. Como resultado de sus diferentes temperaturas máximas, composiciones químicas e inclusiones en la soldadura (óxido y sulfuros), la microestructura del metal de soldadura es totalmente diferente a la de la ZAC y el metal base. Similarmente el comportamiento de la corrosión puede también variar, pero en casos donde las mediciones de atenuación de la corrosión sean aplicada correctamente, por ejemplo recubrimiento o protección e inhibición catódica, éstas normalmente serían adecuadas para prevenir la corrosión preferencialmente en las soldaduras de aceros al carbono [10].

Otro factor importante de considerar es que para una composición dada, los niveles de dureza serían bajos para calores de entrada altos, tales como los producidos por soldadura de arco sumergido, y será mayor para las soldaduras de baja energía (con velocidades de enfriamiento rápidas) realizados por procesos como SMAW, GTAW, MIG. Se debe tener en cuenta que en comparación con calor de entrada, es necesario considerar la eficiencia del arco para comparar los procesos. Dependiendo de las condiciones de soldadura, microestructura del metal de soldadura, que generalmente tienden a granos finos con fundente básico y un poco más gruesos con fundentes de composición ácida o rutilícos [10].

2.5.6.1 Esfuerzos Residuales: Durante la soldadura, el metal de soldadura, ZAC, y subsecuentes pases de soldadura genera esfuerzos debido a la expansión y contracción térmica. En la solidificación, los altos niveles de esfuerzos residuales, a menudo cerca de la resistencia de fluencia del material, siendo una consecuencia de la contracción de la soldadura. El efecto de la concentración de esfuerzos, como el resultado de las discontinuidades geométricas tales como refuerzo de soldadura (exceso de metal de soldadura) y falta de penetración de soldadura (peligroso porque la probabilidad de grietas de corrosión y la posibilidad de grietas por fatiga aumenta.), son también importantes debido a la posibilidad de SCC en algunos medios ambientes [16].

### **2.5.8 FACTORES GEOMÉTRICOS.**

Se podría tener en cuenta que el exceso de penetración de la raíz puede interrumpir el flujo del fluido cerca de la pared de la tubería en operación con alta velocidad de flujo, llevando a la corrosión de compresión debajo de la soldadura. Alternativamente, en sistemas de bajas velocidades de gas y aceite donde el contenido de agua es arrastrada con el líquido abundante, el exceso de penetración puede causar interrupción del flujo y salida del agua, permitiendo la reunión del agua debajo de la soldadura, la cual puede conducir al aumento de la corrosión de la soldadura o del metal base adyacente [16].

### **2.5.9 CORROSIÓN PREFERENCIAL EN ZAC.**

Una amplia gama de microestructuras se pueden producir debido a que cerca del límite de fusión, la transformación de austenita de la ZAC durante el calentamiento será seguido por la transformación a una microestructura de carburo de ferrita o martensita durante el enfriamiento, dependiendo de la composición del material, temperatura crítica y velocidad de enfriamiento. Mas lejos de la soldadura, el material estará expuesto a menores temperaturas críticas solo se produce una reaustenización parcial y estas zonas calentadas debajo de la temperatura de transformación de ferrita-austenita ( $Ac_1$ ) no se verán significativamente afectadas, excepto por algunos carburos engrosados y el temple. A pesar de estas variaciones, en la mayoría de las aplicaciones éstas tienen una pequeña influencia en la resistencia a la corrosión, y la corrosión preferencial en la ZAC es relativamente rara. Donde el ataque preferencial en ZAC ha sido reportado, con mayor frecuencia es en aceros al carbono y carbono-manganeso en grados de alta aleación.

Un ejemplo de la corrosión preferencial en ZAC de aceros al carbono soldados se muestra en la Figura 2.19 [16].

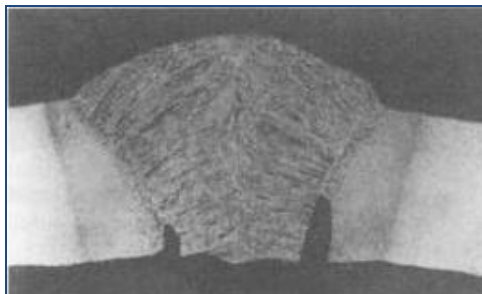


Figura 2.19. Grieta generada después del proceso de soldadura. [16]

Este fenómeno fue observado en una amplia gama de medios acuosos, la conexión más común es que los ambientes son bastantes altos en conductividad, mientras que por lo general existe ataque, aunque no siempre, éste se produjo en los valores de pH por debajo de aproximadamente 7 a 8.

El ataque preferencial de la ZAC en agua de mar fue reportada en los 60s y atribuido a la presencia de productos de bajas temperaturas de transformación tales como la martensita, bainita inferior o austenita retenida. Por lo tanto la composición de los aceros puede favorecer al aumento de la dureza y esto puede conducir a un aumento en la corrosión localizada, pero los aceros microaleados no son susceptibles.

Es evidente que existe una dependencia microestructural y estudios sobre las zonas afectadas por el calor muestran corrosión sensiblemente más severa cuando la composición del material y los parámetros de soldadura son tales que formen estructuras endurecidas. Se ha sabido desde hace muchos años que los aceros endurecidos se corroen más rápidamente en condiciones ácidas que el material totalmente templado, aparentemente por que los microcátodos locales en la superficie endurecida estimula la evolución de la reacción catódica del hidrógeno. La velocidad de la corrosión es usualmente gobernada por la velocidad catódica (reducción) cuando otros factores limitantes no están presentes, y por lo tanto es un factor en ambientes ácidos, pero menos en condiciones neutras o alcalinas.

En algunos entornos de producción de petróleo y gas, la corrosión preferencial en la soldadura puede causar un ataque mayor en ZAC o corrosión en el metal de soldadura [16].



### 2.5.10 AGRIETAMIENTO INDUCIDO POR HIDRÓGENO (HIC).

El agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC), el cual también se le conoce como agrietamiento asistido por hidrógeno y agrietamiento en frío, es un fenómeno asociado con soldaduras en aceros al carbono y aceros endurecidos de baja aleación. Este tipo de agrietamiento resulta de la combinación de los efectos de 4 factores:

- ✓ Microestructura susceptible (fragilidad).
- ✓ Presencia de hidrógeno en el metal de soldadura.
- ✓ Esfuerzos de tensión en el área de la soldadura
- ✓ Rango específico de temperatura 100 a 200 °C.

El HIC ocurre después del enfriamiento de la soldadura y se retrasa por muchas horas, mientras el hidrógeno atómico difunde a las áreas de altos esfuerzos de tensión. En defectos microestructurales en un campo con esfuerzos de tensión, el hidrógeno cambia a su forma molecular causando el agrietamiento. El agrietamiento puede ocurrir en la ZAC o en el metal de soldadura, y ésta puede ser transversal o longitudinal Figura 2.20 [16].

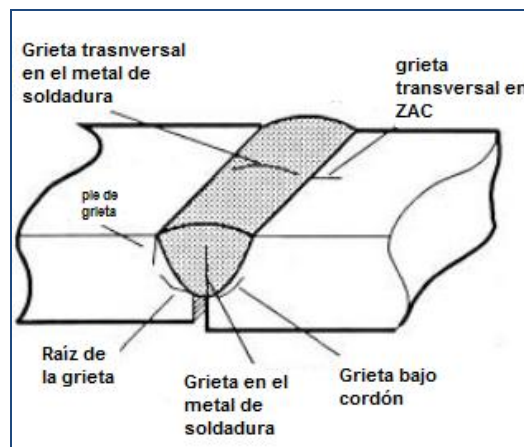


Figura 2.20. Localización del HIC en aceros al carbono soldados [16].

En los aceros al carbono, el agrietamiento ocurre comúnmente en la ZAC, por que los electrodos de acero al carbono son usualmente bajo carbono y el metal de soldadura es generalmente no templeable. La excepción sería si se utilizara un electrodo de alta aleación, si el metal de soldadura fuera hecho más duro por la dilución del carbón del metal base, o en algunas soldaduras de arco sumergido donde el uso excesivo de voltaje de arco y fundentes activos resultan altos en manganeso y/o silicio que adquiere del fundente.

Las grietas en la ZAC son a menudo longitudinales. Las grietas bajo el cordón se encuentran más o menos paralelas a la línea de fusión Figura 2.21. No se extienden normalmente a la superficie y por lo tanto son difíciles de detectar. Las grietas bajo el cordón de soldadura se formarán a bajos niveles de tensión en la martensita cuando estén presentes altos niveles de hidrógeno.

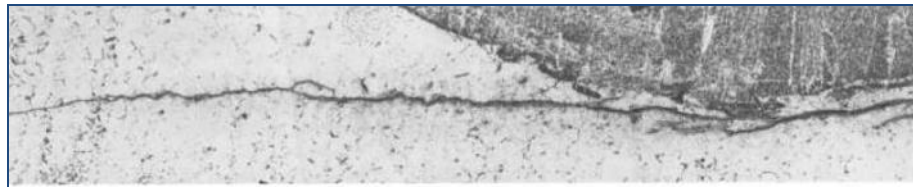


Figura 2.21. Grieta bajo el cordón de soldadura, resultado del HIC en la ZAC [16].

El pie de la grieta (Figura 2.22) y la raíz de ésta comienzan en áreas de alta concentración de esfuerzos. El agrietamiento por lo tanto puede ocurrir en estructuras menos susceptibles o en relativos bajos niveles de hidrógeno. Este tipo de agrietamiento a menudo se retrasa, mientras el hidrógeno necesario difunde al área.

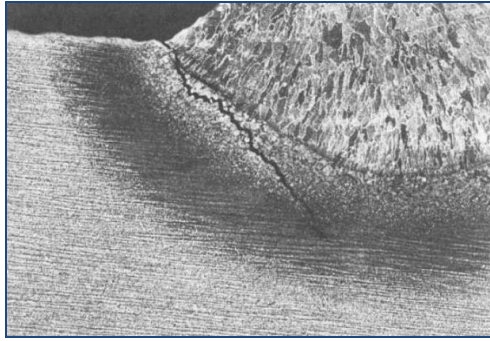


Figura 2.22 .HIC en pie de la grieta en la ZAC de soldadura de arco sumergido en acero de bajo carbono a 18x [16].

El agrietamiento transversal en la ZAC es menos común, y se producirá en martensita de alto carbono bajo condiciones de altos esfuerzos longitudinales. Las grietas en el metal de soldadura, pueden ser longitudinales o transversales. Las grietas longitudinales comienzan debido a la concentración de esfuerzos en la raíz de la soldadura. Las grietas en el metal de soldadura no siempre se extienden en la superficie. En la soldadura de arco sumergido hecha con fundentes húmedos, la única morfología que puede ocurrir es conocida como agrietamiento de Chevron. Aquí las grietas se encuentran a  $45^\circ$  del eje de la soldadura [15].

Uno de los serios problemas con el agrietamiento inducido por el hidrógeno, es la dificultad en detectar la presencia de la grieta. La naturaleza de retraso de algunas de las grietas exige que la inspección no se llevará a cabo muy pronto, especialmente en soldaduras que estarán sometidos a esfuerzos externos cuando están en servicio. Porque algunas de las grietas no se extienden en la superficie, y éstas no son detectables por métodos visuales si no por ejemplo líquidos penetrantes, o inspección de partículas magnéticas las cuales requieren de defectos que se encuentren cerca de la superficie. La radiografía es más sensible a defectos volumétricos y ésta no podría detectar las grietas que son más finas o las de mala orientación. La inspección ultrasónica es capaz de detectar la grieta si el operador conoce donde buscar. Dado la dificultad de detectar el HIC y la posibilidad de que estas grietas conduzcan a una falla en

servicio, es prudente observar las precauciones necesarias para en primer lugar evitar el agrietamiento [16].

2.5.10.1 Prevención del HIC: Las principales medidas de prevención para evitar el HIC son:

- ✓ Pre calentamiento, incluyendo un mantenimiento adecuado de temperatura de entrapasos.
- ✓ Control de calor de entrada.
- ✓ Revenido del cordón de soldadura.
- ✓ Uso de procesos y consumibles bajos en hidrógeno.
- ✓ Uso de materiales de aporte alternativos (por ejemplo electrodos austeníticos.)
- ✓ La susceptibilidad relativa de aceros al HIC; puede ser predicha por el uso de los diagramas de Graville, los cuales sugieren que la susceptibilidad puede ser evaluada calculando el carbón equivalente y compararlo con el contenido de carbono. Un ejemplo del diagrama de Graville para varias clases de aceros al carbón y baja aleación es mostrado en la Figura 2.23 [16]

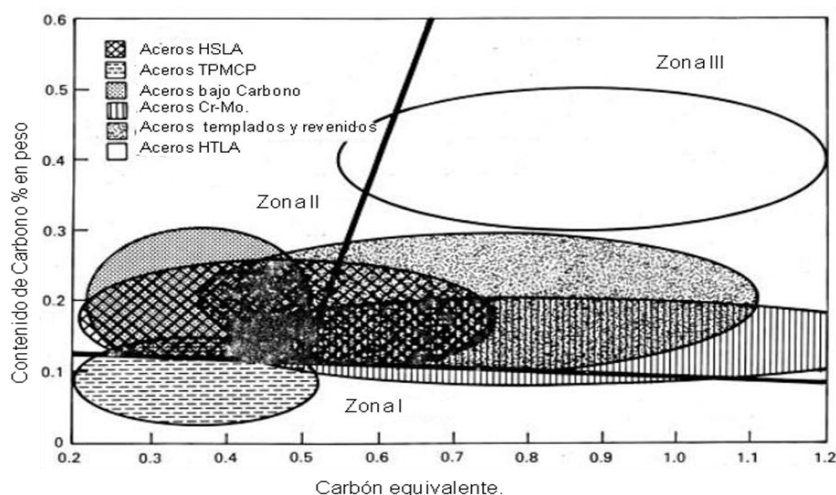


Figura 2.23. Diagrama de Graville [16]

Como se indica en esta figura, los aceros de la zona I tienen bajo carbono y bajo endurecimiento y no son muy susceptibles al agrietamiento. En la Zona II

los aceros tienen alto contenido de carbono y alta templabilidad, y todas las condiciones de soldadura producirán microestructuras sensibles al agrietamiento. Por lo tanto los aceros para evitar el HIC en la zona III el usuario debe aplicar procedimientos de bajo hidrógeno, incluyendo un precalentamiento y un tratamiento post soldadura. Los aceros de la zona II tienen altos niveles de carbono con baja dureza. Es posible; para evitar microestructuras sensibles al agrietamiento en la zona II, limitar velocidades de enfriamiento a través del control del calor de entrada y en menor medida con precalentamiento.

En la Figura 2.23 también muestra que los aceros HSLA, justo en la zona III, requiere una consideración especial para soldarlos. Los aceros Cr-Mo y los aceros templados y revenidos también requieren la misma atención que los aceros HSLA. Los aceros bajo carbono, son fácilmente soldables excepto en secciones gruesas, para las cuales algunas precauciones pueden ser necesarias. Los aceros TPMCP (aceros de alta resistencia) han tenido un desarrollo específicamente para quedarse en la zona I, y así ser soldables y su resistencia al HIC sea excelente [16].

#### **2.5.11 AGRIETAMIENTO ASISTIDO POR EL MEDIO AMBIENTE (EAC).**

El agrietamiento asistido por el medio ambiente (EAC) es común en industrias de refinería y generación de energía, en donde los componentes operan frecuentemente en ambientes agresivos. El EAC o degradación pueden tomar varias formas que van desde un adelgazamiento local, causada por un ataque global de corrosión, por agrietamiento bajo esfuerzos y daño por hidrógeno. La forma del agrietamiento o degradación depende de varios números de factores, incluyendo el material, composición química, microestructura, propiedades del metal de soldadura y ZAC (incluyendo dureza), geometría de la soldadura, nivel de esfuerzos residuales, condiciones de operación y ambiente. [16]

2.5.11.1 Agrietamiento debido a sulfuro de hidrógeno húmedo: La corrosión de aceros al carbono y baja aleación debido a soluciones de sulfuro de hidrógeno

acuoso ( $H_2S$ ) o aguas amargas, puede resultar en uno o más tipos de EAC. Dos de las más frecuentes formas de EAC, que afectan a las piezas soldadas por corrosión son el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) y agrietamiento bajo esfuerzos (SCC). [16]

2.5.11.2 Agrietamiento inducido por hidrógeno: Este ha sido observado en aceros de alta y baja resistencia, incluso en condiciones libres de esfuerzos, se produce principalmente en aceros de baja resistencia que son expuestos a medios que contienen hidrógeno. Debido a su rápido enfriamiento y solidificación el metal de soldadura, forma una estructura de dendritas y tiene inclusiones de óxidos dispersados en forma de finos glóbulos. Se ha confirmado que los metales de soldadura, o cuando no es usado metal de aporte con composición química especial, no se desarrolla el HIC. El HIC sin embargo ha sido observado en el metal base y en la zona afectada por el calor (ZAC). [16]

2.5.11.3 Agrietamiento inducido por hidrógeno en ambiente amargo (SSC): Es una falla del acero causada por la acción simultánea de esfuerzos y absorción de hidrógeno de la corrosión por  $H_2S$  acuoso. La susceptibilidad al SSC está en función de un sin número de variables, dos de las más importantes son resistencia o dureza del acero y el nivel de esfuerzos de tensión. El SSC está normalmente asociado con aceros de alta resistencia y alta aleación, estructuras en la ZAC con resistencias mayores de 550 Mpa (80Ksi) y durezas altas (> 22 HRC). Soldaduras sin post tratamiento térmico son particularmente un problema porque a menudo presentan zonas afectadas por el calor con durezas altas y gran cantidad de esfuerzos residuales que pueden iniciar el SSC y promover la propagación de las grietas. La resistencia al SSC habitualmente se logra con tratamientos térmicos post soldadura. [16]

### **2.5.12 AGRIETAMIENTO BAJO ESFUERZOS Y CORROSIÓN (STRESS CORROSION CRACKING SCC).**

El agrietamiento bajo esfuerzos es un término usado para describir las fallas por servicio en ingeniería de materiales que también pueden ocurrir por propagación lenta del agrietamiento asistido por el medio (EAC). La propagación de la grieta observada es el resultado de la combinación e interacción sinérgica de esfuerzos mecánicos y reacciones de corrosión [16]

2.5.12.1 SCC Debido a Esfuerzos Residuales: No hay duda que los esfuerzos residuales en la soldadura pueden contribuir al SCC en ambientes específicos, en los cuales las grietas representan gran peligro. Este es el caso de la falla por un recorrido activo, es decir disolución de material principalmente en el límite de grano y los mecanismos de fragilización por hidrógeno, y en este último caso, la falla debido a SCC puede ser particularmente vulnerable a bajos calores de entrada de soldadura sin embargo las estructuras con gran dureza tienen mayor susceptibilidad a desarrollar este mecanismo e inevitablemente lo forman [16].

### **2.5.13 SCC EN REFINERÍAS DE PRETRÓLEO.**

Monoetanolamina (MEA) es un absorbente usado para remover gases ácidos que contienen  $H_2S$  y  $CO_2$  en las operaciones de refinación de petróleo. Fallas recientes en varias refinerías han mostrado grietas que pueden ser paralelas o normales a la soldadura, dependiendo de la orientación principal de los esfuerzos de tensión. Las grietas han sido reportadas tanto transgranular como intergranular, como se muestra en la Figura 2.24

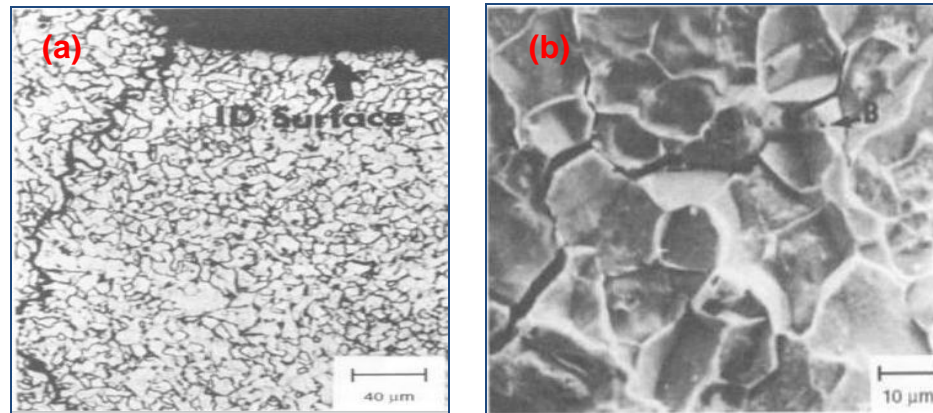


Figura 2.24. Se muestra en a) Agrietamiento transgranular b) Agrietamiento intergranular [16]

Antes en 1978, el alivio de los esfuerzos residuales después de la soldadura de aceros al carbono soldados en sistemas de MEA fueron realizados solo cuando la temperatura del metal de los equipos fuera de 65°C y el contenido de gas ácido más del 80% de CO<sub>2</sub> o cuando la temperatura fuera de 95° C en cualquier concentración de gas ácido. En la actualidad cualquier equipo que contenga MEA a cualquier temperatura y en cualquier concentración de gases ácidos, se está aplicando un alivio de esfuerzos residuales, después de la soldadura. Este es el resultado de encuestas realizadas a varias refinéras para definir el grado del problema del SCC en este ambiente.

Estos programas de inspección demostraron que existían fugas en estos recipientes que se encontraban en servicio a partir de los 2 a 25 años. Sin embargo en donde no se reportaron grietas en los recipientes que habían tenido un alivio de tensiones residuales post soldadura. [16]

El SCC también se ha presentado en soldaduras de acero al carbono en tuberías de recuperación de azufre, las grietas que fueron encontradas en el codo de la tubería, las cuales presentaban una longitud de 152mm y 2.9 Mpa. Después de 8 años de servicio fueron encontradas nuevas grietas, los exámenes metalográficos mostraron que las grietas fueron originadas aparentemente por SCC. Las grietas se presentaron en la soldadura y en el metal base aproximadamente 5mm de la soldadura y pasaron a través de la



zona afectada por el calor, como se muestra en la Figura 2.25. En otros casos las grietas por SCC también se originaron en la ZAC (Figura 2.25b).

La gran cantidad de grietas encontradas, fueron a causa de concentración de esfuerzos residuales en el codo de la tubería, y las características del modo de fractura sugiere que el mecanismo de falla fue debido a SCC, por lo que se decidió realizar un alivio de esfuerzos residuales o en el caso de que no se pudiera proceder, realizar un tratamiento térmico post soldadura [16].

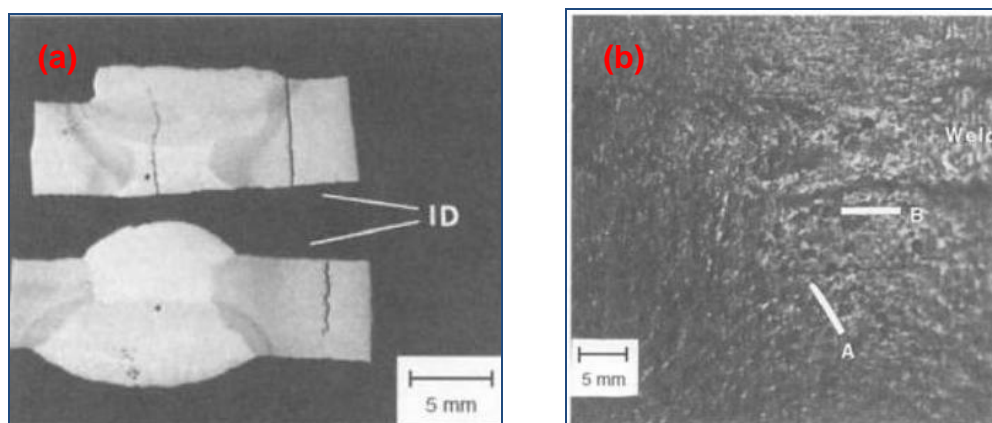


Figura 2.25 Se pudo observar a) Grietas originadas en la ZAC y b) cerca de la zona afectada por el calor. [16]

Otros estudios realizados a tuberías para refinería de petróleo han reportado grietas transversales a la soldadura Figura 2.26.

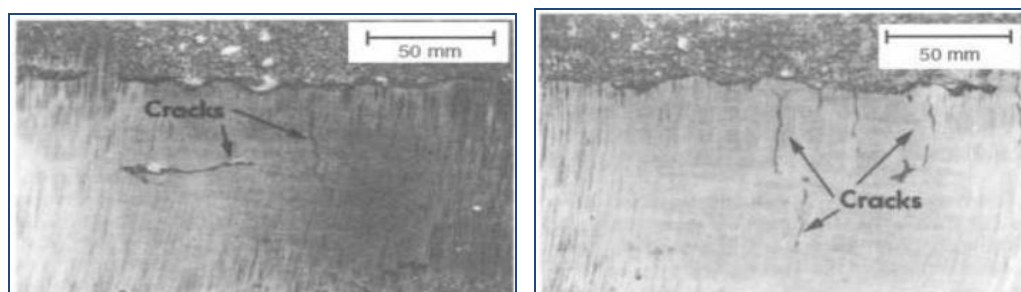


Figura 2.26. Grietas transversales que se originaron en el cordón de soldadura. [16]

Los ensayos metalográficos del metal base, mostraron fases de perlita y ferrita laminar con una estructura de grano equiaxial, Figura 2.27, también se pueden observar grietas longitudinales en la zona afectada por el calor de la soldadura, asociada con un refinamiento de grano. El agrietamiento fue iniciado desde un punto del picado por corrosión. El óxido asociado con las principales grietas fue ampliándose y generando numerosas grietas secundarias.

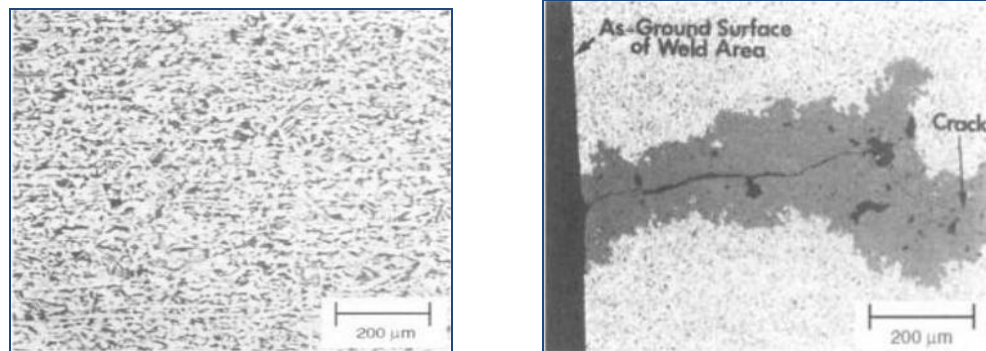


Figura 2.27. Resultados de ensayo metalográficos del metal base en los cuales mostraron fases de perlita y ferrita laminar [16]

En el metal base se observaron grietas que se extendían sobre éste, las grietas se extienden transversal a la soldadura, con grietas secundarias en la periferia de la región de los óxidos Figura 2.28. También se puede observar la conducción de la fase perlita laminar dentro del óxido producto de la corrosión.

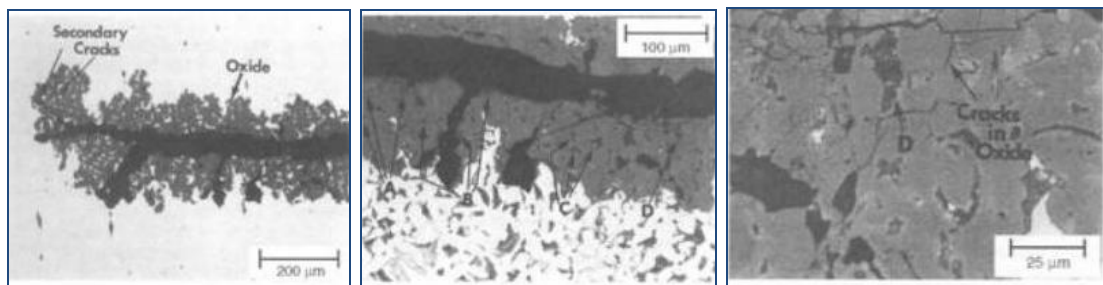


Figura 2.28. Muestra grietas extendidas sobre el metal base y en la periferia de óxidos, que se extienden transversalmente al cordón [16].

Se discutió acerca del origen de las grietas, y de lo cual de llegó a la conclusión de lo siguiente:

- ✓ Las grietas frecuentemente se originaban en las zonas afectadas por el calor, aunque también pueden presentarse en el metal base, como se mostró en la figura anterior.
- ✓ Las grietas son generalmente transversales a la ZAC y ocurre tanto perpendicular como paralela a la dirección de los esfuerzos.
- ✓ Las grietas pueden iniciar desde un óxido producto de la corrosión, concentración de esfuerzos, defectos, etc.

Las recomendaciones sugeridas es que después de realizar una soldadura, ya sea de reparación o aplicada por primera vez, debe de realizarse un alivio de esfuerzos para que ésta no presente falla en servicio [16].

#### **2.5.14 COMPORTAMIENTO DEL HIC EN ACERO X70.**

El hidrógeno es uno de los contaminantes más comunes en los aceros. La absorción del hidrógeno en los aceros, según H. Addach, el estudio de este fenómeno debe de avanzar, sin dudar a una mejor comprensión de los mecanismos puestos en juego [2]. En particular de los aceros de alta resistencia, da como resultado la pérdida de sus propiedades mecánicas, y en este sentido, la permeación electroquímica ha hecho posible el estudio de la difusión de hidrógeno en el hierro [2]. El acero X70, se les conoce por que presentan alta dureza y resistencia a las bajas temperaturas, éstos son muy usados en la transportación de petróleo y gas natural, sin embargo es también conocido su susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno HIC debido a la absorción del mismo, el cual tiene un efecto en la disminución en la propiedades mecánicas, el hidrógeno es conocido por degradar numerosos materiales metálicos debido a la presencia espacios intersticiales libres en el acero, esto permite que el hidrógeno pueda difundir fácilmente en el metal y conducir a zonas de fragilización, sin embargo la difusividad y la permeación del hidrógeno son fuertemente afectados por las propiedades de las superficies [2].

Además se ha reportado que los sitios preferenciales de atrapamiento de hidrógeno son las de fases duras e inclusiones no metálicas, promoviendo al HIC [1].

Koh[1] estudió el efecto del HIC en estructura de acero para tubería con respecto a la distribución de las inclusiones primarias y secundarias y la distribución del hidrógeno. Se encontró que los huecos inducidos por hidrógeno se formaron en los límites de grano cuando la tubería fue sometida a carga de sulfuros en cantidades mínimas. En esta área, se ha estudiado la moderación de las grietas por fatiga en acero puro, la recuperación de las grietas inducidas por el ataque de hidrógeno a altas temperaturas en aceros al carbono y la recuperación de mini-grietas en componentes para aumentar la seguridad del mismo.

Aquí se llevó a cabo una investigación sobre carga electroquímica de hidrógeno en el acero API X70 y la influencia de las inclusiones no metálicas en la iniciación y crecimiento de las grietas, sin embargo H. Addaach[2]. Concluyó que el espesor del material juega también un papel muy importante en la cantidad de hidrógeno que queda atrapado dentro de la red cristalina preferencialmente en los límites de grano [2]. La difusividad del hidrógeno  $D_{eff}$  fue medida a temperatura ambiente. Después de la carga de hidrógeno, las muestras fueron sometidas a tratamiento térmico y fue analizado el proceso de recuperación de las grietas [1].

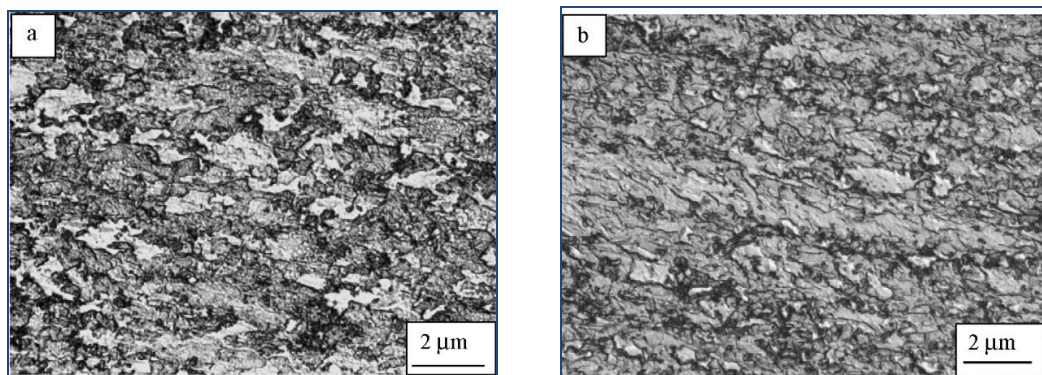


Figura 2.29. Estructura metalografica de acero API X 70 a) plano del laminado b) en dirección del laminado [1].

En la Figura 2.29 se observa la microestructura del acero API X70 en diferentes sentidos de laminación, se puede observar granos muy finos con un promedio de diámetro de menos de  $10\mu\text{m}$ . La microestructura del acero utilizado se compone principalmente de ferrita en forma irregular, y los límites de grano se revelan como discontinuos y muy oscuros. Los límites de granos pueden ser observados apenas y los tamaños de granos parecen no uniformes. La observación en el microscopio electrónico de transmisión (TEM) demuestra que la microestructura del acero, está compuesto principalmente de ferrita poligonal, mezclado con una pequeña cantidad de ferrita acicular Figura 2.30.

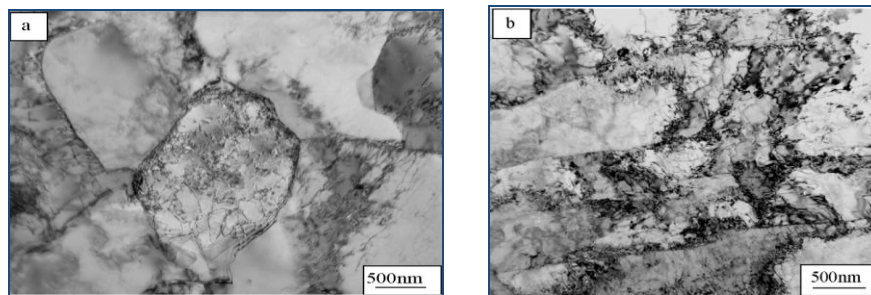


Figura 2.30. Microestructura del acero observado con TEM a) ferrita poligonal b) ferrita acicular [1].

Hay algunos tipos de inclusiones no metálicas encontradas en el acero X70. La microscopía óptica y la observación en el microscopio electrónico de barrido (SEM) indicaron que las inclusiones del acero incluyen a los nitruros y carbonitruros de titanio y niobio, los óxidos de aluminio, los óxidos y oxisulfuros de calcio y una pequeña cantidad de óxidos de manganeso y magnesio. El acero X70 tiene contenido de sulfuro ultra bajo (más bajo de 0.0009%) pero con un manganeso relativamente alto. No se examinó presencia de sulfuros de manganeso (MnS) en el acero. A veces, había otras inclusiones dentro de los nitruros, lo que significa que crecieron alrededor de una base de otras inclusiones. Con el microscopio óptico pudieron ser observadas las inclusiones de nitruros cuadrados, con su interior negro.



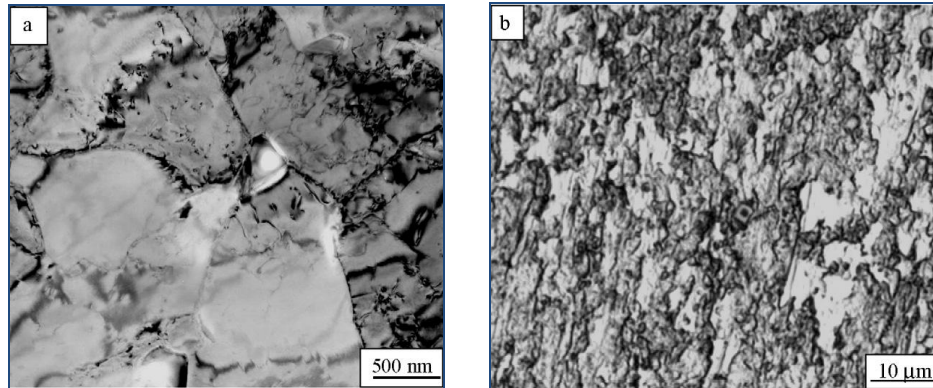


Figura 2.31. Inclusiones en acero API X 70 a) microestructura observada con TEM b) nitruros observados con microscopio óptico [1].

En la Figura 2.31 muestra inclusiones no metálicas observadas con TEM y microscopio óptico respectivamente. La ventaja del TEM sobre la microscopio óptica es que las inclusiones muy pequeñas pueden ser observadas en los límites de grano de la ferrita poligonal.

2.5.14.1 Resultados del ensayo de carga de hidrógeno: Se encontraron blisters con un diámetro menor que 0.5 mm, después que la prueba llevaba un tiempo de 5 min, con una densidad de corriente de 20 mA/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, solo tomó 1 min para que se formaran blisters con una densidad de corriente de 200 mA/cm<sup>2</sup>. El tamaño de los blisters tiende a aumentar si aumenta la densidad de corriente aplicada durante el ensayo. En la Figura 2.32 se aprecia la microestructura del acero con presencia de blíster y grietas observadas con el SEM. Las grietas parecen iniciar debajo de los blisters de manera gradual. Hay también algunas grietas internas visibles que se cree tienen su punto de inicio y crecimiento dentro del espécimen, específicamente debajo de la superficie. Una grieta grande se podría formar por el crecimiento continuo de una micro grieta o por la conexión de varias micro grietas.

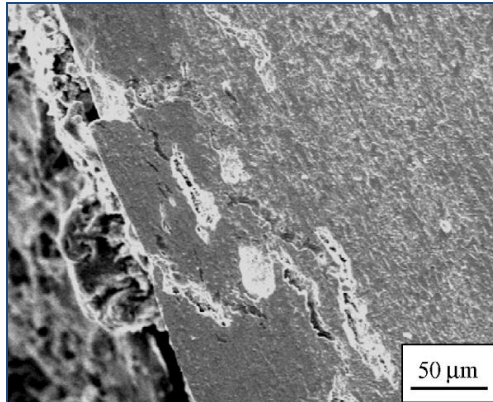


Figura 2.32 Una sección representativa de la ampolla y de las grietas del hidrógeno debajo de la misma [1].

2.5.14.2 Influencia de las inclusiones: Bajo condiciones de carga catódica de hidrógeno, las ampollas y grietas internas se forman debido a la absorción de átomos de hidrógeno, hidrógeno molecular así como el atrapamiento de los mismos en sitios de defectos tales como las inclusiones, límites de grano y dislocaciones. Consecuentemente, las altas presiones se aumentan en estos defectos, las cuales conducen al agrietamiento. El tamaño, la densidad y la distribución de los defectos pueden afectar la susceptibilidad al HIC en gran parte de los aceros. La caracterización microestructural muestra que el promedio del diámetro de los granos del acero X70 no es mayor de  $10\mu\text{m}$ . Estos granos finos resultan con un borde de grano muy grueso. Además, hay varios tipos de inclusiones en el acero X70 que son muy susceptibles al HIC  
Figura 2.33

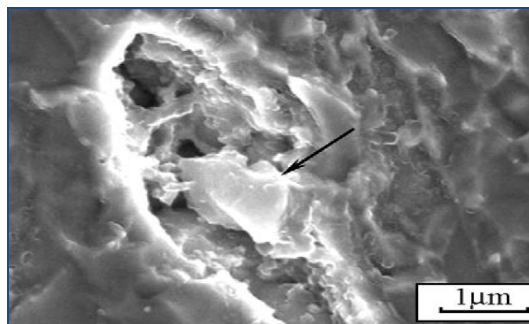


Figura 2.33. Micro grieta generada por una inclusión [1].

Se encontró que en los aceros de ultra alta resistencia, no existe relación dependiente entre las grietas inducidas por el hidrógeno y las inclusiones grandes tales como MnS silicatos y TiN. Se tiene reconocido que una sola inclusión de óxido y/o un racimo de inclusiones de óxido actúan como sitios de nucleación de grietas. Puede concluirse que las inclusiones de óxido y oxisulfuros son más perjudiciales para el acero X70 que las inclusiones de nitruro en el agrietamiento inducido por hidrógeno.

2.5.14.3 Origen y extensión de las grietas en los aceros para tubería X70: La longitud de algunas grietas originadas por la carga del hidrógeno son grietas intergranulares, siendo ocasionalmente trasgranular. Para los aceros X70 las grietas se propagan a lo largo de la dirección de laminado, algunas otras grietas pequeñas tienden a crecer en forma perpendicular al sentido de laminación. El tamaño de los granos del acero son menos que  $10\mu\text{m}$ , pero el ancho de las grietas pueden estar en un rango de  $2\mu\text{m}$  a  $15\mu\text{m}$ . es realmente muy difícil determinar si las grietas son inter o trasgranulares por que tiene un ancho similar o incluso igual que los granos pequeños. De hecho algunas micro grietas se han observado creciendo dentro del grano y a lo largo del límite de grano, esto se muestra en la Figura 2.34 (a). algunas veces se encuentran a lo largo de inclusiones Figura 2.34(b).

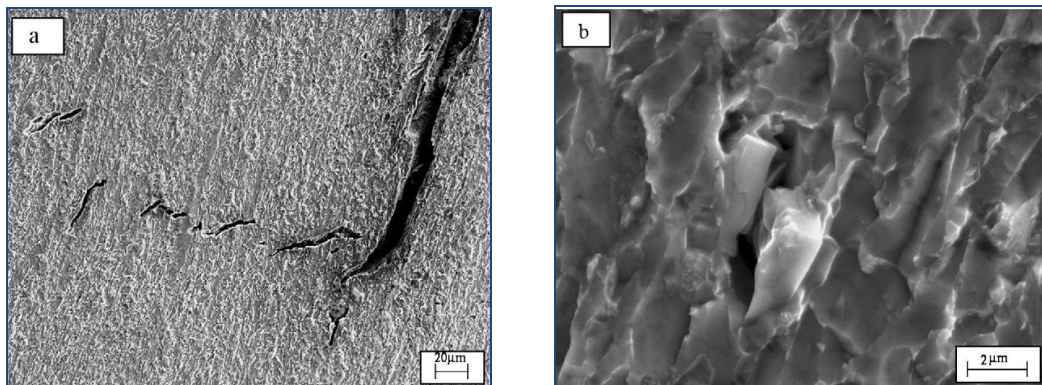


Figura 2.34 a) micro grieta tras e intergranular a lo largo del límite de grano. b) micro grieta encontrada en y alrededor de una inclusión no metálica [1].



Los resultados obtenidos del TEM demostraron que la microestructura del acero X70, consiste principalmente de ferrita poligonal con pequeñas cantidades de ferrita acicular. La ferrita acicular formada por la mezcla de difusión y transformación de corte la cual tiene alta densidad de dislocación. Es conocido como una de la microestructura más deseada para los aceros de tubería de conducción debido a su gran resistencia y buena dureza. La alta densidad de dislocaciones y grano fino en la microestructura también dan un óptimo valor de resistencia-dureza y alta resistencia al HIC de los aceros. No se encontraron micro grietas en los límites de grano de la ferrita acicular Figura 2.35. Se encontró que el acero con ferrita acicular mostraba mejor resistencia al HIC. Sin embargo, cuando la microestructura es poligonal mezclada con ferrita acicular, los límites de grano de la ferrita poligonal se convierte en blanco donde el ataque por hidrógeno conduce al HIC.

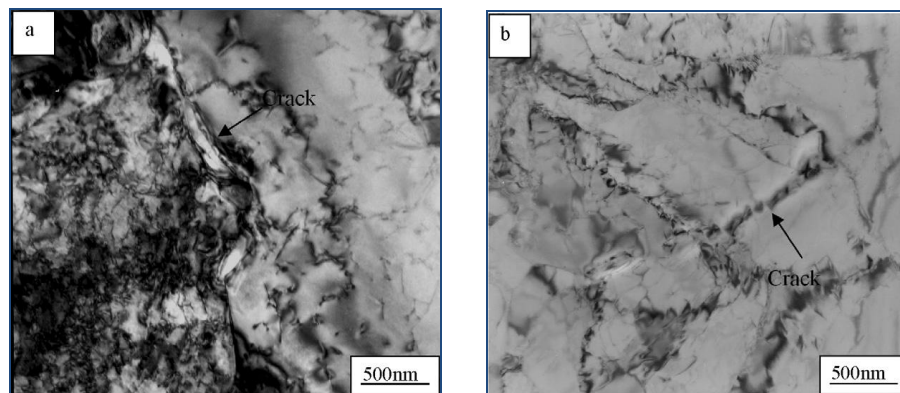


Figura 2.35 Grietas internas a) micro grietas localizadas a lo largo de los límites de grano de la ferrita poligonal, b) micro grietas existentes a lo largo de los límites de los sub granos [1].

### 2.5.15 PERMEACIÓN DE HIDRÓGENO.

La permeación electroquímica ha hecho posible el estudio de la difusión del hidrógeno en el hierro por electrolisis en medio básico, esta técnica fue desarrollada por Devanathan y es el método más comúnmente utilizado en la medición de la difusividad y el fenómeno de fragilización por hidrógeno,

además tiene una gran sensibilidad y ofrece la ventaja de tener un registro continuo del flujo en función del tiempo, según el estudio realizado por H. Addach [2].

El equipo que se utiliza para este tipo de pruebas consta de los siguientes elementos, una celda electrolítica con dos compartimentos un lado anódico y el otro catódico, un electrodo de referencia, un electrolito, un electrodo auxiliar y dos potenciostato[2].

El flujo del hidrógeno a través de la muestra se mide con una densidad de corriente  $I_{\infty}$  Figura 2.36y convertido dentro del flujo del hidrógeno de acuerdo a la siguiente ecuación [1].  $J_{\infty} = I_{\infty} / FA$

donde:

A = área de la muestra a través de la cual ocurre la difusión

F = constante de faraday.

La efusividad efectiva del hidrógeno es calculada con la ecuación:  $D_{\text{eff}} = d^2 / 6t_L$ .

Para determinar la concentración del hidrógeno se utiliza la ecuación:  $C_0 = J_{\infty} \times d / D_{\text{eff}}$ . Para determinar la densidad de atrapa miento de hidrógeno:

$$N_T = \frac{C_0}{3} \left( \frac{D_l}{D_{\text{eff}}} - 1 \right)$$

En la Figura 2.36 a) y b) se muestran la transición media y completa respectivamente de la prueba de permeación de hidrógeno.

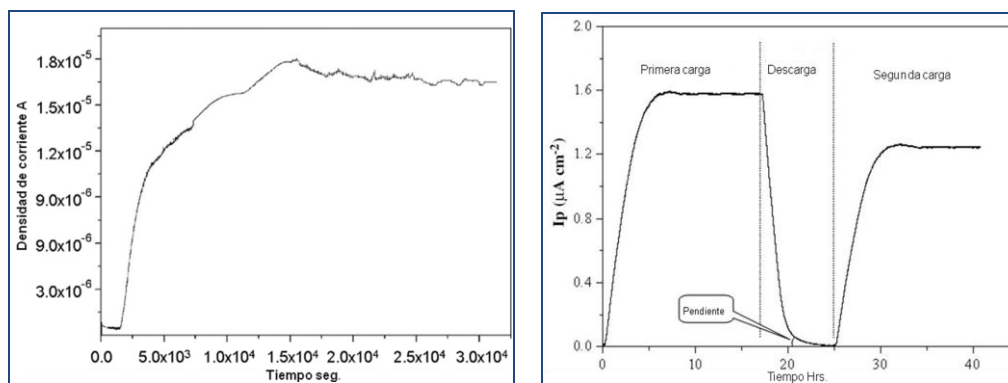


Figura 2.36. Curvas de permeación de hidrógeno a) acero X70[1] b) transición completa de carga [2].

La diferencia observada se atribuyó al pulido mecánico que provoca una modificación de la microestructura de la superficie, provocando que el transporte de hidrógeno se obstaculizado, así mismo generando trampas de hidrógeno. La penetración fue más débil durante la segunda carga debido a que la microestructura del material ha cambiado debido al hidrógeno atrapado durante la primera carga Figura 2.36 (b) sin embargo, en ciertas curvas, se observó que el tiempo de salida de la permeación en la segunda carga, es más corta que la del primero, ya que se produjo una pendiente mas importante en la descarga. Si la totalidad de hidrógeno no tiene tiempo suficiente para permitir la salida del mismo, éste fenómeno podría atribuirse a los términos de trampas irreversibles.

Las inclusiones no metálicas tales como nitruros de titanio y nitruros de niobio no son principales sitios de atrapamiento que causa el HIC. Otras imperfecciones tales como óxidos podrían jugar un papel más importante en al agrietamiento del acero X70, cuando éste está en ambientes ricos en hidrógeno.

Las grietas tienden a aparecer en los límites de grano de la ferrita poligonal, pero no en los límites de grano de la ferrita acicular. La ferrita acicular muestra gran resistencia al HIC [1].

2.5.15.1 Efecto del espesor del material: Con el fin de estudiar el efecto que tiene el espesor en la penetración de hidrógeno, se han obtenido diferentes curvas para explicar este fenómeno. En la figura 2.37 se muestran curvas de permeación de hidrógeno con una misma condición de carga para muestras de diferente espesor. La observación principal aquí fue la reducción del nivel del estado de equilibrio con el aumento del espesor de la muestra. Este estudio sugiere que la penetración y los parámetros de difusión se consideren en función del espesor de la muestra, como se muestra en la Figura 2.37 Si el espesor aumenta, los valores de permeación y difusión disminuyen [2].

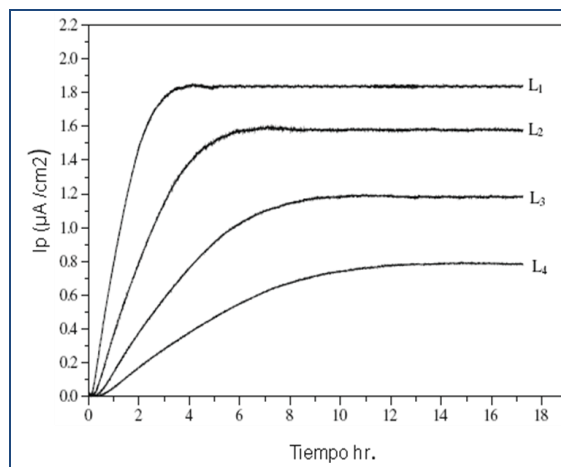


Figura 2.37. Curvas de permeación de hidrógeno aplicada a acero de diferente espesor  $L_1 = 0.5\text{mm}$ ,  $L_2 = 1\text{mm}$ ,  $L_3 = 1.5\text{mm}$  y  $L_4 = 2\text{mm}$  [2].

La permeación del hidrógeno a través de la membrana metálica de hierro de diferentes espesores fue medida por la técnica de permeación electroquímica. Los principales resultados experimentales mostraron que el hidrógeno tuvo fácil movilidad cuando el material era delgado que cuando se tenía un espesor considerable, en este caso la movilidad fue reducida [2].

## 2.6 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. La radiación electromagnética puede ordenarse en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas).

### 2.6.1 ESPECTRO.

Serie de colores semejante a un arco iris (por este orden: violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo) que se produce al dividir una luz compuesta como la luz blanca en sus colores constituyentes. El arco iris es un espectro natural

producido por fenómenos meteorológicos. Puede lograrse un efecto similar haciendo pasar luz solar a través de un prisma de vidrio.

Cuando un rayo de luz pasa de un medio transparente como el aire a otro medio transparente, por ejemplo vidrio o agua, el rayo se desvía; al volver a salir al aire vuelve a desviarse. Esta desviación se denomina refracción; la magnitud de la refracción depende de la longitud de onda de la luz. La luz violeta, por ejemplo, se desvía más que la luz roja al pasar del aire al vidrio o del vidrio al aire. Así, una mezcla de luces roja y violeta se dispersa al pasar por un prisma en forma de cuña y se divide en dos colores. Se diferencian en su frecuencia y longitud de onda. Dos rayos de luz con la misma longitud de onda tienen la misma frecuencia y el mismo color. La longitud de onda de la luz es tan corta que suele expresarse en nanómetros (nm).

Los científicos descubrieron que más allá del extremo violeta del espectro podía detectarse una radiación invisible para el ojo humano pero con una marcada acción fotoquímica; se la denominó radiación ultravioleta. Igualmente, más allá del extremo rojo del espectro se detectó radiación infrarroja que aunque era invisible transmitía energía, como demostraba su capacidad para hacer subir un termómetro. Como consecuencia, se redefinió el término espectro para que abarcara esas radiaciones invisibles, y desde entonces se ha ampliado para incluir las ondas de radio más allá del infrarrojo y los Rayos X y rayos gamma más allá del ultravioleta Figura 2.38

Por orden decreciente de frecuencias (o creciente de longitudes de onda), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, Rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio. Los rayos gamma y los Rayos X duros tienen una longitud de onda de entre 0,005 y 0,5 nanómetros (un nanómetro, o nm, es una millonésima de milímetro). Los Rayos X blandos se solapan con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los 50 nm. No existen límites definidos entre las diferentes longitudes de onda, pero puede considerarse que la radiación ultravioleta va desde los 350 nm hasta los 10 nm. El ultravioleta, a su vez, da paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 400 hasta 800 nm. La

longitud de onda de la luz violeta varía entre unos 400 y 450 nm, y la de la luz roja entre unos 620 y 760 nm. Los rayos infrarrojos o "radiación de calor" se solapan con las frecuencias de radio de microondas, entre los 100.000 y 400.000 nm. Desde esta longitud de onda hasta unos 15.000 metros, el espectro está ocupado por las diferentes ondas de radio; más allá de la zona de radio, el espectro entra en las bajas frecuencias, cuyas longitudes de onda llegan a medirse en decenas de miles de kilómetros [25].

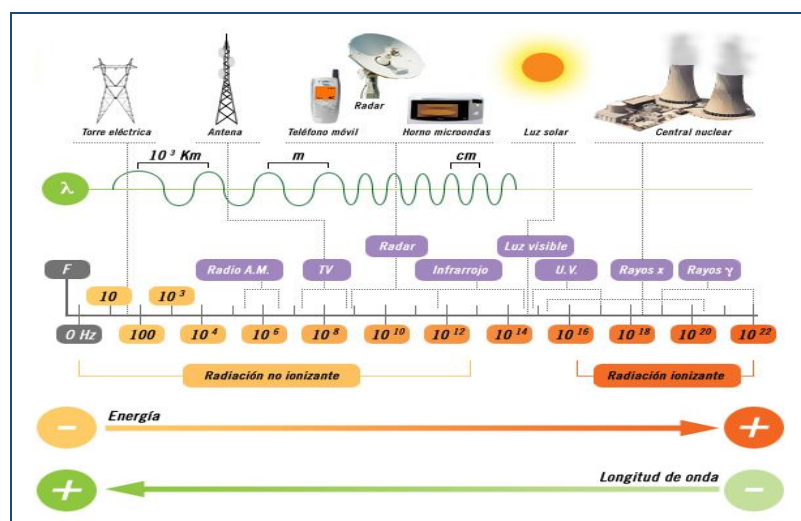


Figura 2.38. Muestra el espectro electromagnético de Rayos X.

## 2.6.2 PROPIEDADES.

Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, éstas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad  $c = 299.792$  km/s. Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción y la interferencia.

La longitud de onda va desde billonésimas de metro hasta muchos kilómetros, es importante para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Y se expresa mediante la ecuación:

$$l \cdot f = c.$$

Donde:

l: longitud de onda

f: frecuencia

c: velocidad de propagación de la luz.

Tabla2.6 Longitudes de onda.

| Rayos | Gamma | X Duros | X Blandos |    | Ultra-violeta | Visible |     |      |     | Infra-rojos |        | Microondas | Radio   |
|-------|-------|---------|-----------|----|---------------|---------|-----|------|-----|-------------|--------|------------|---------|
|       |       |         |           |    |               | violeta |     | Rojo |     |             |        |            |         |
| 1(nm) | 0,005 | 0.5     | 10        | 50 | 350           | 400     | 450 | 620  | 760 | 800         | 100.00 | 400.000    | 15.000m |

### 2.6.3 PROPIEDADES DE LOS RAYOS X.

Los Rayos X afectan a una emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz. La absorción de Rayos X por una sustancia depende de su densidad y masa atómica. Cuanto menor sea la masa atómica del material, más transparente será a los Rayos X de una longitud de onda determinada. Cuando se irradia el cuerpo humano con Rayos X, los huesos (compuestos de elementos con mayor masa atómica que los tejidos circundantes) absorben la radiación con más eficacia, por lo que producen sombras más oscuras sobre una placa fotográfica. En la actualidad se utiliza radiación de neutrones para algunos tipos de radiografía, y los resultados son casi los inversos. Los objetos que producen sombras oscuras en una imagen de Rayos X aparecen casi siempre claros en una radiografía de neutrones [25].

2.6.3.1 Fluorescencia: Los Rayos X también producen fluorescencia en determinados materiales, como el platino-cianuro de bario o el sulfuro de cinc. Si se sustituye la película fotográfica por uno de estos materiales fluorescentes, puede observarse directamente la estructura interna de objetos opacos. Esta técnica se conoce como fluoroscopia [25].

2.6.3.2 Onización: Otra característica importante de los Rayos X es su poder de ionización, que depende de su longitud de onda. La capacidad de ionización de

los Rayos X monocromáticos es directamente proporcional a su energía. Esta propiedad proporciona un método para medir la energía de los Rayos X. Cuando se hacen pasar Rayos X por una cámara de ionización se produce una corriente eléctrica proporcional a la energía del haz incidente. Además de la cámara de ionización, otros aparatos más sensibles como el contador Geiger o el contador de centelleo también miden la energía de los Rayos X a partir de la ionización que provocan. Por otra parte, la capacidad ionizante de los Rayos X hace que su trayectoria pueda visualizarse en una cámara de niebla o de burbujas [25].

2.6.3.3 Difracción de Rayos X: Los Rayos X pueden difractarse al atravesar un cristal, o ser dispersados por él, ya que el cristal está formado por redes de átomos regulares que actúan como redes de difracción muy finas. Los diagramas de interferencia resultantes pueden fotografiarse y analizarse para determinar la longitud de onda de los Rayos X incidentes o la distancia entre los átomos del cristal, según cuál de ambos datos se desconozca. Los Rayos X también pueden difractarse mediante redes de difracción rayadas si su espaciado es aproximadamente igual a la longitud de onda de los Rayos X [25].

## **2.6.4 INTERACCIÓN CON LA MATERIA.**

2.6.4.1 Efecto fotoeléctrico: Cuando un cuanto de radiación o fotón correspondiente a la zona de Rayos X del espectro electromagnético choca contra un átomo, puede golpear un electrón de una capa interior y expulsarlo del átomo. Si el fotón tiene más energía que la necesaria para expulsar el electrón, le transferirá esta energía adicional en forma de energía cinética. Este fenómeno, denominado efecto fotoeléctrico, tiene lugar principalmente en la absorción de Rayos X de baja energía.

2.6.4.2 Efecto Compton: El efecto Compton es una manifestación importante de la absorción de Rayos X de menor longitud de onda. Cuando un fotón de alta energía choca con un electrón, ambas partículas pueden ser desviadas formando un ángulo con la trayectoria de la radiación incidente de Rayos X. El



fotón incidente cede parte de su energía al electrón y sale del material con una longitud de onda más corta. Estas desviaciones acompañadas por un cambio en la longitud de onda se conocen como dispersión Compton.

2.6.4.3 Producción de pares: En el tercer tipo de absorción, que se observa especialmente cuando se irradian elementos de masa atómica elevada con Rayos X de muy alta energía, se produce el fenómeno de producción de pares. Cuando un fotón de alta energía penetra en la capa electrónica cercana al núcleo, puede crear un par de electrones, uno con carga negativa y otro con carga positiva; los electrones con carga positiva se conocen también como positrones. La producción de pares es un ejemplo de la conversión de energía en masa. El fotón necesita una energía de al menos 1,2 MeV para proporcionar la masa del par. Si el fotón incidente posee más energía de la necesaria para la producción del par, el exceso de energía se cede al par de electrones en forma de energía cinética. Las trayectorias de las dos partículas son divergentes [25].

### **2.6.5 TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.**

La difracción es un fenómeno característico de las ondas, que consiste en la dispersión de las ondas cuando se interaccionan con un objeto ordenado. Ocurre en todo tipo de ondas, desde las sonoras, hasta las ondas electromagnéticas como la luz, y también los Rayos X.

Los Rayos X tienen longitudes de onda similares a las distancias interatómicas en los materiales cristalinos, por lo que podemos utilizar la difracción de Rayos X como método para explorar la naturaleza de la estructura molecular.

El estudio de evaluación de la materia sólida se puede hacer de varias maneras, una de ellas es la difracción de Rayos X. La técnica de difracción de Rayos X da información sobre la estructura de los sólidos, es decir la disposición de los átomos que componen el sólido.

Entre los diferentes métodos de evaluación suele ser utilizado el método de difracción de Rayos X, ya que permite el análisis de la estructura de una manera no destructiva, aunque es de relativamente de baja sensibilidad. Los tipos de información que este método puede proporcionar es:

1. Tipo de materiales que componen un sólido (análisis cualitativo).
2. Las cantidades de materiales que componen el sólido (análisis cuantitativo).
3. Las cantidades de materiales que se cristalizan (cristalización).
4. Cantidad de esfuerzos presentes en el sólido (esfuerzos residuales).
5. Tamaño de los cristales que componen el sólido. (tamaño cristalino).
6. Orientación media de los cristales que componen el sólido (textura).

Como herramienta para el análisis, los equipos de difracción de Rayos X pueden ser clasificados por ejemplo el método para policristales (método de polvo), los métodos de cristal simple (single crystal).

En el pasado, debido a su sensibilidad algo baja, la técnica de difracción de Rayos X no fue utilizada activamente, particularmente para el análisis superficial y el análisis micro del área. Estos últimos años sin embargo, para aumentar la sensibilidad, se han hecho esfuerzos para mejorar los sistemas ópticos, los detectores y las fuentes de detección de Rayos X. Esto ha dado lugar a su creciente uso para el estudio de la evaluación de los sólidos.

En las técnicas de micro áreas de difracción de Rayos X, el PSPC (posición de contador proporcional sensible a la posición) se utiliza para detectar simultáneamente los rayos difractados generados en diferentes posiciones angulares en el menor tiempo posible.

La información de Rayos X obtenida eficientemente para áreas de micro hasta 0.01 mm de diámetro. Además, en las técnicas de película delgada la incidencia de Rayos X se hace un ángulo mínimo de la superficie de la muestra a fin de

obtener la mayor información posible sobre la superficie. Además, en el estudio de capa fina, un monocromador se utiliza para mejorar el pico con relación a la profundidad.

2.6.5.1 Aspectos Físicos: El fenómeno de difracción es debido esencialmente a la relación de fases entre dos o más ondas. Las diferencias de camino óptico conducen a *diferencias de fase* que a su vez producen un cambio en la amplitud. Cuando dos ondas están completamente desfasadas se anulan entre sí, ya sea porque sus vectores sean cero o porque estos sean igual en magnitud pero en sentido contrario. Por el contrario, cuando dos ondas están en fase, la diferencia de sus caminos ópticos es cero o un número entero de la longitud de onda (Figura 2.39) [4].

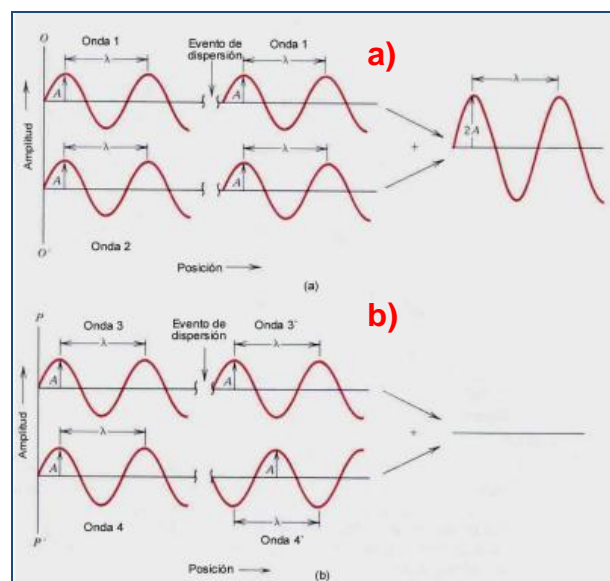


Figura 2.39. (a) Demostración de cómo dos ondas (1 y 2) que tienen la misma longitud de onda y que están en fase después del evento de dispersión (1' y 2') interfieren constructivamente una con la otra. (b) Demostración de cómo dos ondas (3 y 4) que tienen la misma longitud de onda y que llegan a estar fuera de fase después del evento de dispersión (3' y 4'), interfieren destructivamente una con la otra [4].

Cuando consideramos la difracción de Rayos X monocromáticos y paralelos en estructuras ordenadas, existen diferencias de camino óptico. Esto sucede por dispersión y no por alguna interacción entre los Rayos X y los átomos de las estructuras. La difracción de Rayos X es descrita completamente por la Ley de Bragg.

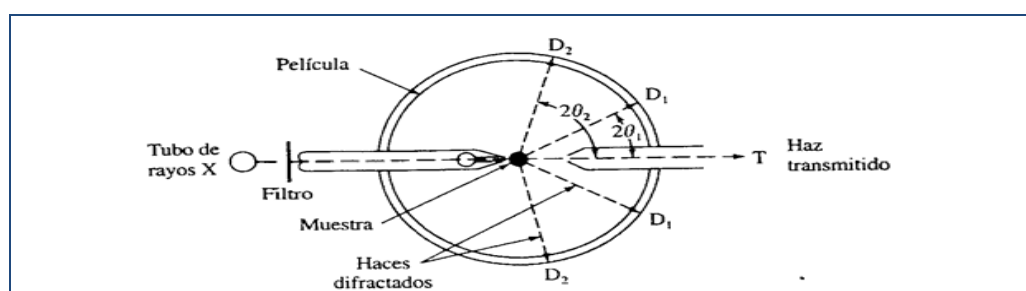
La difracción de Rayos X ocurre sólo cuando la longitud de onda es del mismo orden que los centros de dispersión. Así, para estas ondas electromagnéticas se necesitan rejillas de dispersión del orden de Å. Sólo en la naturaleza y, en particular, en las separaciones interatómicas se encuentran estas distancias.

### 2.6.6 MÉTODOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Existen tres métodos para producir difracción de Rayos X. Método de Laue, Método de rotación de cristal y método Powder.

2.6.6.1 Método De Laue: Consiste en hacer incidir en un cristal un espectro continuo de Rayos X, de tal manera que para cada longitud de onda, existirá un determinado ángulo. El método de transmisión de Laue consiste en colocar esta película detrás del cristal. Por el contrario, en el método de reflexión de Laue, la película se interpone entre la fuente y el cristal, está posee un agujero que deja pasar los haces de Rayos X.

En el método de transmisión de Laue los haces difractados forman un patrón de machas circular o elíptico y en cambio, el patrón formado en el método de reflexión de Laue son hipérbolas Figura 2.40



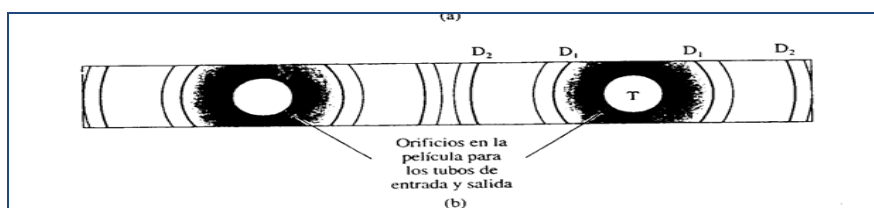


Figura 2.40 Método de transmisión de Laue [5].

2.6.6.2 Método de rotación de cristal: Se hace incidir un haz de Rayos X monocromáticos sobre un cristal. Para detectar los haces difractados, la película es envuelta de forma cilíndrica de tal manera que rodee al cristal. El cristal se hace girar sobre el eje perpendicular al haz incidente, el cual coincide con el eje del cilindro. Para encontrar el ángulo al cual se cumple la ley de Bragg, el giro del cristal se hace sucesivamente de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , hasta encontrar el patrón de difracción mostrado en la Figura 2.40.

2.6.6.3 Método powder: El cristal a analizar es reducido a polvo de tal manera que forme un conjunto de pequeños cristales. Si se tuviese un cristal y en él se hiciera incidir un haz monocromático, el haz se difractaría a un ángulo en particular. Al hacer girar este cristal de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , el haz formará un cono cuyo eje coincide con el del haz incidente. El interés de este método en tomar varios cristales, es formar este cono con las distintas orientaciones posibles de los diversos cristales.

## 2.6.7 LA LEY DE BRAGG.

Los Rayos-X son un tipo de radiación electromagnética que tiene una alta energía y longitudes de onda muy cortas, las longitudes de onda son del orden de espacios atómicos de los sólidos. Cuando un haz de Rayos-X incide sobre

un material sólido, una porción de este rayo se dispersará en todas las direcciones por los electrones asociados a cada átomo o ión que está dentro del camino del haz. Consideremos ahora las condiciones necesarias para la difracción de rayos-X por un arreglo periódico de átomos Figura 2.41

Si se tienen dos planos de átomos A-A' y B-B', como se muestra en la siguiente Figura, que poseen los mismos índices de Miller  $h, k$  y  $l$ , y están separados por la distancia interplanar  $d_{hkl}$ . Asumiendo que un haz de rayos-X de longitud de onda  $\lambda$ , paralelo, monocromático y coherente (en fase) incide en estos dos planos con un ángulo  $\theta$ , dos rayos de este haz (1 y 2), son dispersados por los átomos P y Q. Ocurrirá una interferencia constructiva entre los rayos dispersados (1' y 2') a un ángulo  $\theta$  de los planos, si la diferencia de la longitud del camino recorrido entre 1-P-1' y 2-Q-2' (p.ej., SQ + QT) es igual a un número  $n$ , de longitudes de onda. Esta es la condición de difracción:

$$n\lambda = SQ + QT$$

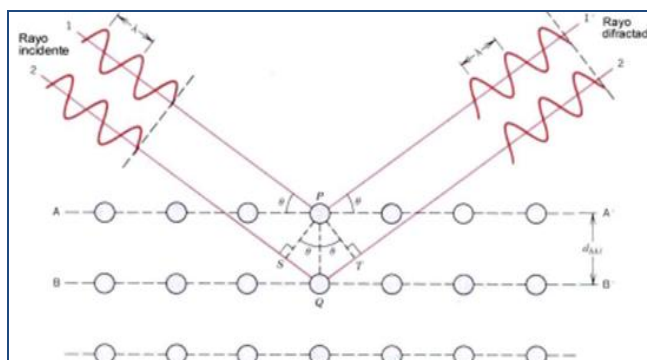


Figura 2.41. Difracción de rayos-X por los planos de átomos A-A' y B-B' [4].

W. L. Bragg visualizó la difracción de rayos-X en término de reflexiones provenientes de los planos de un cristal, dando como resultado la simple relación (conocida como la Ley de Bragg):

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta.$$

Para que una familia de planos cristalográficos difracte, la diferencia del camino recorrido por ondas dispersadas sea un múltiplo entero de la longitud de onda:

$$(SQ + QT) = n\lambda = (dhkl \sin\theta + dhkl \sin\theta) = 2dhkl \sin\theta.$$

Cuando esta condición no se cumple, se obtiene interferencia destructiva [4].

## 2.6.8 EQUIPO.

2.6.8.1 Sistema de operación: El difractómetro es un aparato usado para determinar los ángulos a los cuales la difracción ocurre en una muestra, sus características se muestran en la Figura 2.42.

Una muestra S, en forma de una placa se coloca de manera que la rotación se lleve a cabo en el eje O. Este eje es perpendicular al plano de la página. El haz de Rayos-X monocromático es generado en el punto T, y las intensidades de los haces difractados son detectadas por un contador C. La muestra, la fuente de Rayos-X y el contador son todos coplanares. El contador se encuentra en un dispositivo móvil, el cual también puede ser rotado alrededor del eje O; su posición angular en términos de  $2\theta$  se marca en una regla graduada. El contenedor y la muestra están mecánicamente acoplados, de tal manera que la rotación de la muestra en un ángulo  $\theta$  está acompañada por una rotación del contador  $n$  de  $2\theta$ ; esto asegura que los ángulos incidentes y de reflexión se mantengan igual uno con respecto al otro.

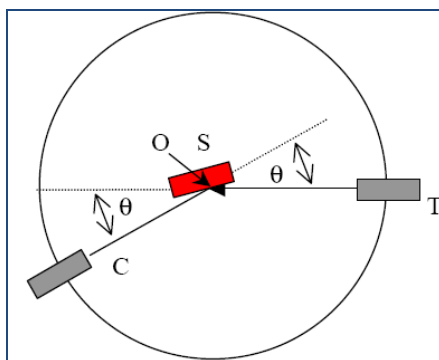


Figura 2.42. Diagrama esquemático de un difractómetro de rayos-X; T= fuente de rayos-X, S= muestra, C = detector y O= eje de rotación alrededor del cual rota el detector y la muestra. b) equipo de difracción de Rayos X [20].

2.6.8.2 Goniómetro: Los aparatos destinados a la medida de esfuerzos residuales por difracción de Rayos X se denominan normalmente goniómetros. Aunque no es el propósito de este trabajo explicar la forma de operar de estos aparatos, a continuación se muestran sus partes fundamentales, así como la nomenclatura comúnmente aceptada para los ángulos y las distintas formas de trabajar de los dispositivos.

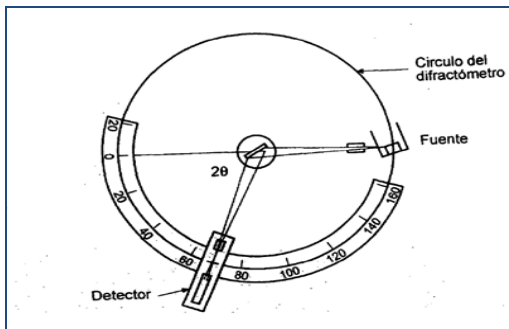


Figura 2.43 representación esquemática de los componentes de un goniómetro [20].

En la Figura 2.43 aparecen, de forma esquemática las partes fundamentales que constituyen un difractómetro de Rayos X, como los utilizados para la medida de esfuerzos residuales. Estos goniómetros constan de un emisor y un detector de Rayos X junto con un mecanismo que les permite operar alrededor de la muestra. El sistema que ejecuta los movimientos está controlado por un microprocesador que se encarga de realizar distintas medidas variando el ángulo  $\psi$ .

Por lo que respecta a la nomenclatura, se llama vector de difracción que al bisector del rayo incidente y el difractado Figura 2.44. Se dice que el goniómetro está trabajando en un modo  $\Omega$  cuando hay un ángulo  $\psi$  entre la normal a la superficie de la muestra  $\bar{n}$  y el vector de difracción  $\bar{q}$ , pero  $\bar{n}$  está en el plano definido por los rayos incidentes y difractado. Cuando el plano definido por  $\bar{n}$  y  $\bar{q}$



es perpendicular al plano de los rayos incidentes y difractado, se dice que el goniómetro está usado en modo  $\psi$  [20].

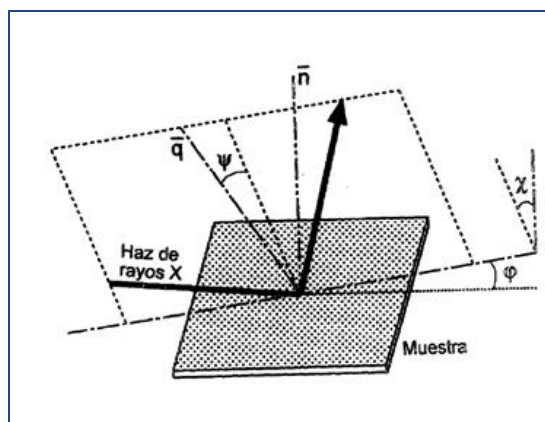


Figura 2.44 definiciones de los ángulos  $\psi$ ,  $\phi$ ,  $\chi$  en el goniómetro [20].

### 2.6.9 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Este tipo de análisis se basa en el uso de una radiación monocromática y en la desorientación de los distintos cristales que forman parte del material, obteniéndose un espectro que refleja las distintas estructuras cristalinas que lo componen.

El registro del espectro se lleva a cabo por medio de un dispositivo conocido como difractómetro, el cual mide directamente la intensidad de un haz difractado por medio de un detector electrónico. Este detector, también conocido como contador, transforma la radiación o el haz difractado en pulsaciones eléctricas. El sistema registra o cuenta el número de las pulsaciones por unidad de tiempo, y este número es directamente proporcional a la intensidad del haz difractado. Con la posición angular de cada haz difractado y la intensidad registrada del mismo, se obtiene un registro conocido como difractograma o diagrama de difracción.

Los diagramas de difracción obtenidos, son una poderosa herramienta para la determinación de la estructura cristalina del material investigado, ya que constituyen la huella digital del mismo; permiten determinar las características

de la celda unitaria (tamaño y forma), el número de átomos y la posición de los mismos dentro de la celda, mediante las posiciones angulares de las líneas de difracción, a partir de la asignación de uno de los siete sistemas cristalinos conocidos como índices de Miller para cada reflexión. Finalmente, la identificación se realiza mediante comparación en ficheros de base de datos ya establecidos.

Existen consideraciones físicas que se deben tomar en cuenta de tal forma que sea posible la detección del haz para un ángulo dado, y de las cuales está basada la construcción de los difractómetros [5].

#### **2.6.10 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.**

Las ecuaciones del modelo son una aproximación para el tratamiento de sistemas reales. Si bien se observan los picos o perfiles de línea esperados, los mismos tienen una forma, un ancho y posición ligeramente diferente de las predicciones anteriores. En particular, el empleo de la radiación X compuesta proveniente de transiciones electrónicas K, tiene una distribución espectral de energía que no es realmente monocromática; produciendo dos máximos de intensidad en las figuras de difracción correspondientes a la dispersión de las radiaciones  $K\alpha_1$  y  $K\alpha_2$ , cuyas longitudes de onda que son similares. Además, los picos presentan un ensanchamiento que puede ser acentuado o discreto, que depende de las condiciones experimentales. Las causas más generales y de mayor importancia que generan el ensanchamiento de los picos difractados son:

2.6.10.1 Tamaño de cristal: Las deformaciones plásticas de un material dúctil producen ordenamientos y/o dislocaciones. Éstas son responsables del fraccionamiento de los granos (Figura 2.45) originales en dominios de difracción coherente muy pequeños (de 100 a 1000 Å).

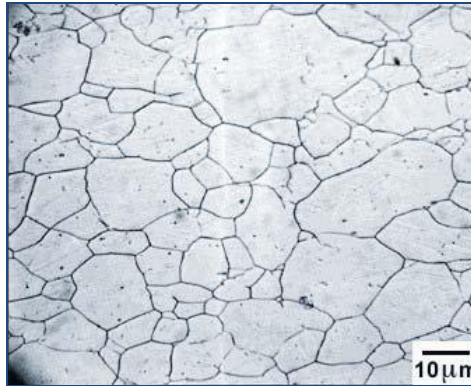


Figura 2.45. Esquema de los granos (dibujo) de una estructura policristalina delineados por sus bordes de grano, cada una con una orientación cristalográfica distintas [6].

Estos están suficientemente desorientados unos respecto a sus próximos como para que entre ellos la difusión sea incoherente, lo cual implica, que la intensidad total difundida en un punto es simplemente la suma de las intensidades difractadas por cada dominio. Como los picos de difracción debidos a un dominio se encuentran muy próximos a los correspondientes a cada uno de los demás dominios vecinos, el diagrama de difracción resultante presenta picos ensanchados [6].

2.6.10.2 Imperfecciones de la red: Un tratamiento termo-mecánico de un material puede producir un estado de tensiones internas que distorsionan elásticamente a los granos, y/o generan fallas de deformación (maclas o fallas de apilamiento). Las dislocaciones que causan la subdivisión del grano grande original en dominios, también producen tensiones de tracción y compresión dentro de los mismos. Estas tensiones elásticas producen el ensanchamiento de las líneas. La limitación de este análisis radica en la elección de la medida adecuada del ancho de línea y en la forma de discriminar el ancho puro del obtenido experimentalmente. Esto es crítico para la cuantificación de los parámetros microestructurales (tamaño de cristal, densidad de dislocaciones, estado de tensiones, grado de cristalinidad, etc.).

2.6.10.3 Medidas del ancho de línea: Pueden emplearse tres tipos de medida:  
 Semi-ancho: Es el ancho del perfil de línea a la mitad de la intensidad máxima,  $I_p$  (Fig. 2.46). Si  $2\theta_1$  y  $2\theta_2$  son los ángulos de difracción que verifican:  $I(2\theta_1) = I(2\theta_2) = I_p/2$  y  $B_{1/2}$  es el semi-ancho correspondiente, entonces:  **$B_{1/2} = (2\theta_2 - 2\theta_1)/2$**

Esta medida es usada con más frecuencia para mediciones de tamaño de grano y tensión; particularmente cuando son suficientes los valores relativos (Figura 2.46) [6].

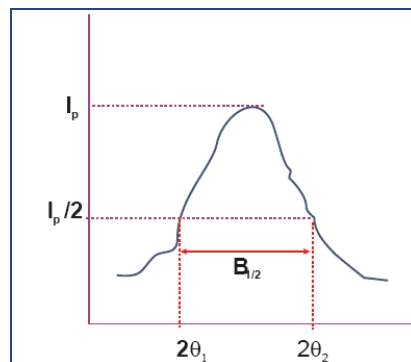


Figura 2.46. Semi-ancho de pico de difracción [6].

### 2.6.11 TÉCNICAS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.

Para mediciones de esfuerzos residuales mediante la técnica de Rayos X, el esfuerzo en la red cristalina es medido, y el esfuerzo producido debido a las fuerzas internas puede ser calculado, asumiendo una distorsión elástica lineal de la celda del cristal. Aunque el término de medición de esfuerzo haya entrado en uso común, el esfuerzo es una característica intrínseca que no es directamente medible. Todos los métodos de determinación de esfuerzos requieren de una propiedad intrínseca, como la tensión o la fuerza, el área y el cálculo del esfuerzo asociado.

Métodos mecánicos (técnicas de disección) y métodos elásticos no lineales (técnicas magnéticas y de ultrasonido) son limitadas por su aplicación a la

determinación de esfuerzos residuales. Los métodos mecánicos son limitados por la supuesta naturaleza en campo de los esfuerzos residuales y la geometría de la muestra. Los métodos mecánicos son necesariamente destructivos y no pueden ser directamente comprobables debido a que el ensayo no puede repetirse. La resolución espacial y profundidad está en órdenes de magnitud menores que la de la difracción de Rayos X.

Todos los métodos elásticos no lineales, están sujetos a errores importantes de orientación preferente, trabajo en frío, la temperatura así como el tamaño de grano. Éste método requiere que las muestras de referencia estén libre de esfuerzos, que son de otra manera idénticas a las muestra bajo investigación. Los métodos elásticos no lineales no son generalmente disponibles para la determinación rutinaria de los esfuerzos residuales en su estado actual de desarrollo.

Para determinar los esfuerzos, el esfuerzo en la red de un cristal puede ser medido durante al menos dos orientaciones que se conocen con precisión respecto a la superficie de la muestra. Por lo tanto, la medición de esfuerzos residuales es aplicable a materiales que son cristalinos, relativamente de grano fino, y producen la difracción para cualquier orientación de la superficie de la muestra. Las muestras pueden ser metálicas o cerámicas, que proporcionen un pico de difracción de la intensidad adecuada y libre de interferencias de los picos vecinos que se pueden producir en la región alta de back-reflexion con las radiaciones disponibles. La medición de esfuerzos residuales mediante la difracción de Rayos X, es la única en que los esfuerzos residuales macroscópicos y microscópicos pueden ser determinados de manera no destructiva.

2.6.11.1 Fundamentos de la medida de deformaciones por difracción de Rayos X: La medida de deformaciones por difracción de Rayos X está basada en la Ley de Bragg.

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

Donde  $d_{hkl}$  es la distancia interplanar de la familia de planos (hkl),  $\theta$  es la mitad del ángulo que forman el rayo incidente y el difractado,  $\lambda$  es la longitud de onda del haz incidente y  $n$  puede ser cualquier número entero positivo no nulo llamado orden de difracción.

La razón fundamental que justifica la utilización de las técnicas difractométricas para la medida de esfuerzos es que las distancias interatómicas en los materiales metálicos son comparables a la longitud de onda de los Rayos X y, a consecuencia de ello, los cristales metálicos difractan los Rayos X, produciéndose una interferencia constructiva cuando el ángulo de incidencia  $\theta$  satisface la Ley de Bragg [20].

Las técnicas de medida basada en la difracción de Rayos X suelen fijar alguno de los parámetros que intervienen en la Ley de Bragg y aplican la relación que resulta entre los restantes para calcular el valor desconocido.

Por lo que respecta a la medida de tensiones, el parámetro prefijado habitualmente es la longitud de onda. De este modo se obtiene una relación biunívoca entre la distancia interplanar  $d_{hkl}$  de la familia de planos (hkl) y el ángulo  $2\theta$  correspondiente al pico de intensidad de los rayos difractados.

La deformación de un sólido cristalino afecta a la distancia interplanar  $d_{hkl}$  y la variación de esta distancia origina un desplazamiento del pico de difracción. En el caso de pequeñas deformaciones, las magnitudes de ambas variaciones son mucho menores que sus respectivos valores iniciales y pueden relacionarse a través de la Ley de Bragg, tomando logaritmos y diferenciando [20]:

$$\epsilon_{nhkl} = \Delta d_{hkl} / d_{hkl} = -(\theta' - \theta) \cotg\theta.$$

2.6.11.2 Tensiones constantes elásticas de difracción: Uno de los aspectos críticos en el uso de las técnicas de medida de esfuerzos residuales con

difracción de Rayos X es que hay que tener siempre en cuenta que clase de tensiones se están midiendo. Una posible clasificación de los esfuerzos residuales presentes en el material, quizá la más extendida hoy día, está basada en el volumen en el que las tensiones son prácticamente constantes.

2.6.11.3 Macrotensiones o Tensiones de primera clase: Son aquellas que se mantienen prácticamente constantes sobre un volumen suficientemente grande del material. Con esto nos estamos refiriendo a un volumen del material que contenga cantidades suficientes de todas las fases presentes y de las diferentes orientaciones de grano. El tamaño característico de esta escala es del orden de varias décimas de milímetro. La condición de autoequilibrio de los esfuerzos residuales se traduce en que las fuerzas internas ligadas a las macrotensiones deben de estar en equilibrio en cada sección y los momentos ligados a estas fuerzas respecto a cualquier eje deben ser nulos.

2.6.11. Tensiones de segunda clase: Son las desviaciones de las macrotensiones existentes a nivel de fase o de grano. El tamaño característico de esta escala es además de varias decenas de micras, además de clasifican en dos grupos: microtensiones que dependen linealmente de las macrotensiones (tensiones de interacción elástica) y microtensiones que no dependen de las macrotensiones (tensiones de interacción residual). Las primeras son debidas fundamentalmente a la diferencia en las constantes elásticas entre los granos o entre las fases y por lo tanto dependerán de las macrotensiones. Las segundas son consecuencia del comportamiento plástico (diferencias en la tensión de fluencia, densidad de dislocaciones inhomogénea, diferencias de los coeficientes de la dilatación térmica,...).

2.6.11.5 Tensiones de tercera clase: (microtensiones residuales inhomogéneas) a las fluctuaciones de tensiones existentes dentro del grano: por ejemplo el parámetro de red puede estar distorsionado en las inmediaciones de una dislocación, la presencia de pequeños precipitados pueden crear deformaciones

locales en el grano. El tamaño característico de esta escala es del orden de centenas de nm (muchas distancias interatómicas).

Esta clasificación es muy importante, sobre todo de cara a interplanar, la información que obtenemos de los distintos métodos de medida. Cuando se mide por difracción, sólo una parte del material está difractando. Esta parte está determinada por el tamaño de rayo y por la penetración de los rayos en el material, es el llamado “volumen de medida”.

Pero incluso dentro de este volumen, no todo el material está contribuyendo a la difracción. Solo aquellos granos que tienen un plano de difracción perpendicular al vector de difracción que difractarán. Así pues, lo que medimos con difracción de Rayos X es una deformación medida de los granos que difractan en el volumen que emiten el haz.

Más aún, si estamos estudiando un material bifásico como es el caso de la perlita, recibiremos datos de las dos fases por separado y, en el mejor de los casos, tendremos información de la deformación media de los granos que difractan de cada clase Figura 2.47 [20].



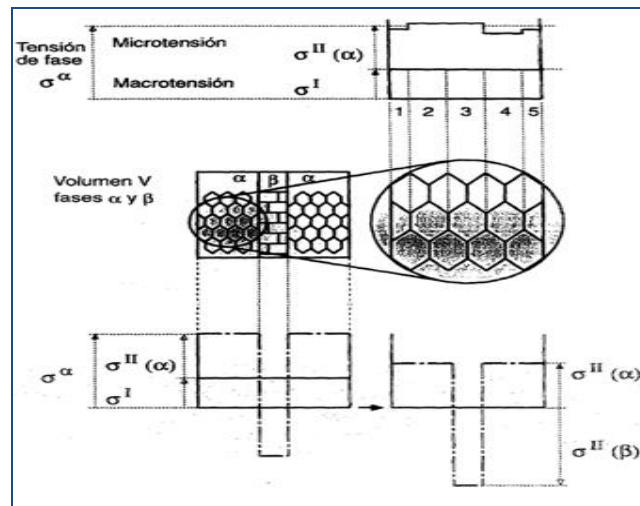


Figura 2.47 representación esquemática de los tipos de tensiones en un material cristalino, según los distintos niveles o escalas. La tensión de fase  $\sigma^\alpha$ , que es la medida por difracción de Rayos X, será la suma de la macrotensión  $\sigma^I$  y las microtensiones de la fase  $\sigma^{II}(\alpha)$ . [20].

Sin embargo normalmente, lo que interesa es en la medida de la tensión en todos los granos, no sólo en los que difractan. La conexión entre ese valor medio de la deformación en los granos que difractan y la tensión que estamos buscando se hará mediante las constantes elásticas de difracción. Por esta razón, las constantes elásticas de difracción son diferentes de las constantes mecánicas medidas del material, ya que dependerán del plano (hkl) elegido y de la posición de la muestra [20].

# **CAPÍTULO III.**

## **DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA.**

Durante la investigación y análisis bibliográfico, se encontró que los esfuerzos residuales son fuerzas internas que no se encuentran distribuidas homogéneamente, además son identificados como uno de los factores que influyen en el deterioro de las piezas soldadas. Los esfuerzos residuales son unos de los factores que determinan las propiedades mecánicas, asimismo el análisis de los esfuerzos residuales es una etapa obligatoria en el diseño de las piezas así como en la fabricación de las mismas.

La generación de esfuerzos residuales es debido a diversos factores, como lo pueden ser: el material, la geometría, el proceso de fabricación, el proceso de soldadura, tratamientos post soldadura y las condiciones de servicio. Durante la aplicación de soldadura, y cuando se realizan reparaciones se suministra una gran cantidad de calor de forma localizada, que genera fuerzas de contracción, en muchos casos el esfuerzo de compresión tiende a superar el límite de fluencia del material, pero en ningún momento se logra dicho fenómeno.

La presencia de esfuerzos residuales y zonas de susceptibilidad a la corrosión dentro de una estructura soldada, genera el fenómeno conocido como agrietamiento bajo esfuerzos (SCC) el cual es producido debido a la interacción con la corrosión y esfuerzos mecánicos que producen una falla por agrietamiento. Este tipo de falla puede ocurrir por diversos mecanismos, uno de ellos quizás el más importante que los estudios revelaron es cuando el

agrietamiento es claramente resultado de la fragilización por hidrógeno, además éste fenómeno es conocido por su forma insidiosa de corrosión, la cual produce una marcada pérdida de resistencia mecánica, con una pequeña pérdida de metal; el daño debido a SCC no es evidente, y no puede ser detectado con una inspección simple, y las grietas originadas por esfuerzos residuales pueden ocasionar una fractura mecánica rápida, hasta fallas catastróficas de componentes soldados.

Durante esta investigación se apreció que las fallas de tuberías de alta presión de transporte de gas, la explosión de calderas y la destrucción de refinerías de petróleo involucran al SCC y que ésta falla puede llevarse a cabo si ocurren simultáneamente; que el material y el medio sea susceptible y suficientes esfuerzos residuales de tensión.

Todos los aceros se ven afectados por el hidrógeno, como se evidenció por la influencia de la corrosión en el crecimiento de grietas y la presencia de agrietamiento inducido por hidrógeno, principalmente en los aceros de alta resistencia que se encuentran en ambientes ricos de  $H_2S$ , en donde el hidrógeno puede introducirse dentro del acero por diversas rutas, si en su camino se encuentra con un defecto de red o zonas duras, éste puede alojarse ahí y dar comienzo al fenómeno conocido como agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC), además se investigó que los efectos del hidrógeno introducido en el acero antes de que el componente sea puesto en servicio puede reducirse y se aplica un tratamiento térmico adecuado, esto permite cierta cantidad de hidrógeno pueda difundir a la superficie del acero y otra parte de éste se fije en sitios inofensivos en la microestructura.

En la actualidad existen varias técnicas para la medición de esfuerzos residuales, éstas se clasifican como destructivas y no destructivas, la gran ventaja de las técnicas no destructivas es que el ensayo puede ser realizado varias veces sin que el componente en prueba sea dañado. Una de las técnicas

que se clasifica dentro de los ensayos no destructivos es la de difracción de Rayos X, la cual puede ser capaz de medir los esfuerzos residuales superficiales de los elementos soldados, la gran ventaja de esta técnica es que puede ser utilizado en campo. La desventaja que tiene es que puede dificultarse el uso en geometrías complejas. Se argumentó que esta técnica puede ser utilizada para emplearse en campo en mediciones de estructuras tales como tuberías soldadas y puentes. La velocidad del ensayo depende de varios factores, uno de ellos es el material y la fuente de generación de Rayos X, es importante mencionar que esta técnica es muy sensible y cualquier variación en la orientación de la incidencia del haz, puede cambiar el valor de los esfuerzos medidos.

Como se mencionó anteriormente los parámetros del proceso de soldadura, se sintetizaron tomando únicamente el calor de entrada como variable principal y por consiguiente al cual se le atribuye la susceptibilidad a la corrosión debido a la generación de esfuerzos residuales durante el enfriamiento del cordón de soldadura.

# CAPÍTULO IV.

## CASO DE ESTUDIO.

Cuando un material cristalino es tensado, los espaciamientos entre los planos paralelos de átomos, los iones, o moléculas en la red cambian. Las técnicas de difracción de Rayos X pueden medir estos cambios y, por lo tanto, constituyen un medio poderoso para estudiar el estado de esfuerzos residuales en el cuerpo. Para calcular esfuerzos macroscópicos de una red tensionada se requiere de la constante del material  $E_{\text{ef}}$  llamada parámetro elástico efectivo.

En el proceso de manufactura de la tubería de conducción las etapas de formado, soldadura y acabado, generan esfuerzos residuales, los cuales disminuyen las propiedades mecánicas.

La difracción de Rayos X es uno de los métodos más importantes para medir los esfuerzos que se generan después del proceso de soldadura, con éste se determina la variación del ángulo de difracción por el efecto de los esfuerzos residuales en las distancias entre los planos cristalográficos.

Se pretende determinar el efecto de los parámetros de proceso de soldadura y el diseño de preparación de la placa en la determinación de los esfuerzos residuales y la susceptibilidad en la corrosión.

Se soldaron seis probetas de acero al carbono API 5L X70, con dos y tres arcos respectivamente, y en condiciones diferentes de preparación de muestra, a tope, bisel sencillo y doble bisel, como se muestra en la Figura 4.1 y con los siguientes parámetros Tabla 4.1.

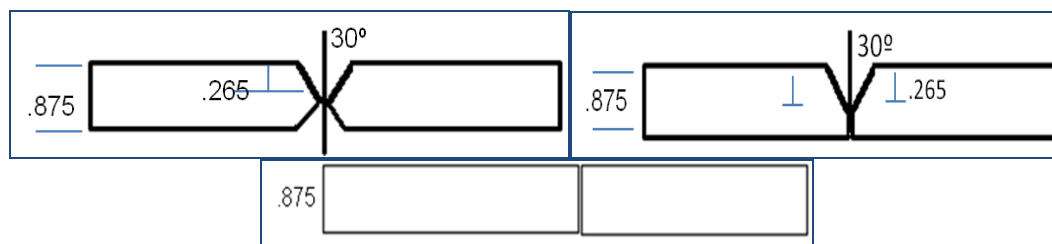


Figura 4.1. Preparación de muestras.

Tabla 4.1. Parámetros de soldadura por SAW con dos arcos.

El material fue soldado por el proceso de soldadura de arco sumergido (SAW),

| PLACA | VOLTS | AMPS | VEL. IN/MIN | ANG. DE VAR. | VEL. DE ALIM. DE VAR. |
|-------|-------|------|-------------|--------------|-----------------------|
| 17-18 | 38    | 1150 | 27          | 80           | 65                    |
|       | 42    | 650  |             | 90           | 65                    |
| 14-13 | 38    | 1100 | 27          | 80           | 61                    |
|       | 42    | 650  |             | 90           | 61                    |
| 3-4   | 38    | 1000 | 36          | 80           | 50                    |
|       | 42    | 650  |             | 90           | 50                    |

bajo las siguientes condiciones (Tabla 4.2):

Tabla 4.2 Parámetros de soldadura por SAW con tres arcos.

| PLACA | VOLTS | AMPS | VEL. IN/MIN | ANG. DE VAR. | VEL. DE ALIM. DE VAR. |
|-------|-------|------|-------------|--------------|-----------------------|
| 11-12 | 38    | 1200 | 34          | 80           | 114                   |
|       | 42    | 650  | 34          | 90           | 114                   |
|       | 44    | 550  | 34          | 107          | 114                   |
| 1-2   | 38    | 1100 | 40          | 80           | 94                    |
|       | 42    | 650  | 40          | 90           | 94                    |
|       | 44    | 550  | 40          | 107          | 94                    |
| 9-10  | 38    | 1000 | 50          | 80           | 85                    |
|       | 42    | 650  | 50          | 90           | 85                    |
|       | 44    | 550  | 50          | 107          | 85                    |

Posteriormente de soldadas las probetas, éstas se limpiaron con acetona y alcohol para eliminar impurezas que fueran a afectar a la difracción de Rayos X, se identificaron zonas a analizar y se marcaron.



Figura 4.2. Preparación de placa de acero API 5L X70 por (SAW) para medición de esfuerzos residuales.

Los parámetros utilizados para llevar a cabo la medición de esfuerzos residuales por medio de la técnica de difracción de Rayos X, fueron los siguientes:

Tabla 4.3. Parámetros del ensayo de medición de esfuerzos residuales.

| <b>PARÁMETROS.</b>      |                  |
|-------------------------|------------------|
| Material                | acero al carbono |
| Tubo                    | Cr               |
| Longitud de onda        | 2.291            |
| Oscilación Angulo beta  | 5                |
| Tiempo de exposición    | 1                |
| Numero de exposiciones  | 10               |
| Voltaje                 | 20KV             |
| Amperaje                | 4 mA             |
| Angulo teorico de Bragg | 156.4            |
| constantes elásticas    | 5.92 e-6         |

Después de que se identificaron las zonas a analizar por medio de la difracción de Rayos X, se decidió analizar la zona afectada por el calor (ZAC), metal base (MB) y cordón de soldadura (C), haciendo tres análisis por punto, como de muestra es la Figura 4.3 de modo que se obtuvieron 21 análisis de cada

muestra, registrando únicamente los resultados convenientes para propósitos de este estudio.

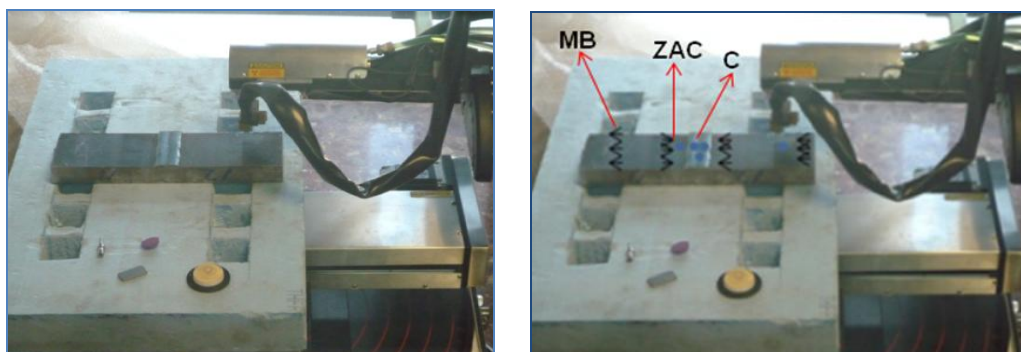


Figura 4.3. Identificación de zonas para medición de esfuerzos residuales por medio de la técnica de difracción de Rayos X.

Para determinar la susceptibilidad a la corrosión se realizó un ensayo de corrosión electroquímica, las muestras ensayadas corresponden siempre al centro de la zona soldada, sin incluir el metal base, para este ensayo se consideraron los siguientes parámetros:

Tabla 4.4. Parámetros del ensayo de corrosión.

| <b>PARÁMETROS.</b>         |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| Electrolito                | Agua de Mar según ASTM D11-41 |
| Temperatura                | Ambiente                      |
| Agitación                  | Suave                         |
| Electrodo de Referencia    | Calomelanos                   |
| Contra electrodo           | Platino                       |
| Medidas                    | 100 a 10s/medida              |
| Intervalo de Potencial     | - 800 a 700mV                 |
| Mantenimiento de Potencial | 5 min                         |
| Preparación de Muestra     | Limpieza con alcohol          |

Se hizo el montaje de la celda electrolítica para llevar a cabo el ensayo, la cual consiste en un electrodo de referencia, un electrolito que en este caso se utilizó agua sintética de mar, un contra electrodo y un potenciómetro, como se muestra en la Figura 4.4.





Figura 4.4. Montaje de celda electrolítica.

Cada muestra fue limpiada con acetona para remover impurezas que fueran a afectar o introducir ruido en los resultados del ensayo Figura 4.5.

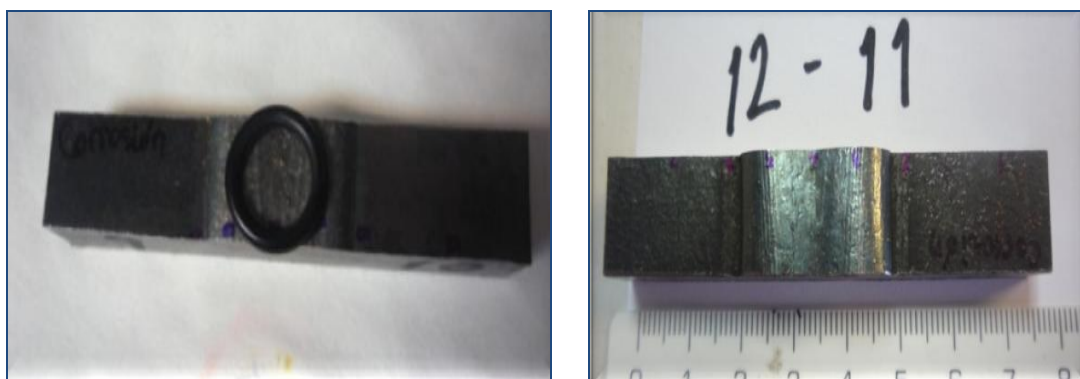


Figura 4.5. Preparación de la probeta para ensayo de corrosión.

## 4.1 RESULTADOS.

Los resultados que se obtuvieron de calor de entrada, debido a los parámetros del proceso de soldadura para cada muestra fueron los siguientes:

Tabla4.5. Calor de entrada de cada muestra después del procedo de soldadura.

| Muestra | Calor de entrada |
|---------|------------------|
| 3-4     | 3666.66KJ/in     |
| 14-13   | 5185.185KJ/in    |
| 9-10    | 5456KJ/in        |
| 17-18   | 5333.33KJ/in     |
| 1-2     | 7130KJ/in        |
| 11-12   | 8752.94KJ/in     |

El ensayo de medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de difracción de Rayos X mostraron los siguientes resultados:

Tabla4.6. Resultados calor de entrada vs esfuerzos residuales.

| Muestra 1-2 |             | Muestra 3-4 |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MB          | -140.42mpa. | MB          | -211.96mpa. |
| ZAC         | 185.42mpa.  | ZAC         | 174.36mpa.  |
| Cordón 1    | -604.2mpa.  | Cordón 1    | -196.9mpa.  |
| Cordón 2    | -651.32mpa. | Cordón 2    | -381.20mpa. |
| cordón 3    | -714.11mpa. | cordón 3    | -202.2mpa.  |
| ZAC         | 400.30mpa.  | ZAC         | 398.82mpa.  |
| MB          | -128.43mpa. | MB          | -30.10mpa.  |

Calor de entrada  
H.I= 7130 KJ/in.

Calor de entrada  
H.I= 3666.66 KJ/in.

**Muestra 9-10**

|          |             |
|----------|-------------|
| MB       | -12.98MPa.  |
| ZAC      | 354.62MPa.  |
| Cordón 1 | -668.51MPa. |
| Cordón 2 | -280.85MPa. |
| Cordón 3 | -251.63MPa. |
| ZAC      | 154.30MPa.  |
| MB       | 168.20MPa.  |

Calor de entrada  
H.I= 5456 KJ/in.

**Muestra 11-12**

|          |            |
|----------|------------|
| MB       | -73.0MPa.  |
| ZAC      | 238.4MPa.  |
| Cordón 1 | -187.4MPa. |
| Cordón 2 | -197.1MPa. |
| Cordón 3 | -223.5MPa. |
| ZAC      | 226.05MPa. |
| MB       | -48.6MPa.  |

Calor de entrada  
H.I= 8752.94 KJ/in.

**Muestra 13-14**

|          |             |
|----------|-------------|
| MB       | -144.49MPa. |
| ZAC      | 432.29MPa.  |
| Cordón 1 | -420.23MPa. |
| Cordón 2 | -827.52MPa. |
| Cordón 3 | 420.71-MPa. |
| ZAC      | 352.52MPa.  |
| MB       | -20.89MPa.  |

Calor de entrada  
H.I= 5185.18KJ/in.

**Muestra 17-18**

|          |              |
|----------|--------------|
| MB       | -38.775 MPa. |
| ZAC      | 119.537 MPa. |
| Cordón 1 | -204.95 MPa. |
| Cordón 2 | -315.46 MPa. |
| Cordón 3 | -261.25 MPa. |
| ZAC      | 269.25 MPa.  |
| MB       | -9.9 MPa.    |

Calor de entrada  
H.I= 5333.33 KJ/in.

Para una zona determinada se obtuvieron y graficando los esfuerzos residuales contra calor de entrada en cada pieza por zona se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 4.6. Representación gráfica de esfuerzos residuales en metal base.

Tabla4.7. Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de metal base.

| <b>Metal Base.</b> |        |
|--------------------|--------|
| 8752.94 KJ/in      | -50.4  |
| 7130 KJ/in         | -71.11 |
| 5456 KJ/in         | -80.7  |
| 5333.33 KJ/in      | -45.9  |
| 5185.18 JK/in      | -44.9  |
| 3666.66 KJ/in      | -21.5  |



Figura 4.7. Representación gráfica de esfuerzos en Zona Afectada por el Calor.

Tabla4.8. Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de ZAC.

| <b>ZAC.</b>   |       |
|---------------|-------|
| 8752.94 KJ/in | 218.5 |
| 7130 KJ/in    | 146.9 |
| 5456 KJ/in    | 113.3 |
| 5333.33 KJ/in | 99.7  |
| 5185.18 JK/in | 119.1 |
| 3666.66 KJ/in | 91.3  |



Figura 4.8. Representación gráfica de esfuerzos en Cordón de soldadura.

Tabla 4.9. Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de Cordón de soldadura.

| Cordón.       |        |
|---------------|--------|
| 8752.94 KJ/in | -261.3 |
| 7130 KJ/in    | -206.6 |
| 5456 KJ/in    | -206.9 |
| 5333.33 KJ/in | -283.1 |
| 5185.18 JK/in | -353.4 |
| 3666.66 KJ/in | -275.5 |

En la siguiente gráfica se puede observar el trazado de las curvas de polarización de todas las muestras analizadas. Todas presentan un comportamiento similar, de gran tendencia a la corrosión sin presencia de posibilidad de pasivación, también se puede observar que el vértice de las curvas se alejan o se acercan al potencial de corrosión característico para aceros al carbono debido a que las piezas no presenten una pérdida de reactividad uniforme, y esto depende del potencial que sea aplicado al ensayo.

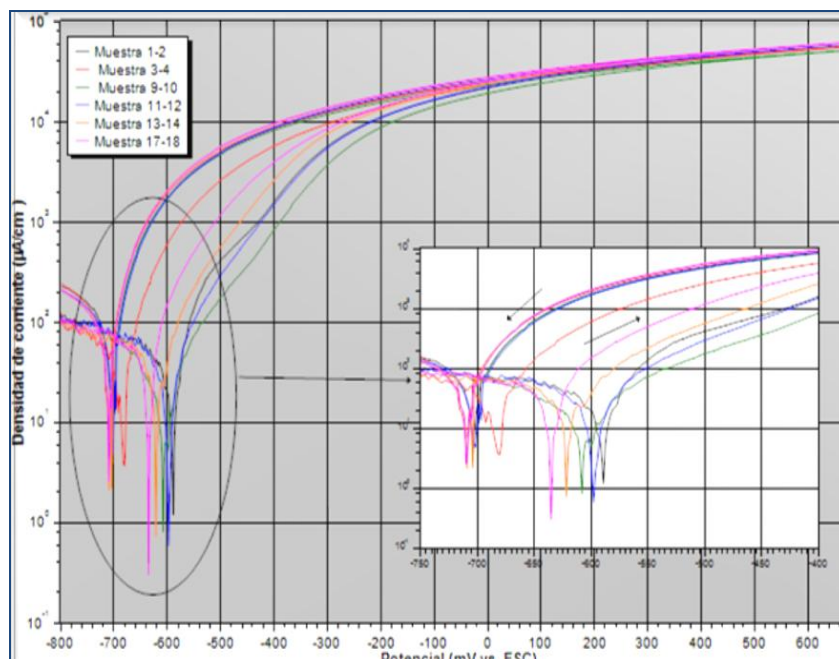


Figura 4.9. Curva de polarización de las muestras analizadas.

En la Tabla 4.10 se resumen los valores del potencial y la densidad de corriente de corrosión, obtenidos a partir de las curvas de polarización.

Tabla 4.10. Resultados del ensayo de corrosión.

| Muestra | $E_{\text{corr}}$ | $I_{\text{corr}} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ | $V_{\text{corr}} (\text{mm}/\text{año})$ |
|---------|-------------------|---|--|
| 1-2     | -589.37           | 20.5056                                   | 0.25                                     |
| 3-4     | -682.55           | 20.2460                                   | 0.24                                     |
| 9-10    | -605.24           | 9.7273                                    | 0.12                                     |
| 11-12   | -597.91           | 21.4132                                   | 0.26                                     |
| 13-14   | -621.50           | 22.2543                                   | 0.27                                     |
| 17-18   | -635.25           | 20.2510                                   | 0.24                                     |

En las Figuras 4.10 a) y 4.10 b) se puede observar, el aspecto superficial de las muestras ensayadas, donde se parecía que la corrosión producida es principalmente generalizada, al efectuarse uniformemente a toda el área en contacto con la disolución (Figura 2.56).

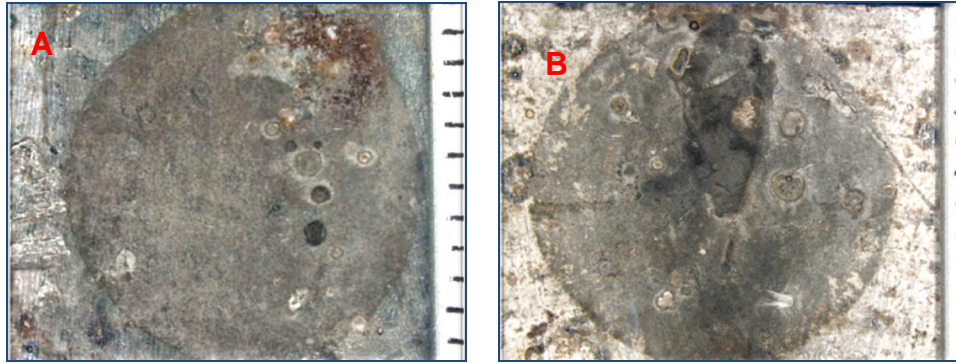


Figura 4.10. A) Muestra 3-4 B) muestra 1-2 después del ensayo de corrosión.

Con los resultados obtenidos del ensayo de corrosión, se procedió a graficar estos y los resultados de esfuerzos presentes en el cordón de soldadura, ya que es la única zona en donde se realizó dicho ensayo.

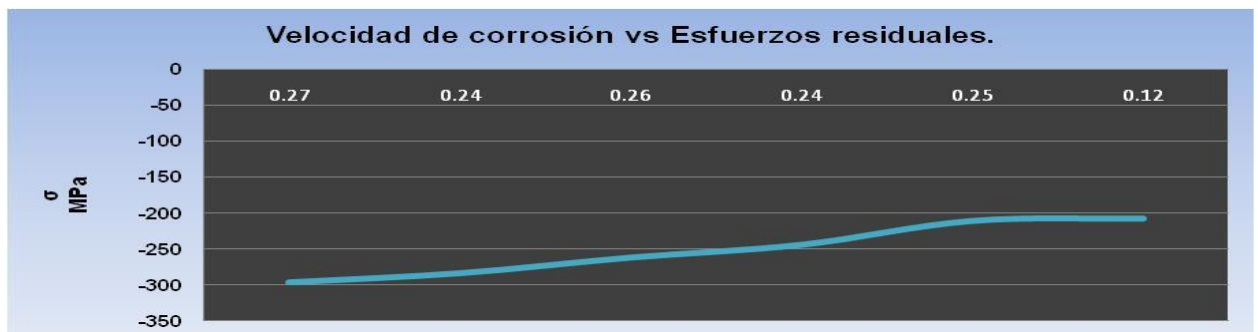


Figura 4.11. Representación gráfica de velocidad de corrosión vs esfuerzos residuales en el cordón de soldadura.

Tabla 4.11. Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de Cordón de soldadura.

| $V_{corr}$<br>(mm/año) | Esfuerzos MPa |
|------------------------|---------------|
| 0.27                   | -295.8        |
| 0.24                   | -283.1        |
| 0.26                   | -261.3        |
| 0.24                   | -243.5        |
| 0.25                   | -210.2        |
| 0.12                   | -206.9        |

## CAPÍTULO V.

### CONCLUSIONES.

Con este estudio se obtuvo un amplio panorama acerca de las principales fallas de las tuberías de conducción de hidrocarburos amargos, principalmente de los aceros de alta resistencia. Éstas involucran varios factores, que al combinarse pueden causar uno o varias fallas debido a la combinación de corrosión y esfuerzos residuales presentes en las uniones soldadas. Además se constató que las principales fallas en servicio son debido a que no se aplica una etapa de alivio de esfuerzos residuales o algún tratamiento térmico post soldadura y uno de los principales fenómenos que se presenta es el agrietamiento bajo esfuerzos, que es la combinación de esfuerzos residuales y fragilización debido a la absorción de hidrógeno.

La técnica de Rayos X es una técnica muy sensible para la determinación de esfuerzos residuales, la cual presenta una gran ventaja por su uso en servicio y su velocidad de aplicación.

Dentro del proceso de soldadura se debe de considerar una etapa de alivio de esfuerzos residuales, ya que las principales fallas son debido a la gran concentración de éstos en las uniones soldadas.

El conocimiento del desplazamiento del hidrógeno dentro de la red, y de las formas para evitar que este pueda alojarse dentro de ella, puede ayudar a evitar las fallas debido al agrietamiento inducido por hidrógeno.

Con los resultados del caso de estudio se puede observar que a medida que aumentan los esfuerzos de compresión en el cordón de soldadura, aumenta la velocidad de corrosión.



## **BIBLIOGRAFÍA.**

- [1]. Dong. C.F. X.G. Li, Liu. Z.Y. Y.R 2009. Hydrogen-induced cracking and healing behaviour of X70 steel. Beijing.
- [2] Addach, P. Berçot , Rezrazi M. 2008. Study of the electrochemical permeation of hydrogen in iron. France. Pags 263-267.
- [3]. Dong. C.F. Z.Y. Liu , X.G. Li, Chen. Y.F. 2009. Effects of hydrogen-charging on the susceptibility of X100 pipeline steel to hydrogen-induced cracking.
- [4] Barceinas S.J. y Juárez H.A. Ciencia e Ingeniería de los Materiales Capítulo 3 Ordenamiento Atómico de los Sólidos. Pags. 23-27.
- [5] Addison Wesley B.D. Cullity. Elements of X-Ray Diffraction. Second Edition. Pags. 189-199.
- [6] Ozols A. 2009. Aplicaciones de la difracción de Rayos X. FACULTAD de INGENIERIA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.
- [7] Leggatt. R.H. Granta TWI. 2008. Residual stresses in welded structures., UK. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Pags 144–151.
- [8] Carboni A, Pigani A, Megahed G and Paul.S. K. 2008. Casting and rolling of API 5L X70 grades for arctic applications in thin slab rolling plant. Millenium steel.
- [9] Reyes F.A. Efecto de la microestructura en la difusión de hidrogeno en los aceros al carbono.2003

[10] Arámburo G. Pérez, S. García G.R. Pérez C y Juárez J.A. 2003. Impacto tecnológico de aceros grado API 5L X70 para la fabricación de ductos resistentes al gas amargo.

[11] Interrante C.G. Pressouyre. G.M. Current Solutions to Hydrogen Problems in Steels. 2004. American Society for Metals.

[12] Brien. R.L. Manual de soldadura tomo I, octava edición. American Welding Society. Pags 191-227.

[13] Timmins. P.F. Solution to Hydrogen Attack in Steels. ASW International. The materials Information Society.

[14] Kou S. Welding Metallurgy. Department of Materials Science and Engineering University of Wisconsin pags. 122-125 y 11-13.

[15]. Vedia L. A. Svoboda. H. G. 2004. Introducción a la Metalurgia de la soldadura.

[16] Corrosion of Weldments ASM International the Material Information Society pags. 13-36.

[17] Toribio. J. 2007. Residual Stress Effects in Stress-Corrosion Cracking.

[18] Osadchuk. Banakhevych. V. A. Yu. V. Ivanchuk. O. 2006. Determination Of The Stressed State Of Main Pipelines In The Zones Of Circular Welds.

[19] Yuri F. Kudrayvtsev. Windor. C. Residual stress. Neutron Diffraction Methods for the study of Residual Stress Field. Pag 371-376.

[20] Atienza. J.M. Determinación de los esfuerzos residuales mediante la técnica de difracción de Rayos X. Universidad Politécnica de Madrid. Pags 40-54.

[21] I.C. Noyan J.B. Cohen. Residual Stress measurement by Diffraction and interpretation. Springer- Verlog. Materials research and engineering.

[22] 2003. Standard Test Method for Determining the Effective Elastic Parameter for X-Ray Diffraction Measurements of Residual Stress. Designation: ASTM E 1426 – 98.

[23] Delgado. E. Corrosión y degradación de los materiales. Instituto Tecnológico de Morelia. Pags. 26-73, 142-191.

[24] American Welding Society. Manual de Soldadura tomo I. pags. 191-231.

[25] Ricardo Santiago Netto (RSN) [internet] [update 2010 July 25<sup>th</sup>]. Fisicanet; [cited 2010 Nov 15]. Available from: [http://fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap04\\_ondas\\_electromagnéticas.php](http://fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap04_ondas_electromagnéticas.php)

| <b>ÍNDICE DE TABLAS.</b> |  | <b>Pág.</b> |
|--------------------------|--|-------------|
| Tabla2.1                 | Parámetros recomendados para alambres de soldadura de arco sumergido (SAW) | 13          |
| Tabla2.2                 | Datos de Deposición para alambres de soldadura de Arco Sumergido (SAW).    | 14          |
| Tabla2.3                 | Porcentaje en peso de la composición química del electrodo                 | 25          |
| Tabla2. 4                | Composición química % en peso del acero API 5L X70.                        | 26          |
| Tabla2.5                 | Clasificación de las técnicas para la medición de tensiones residuales.    | 35          |
| Tabla2.6                 | Longitudes de onda.  | 71          |
| Tabla4.1                 | Parámetros de soldadura por SAW con dos arcos.                             | 94          |
| Tabla4.2                 | Parámetros de soldadura por SAW con tres arcos.                            | 94          |
| Tabla4.3                 | Parámetros del ensayo de medición de esfuerzos residuales                  | 95          |
| Tabla4.4                 | Parámetros del ensayo de corrosión.  | 96          |
| Tabla4.5                 | Calor de entrada de cada muestra después del procedo de soldadura.         | 98          |
| Tabla4.6                 | Resultados calor de entrada vs esfuerzos residuales.                       | 98          |
| Tabla4.7                 | Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de metal base.          | 100         |
| Tabla4.8                 | Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de ZAC.                 | 100         |
| Tabla4.9                 | Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de Cordón de soldadura. | 101         |
| Tabla4.10                | Resultados del ensayo de corrosión.  | 102         |
| Tabla4.11                | Valores de esfuerzos residuales y calor de entrada de Cordón de soldadura. | 103         |

| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b> |   | <b>Pág.</b> |
|---------------------------|---|-------------|
| Figura 2.1                | Modo de transferencia en SAW  | 12          |
| Figura 2.2                | Proceso de soldadura SAW  | 13          |
| Figura 2.3                | Instalación de proceso SAW en la industria  | 15          |
| Figura 2.4                | Fundente granulado aglomerado.  | 17          |
| Figura 2.5                | Fundentes fundidos  | 18          |
| Figura 2.6                | Efecto del amperaje en la forma y penetración del cordón  | 21          |
| Figura 2.7                | Falta de fundente en el proceso de arco sumergido (SAW)   | 22          |
| Figura 2.8                | Efecto del voltaje en el proceso de soldadura (SAW)   | 23          |
| Figura 2.9                | Efecto de la velocidad de avance con voltaje y amperaje constantes                              | 24          |
| Figura 2.10               | Efecto del tamaño del electrodo   | 24          |
| Figura 2.11               | Diagrama de producción de soldadura   | 27          |
| Figura 2.12               | Estados transitorios y finales durante la soldadura   | 31          |
| Figura 2.13               | Factores que contribuyen a los esfuerzos residuales   | 32          |
| Figura 2.14               | Profundidad de anillo de la muestra, para medición de esfuerzos                                 | 37          |
| Figura 2.15               | Clasificación de la corrosión   | 39          |
| Figura 2.16               | Clasificación de corrosión según su forma   | 41          |
| Figura 2.17               | Corrosión en placa metálica   | 41          |
| Figura 2.18               | Corrosión por unidad de área.   | 42          |
| Figura 2.19               | Grieta generada después del proceso de soldadura  | 48          |
| Figura 2.20               | Localización del HIC en aceros al carbono soldados  | 49          |
| Figura 2.21               | Grieta bajo el cordón de soldadura, resultado del HIC en la ZAC                                 | 50          |
| Figura 2.22               | HIC en pie de la grieta en la ZAC de soldadura de arco sumergido en acero de bajo carbono a 18x | 51          |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.23 | Diadrama de Graville  | 52 |
| Figura 2.24 | Agrietamiento transgranular e intergranular   | 56 |
| Figura 2.25 | Grietas originadas en la ZAC y cerca de ella  | 57 |
| Figura 2.26 | Grietas transversales en soldadura  | 57 |
| Figura 2.27 | Fases de perlita y ferrita laminar  | 58 |
| Figura 2.28 | Grietas extendidas sobre el metal base y en la periferia de óxidos  | 58 |
| Figura 2.29 | Estructura metalografica de acero API X 70 a) plano del laminado b) en dirección del laminado   | 60 |
| Figura 2.30 | Microestructura del acero observado con TEM a) ferrita poligonal b) ferrita acicular  | 61 |
| Figura 2.31 | Inclusiones en acero API X 70 a) microestructura observada con TEM b) nitruros observados con microscopio óptico  | 62 |
| Figura 2.32 | Una sección representativa de la ampolla y de las grietas del hidrógeno debajo de la ampolla  | 63 |
| Figura 2.33 | Micro grieta generada por una inclusión   | 63 |
| Figura 2.34 | a) micro grieta trans e intergranular b) micro grieta encontrada en y alrededor de una inclusión no metálica  | 64 |
| Figura 2.35 | Grietas internas a) micro grietas localizadas a lo largo de los límites de grano de la ferrita poligonal, b) micro grietas existentes a lo largo de los límites de los sub granos | 65 |
| Figura 2.36 | Curvas de permeación de hidrógeno a) acero X70[1] b) transición completa de carga   | 66 |
| Figura 2.37 | Curvas de permeación de hidrógeno aplicada a acero de diferente espesor $L_1 = 0.5\text{mm}$ , $L_2 = 1\text{mm}$ , $L_3 = 1.5\text{mm}$ y $L_4 = 2\text{mm}$                     | 68 |
| Figura 2.38 | Espectro electromagnético   | 70 |
| Figura 2.39 | a) Demostración de cómo dos ondas (1 y 2) que tienen la misma longitud de onda y que están en fase después  |    |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
|             | del evento de dispersión ( $1'$ y $2'$ ) interfieren constructivamente una con la otra. (b) Demostración de cómo dos ondas (3 y 4) que tienen la misma longitud de onda y que llegan a estar fuera de fase después del evento de dispersión ( $3'$ y $4'$ ), interfieren destructivamente una con la otra  | 75 |
| Figura 2.40 | Método de Laue   | 76 |
| Figura 2.41 | Difracción de rayos-X por los planos de átomos A-A' y B-B  | 78 |
| Figura 2.42 | Diagrama esquemático de un difractómetro de Rayos-X; T= fuente de Rayos-X, S= muestra, C = detector y O= eje de rotación alrededor del cual rota el detector y la muestra b) equipo de difracción de rayos   | 79 |
| Figura 2.43 | Representación esquemática de los componentes de un goniómetro   | 80 |
| Figura 2.44 | Definiciones de los ángulos $\psi$ , $\varphi$ , $\chi$ en el goniómetro   | 81 |
| Figura 2.45 | Esquema de los granos (dibujo) de una estructura policristalina delineados por sus bordes de grano, cada una con una orientación cristalográfica distintas   | 83 |
| Figura 2.46 | Semi-ancho de pico de difracción   | 84 |
| Figura 2.47 | Representación esquemática de los tipos de tensiones en un material cristalino, según los distintos niveles o escalas. La tensión de fase $\sigma^{\alpha}$ , que es la medida por difracción de Rayos X, será la suma de la macrotensión $\sigma^1$ y las microtensiones de la fase $\sigma^{II(\alpha)}$ | 89 |
| Figura 4.1  | Preparación de muestras  | 94 |
| Figura 4.2  | Preparación de placa de acero API 5L X70 por (SAW) para medición de esfuerzos residuales.  | 95 |
| Figura 4.3  | Identificación de zonas para medición de esfuerzos residuales por medio de la técnica de difracción de Rayos X.  | 96 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figura 4.4  | Montaje de celda electrolítica.   | 97  |
| Figura 4.5  | Preparación de la probeta para ensayo de corrosión  | 97  |
| Figura 4.6  | Representación gráfica de esfuerzos residuales en metal base  | 100 |
| Figura 4.7  | Representación gráfica de esfuerzos en Zona Afectada por el Calor                                   | 100 |
| Figura 4.8  | Representación gráfica de esfuerzos en Cordón de soldadura.   | 101 |
| Figura 4.9  | Curva de polarización de las muestras analizadas.   | 102 |
| Figura 4.10 | A) Muestra 3-4 B) muestra 1-2 después del ensayo de corrosión                                       | 103 |
| Figura 4.11 | Representación gráfica de velocidad de corrosión vs esfuerzos residuales en el cordón de soldadura. | 103 |