

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA**



**“ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN BAJO
ESFUERZOS DE UNIONES EN TUBERÍAS DE ACERO API 5L, X70
OBTENIDAS POR SOLDADURA SMAW Y MMA.”**

Por

ING. JUAN ENRIQUE HERNÁNDEZ CASTRO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA con Especialidad en MATERIALES.**

Enero, 2013

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA**



**ESTUDIO DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS DE UNIONES EN TUBERÍAS
DE ACERO API 5L, X70 OBTENIDAS POR SOLDADURA SMAW Y MMA.**

MONTERREY, NUEVO LEÓN

Por

ING. JUAN ENRIQUE HERNÁNDEZ CASTRO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA con Especialidad en MATERIALES.**

Enero, 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis de Maestría **“ESTUDIO DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS DE UNIONES EN TUBERÍAS DE ACERO API 5L, X70 OBTENIDAS POR SOLDADURA SMAW Y MMA”**, realizada por el alumno **JUAN ENRIQUE HERNÁNDEZ CASTRO**, con número de matrícula **1132208** sea aceptada para obtener el Grado de **MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA** con Especialidad en **MATERIALES**.

El Comité de Tesis

Asesor
Dra. Dora Irma Martínez Delgado

Revisor
Dr. Rafael Mercado

Co Asesor
M.C. Gabriel García Cerecero

Vo. Bo.
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Enero 2013

Agradecimientos

A la U.A.N.L., CONACyT, TUBACERO S de R.L. de C.V y COMIMSA también a mis profesores y compañeros.

Debo agradecer de manera especial y sincera a **la Dra. Dora Irma Martínez Delgado** por aceptarme para realizar esta tesis de maestría bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento al **M.C. Gabriel García Cerecero** por su importante aporte y colaboración activa en el desarrollo de esta tesis. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado y, además, ha significado el surgimiento de una sólida amistad.

Dedicatoria

*A mi hijo, “**Zaid Alexander Hernández R.**”, por ser la alegría de mi vida y fuente de inspiración para seguir adelante.*

*A mis padres, “**Sr. José Guadalupe Hernández Elizondo y Sra. María Silvia Castro Macías**”, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy.*

*A mis hermanos, **José Guadalupe, Alejandro y Gerardo.***

CONTENIDO

Agradecimientos

Dedicatoria

RESUMEN

1 INTRODUCCIÓN

- 1.1. Objetivos generales
- 1.2. Objetivos específicos
- 1.3. Hipótesis
- 1.4. Metas

2. MARCO TEÓRICO

- 2.1. Procesos de soldadura por fusión
- 2.2. Procesos de Soldadura SMAW y MMAW
- 2.3. Soldadura por arco con electrodo revestido
- 2.4. Revestimiento del electrodo
- 2.5. Defectos de la soldadura
- 2.6. Clasificación de los defectos de soldadura
- 2.7. Efectos de la corrosión bajo esfuerzos
- 2.8. Susceptibilidad al SSC y HIC
- 2.9. Aceros API 5L
- 2.10. Especificaciones API 5L
- 2.11. Aceros de alta resistencia mecánica
- 2.12. Corrosión
- 2.13. Especificaciones y normas.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Pruebas químicas

- 3.1.1. Ensayo de SSC método B solución B
- 3.1.2. Objetivo
- 3.1.3. Descripción
- 3.1.4. Preparación de la solución acuosa Corrosiva
- 3.1.5. Dimensión de la probeta de SSC
- 3.1.6. Cálculo de la deflexión de la probeta a ensayar de SSC
- 3.1.8. Exposición de la probeta de SSC en el medio corrosivo
- 3.1.9. Purgado y saturación de la solución utilizada para el ensayo de SSC
- 3.1.10. Condiciones para el ensayo de SSC

- 3.2.1. Ensayo de HIC
- 3.2.2. Objetivo
- 3.2.3. Descripción
- 3.2.4. Preparación de los reactivos para la solución del ensayo de HIC

- 3.2.5. Preparación de la solución acuosa corrosiva para el ensayo de HIC
- 3.2.6. Dimensiones de la probeta HIC.
- 3.2.7. Exposición de la probeta de HIC en el medio corrosivo
- 3.2.8. Purgado y saturación de la solución utilizada para el ensayo de HIC
- 3.2.9. Condiciones para el ensayo de HIC
- 3.2.10. Evaluación del ensayo de HIC
- 3.2.11. Medición de grietas escalonadas.

- 3.3.1. Esfuerzos Residuales
- 3.3.2. Objetivo
- 3.3.3. Descripción

- 3.4.1. Barrido potenciodinámico
- 3.4.2. Objetivo
- 3.4.3. Descripción

Ensayos mecánicos

- 3.5.1. Preparación metalográfica
- 3.5.2. Objetivo
- 3.5.3. Descripción

- 3.6.1. Evaluación metalográfica
- 3.6.2. Objetivo
- 3.6.3. Descripción

- 3.7.1. Determinación de inclusiones no metálicas
- 3.7.2. Objetivo
- 3.7.3. Descripción

- 3.8.1. Ensayo de tensión
- 3.8.2. Objetivo
- 3.8.3. Descripción

- 3.9.1. Ensayo Dureza Vickers
- 3.9.2. Objetivo
- 3.9.3. Descripción

- 3.10.1. Ensayo Impacto
- 3.10.2. Objetivo
- 3.10.3. Descripción

- 3.11. Equipo utilizado para experimentación y caracterización de materiales.

4 RESULTADOS y DISCUSIONES

- 4.1 Resultados obtenidos de los ensayos mecánicos y caracterización de la microestructura de los procesos de los procesos MMA y SMAW
- 4.2 Caracterización microestructural proceso SMAW
- 4.3 Caracterización microestructural proceso MMA
- 4.4 Evaluación de durezas para los procesos de SMAW y MMA
- 4.5 Análisis de pruebas potenciodinámicas e impedancia electroquímica
- 4.6 Análisis macroscópico
- 4.7 Resultados obtenidos del estereoscopio
- 4.8 Análisis de la fractura
- 4.9 Análisis con el microscopio confocal
- 4.10 Análisis de difracción de rayos X
- 4.11 Resultados de dureza Vickers en soldadura MMA después del ensayo de HIC
- 4.12 Resultados de Ensayo de HIC.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. REFERENCIAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

GLOSARIO

RESUMEN

La expropiación de petróleo en el mundo cada vez se lleva a cabo en aguas más profundas, lo que trae consigo el desarrollo de tecnologías de soldadura para la fabricación y reparación, además del uso de nuevos materiales. Sin embargo, al realizar un proceso de reparación por soldadura trae consigo la generación de esfuerzos residuales inherentes del proceso. La magnitud de estos esfuerzos puede promover la falla del material, de ahí la necesidad de cuantificar la corrosión bajo esfuerzos.

En la actualidad se tienen diferentes técnicas de medición de la corrosión bajo esfuerzos, sin embargo, se tiene poco conocimiento de la diferencia de los esfuerzos que se generan en los diferentes procesos de soldadura. En esta investigación se generó conocimiento de la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos para dos tipos de soldadura realizadas el proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y MMA (Manual Metal Arc) en tubería API 5L X70.

La estimación de la corrosión bajo esfuerzos se realizó mediante dos técnicas principalmente que son los ensayos de SSC (Sulfide Stress Corrosion Cracking) y HIC (*Hydrogen Include Cracking*). Se encontró que la magnitud de la corrosión bajo esfuerzos es mayor en la zona crítica de la ZAC (Zona Afectada por el Calor) y Soldadura, existen diferencias en magnitud de la corrosión bajo esfuerzos dependiendo de la magnitud de deformación y el proceso de soldadura, pero, cabe mencionar que el comportamiento de la corrosión bajo esfuerzos es similar.

El objetivo del presente estudio fue realizar ensayos de SSC y HIC las pruebas se llevaran a cabo a temperatura ambiente, en una solución NACE saturada con H_2S , esto para medir la susceptibilidad a la corrosión del acero API 5L X70 como metal base y así mismo medir las propiedades de ZAC e interfases, con los dos tipos de soldadura obtenidas en ambiente seco (SMAW) y el obtenido húmedo bajo el agua (MMA). Además se evaluaron las propiedades mecánicas de las uniones.

Se realizó la caracterización microestructural correspondiente por medio de las siguientes técnicas microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, además se realizaron ensayos de microdureza vickers y análisis por difracción de rayos X, para determinar las fases presentes en las muestras después de los ensayos de SSC.

INTRODUCCIÓN

Aunque con el paso de los años, los materiales como los polímeros y los materiales compuestos están siendo utilizados en la industria, pero, los metales siguen ocupando un lugar privilegiado, gracias a sus buenas propiedades mecánicas y tolerancia a las altas temperaturas. Pero lamentablemente, los metales tienen una gran desventaja con otros materiales, están sujetos a la corrosión y un más para los aceros API 5L ya que son utilizados ampliamente en la industria petrolera principalmente por razones económicas. Sin embargo sufren corrosión debido a los ambientes que se generan en estos procesos químicos y de transporte. Estos ambientes corrosivos incluyen gases ácidos, como el dióxido de carbono (CO₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S), y agua salada.

Tabla 1.1. Principales contaminantes del gas amargo.[1]

Sulfuro de hidrogeno	H ₂ S
Monoxico de cabrono	CO
Dioxido de carbono	CO ₂
Sulfuro de carbono	COS
Disulfuro de carbono	CS ₂
Mercaptanos	RSH
Nitrogeno	N ₂
Agua	H ₂ O
Oxígeno	O ₂
Mercurio	Hg

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) y/o Dióxido de carbono (CO_2). En presencia de agua aseguran la existencia de corrosión.

H_2S/CO_2 = Alto (menos corrosivo).

H_2S/CO_2 = Bajo (más corrosivo).

Existen diferentes tipos de corrosión [2,3] la que nos interesa en este estudio es la corrosión bajo esfuerzos, que es generada por ambientes altamente corrosivos a los que están expuestos los aceros API 5L y los esfuerzos a los que están sometidos, algunos de estos esfuerzos son atribuidos al método utilizado bajo el cual fue procesado el material para su formado y/o por el ciclo térmico de la soldadura, en esta investigación se consideran en específico dos diferentes procesos de soldadura que son SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y MMA (Manual Metal Arc).

Cuando el sueco Oscar Kjellberg, en 1904, entregaba en una oficina de patentes, una nota escrita donde describía su invención de la soldadura por arco con electrodo revestido, nunca imaginó que sus esfuerzos serían coronados con un rotundo éxito a nivel mundial. Aún actualmente, después de haber permanecido en la élite de los procesos de soldadura por arco durante más de 100 años, el proceso SMAW, mantiene su vigencia pese a sus relativas desventajas respecto a los procesos automáticos de soldadura por arco.

A partir de 1980, se produjo una explosión en la automatización de la tecnología industrial que parecía desbancar, con el amplio desarrollo alcanzado por el equipamiento automático, a los procesos de soldadura manuales y semiautomáticos. No obstante, el proceso de soldadura por arco más común, SMAW, veintiocho años después, se ha mantenido insustituible en diversas aplicaciones en la industria de los denominados países desarrollados.[4]

1.1 Objetivo General

Evaluar la microestructura y la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos de dos procesos de soldadura SMAW y MMA en un acero API 5L X-70.

1.2. Objetivos específicos

Generar conocimiento referente a la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos en las zonas críticas de la soldadura en un acero API 5L en presencia de gas sulfhídrico.

Evaluar el efecto de la microestructura, sobre las zonas críticas de la soldadura en seco (SMAW) y ambiente húmedo (MMA).

Determinar la relación entre esfuerzos residuales y la susceptibilidad a la corrosión de tubería utilizada para el transporte de hidrocarburos.

Determinar el tipo de fractura, comportamiento y propagación de la misma en las zonas críticas de la soldadura.

1.3. Hipótesis

Se puede determinar la resistencia a la corrosión bajo esfuerzos de un acero API 5L X-70 soldado por dos procesos diferentes SMAW y MMA al determinar la relación entre las propiedades mecánicas y los efectos del proceso de soldadura sobre la microestructura de la ZAC y la soldadura.

1.4. Metas

Conocer la respuesta de la susceptibilidad de los aceros X-70 al agrietamiento generado por el ambiente corrosivo.

Cuantificar el grado de susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos a según la norma NACE.

Determinar los esfuerzos residuales generados de dos procesos de soldadura y su respuesta a los ensayos de SSC y HIC.

1. MARCO TEÓRICO

2.1. Procesos de soldadura por fusión

La soldadura por fusión es un proceso de unión que provoca la fusión del metal base y un metal de aporte para realizar la soldadura. A continuación se presenta los procesos más importantes de soldadura por arco.[35]

Tabla 2.1. Procesos de Soldadura por arco eléctrico [35].

Método	Proceso	Técnica
Soldadura de arco	Metálico protegido (SMAW)	Funde y une metales calentándolos con un arco establecido entre un electrodo recubierto y el metal.
	Gas de Tungsteno (GTAW)	Funde y une metales calentándolos con un arco establecido entre un electrodo de tungsteno no consumible y el metal.
	De plasma (PAW)	Funde y une metales calentándolos con un arco restringido establecido entre el electrodo de tungsteno y el metal.
	Metálico por gas (GMAW)	Funde y une metales calentándolos con un arco establecido entre un electrodo de alambre alimentado continuamente de metal de relleno y el metal.
	Con flujo central (FCAW)	Es similar al proceso GMAW, pero el alambre del electrodo es interno.
	Sumergido (SAW)	Funde y une metales calentándolos con un arco establecido entre un electrodo de alambre consumible y el metal.
	Electroescoria (ESW)	Funde y une metales calentándolos con un charco de escoria fundida situado entre el metal y el electrodo alimentado continuamente del metal de relleno.

3.2. Proceso de soldadura

Las placas fueron unidas por el proceso MMA, de ranura en V, con una abertura de raíz de 3.32 mm y un ángulo de bisel de 60° de ángulo de apertura, se utilizó electrodo de la marca Broco Underwater AWS E70XX UW-CS-1 de 3 mm de espesor y un equipo para soldadura modelo Miller Syncrowave 250, con una corriente eléctrica ajustable de hasta 175 A, con una corriente CD negativa, un voltaje de 23 V y alambre de refuerzo de 2 mm. La figura 4.1 muestra las placas antes y después de ser soldadas. La velocidad con la que fueron soldadas cada una de las placas fue de 3 mm/seg.

La fórmula que se utiliza para calcular el calor de entrada en una soldadura es la siguiente:

$$Q = \frac{vI}{S} \quad [1]$$

Donde Q es la entrada de calor, v es el voltaje (23 V), I es la corriente (175 A) y S es la velocidad de soldadura (3 mm/seg.).

$$\text{De esta manera } Q = \frac{(23V)(175A)}{3mm / seg} = 1341.66 \text{ W mm/seg}$$

2.1. Procesos de Soldadura SMAW y MMAW

Se aplicaron dos tipos de proceso de soldadura para unir las placas de acero API X70, el proceso SMAW y el proceso MMA este último término empleado para la aplicación de soldadura submarina. El material usado en las muestras fue un acero API X70 para oleoductos, con una microestructura ferrítica y perlítica, con la composición química que aparece en la tabla 2.4.

El metal de aporte utilizado fue un electrodo AWS E70XX UW-CS-1 de 3 mm de espesor y su composición química se muestra en la tabla 2.5. Las soldaduras para el proceso MMA se llevaron a cabo a 5 metros de profundidad en el puerto de Veracruz.

A los procesos de soldadura se le han reconocido de mucha utilidad para determinadas aplicaciones bajo ambientes altamente corrosivos. Por ejemplo se utiliza en operaciones como reflotamiento de buques, reparaciones, construcciones, remoción de maquinaria y accesorios de buques irrecuperables para transferirlos a otros buques, traslado de masas retorcidas de cascos hundidos y naufragados, para limpiar los puertos y canales de navegación, reparación de muelles y barcos deteriorados, así como en las construcciones iniciales de estos.



Figura 2.1. Proceso de soldadura submarina (MMA) realizada por un buzo.

En la figura 2.1 se muestra un buzo realizando trabajos de soldadura húmeda (MMA) utilizada para la reparación de tubería para la transportación de hidrocarburos y plataformas petroleras.

La soldadura es el proceso que se utiliza para realizar la unión de piezas metálicas mediante un calor intenso proveniente de una corriente eléctrica o

arco eléctrico. Como se indica los tipos de soldadura más comunes son el SMAW considerado en un ambiente seco y el MMA que consiste en ambiente húmedo [5]. Estos métodos son de gran importancia en la actualidad ya que es utilizado para reparación o fabricación de grandes líneas de tuberías o estructuras estas de ambiente agresivamente corrosivas que sirven para transporte de petróleo, aceite, gases ó agua.

A pesar de existir una gama amplia de procesos de unión, convencionales y no convencionales, uno de los más empleados es el MMA proceso de unión y reparación convencional empleado en plataformas y estructuras marítimas. El proceso MMA es utilizado, principalmente para soldaduras en aguas de moderada profundidad es decir, un ambiente altamente corrosivo. Respecto al material de aporte, este puede provenir de electrodos de acero recubierto tipo "básico" (electrodo de bajo hidrógeno), este contiene aproximadamente 30% de carbonato de calcio; un arco eléctrico es desarrollado entre el electrodo y la pieza de trabajo; durante la soldadura el recubrimiento se descompone hasta formar gases CO y CO₂ y escoria de óxido de calcio que cubre el metal fundiéndolos.

A diferencia de la soldadura SMAW, el efecto de la profundidad, el tipo de electrodo y tubería empleado en ambiente submarino influyen directamente en las propiedades mecánicas y en la formación de imperfecciones en el cordón de soldadura [6], la porosidad disminuye a lo largo del cordón de soldadura, debido a los cambios de oxígeno, magnesio y silicio los cuales funcionan como fundente en el electrodo; este fenómeno es relacionado con el calentamiento del electrodo llamado efecto joule. Dicho efecto hace referencia que al aumentar el tiempo de soldadura el charco se hace más grande y la cantidad de oxígeno disminuye. A continuación se muestra un esquema del proceso SMAW.

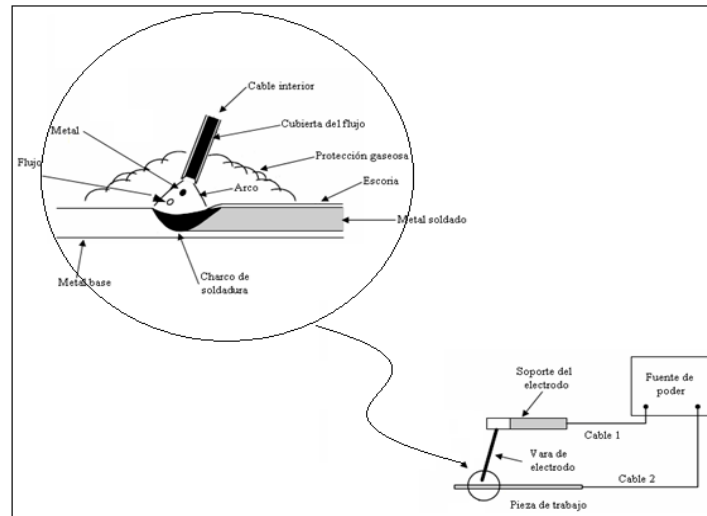


Figura 2.2. Representación esquemática del proceso SMAW.

Las condiciones de servicio de las tuberías conducción de petróleo submarinas son cada vez más exigentes, al requerir materiales con mayor capacidad para operar a grandes profundidades y para soportar altas presiones. Por lo que, el empleo de aceros de alta resistencia y baja aleación han sido usados ampliamente en esta aplicación. Ya que al ser microaleados presentan una excelente resistencia y tenacidad a bajas temperaturas. [7]

Siendo el proceso de MMA, empleado por excelencia para la unión y reparación de tuberías de conducción. Sin embargo, la aplicación de soldadura trae consigo cambios microestructurales en los materiales que pueden afectar de forma grave las propiedades mecánicas. Investigadores han encontrado que a medida que incrementa la profundidad de reparación se tiene una mayor probabilidad de incurrir en defectos como atrapamiento de gas y problemas de agrietamiento por hidrogeno [8], lo cual, sumado con los esfuerzos residuales generados en el componente pueden afectar directamente la integridad mecánica de la tubería.

A partir de 1990, fue más relevante encontrar estudios sobre la soldadura con electrodos revestidos, así como de estudios de estabilidad del arco eléctrico de soldadura. [9, 10, 11], Otros estudios, se enfocan hacia el desarrollo de sistemas y métodos para el control en tiempo real del equipamiento automático. [12, 13, 14].

La soldadura con electrodos revestidos, ha sido abordada desde el punto de vista de la influencia de los materiales del revestimiento en las características operativas y económicas de los electrodos para soldar, producidos a partir de determinadas mezclas de minerales. [15, 16, 17, 18].

El sensado en tiempo real del voltaje y la corriente de arco, permite evaluar el comportamiento de los fenómenos de transferencia de carga eléctrica y de transferencia metálica, los cuales están relacionados a la transferencia energética y de masa a través del arco, lo que define la calidad del producto obtenido por soldadura.

Existen métodos basados en el análisis de la estabilidad del arco producido en soldadura SMAW, que permiten registrar diferencias, durante el desempeño del proceso de soldadura, cuando se utilizan diferentes dosificaciones, naturalezas y orígenes de los materiales del revestimiento del electrodo. [19].

2.3. Soldadura por arco con electrodo revestido

El tipo de electrodo que se utilizó para soldar cada una de las placas es de material de acero dulce [83]. Y la composición del recubrimiento es de polvo de hierro de bajo hidrógeno.

El proceso de soldadura SMAW, por muchos años, ha sido una de las técnicas más comúnmente aplicadas en la fabricación de estructuras de acero. Es también conocido como Soldadura Manual por Arco con Electrodo Revestido.[4]

De la gama de procesos de soldadura, el proceso SMAW es uno de los más ampliamente utilizados. Si bien los fabricantes continúan automatizando los procesos para incrementar la productividad, SMAW se mantiene en gran parte del total de los negocios. Esto es debido a su versatilidad, bajos costos de accesorios y consumibles, simplicidad de la fuente de potencia, bajos costos de mantenimiento, durabilidad, relativa simplicidad de operación y fácil configuración. [17].

2.4. Revestimiento del electrodo

La composición, el origen, la dosificación y el tratamiento de las sustancias utilizadas en la fabricación del revestimiento de los electrodos, desempeña una función fundamental en la soldadura SMAW.[4]

Para el revestimiento se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, como arena de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeTi, FeMn, etc. La composición de los revestimientos suele ser muy compleja, generalmente se emplea una mezcla de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento, suelen intervenir óxidos naturales: óxidos de hierro, ilmenita (50 por ciento óxido férrico y 50 por ciento óxido de titanio), sílice (óxido de silicio); silicatos naturales (caolín, talco, mica, feldespato, etc.), productos volátiles (celulosa, serrín, etc.), fundentes (fluorita), concentrados (carbonatos, óxidos (óxido de titanio)), ferroaleaciones (FeMn, FeSi, FeTi), aglomerantes (silicato sódico, silicato potásico). [9].

Las características de las sustancias del revestimiento posibilitan la ocurrencia de distintos fenómenos de naturaleza eléctrica, física y metalúrgica. La función del revestimiento permite el encendido, reencendido y mantenimiento del arco, primeramente al disminuir el trabajo de extracción de los electrones al metal del electrodo, y luego, al aportar sustancias que se descomponen en gases de bajo potencial de ionización y, a la vez, no fácilmente dissociables, pues la disociación es un proceso endotérmico que tiende a consumir calor y dificultar el encendido y mantenimiento del arco eléctrico. [4]

2.5. Defectos de la soldadura

Una consecuencia indeseada de la soldadura es la presencia, en ocasiones de defectos en la zona de fusión. Esto puede tomar forma de discontinuidades tales como grietas, carencia de fusión, porosidad e inclusiones de escoria o irregularidades en el perfil soldado, es decir, falta de penetración y corte inferior. Algunos de estos defectos se ilustran en la figura 2.1.

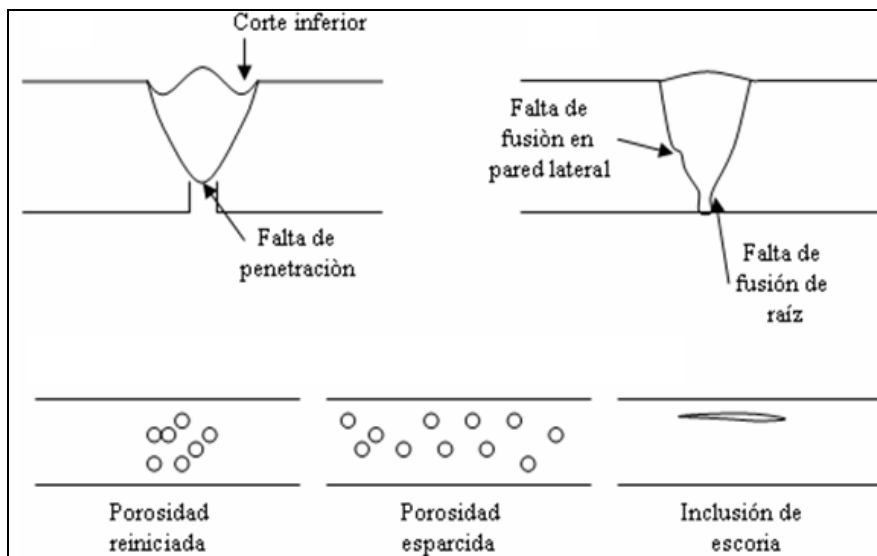


Figura 2.3. Algunos defectos de la soldadura. [20]

Algunos defectos, como la porosidad, resultan comúnmente durante la fusión y la solidificación, otros como agrietamiento laminar, se deben al metal base defectuoso.

La mayoría de los defectos de soldadura, son causados por una mala manipulación o por errores operacionales. El agrietamiento es el defecto más serio y en el acero es regularmente causado por el hidrógeno.

2.6. Clasificación de los defectos de soldaduras del Instituto Internacional de Soldadura (IIW) [21]

Tabla 2.2. Clasificación de los defectos de la soldadura según el IIW.

Serie 100	Fracturas longitudinales, transversales, radiales y en cráter.
Serie 200	Cavidades como bolsas de gas, porosidad interna o porosidad superficial
Serie 300	Inclusiones sólidas, escoria, fundente, óxidos metálicos y materiales extraños
Serie 400	Penetración o fusión incompleta.
Serie 500	Forma imperfecta o contorno inaceptable, socavado, refuerzo, excesivo, falta de llenado, forma del chaflán.
Serie 600	Defectos varios no incluidos anteriormente: Golpes de arco, salpicadura excesiva, superficie áspera.

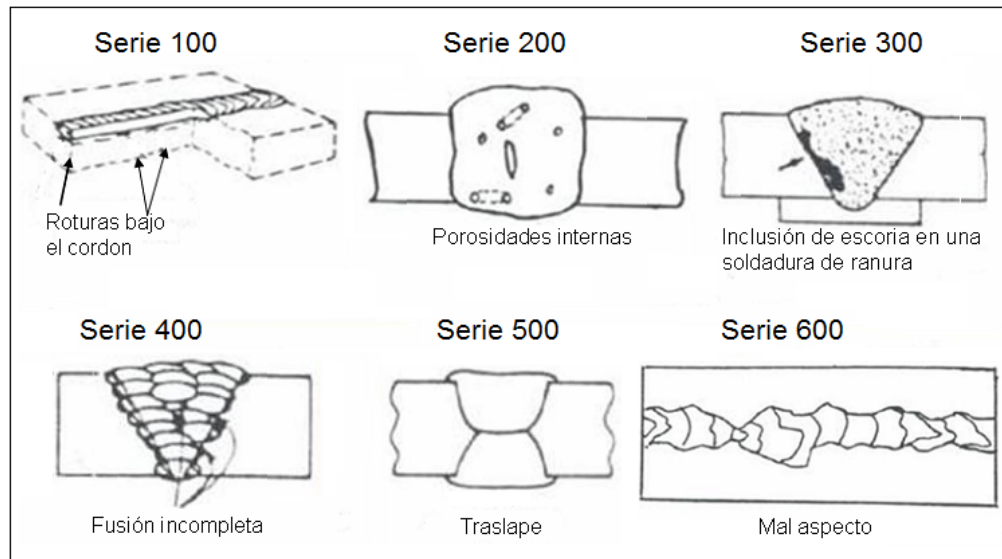


Figura 2.4. Clasificación de los defectos en las soldaduras según el IIW.

2.7. Efecto de corrosión bajo esfuerzos

Muchas de las investigaciones relacionadas con reparaciones de soldadura se han enfocado en el análisis, efecto de corrosión bajo esfuerzos y la gran mayoría se han basado en simulación por elemento finito [22-23]. Existen trabajos que han evaluado efectos o cambios en las propiedades mecánicas de la unión soldada de tubería en línea de acero API en un ambiente altamente corrosivo en los cuales la tenacidad a la fractura y dureza son uno de los puntos importantes a considerar. [24] Por esto se pretende realizar una investigación para evitar fallas en el material y/o considerar la susceptibilidad a la corrosión de un material en ciertas condiciones de operación.

2.8. Susceptibilidad al SSC y HIC

Tradicionalmente, la susceptibilidad al agrietamiento por corrosión bajo tensión en presencia de sulfhídrico (SSC) de aceros para tubería de línea y de tubería soldada ha sido evaluada mediante las pruebas descritas en la NACE TM0177.[25, 26, 27, 28]

Las pruebas de Hydrogen Included Cracking (HIC) de acuerdo a la norma NACE STD 02-84 [29,30,31] permiten evaluar la susceptibilidad de materiales metálicos al agrietamiento inducido por la absorción de hidrógeno en un ambiente corrosivo de una manera rápida y sencilla debido a que es una prueba estática que dura 96 hrs. De este modo, la posible falla ocurre en unos cuantos días y parámetros como agrietamiento pueden ser cuantificados y comparados con resultados de pruebas similares con diferentes aceros.

Pocas investigaciones han evaluado la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos mediante los métodos de SSC y HIC de aceros para tubería de línea y así como también para evaluar la susceptibilidad a la soldadura también han sido pocas las que han evaluado la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos de la soldadura circunferencial y/o longitudinal de la tubería en línea. La susceptibilidad de reparaciones múltiples en soldaduras circunferenciales de tubería de línea no ha sido evaluada por ninguna de las pruebas descritas anteriormente.

En los lugares donde las necesidades de reparación son mayores, en áreas de agua salada, el éxito de la soldadura húmeda aumenta enormemente ya que cuanto más alta es la salinidad de las aguas, mayor es la estabilidad del método de soldadura húmeda. Las sales disueltas en el agua aumentan sus cualidades electrolíticas, permitiendo de este modo un arco más caliente y una soldadura más eficiente.

Actualmente se reporta mucha información técnica que permite entender el comportamiento de la soldadura submarina y soldadura en seco, al SSC y HIC, sin embargo, para esta investigación científica se aporta valiosa información que permite entender el comportamiento de estos dos tipos de soldadura, a la corrosión en determinado ambiente de operación. Y así establecer las diferencias en cuanto a propiedades mecánicas de la soldadura por SMAW y por MMA. [45]

2.9. Aceros API 5L

El uso de este tipo de aceros se aplica para tuberías submarinas, tuberías de alta presión y ductos de alta resistencia. El acero de importancia en esta investigación es el API 5L X70. De modo general los aceros para tubos podemos dividirlos en cuatro grupos como se puede observar en la tabla 2.3 [32].

Tabla 2.3. Clase, grado y uso de tubos.

Clase (LE)	Grado típico	Uso
Min 217 MPa	API 5L A/ B/ X42/ X46/ X52/ X56	Productos no sometidos a la presión
Min 453 MPa	API 5L X60/ X65	Tuberías sometidas a presión media y alta
Min 522 MPa	API 5L X70	Tuberías a alta presión
Min 551 MPa	API 5L X80	Tuberías a alta presión

El coeficiente de dilatación lineal de aceros al carbón es de 0.000012 (1/°C).
LE: Límite Elástico.

2.10. Especificación API 5L [32,66,71,73]

Por sus siglas en inglés API se refiere a American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo). Los tubos que se utilizan en la industria petrolera son clasificados de acuerdo a la norma API, la cual se basa en aplicación y resistencia mecánica.

La especificación para tubería es API 5L, la cual está especificada para los tubos de acero y se refiere a tubos con y sin costura que estén soldados. Esta especificación API 5L se adapta para tubos de acero X70 y se usa para transportar hidrocarburos no amargos (HNA), para este servicio se adaptan los requisitos establecidos en ISO 3183-2 para grados L 290 hasta L485 (X42 hasta X70). Esta especificación establece normas para la transportación apropiada, para la fabricación de tubería usada para el transporte de agua, gas y petróleo.

El acero API 5L X70 presenta buenas propiedades mecánicas tales como resistencia a la tracción, a la fluencia y menor temperatura de transición, este comportamiento se puede atribuir al tipo de procesamiento de este acero, obtenido por laminación controlada y consecuentemente la reducción del tamaño de grano. También presenta propiedades de resistencia al gas amargo, el cual es gas natural u otro gas que contenga cantidades significativas de sulfuro de hidrógeno.

El gas natural generalmente se considera amargo y tiene un contenido de 5.7 mg de H_2S/m^3 de gas natural, que equivale a aproximadamente 4 ppm por volumen.

Los tubos deben de cumplir con los requisitos de propiedades mecánicas, composición química, dimensiones y peso, además de otros. Existen algunos defectos que se presentan en los tubos, los principales son: defectos propios de la placa, defectos de la soldadura y defectos de fabricación, éstos deben ser revisados cuidadosamente.

Los grados X cubiertos por la norma API 5L son X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80, y algunos grados intermedios. Los tubos utilizados en líneas de producción se fabrican de acuerdo a la norma API.

El proceso de fabricación inicial se llama UOE, se nombra así por los pasos en que consiste la elaboración de los tubos.

La figura 2.5, muestra un esquema del proceso para la fabricación de tubos; primero está la inspección de la materia prima cuando se recibe la lámina, se revisa que no tenga defectos como ralladuras o relieves, enseguida se procede a los cortes de la lámina y predobleces para iniciar con la preforma del tubo, después se hace una forma en U a la lámina y se cierra formando una O, hecha esta forma, se inspecciona visualmente para comprobar que la forma en O esté completamente redondeada, se hace inspección visual en los bordes del tubo y se cortan los filos.

Después se aplica la soldadura por puntos longitudinalmente a lo largo de la placa y finalmente se realiza el proceso de soldadura por arco sumergido, realizando un pase interno y uno externo a lo largo del tubo, para garantizar ausencia de defectos en la soldadura, se realizan pruebas de ensayos no destructivos y se hace una limpieza del flux (desoxidantes), esto es para reducir los óxidos presentes en todas las superficies involucradas en la unión de la soldadura y reducir las tensiones superficiales de la soldadura fundida, así como la prevención de la reoxidación de la superficie durante la soldadura y ayuda a la transferencia de calor entre las superficies a soldar. La inspección final general se realiza con ultrasonido que es una prueba no destructiva, es decir, no daña ni altera el material final, de manera que se puede observar el tubo en aquellas partes donde no se alcance a inspeccionar.

A continuación el tubo se somete a una expansión E en frío del tubo, por presión hidrostática interna en dados cerrados o por medios de expansión mecánicos, La prueba hidrostática, consiste en sumergir el tubo en un recipiente que contiene un fluido y se colocan elastómeros en ambos extremos del tubo, donde se aplica una presión interna de un 80% de su capacidad, esto se hace con un tiempo de cinco segundos, con la finalidad de ajustar el tubo a las normas de diámetro API 5L CT.

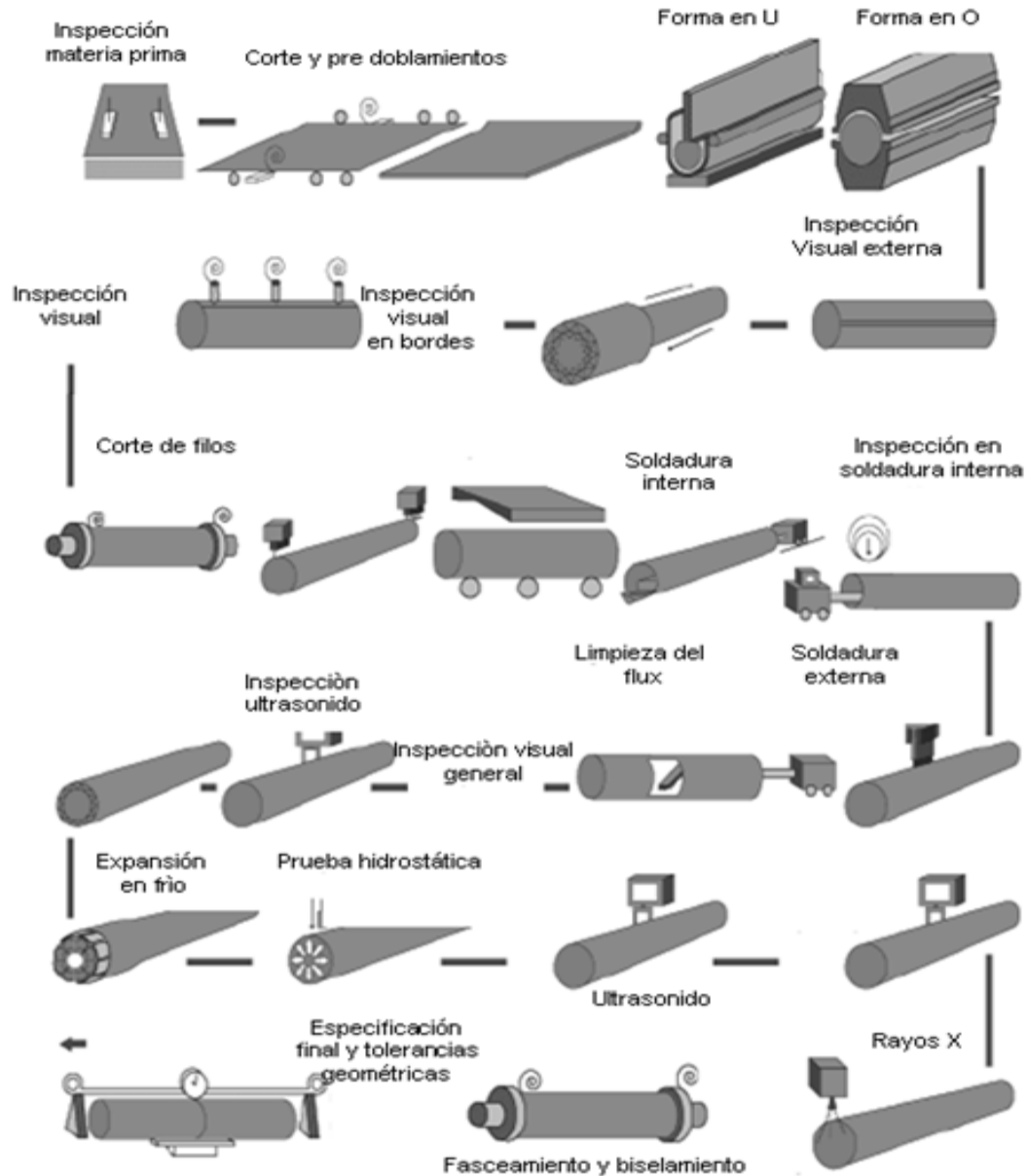


Figura 2.5. Proceso de fabricación de tubería para la industria petrolera por procesos de soldadura SAW y ERW. [33]

Los materiales de fabricación de las estructuras en ambientes marinos son los aceros API 5L. Estos aceros son microaleados resistentes a la corrosión, empleados en la industria petrolera en ambientes marinos y secos.

Un aumento en la cantidad de ácido sulfhídrico ha disminuido significativamente la vida en servicio de las tuberías de conducción. El daño por hidrógeno derivado de la corrosión en soluciones acuosas de ácido sulfhídrico es incrementado significativamente por la presencia de la ZAC esto debido al tipo de proceso al que fueron sometidos los materiales en su etapa de formado.

El arco sumergido es un proceso rápido y eficiente ya que la unión soldada es protegida por un fundente granular. Los efectos de los esfuerzos residuales como propagador de la grieta en la corrosión bajo esfuerzos han sido estudiados con anterioridad. Se ha reportado que entre mayor sea el esfuerzo residual de tensión más rápido será la propagación de la grieta. [34]

La tubería se fabrica de acero microaleado con niobio, titanio, vanadio y bajo carbono (< 0.1 % peso), por medio del proceso de laminado controlado termomecánicamente (TMCP), resultando una adecuada resistencia, tenacidad y soldabilidad debido al refinamiento de grano y al endurecimiento, por precipitación de carbo-nitruros de Nb-Ti con diferente tamaño y morfología, durante el laminado, enfriamiento y enrollado.[35,36]

Por otro lado, el acero de las tuberías y todos los materiales sufren un proceso de envejecimiento natural que se ve acelerado debido a la exposición prolongada a temperatura de operación (entre 25 y 70 °C). [37]

2.11. Aceros de alta resistencia mecánica

Actualmente se ha incrementado la demanda de acero con alta resistencia mecánica y resistencia al gas amargo para la construcción de ductos que transportan hidrocarburos. Se ha señalado que la fabricación de este tipo de aceros requiere una práctica estricta de aceración con laminación en caliente del planchón en forma controlada más un enfriamiento acelerado de la placa deformada. [38]

Con respecto a la práctica de aceración los desarrollos tecnológicos han permitido la producción de aceros con elementos microaleantes controlados en ppm [39], permitiendo una mejor respuesta cuando se someten a procesos termomecánicos. Por ejemplo con contenidos de carbono (<0.05% en peso) se mejora la soldabilidad se reduce el endurecimiento de la zona afectada por el calor. Los bajos contenidos de S disminuyen la susceptibilidad al agrietamiento por H₂ y los bajos contenidos de P reducen la tendencia al endurecimiento en regiones segregadas. El control de la morfología de las inclusiones mejora la tenacidad y la degradación de tuberías debido a la presencia de H₂S. [40]

Con respecto a la corrosión química del acero debe ser diseñado de tal forma que responda al proceso de laminación en caliente controlado junto con el procedimiento de enfriamiento acelerado para alcanzar el límite de fluencia y la tenacidad que se requiere las tuberías de aceros de 36" de diámetro en donde el acero API 5L X-70 ha sido de mayor aceptación. La composición química que satisface las propiedades mecánicas del acero grado API 5L X-70 con resistencia al gas amargo es el tipo Fe-C-Mn-Nb. Por esta razón varios estudios que se han llevado a cabo con el propósito de correlacionar los contenidos de Nb con el procedimiento de laminación controlada [41,42], más el efecto de enfriamiento acelerado [43], con el propósito de alcanzar dos metas la resistencia al gas amargo y las propiedades de los aceros API 5L X-70 [42-43].

En este trabajo se reportan los resultados de pruebas experimentos para fabricar y procesar aceros del tipo Fe-C-Mn-Nb capaz de responder al tratamiento termomecánico controlado más el enfriamiento de placas con el propósito de satisfacer las propiedades de un acero API 5L X-70.

Tabla 2.4 Composición química del metal base API 5L X-70 en %wt.

% C	% S	% Mn	% P	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% V	% Nb	% Ti	% W
0.06	<0.002	1.56	0.008	0.27	0.11	0.11	0.02	0.234	0.030	0.041	0.012	<0.002

Tabla 2.5. Composición química del electrodo en %wt.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Sn	Pb	B	Zn	Zr
0.112	0.041	0.488	0.004	0.011	0.043	0.019	0.069	0.007	0.068	0.008	0.004	0	0.03	0	0	0	0	0.003	0.007

2.12. Corrosión

La corrosión metálica es un deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Siempre que la corrosión es originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades del material. Se calcula que cada pocos segundos se disuelven 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros de corrosión localizada. [44]

Dentro del proceso electroquímico de la corrosión se establece una corriente de electrones debido a una diferencia de potenciales entre un punto y otro. En este mecanismo, la especie que cede electrones se llama ánodo y la que los recibe cátodo, presentándose oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo [31]. Donde habrá una transmisión de electrones de ánodo a cátodo por medio de cargas eléctricas y de iones en el electrolito. A esta corrosión también se le suele llamar corrosión húmeda [45] o fractura por esfuerzo de corrosión y es definida como la interacción entre un esfuerzo de tensión y un ambiente acuoso sobre una superficie metálica susceptible, que inicia y propaga fracturas.[46]

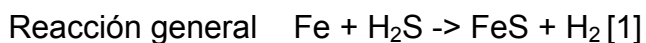
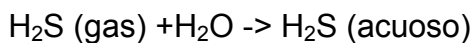
Existen dos formas de agrietamiento por esfuerzos.

La primera se propaga intergranularmente y es asociada con una concentración alcalina electrolítica que tiene contacto con la superficie del acero. El control de este mecanismo es posible reduciendo la temperatura de la tubería y controlando el rango de potencial electroquímico de la tubería. [47,48]

La segunda se propaga transgranularmente y es asociada con un electrolito diluido en un pH neutral en contacto con la superficie del acero. [49]

El gas amargo es un ambiente que propicia la corrosión debido a su composición química H_2S . Se considera gas amargo cuando el H_2S excede 0.32 atm (0.05 psi). La presión parcial es determinada por la concentración de H_2S y la presión en la línea de la tubería. [50]

La reacción química presente en el gas amargo para la generación de hidrogeno, ocurre de la siguiente manera:



El sulfuro de hidrógeno (H_2S) se conoce a partir de las escalas de sulfuro de hierro (FeS) con diferentes estructuras cristalinas que puede o no puede ser protectora dependiendo de condiciones tales como la temperatura, concentración de H_2S o Ph.

El Fe S es una capa protectora que se forma en la superficie como producto de corrosión.[51] Otros estudios [52,53], consideran la corrosión electroquímica por H₂S del acero al carbón y la susceptibilidad de la soldadura al SSC.[54]

Una gran cantidad de H₂ formado se disocia en el agua formando iones H⁺. Así mismo el H₂O en medio acuoso se disocia en iones H⁺. Si el hidrógeno no se disociara en átomos, no se llevaría a cabo el mecanismo de daño.

2.13. Especificaciones y normas

En esta investigación se utilizó un material que comúnmente es utilizado en la industria petrolera el cual su composición química que satisface las propiedades mecánicas del acero grado API 5L X-70 con resistencia al gas amargo es el tipo Fe-C-Mn-Nb.

Para el diseño experimental se utilizara acero grado API 5L X-70 como metal base sometido a dos procesos diferentes de soldadura que son SMAW y MMA, Verificación de sanidad de soldadura según API-1104. [55]

Se utilizaron probetas según la norma establecida para observar su efecto en pruebas electroquímicas como, el barrido potenciodinámico, según la ASTM G-61,[56] así como también se sometió a otros métodos de pruebas físicas.

Realización de las pruebas de tensión uniaxial a temperatura ambiente según ASTM E-8 [59,72] (Las probetas deberán estar maquinadas transversalmente a la dirección de la soldadura). Los ensayos mecánicos considerados son: resistencia al impacto según ASTM E-23 [60,74] y dureza vickers según ASTM E-384. [61,62,63]

La Caracterización y medición de las propiedades mecánicas de la ZAC, Soldadura y línea de fusión son, involucran una preparación y evaluación metalográfica para la medición del tamaño de grano según ASTM E-1382 [57] y ASTM E-112 [58], y la determinación de inclusiones no metálicas según ASTM E-45.[69]

Realización de las Pruebas SSC y HIC según la norma NACE TM 0177, [24] y NACE STD 02-84, [28] (Las probetas deberán estar maquinadas transversalmente a la dirección de la soldadura).

El análisis de los resultados será evaluado mediante una modelación estadística entre los ensayos realizados. Para determinar contundentemente los cambios en las propiedades mecánicas y su relación con la susceptibilidad a la corrosión para los diferentes ambientes y métodos de soldadura según ASTM G-1 [65] (SMAW y MMA).

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Pruebas químicas

3.1.1. Ensayo de SSC Método B Solución B [24,64,65]

Prueba de susceptibilidad a la corrosión y resistencia al agrietamiento bajo esfuerzos en presencia de sulfhídrico (SSC o SSCC).

3.1.2. Objetivo

Determinar la susceptibilidad a la corrosión esto mediante el monitoreo del agrietamiento por la acción combinada de esfuerzos y ambiente altamente corrosivo, constituido por agua y ácido sulfhídrico.

Tabla 3.1 Herramientas y Equipo para ensayo de SSC

Recipiente hermético (Adaptado para purgar e introducir ácido sulfhídrico)
Manguera de polietileno
Termómetro
Medidor de pH
Medidor de flujo
Trampas de NaOH
Soporte de 4 puntos
Indicador de carátula
Vernier digital
Lupa 10X
Lija 240
Guantes de látex

Tabla3.2. Reactivos químicos para ensayo de SSC.

Tanque de hidrógeno o argón UAP
Tanque de ácido sulfhídrico
Agua destilada o Desionizada
Soluciones buffer
NaCl
CH ₃ COOH (Ácido acético glacial)

3.1.3. Descripción

La prueba consiste en la exposición de los especímenes en una solución en un ambiente acuoso de bajo pH conteniendo H₂S, la absorción de hidrógeno genera corrosión en el acero, el mecanismo de falla se muestra mediante el agrietamiento originado por la formación de hidrógeno molecular a partir del hidrógeno atómico atrapado en inclusiones no metálicas o discontinuidades internas del material a lo largo de la dirección de rolado del acero, las fracturas sobre el plano se enlazan con otras fracturas de planos adyacentes para formar fracturas escalonadas a través del espesor, las fracturas pueden reducir el espesor efectivo de la pared hasta que la tubería se sobrecarga y fractura.

3.1.4 Preparación de la solución acuosa corrosiva

La solución consiste en 5% en peso de NaCl y 0.5% en peso de CH₃COOH en agua destilada. Todos los reactivos añadidos a la solución de prueba debe ser medidos al $\pm 1\%$ de las cantidades especificadas.

Nota: la gente debe prepararse y ajustarse al pH inmediatamente antes de usarse.

3.1.5. Dimensiones de la probeta de SSC

Cada espécimen debe ser de 5 mm de espesor, 15 mm de ancho, 115 mm de longitud.

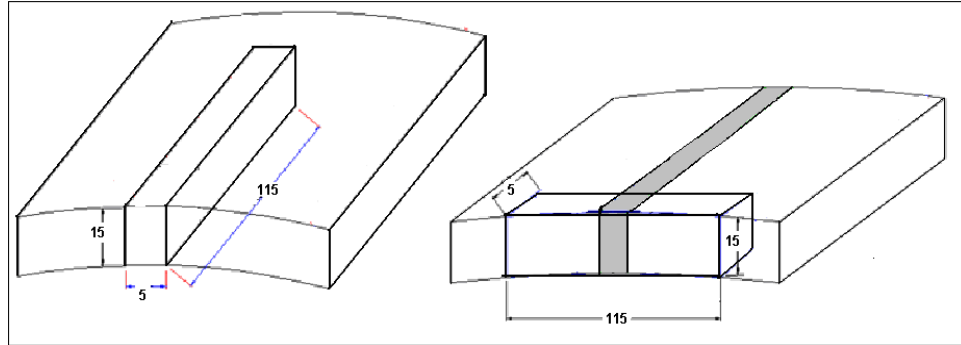


Figura 3.1 Esquema que indica la orientación y ubicación correcta de las probetas a ensayar de SSC en metal base y soldadura.

Nota: la soldadura deberá quedar al centro del espécimen a evaluar.

3.1.6. Cálculo de la deflexión de la probeta a ensayar de SSC

$$Y = \frac{\sigma (3H^2 - 4A^2)}{12 E t}$$

Ec. [2]

σ esfuerzo

H distancia entre soportes interiores

A distancia entre soportes interiores y exteriores

E modulo de elasticidad

t espesor de la probeta



Figura. 3.2. Montaje de la probeta en el soporte de cuatro puntos para el ensayo de SSC.

3.1.7. Exposición de la probeta de SSC en el medio corrosivo

Los especímenes son colocados en los soportes de 4 puntos dándoles la deflexión obtenida en el cálculo realizado de acuerdo a la función anterior con el indicador de carátula.

El recipiente debe ser cerrado y debe quedar perfectamente sellado antes de purgar con el nitrógeno N_2 y saturar con ácido sulfhídrico (H_2S).

3.1.8. Purgado y Saturación de la solución utilizada para el ensayo de SSC

El purgado con gas nitrógeno y saturación con ácido sulfhídrico debe de introducirse cerca del fondo de recipiente de prueba.

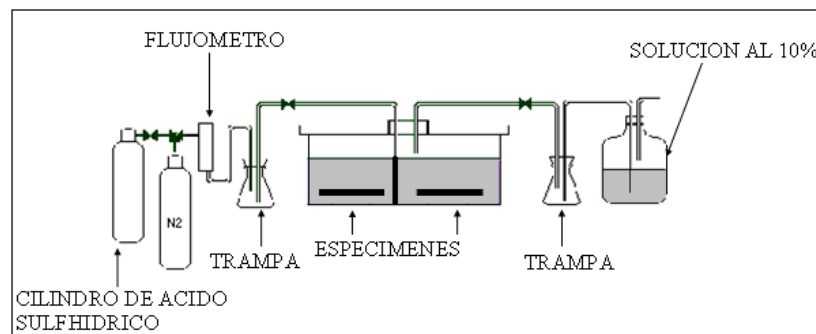


Figura 3.3. Diagrama esquemático de purgado y saturación para el ensayo de SSC.

3.1.9. Condiciones para el ensayo de SSC

Tabla 3.3. Parámetros para ensayo de SSC.

Temperatura	25 ± 3°C
Ph inicial	2.6 a 2.8
Ph después de saturación	4
Ph final	4
Tiempo de exposición	720 hrs.

El recipiente sellado debe purgarse con nitrógeno para eliminar el aire durante una hora mínimo, la purga empezará inmediatamente después de llenar el recipiente es terminada a un ritmo de 100 cc por minuto por litro de solución. Después de la purga, el ácido sulfhídrico debe burbujear directamente de la solución acuosa para alcanzar y mantener la saturación. El flujo de burbujeo debe ser mínimo de 200 cc por minuto por litro de solución por 20 minutos por litro de solución.

Al finalizar el tiempo de saturación se debe medir el Ph de la solución y anotarse en un formato de monitoreo de pruebas SSC y deberá estar en un rango no mayor de 4.0.

Durante la prueba periódicamente se deberá inyectar el H₂S por una duración de 20 a 30 minutos en un rango de 100 a 200 cc por minuto por litro de solución tres veces por semana.



Figura. 3.4. Probetas expuestas al ácido sulfhídrico después de 15 días.

Al finalizar la prueba se mide el ph final de la solución deberá estar en el rango de no mayor a 4.0.

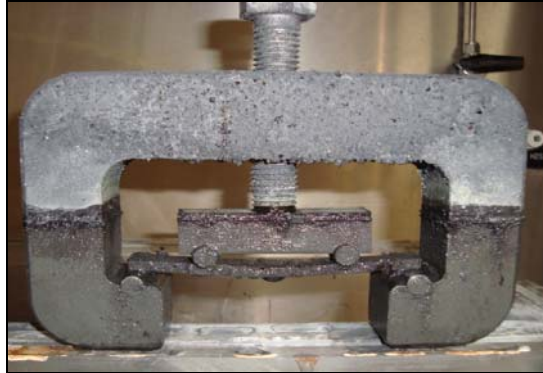


Figura 3.5. Probeta montada en el soporte de SSC al final del ensayo.

3.2.1. Ensayo de HIC [28,65]

3.2.2. Objetivo

Evaluar la resistencia de la materia prima y tubería de acero a la fractura escalonada inducida por absorción de hidrógeno en un medio corrosivo.

Tabla 3.4. Herramientas y Equipo.

Recipiente hermético (adaptado para purgar e introducir el ácido sulfhídrico).
Manguera de Polietileno.
Tanque de nitrógeno.
Tanque de ácido sulfhídrico (H ₂ S).
Medidor de flujo.
Trampas de NA OH.
Varilla de vidrio.
Microscopio metalúrgico
Termómetro.
Medidor de pH.

Tabla 3.5 Reactivos Químicos.

Agua destilada o desionizada	
Soluciones buffer	
Nital al 3%	
MgCl ₂ •6H ₂ O	Cloruro de Magnesio
CaCl ₂ (anhidro)	Cloruro de Calcio
SrCl ₂ •6H ₂ O	Cloruro de Estroncio
NaHCO ₃	Bicarbonato de sodio
KCl	Cloruro de Potasio
KBr	Bromuro de Potasio
H ₂ BO ₂	Acido Bórico
NaF	Fluoruro de Sodio
NaCl	Cloruro de Sodio
NaOH	Hidróxido de Sodio
Na ₂ S ₂ O ₃ •5H ₂ O	Tiosulfato de Sodio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de Sodio
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de Potasio
KI	Yodurato de Potasio
HCl	Acido Clorhídrico
I	Yoduro de Potasio Libre de Yodato
K	Yodo resublimado
I ₂	Yoduro de Potasio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de Sodio Anhidro

3.2.3. Descripción

La prueba consiste en la exposición de los especímenes en una solución de agua de mar sintética saturada, con ácido sulfhídrico (prueba sin esfuerzos mecánicos); la absorción de hidrógeno genera la corrosión del acero, el mecanismo de falla se manifiesta mediante agrietamiento o ampollamiento originado, por la formación de hidrógeno molecular a partir del hidrógeno atómico atrapado en inclusiones no metálicas o discontinuidades internas del material a lo largo de la dirección de rolado del acero; Las fracturas sobre un plano se enlazan con otras fracturas de planos adyacentes para formar fracturas escalonadas a través del espesor, las fracturas pueden reducir el espesor efectivo de la pared hasta que la tubería se sobrecarga y se fractura.

3.2.4. Preparación de reactivos para la solución de HIC

Solución No. 1

Disuelve las cantidades de sales en agua destilada.

Tabla 3.6. Reactivos de la solución No. 1

MgCl ₂ ·6H ₂ O (Cloruro de Magnesio)	555.6 g/LITRO
CaCl ₂ (ANHIDRO) (Cloruro de Calcio)	57.9 g/LITRO
SrCl ₂ ·6H ₂ O (Cloruro de Estroncio)	2.1 g/LITRO

Solución No 2

Disuelve las siguientes cantidades de sales en agua destilada.

Tabla 3.7. Reactivos de la solución No. 2

KCl (Cloruro de Potasio)	69.5 g/LITRO
NaHCO ₃ (Bicarbonato de Sodio)	20.1 g/LITRO
KBr (Bromuro de Potasio)	10.0 g/LITRO
H ₂ BO ₂ (Acido Bórico)	2.7 g/LITRO
NaF (Fluoruro de Sodio)	0.3 g/LITRO

3.2.5. Preparación de la solución acuosa corrosiva para el ensayo de HIC.

Agua de mar sintética

Disuelve lentamente 245.34 g de cloruro de sodio (NaCl) y 40.94 de sulfato de sodio anhidrido (Na₂SO₄) en 8 o 9 litros de agua destilada.

Agrega **200 ml** de solución **No. 1** agitando vigorosamente.

Agrega **100 ml** de solución **No. 2**, diluye a 10 litros con agua destilada.

Ajusta titulando el pH A 8.2 con una solución de HIDROXIDO DE SODIO (NaOH) 0.1 N.

3.2.6. Dimensiones de la probeta de HIC

Cada espécimen debe ser de 100 ± 1 mm de largo por 20 ± 1 mm de ancho y el espesor de la placa.

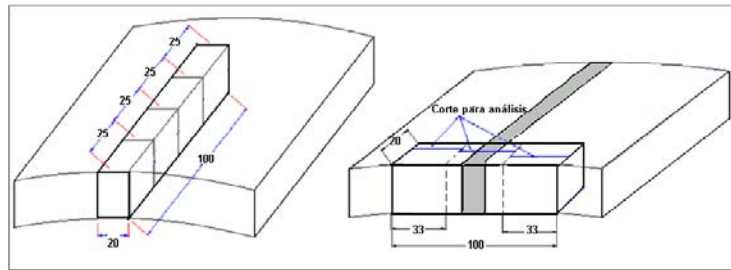


Figura 3.6. Esquema que indica la orientación y ubicación correcta de las probetas de HIC en metal base y soldadura.

El espécimen de tubería debe ser tomado con su eje longitudinal, perpendicular a la soldadura para el espécimen de soldadura, paralelo al eje longitudinal, para los especímenes de metal base.

3.2.7. Exposición de la probeta de HIC en el medio corrosivo

Los especímenes se colocan en el recipiente hermético con las caras anchas verticales, separadas del recipiente y de los otros especímenes por barras de vidrio u otras barras no metálicas con un diámetro mínimo de 6 mm (se pueden exponer tantos especímenes como se acomoden completamente sumergidos y sin tocarse).

El recipiente se llena con el agua de mar sintética, se mide y se registra el pH el cual debe de estar dentro del rango de 8.1 a 8.3 para que la prueba tenga validez.

El recipiente debe ser cerrado y debe de quedar perfectamente sellado antes de purgar con N_2 y saturar con el ácido sulfhídrico ($H_2 S$).

3.2.8. Purgado y saturación de la solución utilizada para el ensayo de HIC

El purgado con gas nitrógeno y gas del ácido sulfhídrico debe introducirse cerca del fondo del recipiente de prueba.

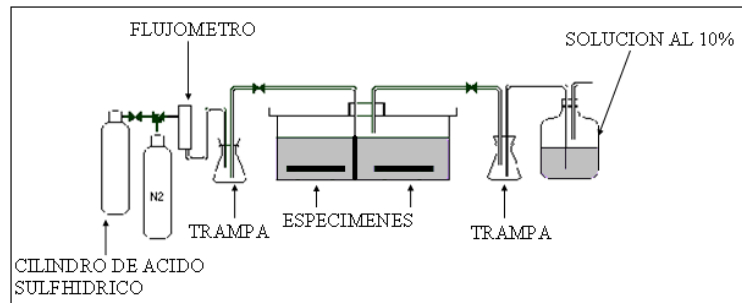


Figura 3.7 Diagrama esquemático de purgado y saturación para el ensayo de HIC.

3.2.9. Condiciones para el ensayo de HIC.

Tabla 3.8. Parámetros para el ensayo de HIC.

Temperatura °C	Ph inicial de la solución salina	Ph después de la saturación	Ph Final	Tiempo de Exposición
25 ± 3°C	8.1 a 8.3	4.8 a 5.4	4.8 a 5.4	96 hrs.

El recipiente sellado debe purgarse de aire con nitrógeno durante una hora mínimo. La purga empezara inmediatamente después de llenar el recipiente y es terminada a un ritmo de por lo menos 100cc por minuto por litro de solución.

Después de la purga, el ácido sulfhídrico debe burbujear directamente en el agua de mar sintética para alcanzar y mantener la saturación. El flujo de burbujeo debe ser mínimo 200cc por minuto por litro de solución, para los primeros 60 minutos.

3.2.10. Evaluación del ensayo de HIC

Cada sección debe pulirse y atacarse si es necesario de tal manera que se puedan distinguir las grietas con respecto a defectos tales como pequeñas inclusiones, laminaciones, rayas ú otras discontinuidades. Solamente se debe utilizar un ataque ligero, ya que un ataque fuerte podrían obscurecer las grietas pequeñas, si esto sucede se debe volver a pulir la superficie a acabado espejo.

Se revisan los especímenes superficialmente para detectar posibles ampollamientos, en caso de que se presenten se registran y si se requiere se toma una fotografía por la cara de mayor ampollamiento.

El tamaño de las grietas se mide de acuerdo a la figura siguiente

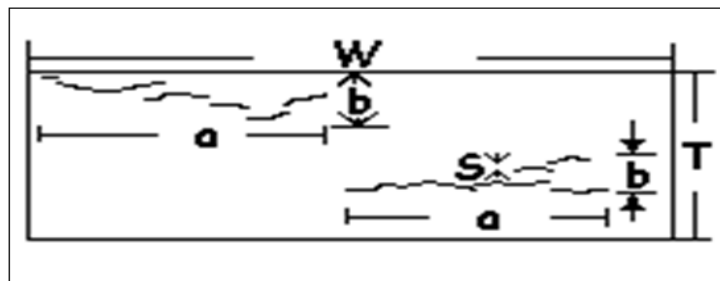


Figura 3.8. Esquema para la evaluación de la probeta de HIC después del ensayo.

- a = Longitud de la grieta (mm)
- b = Espesor de la grieta (sí es una grieta individual $b=0$)
- T = Espesor del espécimen(mm)
- W = Ancho del espécimen (mm)
- S = Distancia entre grietas:

3.2.11. Medición de grietas escalonadas.

En la medición de la longitud y espesor de las grietas, las grietas que están separadas por menos de 0.5 mm deben ser consideradas como una sola grieta de acuerdo a TM0284.

Especificación TM0284

SI $S \geq 0.5$ mm se considera una grieta individual

SI $S < 0.5$ mm grieta escalonada o agrupada

3.3.1 Ensayo de Esfuerzos Residuales por el método de la galga extensométrica y perforación de agujero.

3.3.2 Objetivo

Realizar la medición de esfuerzos residuales generados por el proceso de fabricación y/o el proceso del ciclo térmico de la soldadura.

3.3.3 Descripción

El ensayo consiste en la adición de una galga extensométrica en el material que mide las microdeformaciones por medios electrónicos las cuales se traducen en esfuerzos internos que presenta el material, por los procesos de fabricación por los que fue sometido y/o los procesos de soldadura.

3.4.1. Barrido potenciodinámico [56]

Las pruebas de barrido potenciodimámico se realizaron como parte del procedimiento experimental de la tesis de licenciatura de David Alberto Landeros.

3.4.2. Objetivo

Realizaron el bardo potenciodimámico para describir el comportamiento de las curvas de polarización y las pruebas de impedancia a las distintas zonas de las uniones soldadas por proceso MMA y SMAW

3.4.3. Descripción

Se montó una celda electroquímica simple usando un electrodo de platino como electrodo auxiliar; un electro calomel (Hg/HgCl_2) como electrodo de referencia, conectado a la celda por medio de un puente salino, y el espécimen como electrodo de trabajo, en una solución de 9.62 % NaCl, 0.305% CaCl, 0.18% MgCl y 89.89 % H_2O .

Para asegurar un ambiente amargo se generó, una solución de H_2S por medio de la adición de 3.53 g de sulfuro de sodio y 1.7 g de ácido acético, además, se adicionó sulfito de sodio (0.004g) para eliminar cualquier residuo de oxígeno después de la purga.

Ensayos mecánicos [70]

3.5.1. Preparación metalográfica [67]

3.5.2. Objetivo

Establecer la técnica para preparar superficies metálicas para evaluación metalográfica.

Tabla 3.9. Herramientas y equipo para preparación metalográfica

Cortadora de sierra cinta
Esmeril
Pulidora de velocidad variable
Lijas de las siguientes granulometrías 240,320, 400, 600 y 1200
Paño de nylon
Paño de algodón
Pasta de diamante de 1micrometro
Pasta de diamante de 6 micrómetros
Alúmina de 0.5 micrómetros
Alúmina de 1 micrómetro
Agua
Lubricante para pasta de diamante
Equipo de seguridad

3.5.3. Descripción

Una vez recibida la muestra o el espécimen se procede a identificar. Con la sierra cinta se procede a eliminar las zonas afectadas por el corte del soplete. Se esmerilan los bordes de la muestra para un mejor manejo durante la preparación. Desbaste fino de la superficie a analizar; en esta etapa utilizamos papeles lija de diferente granulometría y agua como medio lubricante, en la pulidora de velocidad variable, empezamos con una lija de 240 aplicando un poco de agua y colocando la cara de la probeta a analizar contra la lija para efectuar el pulido, una vez eliminadas las marcas dejadas por el equipo de corte; se procede a cambiar de lija.

Utilizando una lija de 320 en este caso repetimos la operación anterior, esta vez giraremos la probeta a 90° para poder eliminar las marcas dejadas por la lija anterior. Utilizando una lija de 400 en este caso repetimos la operación anterior, esta vez giraremos la probeta a 90° para poder eliminar las marcas dejadas por la lija anterior Utilizando una lija de 600 en este caso repetimos la operación anterior, esta vez giraremos la probeta a 90° para poder eliminar las marcas dejadas por la lija anterior. Utilizando una lija de 1200 en este caso repetimos la operación anterior, esta vez giraremos la probeta a 90° para poder eliminar las marcas dejadas por la lija anterior. Pulido: se elimina con agua la rebaba que queda en la muestra, se seca perfectamente la probeta y se procede a preparar el paño de algodón con alúmina de 0.5 micrómetros y de 1 micrómetro respectivamente con agua. El pulido con pasta de diamante de 1 y 6 micras solo se utiliza en preparaciones especiales.

Una vez pulida la superficie a examinar con un acabado espejo se lava la probeta con agua y jabón suave eliminando los residuos del pulido, se deberá mojar la superficie con alcohol y secarse rápidamente para evitar la oxidación y preservarla para su posterior evaluación.

La preparación metalográfica se podrá considerar aceptable cuando la muestra este en condición de acabado espejo libre de óxido, rayas colas de cometa o cualquier condición que impida su evaluación.

3.6.1. Evaluación Metalográfica [68]

3.6.2. Objetivo

Determinar el tamaño de grano y evaluar la microestructura del acero

Tabla 3.10. Herramientas y Equipo

Microscopio metalográfico y accesorios
Muestras preparadas metalográficamente
Tablas de comparación PLATE I A & I B Untwinned Grains

3.6.3. Descripción

Evaluación, se corta una muestra transversal al flujo del material y se preparan las muestras para que tengan una superficie con acabado espejo, que estén libres de cualquier imperfección (rayas u óxidos) se podrán evaluar en el microscopio metalográfico. Con la solución Nital al 3% (se pueden usar otros reactivos) se ataca la superficie previamente preparada por un tiempo de 1 a 3 segundos. Inmediatamente se neutraliza el ataque de la superficie preparada poniendo la probeta bajo chorro de agua. Enseguida se baña con alcohol la superficie atacada. Se seca con aire forzado para evitar la oxidación de la misma. Se observa en el microscopio la superficie atacada con una ampliación igual o mayor a 50X, analizando toda la superficie con un aumento de 100X. Utilizando las tablas de comparación PLATE I A& I B Untwinned Grains (flat etch) 100X de ASTM se realiza la determinación del tamaño de grano. Si se desea se puede utilizar las retículas con tamaño de grano que posee el microscopio y se realiza la comparación directamente sobre la superficie preparada, haciendo esta en varias zonas de la misma superficie.

3.7.1. Determinación de inclusiones no metálicas [69]

3.7.2. Objetivo

Determinar el nivel de inclusiones no metálicas del acero

Tabla3.11. Equipo para determinación de inclusiones no metálicas.

Microscopio metalográfico y accesorios
Muestras preparadas metalográficamente

3.7.3. Descripción

Las muestras a analizar deben tener una superficie con acabado espejo preparado metalográficamente y se podrá evaluar en el microscopio metalográfico.

Se realiza la cuenta, clasificación y medición de inclusiones de acuerdo al método "A" "Worst Fields" comparando los campos mas sucios con el PLATE "I-r" de ASTM E-45. (Anexo 1)

Durante la observación de los campos se registra lo que es potencialmente el campo mas sucio y se registra el nivel de los diferentes tipos de inclusiones no metálicas utilizando, para esta clasificación el Anexo 2 de nivel de severidad de la inclusiones no metálicas por campo en función de su longitud total mínima para las inclusiones A, B y C y en función del número de inclusiones para el tipo D.

Con el anexo 2 (Clasificación de delgada o gruesa de las inclusiones no metálicas) se clasifica el tipo de inclusión (A, B, C o D) en delgada (T) o en gruesa (H) en función de su ancho para inclusiones A, B, C y en función de su diámetro para las del tipo D. (Anexo 3)

Las inclusiones de sobretamaño contribuyen a determinar el nivel de inclusiones, si una inclusión tipo A, B o C tiene sobretamaño en longitud o espesor la porción que esta entre los límites del campo será incluida en la medición del nivel de severidad apropiado ya sea delgada o gruesa.

De igual manera una inclusión tipo D con sobretamaño encontrada en un campo, es también incluida en el conteo que determina la clasificación gruesa de las inclusiones tipo D.

Un campo que contiene menos inclusiones o la longitud total de las inclusiones es menor que el nivel de severidad $\frac{1}{2}$ es registrado con un cero. (0)

3.8.1 Ensayo de tensión [59,72]

Los ensayos de tensión se realizaron como parte del procedimiento experimental de la tesis doctoral del M.C. Isidro Guzmán Flores.

3.8.2. Objetivo

Determinar las propiedades mecánicas del material en estudio por medio del ensayo de tracción.

3.8.3. Descripción

Tomar y registrar las medidas del ancho y espesor ó diámetro en la garganta de la probeta a ensayar. Con el “gauge” de puntos marca la longitud calibrada sobre la garganta, esto únicamente en las muestras de metal base. La probeta se introduce entre las mordazas de los cabezales y se sujeta primero con las mordazas superiores.

Para evaluación de Metal Base se evalúa con Carga vs. Porcentaje de Elongación. Para la evaluación de Soldadura se evalúa con Carga vs. Tiempo.

Posteriormente se deja correr la prueba hasta la ruptura de la probeta. Se procede a medir el Porcentaje de Elongación, el cual es registrado en los datos de la prueba para reflejar los valores finales.

3.9.1. Dureza Vickers [61,62,63]

Los ensayos de Dureza Vickers se realizaron como parte del procedimiento experimental de la tesis doctoral del M.C. Isidro Guzmán Flores.

3.9.2. Objetivo

Determinación de dureza Vickers en materiales metálicos

3.9.3. Descripción

La medición de microdureza en materiales metálicos donde la aplicación de carga puede ser de 1, 3, 5, 10, 20 y 30 kgf. Las muestras a evaluar deberán presentar dimensiones adecuadas. Las muestras deben tener las superficies planas y paralelas, deben ser rectificadas por ambas caras para poder efectuar el análisis de dureza.

Se selecciona la carga adecuada para la dureza de la muestra, que va de 1 a 30 kgf. El tiempo de aplicación de la carga de prueba será de 10 a 15 segundos.

El espacio entre indentaciones; la distancia entre la indentación a cualquier extremo de la muestra y otra indentación no debe ser menor que 2.5 veces la longitud de su diagonal. La figura muestra un mapeo de la localización de cada una de las indentaciones.

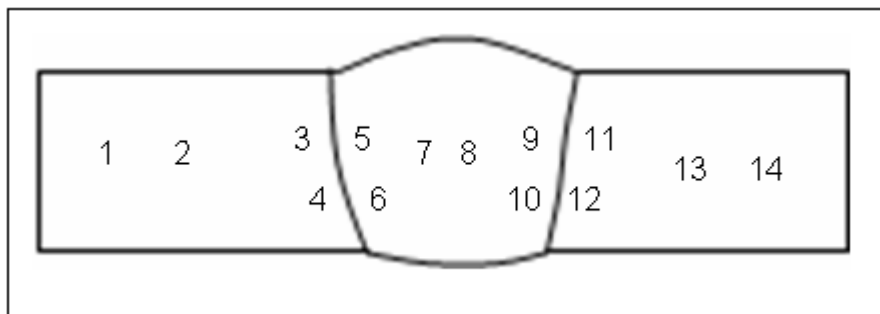


Figura 3.9. Esquema de las indentaciones realizadas en los ensayos de dureza vickers.

Notas:

El equipo es verificado periódicamente, (por lo menos una vez cada tres meses o antes si es requerido) y los resultados obtenidos son registrados en el formato.

Indentador, diamante piramidal de base cuadrada, altamente pulido, con ángulo en las caras de $136^{\circ} 0'' (\pm 30')$ las cuatro caras del indentador deberán ser igualmente inclinadas al eje del indentador (con $\pm 30'$) y unirse al centro del indentador.

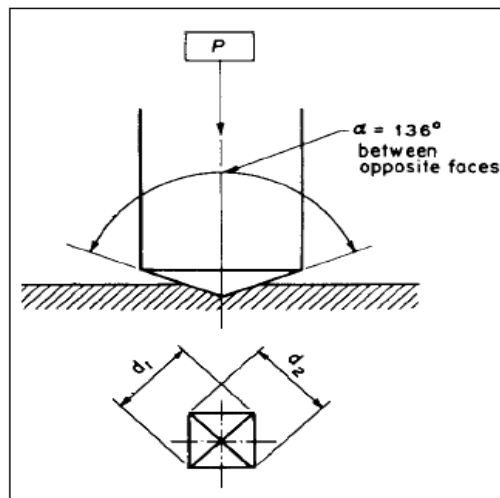


Figura 3.10. Tipo de indentador y la forma geométrica de la indentación con la cual se determina el valor de dureza Vickers.

El valor de dureza Vickers (HV), es el número obtenido por la división de la carga aplicada en grs.-fuerza por el área de la indentación en micras cuadradas obtenida de la medición de la diagonal de la indentación, el valor de dureza vickers es obtenido de la siguiente ecuación:

$$HV = P / A_s = 2 P \text{sen}(\alpha/2) / d^2 = 1.8544 P / d^2.$$

Ec. [3]

P = Carga (grF)

d = Diagonal de indentación (μm)

As= Area de la indentación (μm^2)

α = Angulo de la cara del indentador (136°).

3.10.1. Resistencia al Impacto (Charpy) [60,74]

Los ensayos de Impacto se realizaron como parte del procedimiento experimental de la tesis doctoral del M.C. Isidro Guzmán Flores.

3.10.2. Objetivo

Determinar las propiedades mecánicas de tenacidad concluyendo acerca del área dúctil y frágil.

3.10.3. Descripción

Las probetas son colocadas en el baño enfriador para probetas ordenadamente con el medio enfriante adecuado para la temperatura de prueba requerida. Se llena la cámara del baño enfriador cuidando que las probetas queden al menos a 25 mm (1 pulgada) del fondo del recipiente y el líquido las cubra por lo menos 25 mm (1 pulgada).

Una vez que se llega a la temperatura especificada, el baño debe mantenerse por 10 minutos a esta temperatura con una variación máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$.

El péndulo de la máquina se coloca en posición para ser liberado, (se eleva el brazo del péndulo 135°), y se coloca la aguja en la lectura máxima de la escala (máxima energía).

Una vez transcurridos los 10 minutos de permanencia del baño a la temperatura especificada, se toma la primera probeta con las pinzas y se coloca en los puntos de apoyo para prueba, se libera el péndulo a que rompa la muestra con el martillo, las probetas deberán estar rotas en cinco segundos máximo después de haberlas removido del medio enfriante.

Se registra la lectura indicada en la carátula que después de romper cada probeta que corresponde a la energía absorbida.

3.11. Equipo utilizado para experimentación y caracterización de materiales

Microscopio Óptico

Nikon EPIPOT 300

Microscopio confocal de barrido por luz blanca

Carl Zeiss CSM 700

Estereoscopio.

Nikon SMZ 745T

Microscopio electrónico de barrido

JEOL – SEM Control User Interface Versión 8.14, Modelo J5M6490LV

Durómetro para Micro durezas Vickers

Future-Tech FV 7032.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados obtenidos de los ensayos mecanicos y la caracterización de la microestructura de los procesos MMA y SMAW.

Los siguientes resultados fueron obtenidos de la experimentación realizada como parte de la tesis de licenciatura de David Alberto Landeros y la tesis doctoral del MC Isidro Guzmán Flores.

4.2. Caracterización microestructural proceso SMAW

Cada una de las zonas evaluadas en la soldadura se les dio la siguiente nomenclatura, Metal base (MB), Soldadura (SOL) y zona afectada por el calor (ZAC). Se tomaron fotomicrografías de un macroataque con soldadura obtenida por el proceso SMAW.

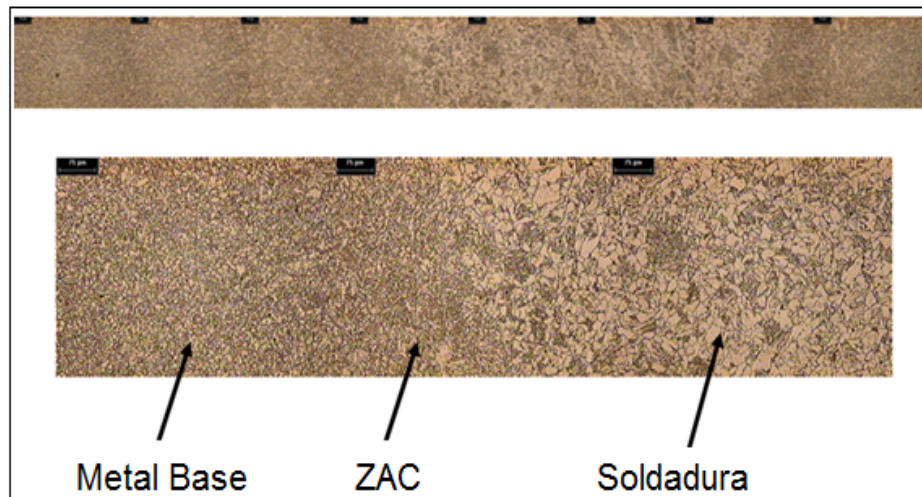


Figura 4.1. Micrografías del proceso SMAW.

Las micrografías anteriores son un mapeo de las tres principales áreas presentes en el acero estudiado API 5L X70, primero, se puede observar de izquierda a derecha en la figura 4.1 el metal base, el cual muestra una microestructura básicamente de granos equiaxiales de ferrita y perlita, los granos más claros son la fase ferrítica y los más oscuros son la fase perlítica, éste metal base se encuentra sin transformación, ya que es el acero base.

Las microestructuras tienen como resultado mejores propiedades mecánicas debido a que hay una mayor homogeneidad, dando granos equiaxiales definidos, esto se presenta debido a que se dio un enfriamiento lento a temperatura ambiente constante.

En metales soldados, los aceros de partículas estables dispersas y algunos aceros microaleados, la ferrita nuclea no solo en los bordes de grano, sino también en partículas dentro de granos austeníticos ^[29]. A continuación en la figura 4.2 se observa un cambio de morfologías, esto es en la zona afectada por el calor donde se puede ver un cambio en la fase ferrítica, ya que transformó a ferrita acicular, con una cantidad significativa de perlita, la cual es precipitación de la interfase de cementita y del lado derecho de la figura 4.2 en el área de la soldadura se observa un crecimiento de grano de la fase ferrita, obteniendo granos equiaxiales ferríticos, además de ferrita intragranular y trazas de perlita, en esta zona hubo solo cambios microestructurales de la ferrita, ya que ésta no transformó a otra fase posterior.

La ferrita acicular se conoce como morfología intragranular nucleada de ferrita en la cual existen obstáculos entre granos, la ferrita nuclea en inclusiones dentro de bordes de grano austeníticos. Se presenta bajo condiciones de enfriamiento continuo, esto lleva a que pueda presentarse una variedad de formas dependiendo de la composición del acero, rango de enfriamiento y características de las inclusiones como se muestra en la figura 4.2.

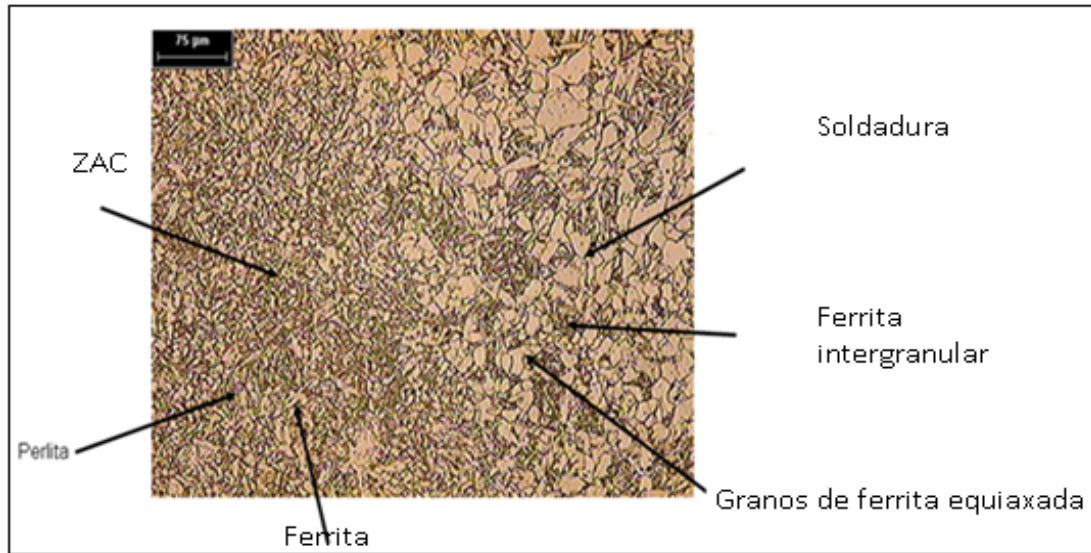


Figura 4.2. Microestructura de la ZAC e interfase con la soldadura proceso SMAW.

4.3. Caracterización microestructura proceso MMA

La figura 4.3 muestra un mapeo del área del metal base, área de la ZAC y la soldadura del macroataque con soldadura bajo el agua. Las probetas unidas bajo el agua, obtuvieron una alta porosidad a simple vista en el cordón de la soldadura, debido a las condiciones que existen bajo el agua, principalmente el agua salina, la corriente marina y el tipo de electrodo utilizado para soldar, por lo tanto la manipulación del electrodo durante la soldadura, no fueron del todo uniformes, y no hubo buena soldabilidad, es por ello que el mapeo no se distingue uniformemente y se ven distintas tonalidades en las diferentes áreas que se señalan en las fotomicrografías.

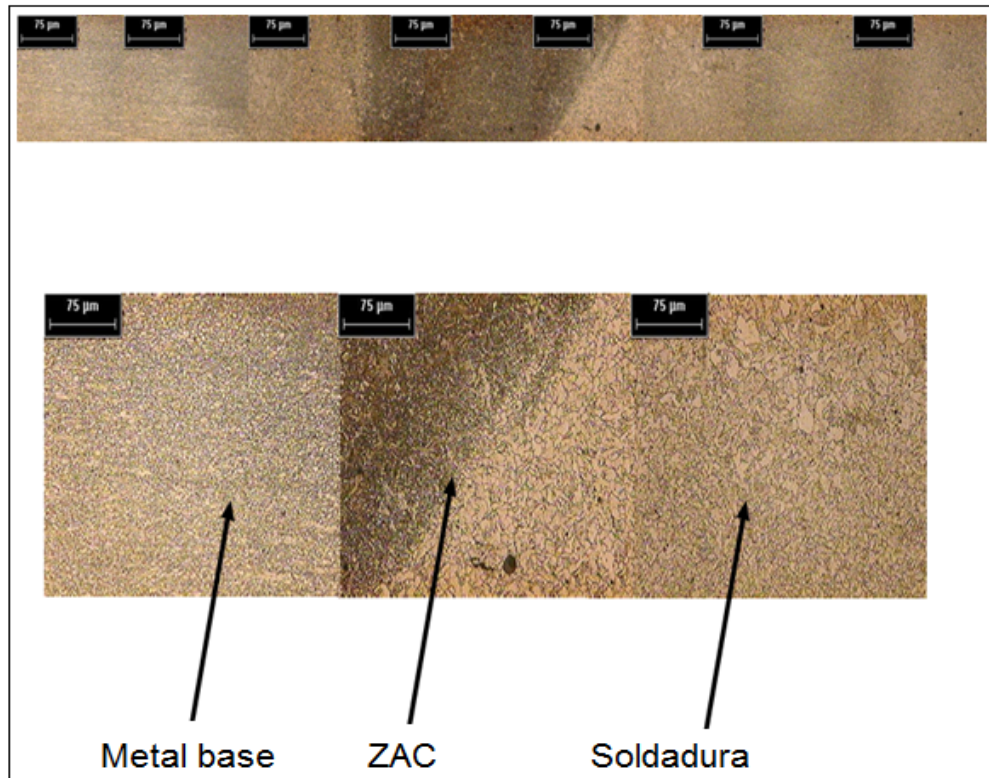


Figura 4.3. Microestructuras del proceso MMA.

De igual manera que en la microestructura del mapeo de la figura 4.4, la microestructura del metal base es de fase perlítica y de granos equiaxiales de ferrita, el área de la ZAC muestra las fases ferrítica y perlítica y la presencia de placas de ferrita widmanstatten en la soldadura que surgen a partir del límite de grano, La microestructura resulta más frágil ya que el enfriamiento fue más rápido, también se pueden observar la figura 4.4 donde se ilustra la transformación que se obtuvo de la fase ferrítica, donde se observan placas laterales que crecen a partir de los bordes de grano auténticos, los cuales se señalan también con una flecha dicha transformación es conocida como Ferrita widmanstatten.

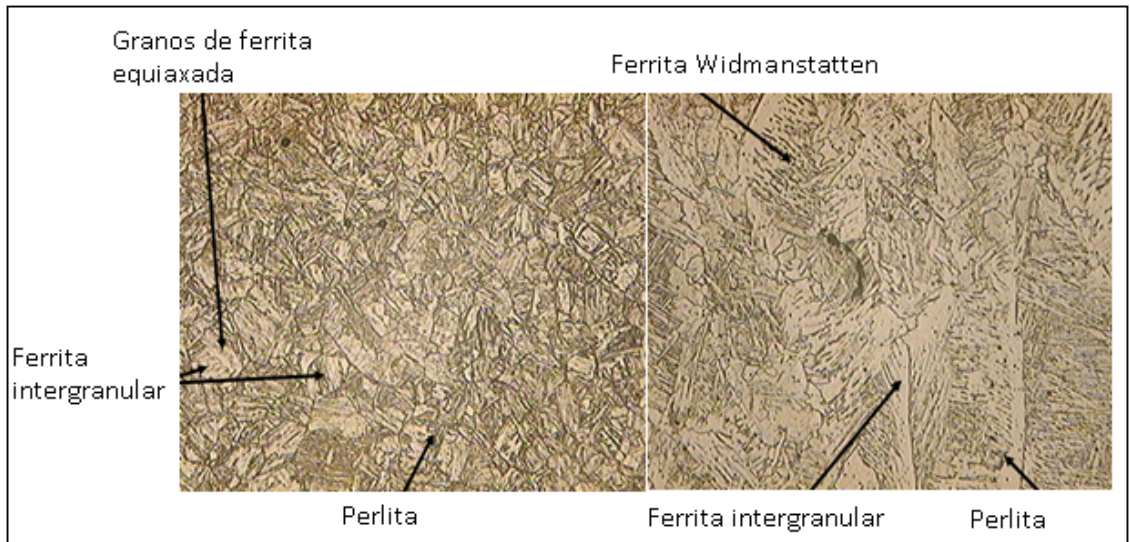


Figura 4.4 Microestructura de la ZAC y metal base.

4.4. Evaluación de durezas para los procesos MMA y SMAW

La figura 4.5 muestra las oscilaciones de las microdurezas obtenidas en cada una de las diferentes áreas indentadas por el microdurómetro, en la gráfica de la figura 4.5, se puede observar que la dureza entre cada una de las áreas indentadas no varía en gran medida, en donde hay una caída significativa de las microdurezas de las áreas de la ZAC y soldadura.

Éstas diferencias se deben a que el acero soldado, se encuentra en un medio acuoso con algunos factores que intervienen, como la corriente marina, la temperatura y el enfriamiento rápido por el agua, y no se obtiene una buena resistencia en la unión, pero si se obtienen microdurezas mayores que las placas unidas en seco, esto es debido al mecanismo de temple que se lleva a cabo bajo el agua, mientras el metal de aporte va solidificando.

La figura 4.5 muestra la distribución de durezas en diferentes zonas de la soldadura metal base y zona afectada por el calor, existe una alta dureza en la zona afectada por el calor, que está asociada con la presencia de endurecimiento fase ferrítica. En particular en la zona de la soldadura se aprecia una disminución considerable de la dureza, debido a la mejora de la dureza por la presencia de ferrita acicular, mientras que en el área de soldadura se aprecia una menor dureza para ambos procesos debido al crecimiento del grano austenítico que contiene a su vez ferrita Widmanstätten y otros tipos de ferrita. [76]

Zhang et al [77] estableció que este aumento de durezas en la ZAC es debido a los esfuerzos residuales que se generan durante la aplicación de la soldadura generando posteriormente una mayor degradación anódica durante las pruebas de corrosión.

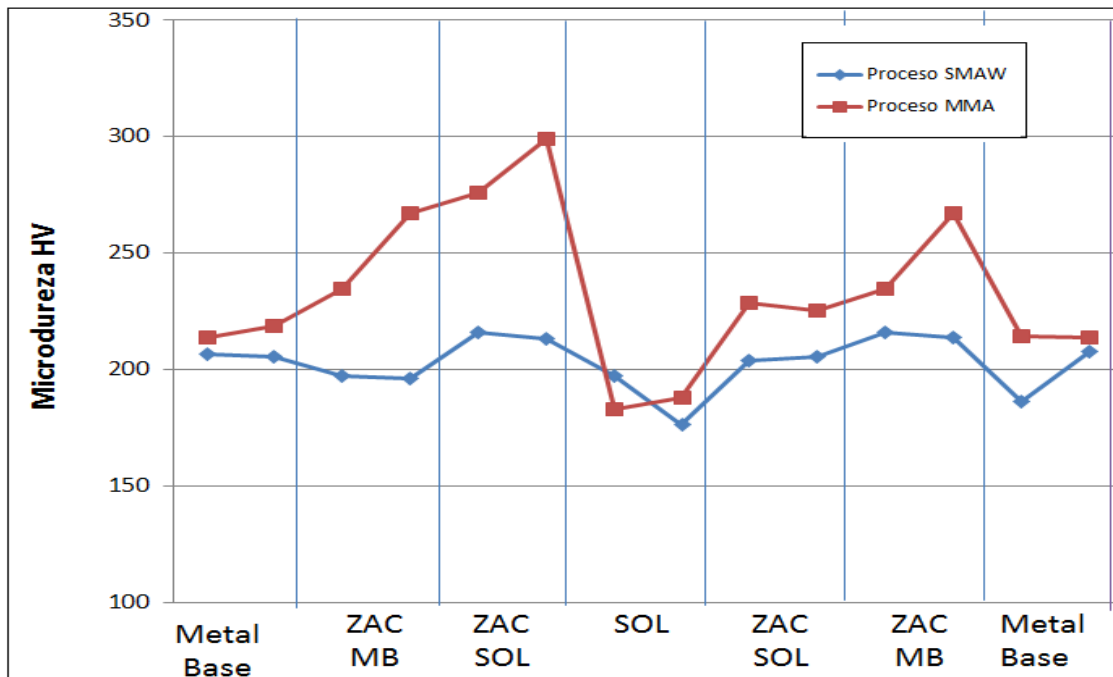


Figura 4.5. Grafica de durezas de los procesos MMA y SMAW.

4.5. Análisis de pruebas potenciodinámicas e impedancia electroquímica

Como se puede apreciar en la tabla 4.3, los valores más bajos de E_{corr} se obtuvieron en el espécimen de la zona ZAC del proceso de soldadura MMA y la ZAC del proceso SMAW, las zonas de la unión soldada tienen prácticamente el mismo valor de E_{corr} e i_{cor} , la zona del MB posee casi el mismo E_{cor} que la ZAC del proceso SMAW pero difieren en I_{cor} . A partir del análisis de la tabla 4.3, se puede observar que la muestra que se corroyó más fue la ZAC del proceso MMA.

Tabla 4.1. Datos de Potencial, Corriente y Velocidad de Corrosión.

	<u>E_{cor}(V)</u>	<u>i_{cor}(Amp/cm²)</u>	<u>mmPY</u>
ZAC MMA	-1.1094	7.04E-03	82.131
ZAC SMAW	-1.0458	0.0005734	6.6939
MB	-1.097	5.70E-05	0.66556
SOL MMA	-0.9228	1.35E-05	0.15723
SOL SMAW	-0.92109	1.05E-05	0.12287

Las siguientes graficas de la figura 4.6 muestran las curvas potenciodinámicas para las diferentes zonas de la soldadura ZAC, MB, SOL y los diferentes procesos MMA y SMAW. El comportamiento que se observa es totalmente pasivo, para ambos procesos MMA y SMAW, como lo determino ZHANG [78], en su experimentación la zona que más se corroe para ambos procesos SMAW y MMA es la zona afectada por el calor ZAC, la cual muestra una mayor disolución anódica.

Durante la aplicación de la soldadura las transformaciones de fases ocurren de la soldadura a la zona afectada por el calor, estas transformaciones de microestructuras puede alterar significativamente el comportamiento intrínseco a la corrosión del acero.

Se ha reconocido[79,80], que la corrosión es apreciablemente más grave cuando la composición del material es tal que las estructuras endurecidas se forman, es decir, microestructuras endurecidas sufren una corrosión crecientes. Además, debido a la alta velocidad de enfriamiento durante la soldadura, el metal de soldadura y ZAC contendría una alta densidad de defectos en la red, que también dan lugar a una alta actividad en la soldadura de metal y la ZAC.

Por otra parte, el gradiente de alta temperatura generado durante el proceso de soldadura aumentaría los esfuerzos en el acero. La alta concentración local de esfuerzos podría activar dislocaciones, resultando en la formación de bandas de deslizamiento permanentes en el acero y la mejora de la actividad de acero alrededor de la soldadura. El presente trabajo confirma que ZAC tiene una mayor actividad y corriente de disolución del metal de soldadura.

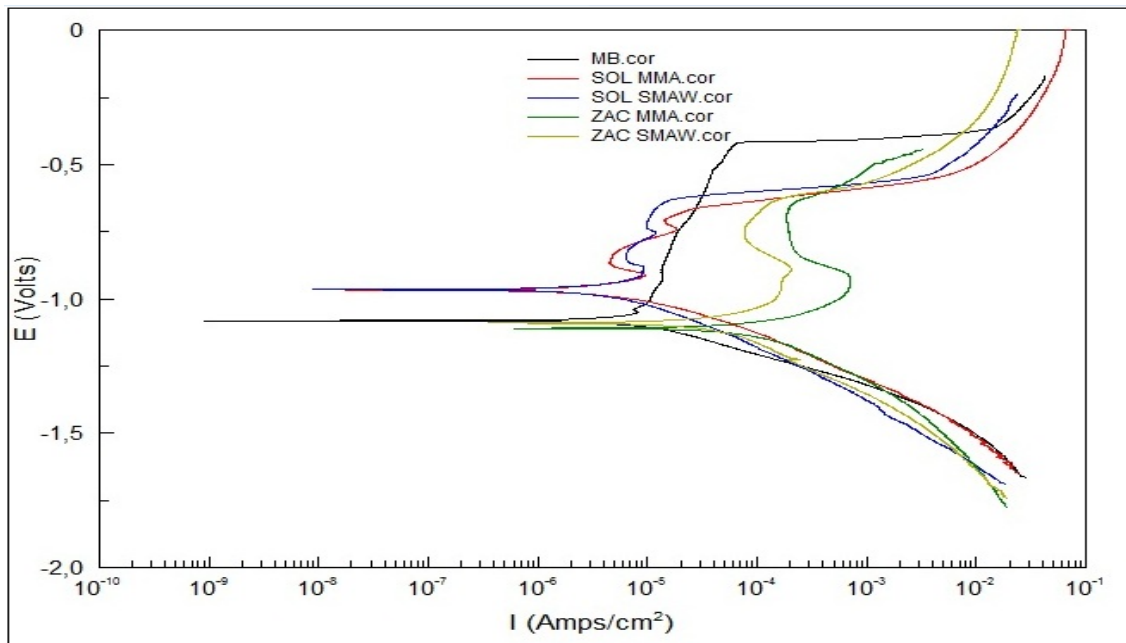


Figura 4.6. Curvas potenciodinámicas de las diferentes zonas ZAC, MB, SOL, de los procesos MMA y SMAW

En las curvas potenciodinámicas (fig.4.6) de las uniones soldadas, se pudo encontrar evidencia de la formación de una capa pasiva que conforme aumentaba el voltaje se destruía aumentando la densidad de corriente, pero volviéndose a formar más de una vez.

A este fenómeno se le denomina pitting [81], de igual manera y utilizando el mismo criterio se pudo encontrar evidencia de pitting en el espécimen del metal base. Se ha de destacar también que el potencial del metal base es menor al potencial de la zona de la soldadura. Mientras tanto, en las curvas de la ZAC, se pudo apreciar que se presentó el mismo fenómeno de pitting, pero mientras en las curvas de las uniones soldadas se formó dos veces la capa pasiva, en las curvas de la ZAC solo ocurrió una vez (fig. 4.3).

Los resultados de las pruebas de impedancia que se muestran en la tabla 4.4 nos dieron a conocer que los especímenes que obtuvieron los menores valores de R_p son las ZAC y por ende son las zonas de menor resistencia a la corrosión [35] obteniendo valores similares a los obtenidos en esta investigación, y que los especímenes con mayor R_p , son las zonas de la soldadura en los dos procesos, estas dos especímenes son los especímenes con mayor resistencia a la corrosión como lo demostró G. Thewlis.[81]

Tabla 4.2. Valores de resistencia obtenidos para las diferentes zonas ZAC, MB, Sol.

R_p resistencia a la polarización (Ω)		[Rs] Resistencia de la solución (Ω)	[C] Capacitancia (F)
MB	1131	2.341	0.002
SOL MMA	6373	9.194	0.002
SOL SMAW	3061	4.141	0.002
ZAC MMA	181	2.07	0.014
ZAC SMAW	62.41	0.73876	0.015

Los diagramas de Nyquist muestran también como el material formo una capa pasiva.

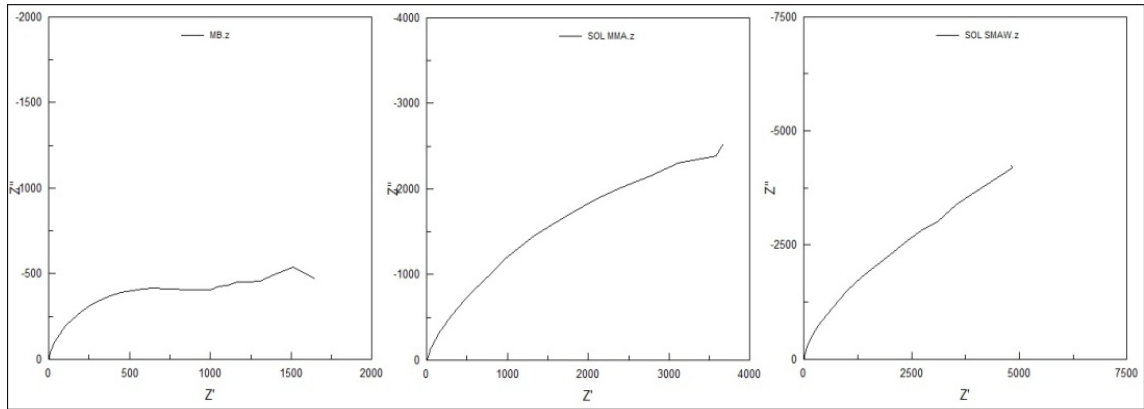


Figura 4.6. Diagrama de Nyquist. MB, Soldadura MMA y SMAW.

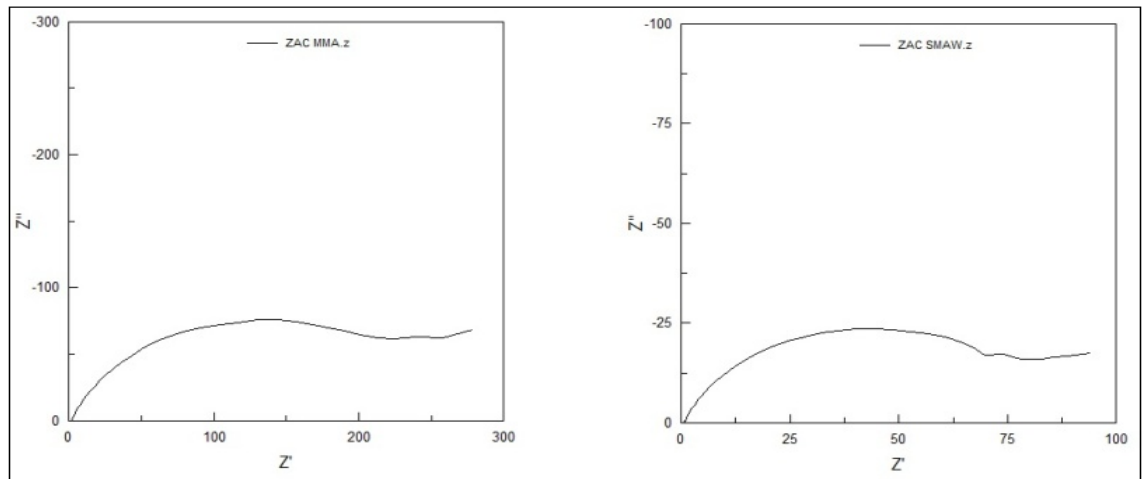


Figura 4.7. Diagrama de Nyquist. ZAC de Soldadura MMA y SMAW.

Pero es en los diagramas de Bode de la figura en la frecuencia más alta se pueden apreciar mejor.

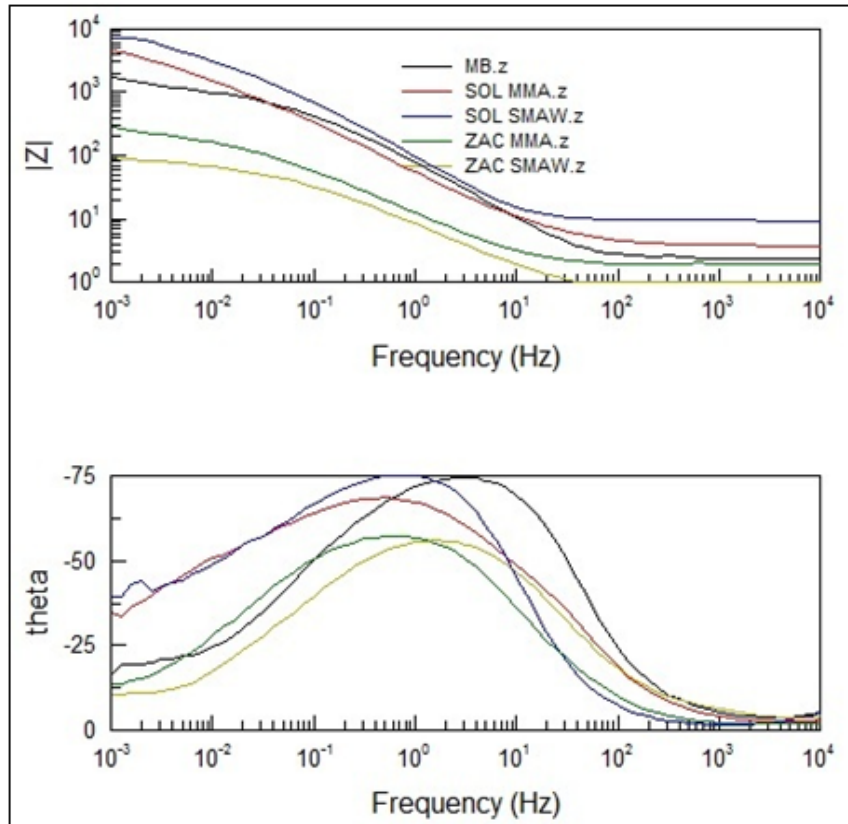


Figura 4.8. Diagrama de Bode para las diferentes zonas en los procesos MMA y SMAW.

Al comparar el porcentaje de fases de cada Zona con su E_{corr} , queda muy en claro que el E_{corr} guarda una relación con la cantidad de fase Perlítica ($\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C}$). Esto es debido a la producción de un par galvánico entre la fase perlítica y la fase ferrítica, pues cada una de ellas tiene diferente potencial, lo que provoca que al estar en contacto con un electrolito se cree un par galvánico entre las misma. En la tesis de Morales. P [82] se menciona como la perlita puede tener un efecto dominante en la velocidad de corrosión en muestras sometidas a envejecido artificial de aceros API 5L.

El par galvánico genera que la ferrita se ionice (Fe^{+2}) y transfiera sus electrones hacia la zona perlítica del material, generando un mayor diferencial de electrones conducidos y una mayor densidad de corriente en la celda, es por eso que los especímenes con mayor cantidad de fase perlítica son los que presentan un menor potencial de corrosión. No obstante se puede apreciar

como el espécimen de MB y de la ZAC del proceso SMAW comparte casi el mismo E_{corr} , pero difieren en la densidad de corriente.

Tabla 4.3. Potenciales de corrosión y porcentaje de la fase presente.

<u>$E_{corr}(V)$</u>		% Perlita	%Ferrita
ZAC SMAW	-1.0458	40%PERLITA	60 % FERRITA
ZAC MMA	-1.1094	51 %PERLITA	48.49 % FERRITA
SOL MMA	-0.9228	29% PERLITA	71% FERRITA
SOL SMAW	-0.92109	30.88 % PERLITA	69.12% FERRITA

Las zonas con mayor cantidad de perlita poseyeron tanto en las pruebas de impedancia, como en las pruebas potenciostáticas, los mejores resultados en cuanto a resistencia a la corrosión. Esto se debe a que en estas zonas existía una mayor cantidad de ferrita como se observó en las metalografías. La ferrita al poseer los iones Fe^{+2} en su superficie, formando sulfuros en la superficie, impidiendo el paso de corriente por la muestra.

Esto se ve claramente en que la zona con mayores valores de R_p , y menores valores de I_{corr} y por consiguiente mayor resistencia a la corrosión fueron las zonas soldadas, poseyendo casi la misma proporción de ferrita y perlita, y casi los mismos resultados de E_{corr} , i_{corr} , y pérdida de mmpy. Las zonas de las soldaduras, que poseían mayor cantidad de ferrita, formaron una capa pasiva que se destruía y se volvía a formar.

4.6. Análisis Macroscópico

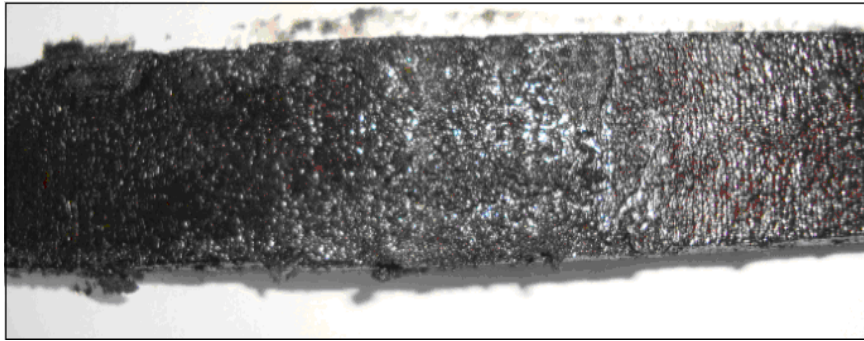


Figura 4.9. Formación de la capa pasiva en probeta MMA.

Después de 720 hrs de ensayo con una deformación del 75% la probeta MMA exhibe la formación de sulfuro de hierro en la superficie de la probeta sometida a ensayo de SSC.

4.7. Resultados obtenidos con el estereoscopio

La probeta fue expuesta al H₂S durante 720 bajo un esfuerzo de tensión. En la imagen se pueden identificar que la zona más susceptible a la corrosión fue la línea de fusión localizada entre la soldadura y la ZAC. Se puede apreciar que la cantidad de óxido formada en la superficie de la probeta ensayada (fase de mackinawita) es uniforme, a diferencia de la línea de fusión que presenta más concentración de esta capa de óxido formado.

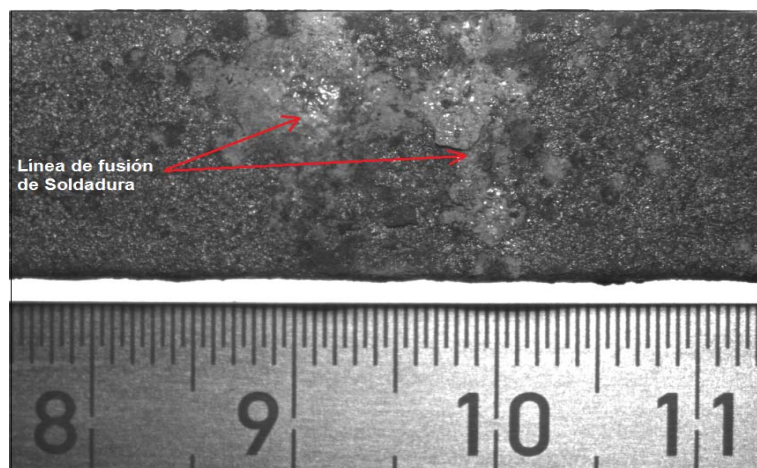


Figura 4.10. Superficie de la probeta con soldadura SMAW a tensión.

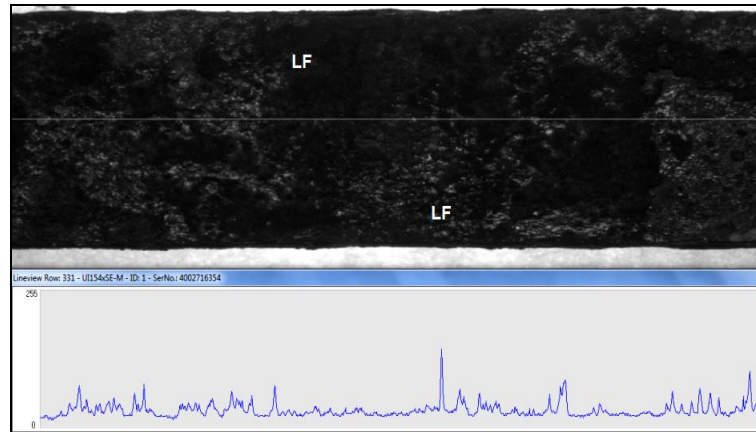


Figura 4.11. Superficie de la probeta con soldadura SMAW a compresión.

La probeta expuesta al H₂S durante 720 hrs bajo un esfuerzo de compresión, exhibe una superficie opaca, como lo muestra su espectro de intensidad de luz, con el que se determina su característica cromática.

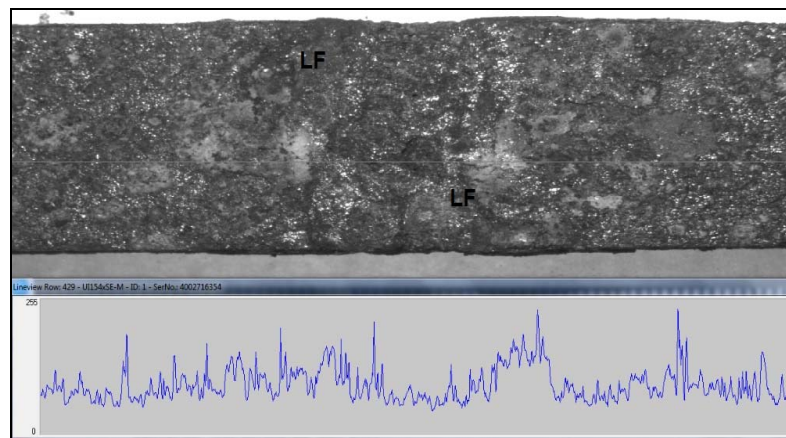


Figura 4.12. Superficie de la probeta con soldadura MMA a tensión.

La probeta fue expuesta al H₂S durante 720 hrs bajo un esfuerzo de tensión, exhibe una superficie brillante, como se muestra en su espectro de luz, con el que se determina su característica cromática.

La probeta presenta mayor susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzo de tensión principalmente en la transición de la ZAC y soldadura (Línea de fusión), como se indica en el espectro de intensidad de luz, se presentan superficies brillantes metálicas, opacas, las cuales son características cromáticas de la mackinawita $((\text{Fe},\text{Ni})_{1+x}\text{S}(x=0-0.07)) = 49.04 \% \text{ Fe}, 17.18 \% \text{ Ni}, 33.79 \% \text{ S}$.

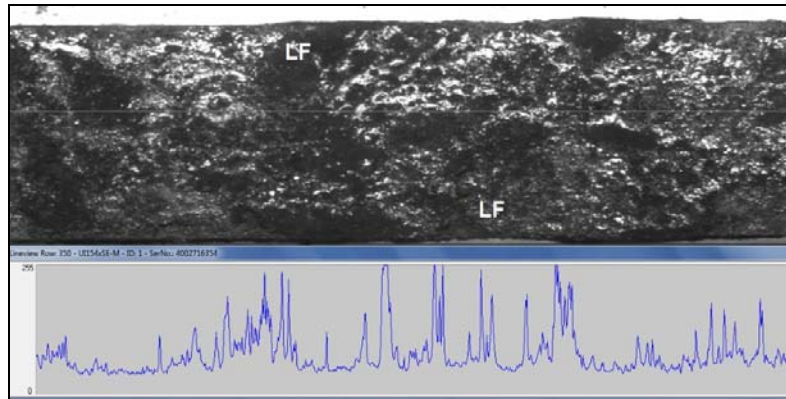


Figura 4.13. Superficie la probeta con soldadura MMA a compresión.

La probeta fue expuesta al H₂S durante 720 hrs bajo un esfuerzo de compresión. En la imagen se puede observar la formación de óxido (mackinawita) de manera uniforme y sin aglomeraciones en toda la superficie de la probeta ensayada, en este caso, los tres puntos críticos, presentan un mismo nivel de susceptibilidad a la corrosión.

4.8. Análisis de la fractura



Figura4.14. Lado de la probeta sometido a tensión.

Probeta MMA ensayada al 75% de Deformación, la cual presenta fractura entre la línea de fusión de la ZAC-Soldadura, 356 hrs de haber iniciado el ensayo además presenta la máxima susceptibilidad a la corrosión en la soldadura.



Figura 4.15. Lado de la probeta sometida a compresión.

Probeta con soldadura MMA ensayada al 75% de Deformación, en este caso se identifican tres grietas que inician en la superficie las cuales se identifican en la línea de fusión se puede observar a simple vista la corrosión y las propias grietas.

Nota: la parte más susceptible a la corrosión a simple vista se presenta en la soldadura en el área de la línea de fusión, además también podemos determinar que la parte sometida a tensión es todavía mas susceptible a dicha corrosión.

4.9. Análisis con el microscópico confocal.

Microscopio confocal de barrido por luz blanca.

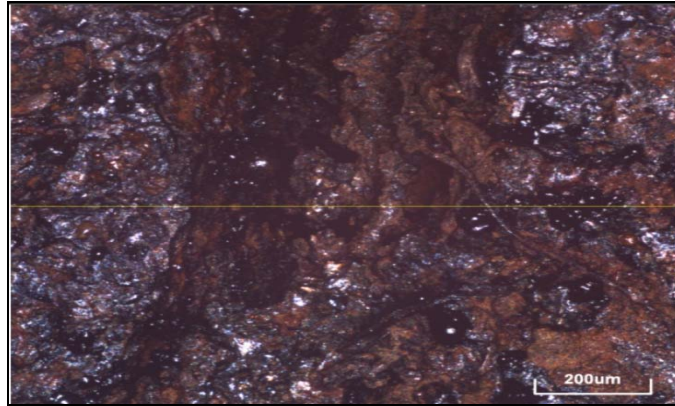


Figura 4.16a. Área de fractura de la probeta con soldadura MMA.

En esta imagen se presenta un acercamiento de la fractura en la Probeta MMA ensayada al 75% de Deformación se alcanza a percibir la corrosión sobre toda la superficie de la fractura, incluso se alcanza a ver parte de la escoria generada por le tipo de soldadura.

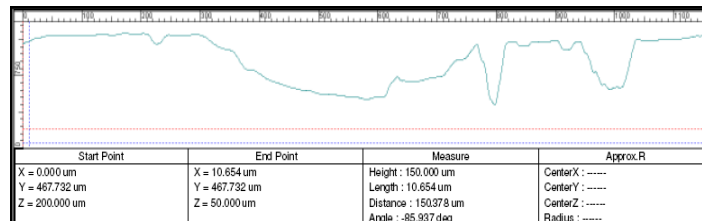


Figura 4.16b. Topografía de la zona de la fractura.

El espectro nos demuestra el comportamiento de la fractura en el área de la imagen además nos indica principalmente la profundidad del agrietamiento.

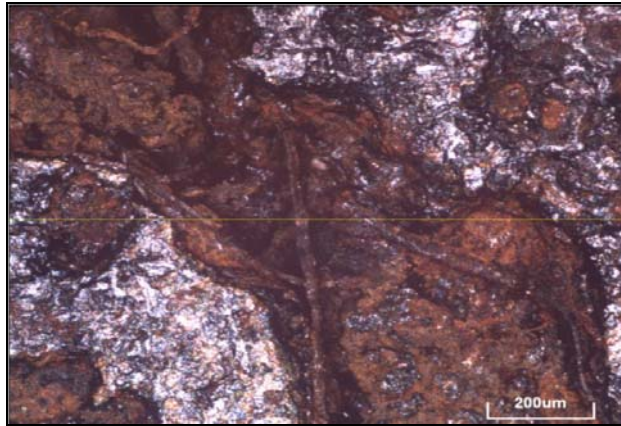


Figura 4.17a. Intersección de dos grietas a 200 μ m.

En la imagen podemos determinar la principal causa de la fractura se observa la intersección de dos grietas que en gran medida ayudaron a propagar de manera acelerada la fisuración.

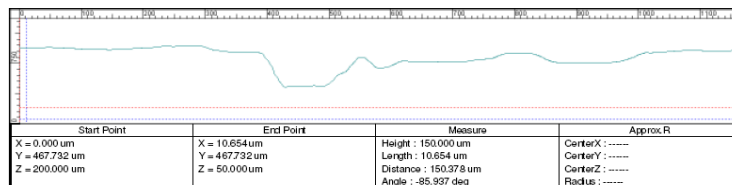


Figura 4.17b. Topografía de la zona de la fractura.

El espectro nos demuestra el comportamiento de la fractura en el área de la imagen además nos indica principalmente la profundidad de la fractura.

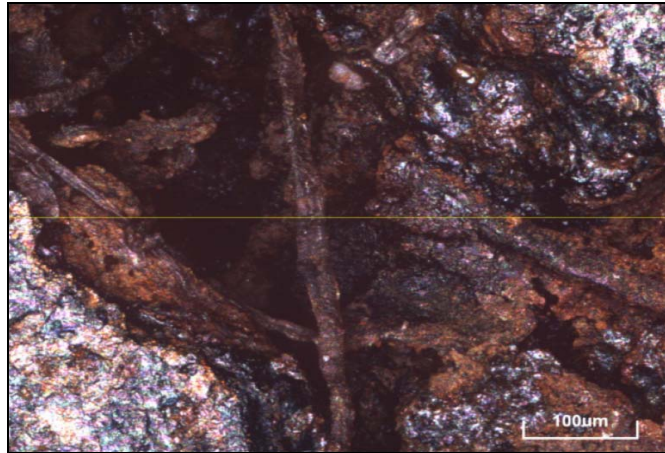


Figura 4.18a. Intersección de dos grietas a 100 μ m.

En la imagen se puede observar una ampliación de la figura 4 en la cual nos permite ver con más precisión la considerada zona crítica.

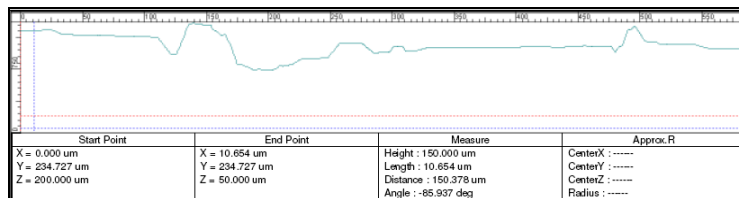


Figura 4.18b. Topografía de la zona de la fractura.

El espectro nos demuestra el comportamiento de la fractura en el área de la imagen además nos indica principalmente la profundidad de la fractura.

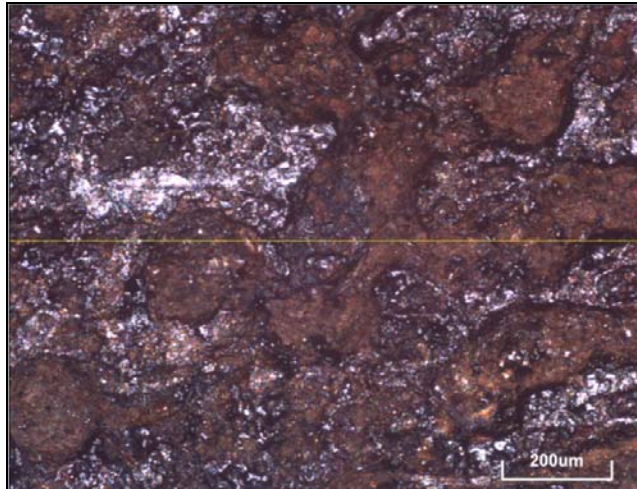


Figura 4.19a. Superficie de la soldadura después del ensayo de SSC.

En la imagen se muestra la superficie de la soldadura, la cual presentó mayor susceptibilidad a la corrosión, además se puede observar la formación de una segunda fase al parecer mackinawita.

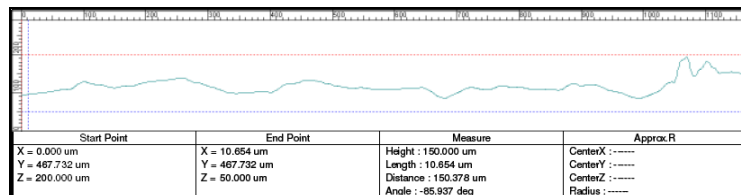


Figura 4.19b. Topografía de la zona de la fractura.

El espectro nos demuestra el comportamiento de la fractura en el área de la imagen además nos indica principalmente la profundidad de la fractura.

4.10. Análisis de difracción de rayos X

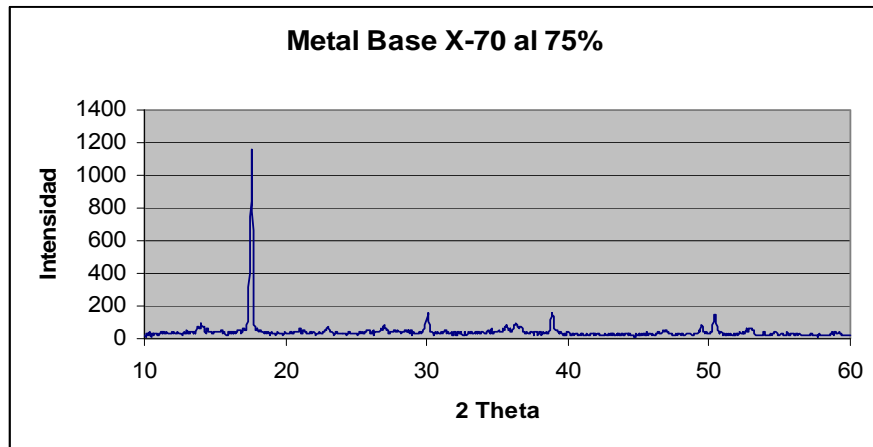


Figura 4.20. Espectro de difracción de rayos X, MB al 75%.

En la imagen se observa la reflexión característica de la mackinawita (FeNiS) la cual se forma como una segunda fase en la superficie de la probeta ensayada.

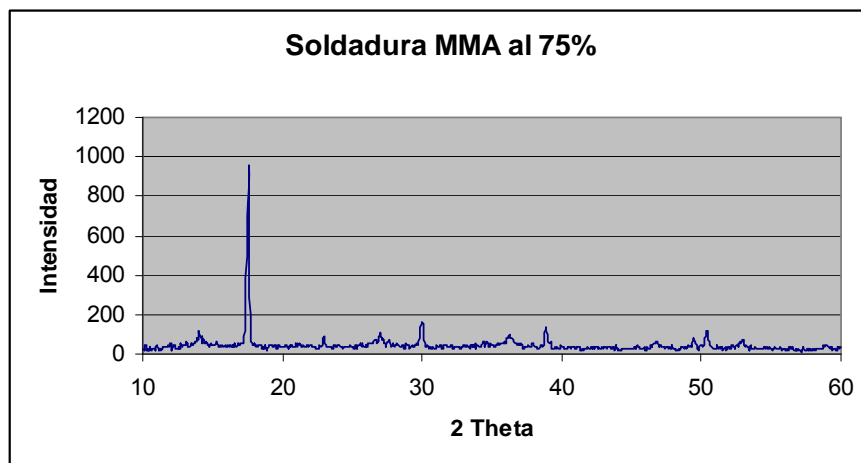


Figura 4.21. Espectro de difracción de rayos X, soldadura MMA al 75%.

En la imagen se observa una la reflexión característica de la mackinawita (FeNiS) que al igual que en los espectros anteriores está presente.

4.11. Resultados de dureza Vickers en Soldadura MMA después del ensayo de HIC.

En las pruebas de dureza realizadas en tres secciones considerados puntos críticos se puede evidenciar el comportamiento del material después de ser sometido al ciclo térmico de la soldadura MMA y un ensayo de HIC.

En este tipo de soldadura la parte de la ZAC es la más afectada ya que presenta la más alta dureza, y va en aumento cuando se acerca a la línea de fusión, al momento de alejarse de la línea de fusión y acercarse al metal de soldadura la dureza comienza a decrecer significativamente, para este caso la parte del metal base es la que presenta los valores más estables de dureza, como se observa en la siguiente gráfica.

Resultados de Ensayos de Dureza en las zonas críticas de un acero API X-70 con soldadura MMA.

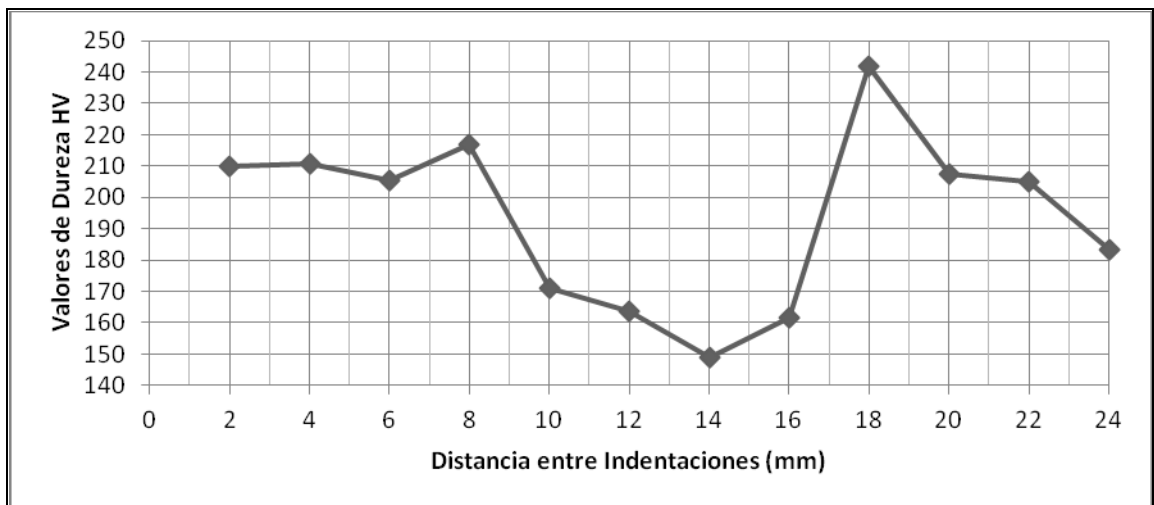


Figura4.22. Gráfica de dureza en la soldadura MMA.

En la gráfica se muestra la relación entre los tres puntos críticos de la soldadura MMA (Metal base, la ZAC y la soldadura) con respecto a su dureza Vickers.



Figura 4.23. Corte transversal de la probeta HIC para su evaluación.

Tabla 4.4 Valores obtenidos de Dureza Vickers en un acero API X-70 con soldadura MMA.

Distancia (mm)	Valor HV	Zona
2	209.9	Metal Base
4	210.75	Metal Base-ZAC
6	205.3	ZAC
8	216.7	ZAC
10	171	Soldadura
12	163.7	Soldadura
14	148.95	Soldadura
16	161.75	Soldadura
18	242	Soldadura-ZAC
20	207.4	ZAC
22	205.2	ZAC
24	183.4	Metal Base

Descrito lo anterior se puede concluir acerca del comportamiento de la dureza en los tres puntos críticos, en el metal base su comportamiento es constante su valor de dureza que oscila entre los 183 a 210 HV, este valor va en aumento en cuanto se acerca a la ZAC, en este caso los valores más altos de dureza se presentan cerca de la línea de fusión, en la parte de la soldadura la dureza decrece considerablemente hasta los 150 HV aproximadamente.

Nota: Para obtener buenas propiedades en la soldadura es considerado un punto importante que es la homogeneidad de las microestructura en los tres puntos críticos.

4.12. Resultados de dureza Vickers en soldadura y metal base después del ensayo de HIC.

En la siguiente figura se muestran dos gráficas las cuales representan la dureza Vickers en la soldadura MMA y el Acero API 5L X-70 como metal base.

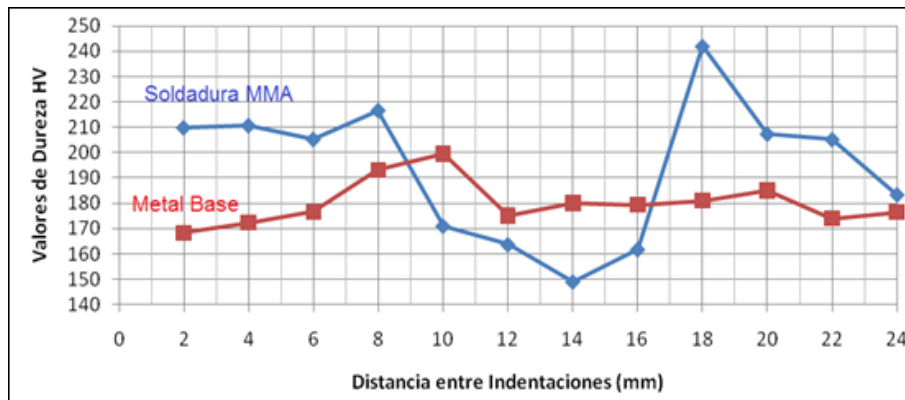


Figura 4.24. Gráfica de comportamiento de dureza vickers en metal base y soldadura MMA.

En la gráfica se muestra la relación entre el comportamiento de los puntos críticos de la soldadura MMA y el acero API 5L X-70 (metal base) con respecto a la dureza Vickers.

Tabla 4.5. Valores obtenidos de Dureza Vickers en un acero API X-70 después del ensayo de HIC.

Distancia (mm)	Valor HV	Zona
2	209.9	Metal Base
4	210.75	Metal Base
6	205.3	Metal Base
8	216.7	Metal Base
10	171	Metal Base
12	163.7	Metal Base
14	148.95	Metal Base
16	161.75	Metal Base
18	242	Metal Base
20	207.4	Metal Base
22	205.2	Metal Base
24	183.4	Metal Base

En este caso el metal base (Acero API 5L X-70) se comporta de manera estable con una tendencia lineal encontrándonos los valores dentro del rango de entre 168.25 hasta 199.4 HV a diferencia de la gráfica de soldadura que es completamente inestable tiene una tendencia a bajar considerablemente su dureza en la parte de la soldadura y a aumentarla en la ZAC siendo su valor máximo alcanzado cerca de la línea de fusión.

4.13. Resultados de HIC para soldadura MMA

Después del ensayo de HIC las probetas fueron preparadas para su evaluación en este caso se analizaron los tres puntos críticos de la soldadura MMA, definitivamente la zona más susceptible se encuentra el ZAC y Soldadura por su nivel de dureza respectivamente.

En este caso el espécimen presenta agrietamiento o fisuración cerca de la superficie, una de las principales grietas se encuentra cerca de la línea de fusión la cual una de ellas inicia a 184.0 μm (A) y otra a 500 μm (B) aproximadamente, esto indica que la parte más susceptible se encuentra en la transición de la ZAC y la línea de fusión.

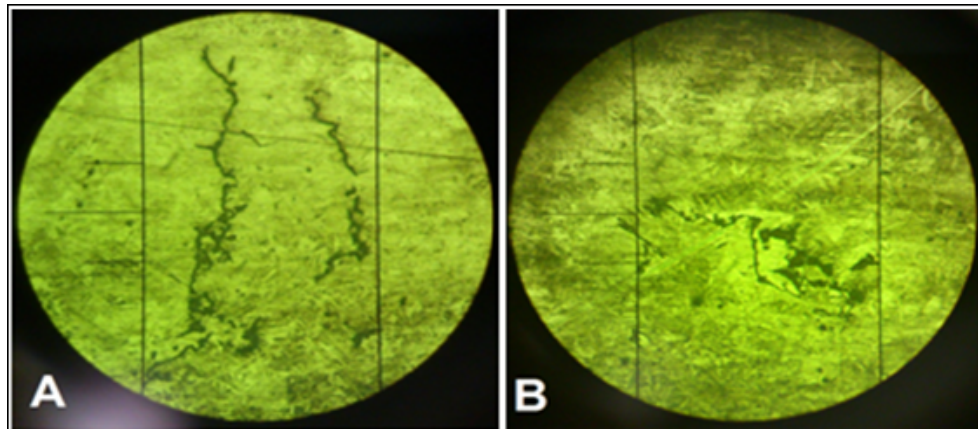


Figura 4.25. Imagen obtenida con el durómetro Vickers a 20X.

Nota: Las grietas fueron dimensionadas con el durómetro Vickers para tener mejor precisión en las mediciones.

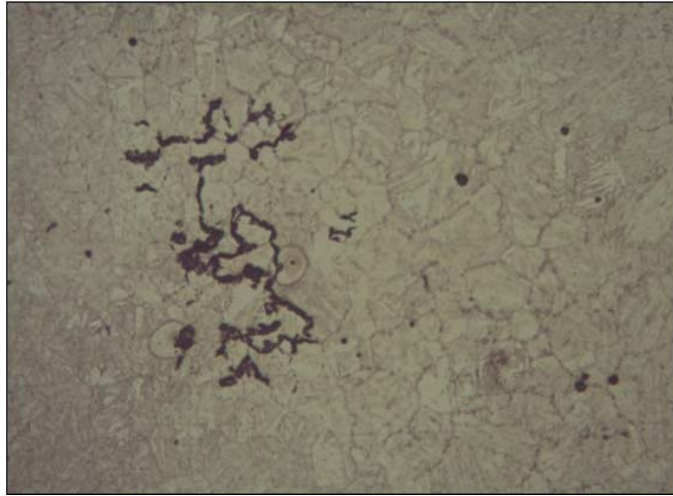


Figura 4.26. Fisura en los límites de grano a 20X,

Se considera del tipo de propagación transgranular escalonada, esta fisura se presenta entre la ZAC y la soldadura muy cerca de la línea de fusión. El agrietamiento o fisuración presenta unificación de tres o más grietas las cuales aceleran su propagación.

Entre las diversas formas de falla a través de las cuales se pueden manifestar problemas en la soldabilidad de un material debe destacarse el agrietamiento en frío. Este es un mecanismo que ocurre cuando existe conjuntamente presencia de hidrógeno, microestructura susceptible, esfuerzos residuales y temperatura cercana a la ambiente.

Esta forma de Agrietamiento suele presentarse en la ZAC o soldadura y puede presentarse transversal longitudinalmente.

En las figuras siguientes se presenta las principales faces de transición entre la ZAC-MB-LF-Soldadura, tomadas del Microscopio óptico.

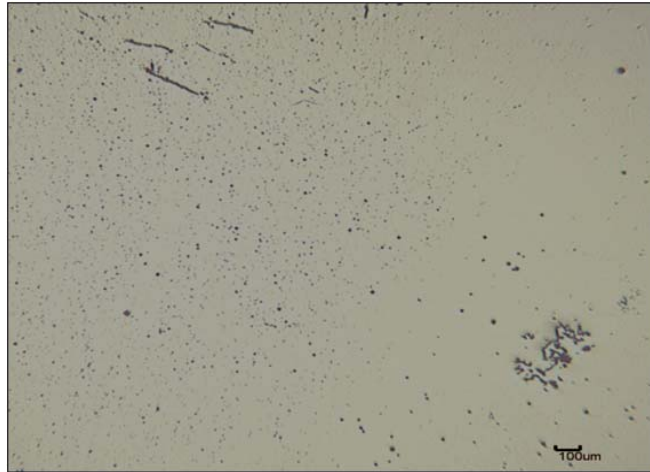


Figura 4.27. Imagen tomada a 5X identificando la transición de la ZAC-soldadura.

Se puede ver el nivel de porosidad de la Soldadura MMA, además se puede identificar el tipo de grieta en la parte de la ZAC se presentan grietas densas mientras que en la parte de la Soldadura MMA se aprecien grietas alargadas.

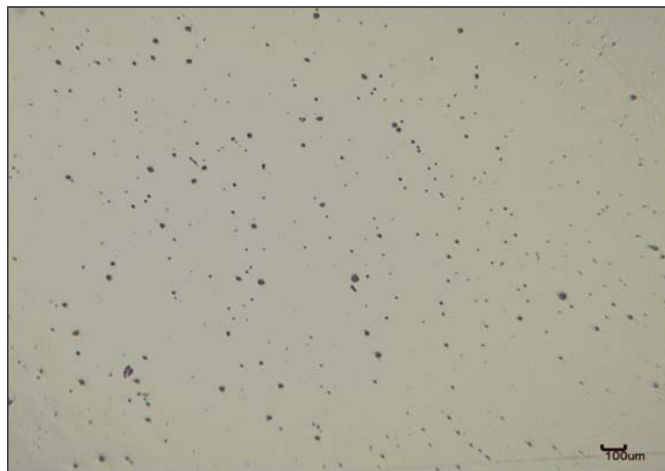


Figura 4.28. Imagen tomada a 5X identificando el metal base.

En la imagen se pueden observar el nivel de inclusiones no metálicas no se aprecia ningún tipo de grieta.

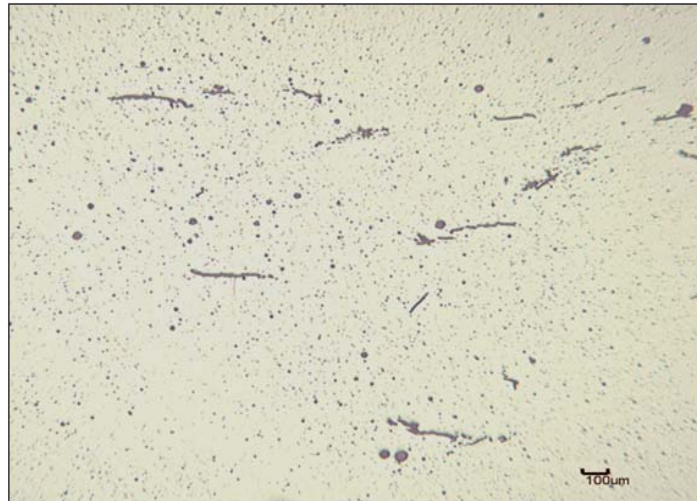


Figura 4.29. Imagen tomada a 5X identificando la soldadura MMA

En la imagen se puede apreciar el nivel de porosidad y se pueden observar gran cantidad de inclusiones no metálicas y grietas que se propagan de forma alargada.

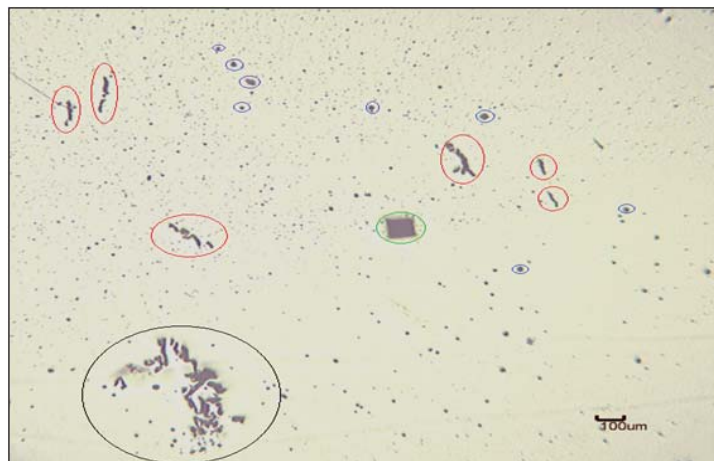


Figura 4.30. Imagen tomada a 5X de la ZAC y Soldadura.

Se puede identificar puntos principales de la transición de la Soldadura MMA y la ZAC, se pueden observa el agrietamiento denso y agrietamiento tipo escalonado y alargado, inclusiones no metálicas y una indentación próxima a la línea de fusión.

Los resultados obtenidos de los ensayos de esfuerzos residuales no existe un patrón o un comportamiento definido.

Se realizaron ensayos a las placas soldadas de las diferentes soldaduras y a las probetas a ensayar después de su maquinado. La placa soldada de SMAW presenta valores mayores que en la probeta estos esfuerzos se mantienen en compresión en placa como en probeta.

En cuanto la placa de MMA se presenta como esfuerzos residuales positivos (tensión) y en la probeta cambia sus esfuerzos a negativos (compresión).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En este caso todos los especímenes ensayados presentan diferente nivel de susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos, en cuanto a las características cromáticas se puede evidenciar la presencia de la mackinawita en casi todas sus posibles formaciones físicas, las cuales se pueden presentar en forma de óxidos opacos, óxidos metálicos, óxidos oscuros, etc.

Los niveles de susceptibilidad dependen directamente de la magnitud del esfuerzo de tensión o compresión, de la zona superficial del espécimen bajo estudio, el metal base-ZAC-soldadura y del proceso de soldadura.

La capa pasiva se comporta positivamente cuando la probeta esta bajo un esfuerzo de compresión y negativamente cuando la probeta esta bajo un esfuerzo de tensión.

Tomando en cuenta que los ensayos de SSC y HIC se realizaron simultáneamente y en condiciones similares se concluye que:

La soldadura por el proceso MMA presentó bajas propiedades mecánicas y por lo tanto mayor susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzo. En ambientes húmedos donde se presentan concentraciones de saturación de H_2S , se exhibe la formación de grietas derivado de la fragilidad causada por el hidrógeno atómico alojado en las inclusiones de sulfuros de manganeso, durante el tiempo de exposición, generando la fractura prematura del material.

La soldadura SMAW tiene mejor compatibilidad con el acero API 5L X-70, es menos susceptible a la corrosión bajo esfuerzos, ésta depende directamente del tipo de soldadura y la magnitud del esfuerzo (tensión o compresión).

La anisotropía de la microestructura de la soldadura incluyendo el área de la ZAC y metal base, determinan definitivamente el nivel de susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos.

El comportamiento electroquímico de los especímenes estudiados está fuertemente relacionado con la proporción de las fases perlíticas y ferríticas, debido al par galvánico que se crea entre ellas, y a la formación de sulfuros de hierro en la superficie del material.

La I_{cor} y la E_{cor} están relacionadas con la cantidad de fase ferrita que posee el material.

Las zona de la ZAC son susceptibles ante el fenómeno de la corrosión presentó menor R_p y mayor densidad de corriente, por lo que, esto es debido a su gran cantidad de ferrita y su déficit en ferrita.

Se determina que el comportamiento de las zonas de soldadura por ambos procesos, MMA y SMAW son susceptibles a la corrosión bajo esfuerzo en ambiente amargo, siendo la soldadura húmeda la que presenta mayor daño.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar pruebas experimentales variando parámetros de soldadura, tipo de electrodo, amperaje, velocidad y emplear un proceso térmico de pre y post-soldadura.

Una opción favorable sería realizar tratamientos térmicos como un revenido o envejecido, después de la soldadura esto para mejorar las propiedades mecánicas.

Se recomienda realizar más ensayos mecánicos previos al ensayo de SSC bajo diferentes deformaciones para evaluar la relación que existe entre la susceptibilidad a la corrosión bajo esfuerzos y las propiedades mecánicas.

Es recomendable considerar en gran medida analizar la microestructura del material antes y después del ensayo de SSC, para evaluar la relación que existe a la susceptibilidad.

Se recomienda realizar ensayos de esfuerzos residuales previos a los ensayos de SSC y HIC para determinar la relación que existe. Es decir concluir acerca del comportamiento la susceptibilidad tomando en cuenta el tipo y el nivel de esfuerzos residuales.

7 REFERENCIAS

[1] “Calidad del gas a ventas en los sistemas de transmisión y distribución de Corpoven, S.A. Flexibilidad y Confiabilidad 2000”, Gerencia General del Gas, (1993).

[2] García-Cerecero G. Hydrogen Sulfide of Weld Regions in API X-52 Steel, 2012. Corporación Mexicana de Investigación en Materiales SA de CV. Saltillo Coahuila, Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIII No. 4 pp. 473-478

[3] M. Kimura, Corrosión 55 (1999) pp.738.

[4] M.Sc. Alejandro García Rodríguez, “ Consideraciones sobre Soldadura Manual con Electrodo Revestido”, 2009.

[5] E.C.P. Pessoa, A.Q. Bracarense, S. Liu, F.P. Guerrero, Estudo da Variac, ão da Porosidade ao Longo do Cordão de Soldas Subaquáticas Molhadas, in: XXX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Rio de Janeiro – RJ, 2004, p. 8.

[6] Alejandro Duffus Scott²; Alexandre Queiroz Bracarense¹; Lorenzo Perdomo González³; Ezequiel Caires Pereira Pessoa⁴; Rafael Quintana Puchol⁵; Manuel Rodríguez Pérez.⁶ Caracterización metalográfica de depósitos de soldadura subacuática mojada Prof. Doctor, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) Centro de Investigaciones de Soldadura.

[7] José Jorge Rodríguez Mondragon, Fernando Macías López, Jorge Leobardo Acevedo Dávila, Alfonso Ballesteros Hinojosa, Núria Cuadrado Lafoz, Eddy Alfaro López. COMIMSA “Residual stress determination in API 5L X-65 steel Weld in underwater environment by MMAW”, 2011.

[8] Duffus, A; Queiroz, A; Perdomo, L; Pereira, E; Quintana, R; Rodríguez, M, «Caracterización Metalográfica de Depósitos de Soldadura Subacuática Mojada,» 06 Noviembre 2008.

[9] Ramírez, J., Soldadura por Arco Manual con Electrodo Revestido. 2003, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería. p. 15.

[10] . J.P.Farias, A.S., P.S.de S.Bálsamo,E.Surian, The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004. **26**(3):pp. 17.

[11] . Chu, W.-H., Automatización SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada. 2003. p. 108.

[12]. Hutchison, R.e.a., Method and apparatus for welding. 2004: United States Patent Application.

[13]. Hu, S.J.e.a., ONLINE MONITORING SYSTEM AND METHOD FOR A SHORT-CIRCUITING GAS METAL ARC WELDING PROCESS. 2004: United States Patent Application.

[14]. Dodge, R.e.a., System and method for facilitating welding system diagnostics. 2004: United States Patent Application.

[15]. ANSI/AWS, Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, Standard 5.1-91, Miami, FL, 1991, American National Standards Institute/American Welding Society.

[16] N. M. R. DE RISSONE, J.P.F., I. DE SOUZA BOTT, E. S. SURIAN, ANSI/AWS A5.1-91 E6013 Rutile electrodes: The Effect of Calcite. Welding Journal Supplement, 2002: p. 113-S - 124-S.

[17] Chu, W.-H., Automatización SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada. 2004. p. 108.

[18]. B.E.Paton.et.al, Direccionamiento del proceso de soldadura por arco a través de la programación de la alimentación del alambre electrodo. Soldadura Automática, 1977. No.1, p. 1-5.

[19] Farias, J.P., Metallic Mg as a coating component in C-Mn-Ni electrode. 1993, Universidad Federal de Santa Catarina, Brazil. p. 225.

[20]. "Metallurgy of Welding" - J. F. Lancaster - Abington Publishing, 1999.

[21]. Monografía: "Análisis de defectos y como evitarlos en soldaduras de arco SMAW y SAW longitudinales y circunferenciales en ductos de transporte de hidrocarburos" - Angel Murillo Sigero- COMIMSA, Junio. 2010.

[22] A.S. Oddy. "Transformation Plasticity and Residual Stresses in Single-Pass Repair Welds", Journal of Pressure Vessel Technology, 1992; 114:33-38.

[23] P. Dong. "Effects of Repair Weld Residual Stresses on Wide-Panel Specimens Loaded in Tension", Journal of Pressure Vessel Technology, 1998; 120:122-128.

[24] T. McGaughy. "The influence of weld repairs on changes in residual stress and fracture toughness in pipeline girth welds", Recent Advances in Structural Mechanics, ASME 1992; PVP 248:81-86.

[25] NACE TM 0177-2005 "Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments" pp. 1-36.

[26] W. K. Kim, NACE Corrosion Conference & Expo 2008, The effect of metallurgical factors on SSC of High Strength Pipeline Steel. Paper No.08496

[27] NACE committee, Review of Published literature on wet H₂S cracking of steel through 1989, (Houston, Texas, 2003).

[28] A. Takahashi and H. Ogawa, ISI J International 36 (1996) pp. 334-340.

[29] NACE STD TM 02-84 Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen Induced Cracking.

[30] Makareno V.D., Khalin A.N. "Effects of hydrogen on the Corrosion Failure of Welded Landpipes. Chemical and Petroleum Engineering, Volume 41 (issues 7-8), 2005, 448-450.

[31] R.J. Pargeter, CORROSION/2007 Conference & Expo (2007) Paper: 07115.

[32] NRF-001-PEMEX-2007 Tubería para acero de recolección y transportación de hidrocarburos.

[33] Monografía: “La tecnología de la Soldadura Industrial: Su papel en el diseño de uniones soldadas para tubería de conducción de hidrocarburos API 5L por el proceso SAW” - Adrián Enrique Monroy Madrid – COMIMSA, Junio. 2010.

[34] G. Van Boven W Chen, R. Rogger” The role of residual stress in neutral pH stress corrosion cracking of pipeline Steels”. Part I: Pitting and Cracking Occurrence. Acta Materialia 2006

[35] T. Gladman, The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, 1a edición, Ed. The Institute of Materials, Londres, Reino Unido, 1997, pp. 185-211.

[36] U. Sharma y D.G. Ivey, International Pipeline Conference, Vol. 1, Calgary, Alberta, Canada, 2000, ASME, EE. UU., 2000, pp. 193-201.

[37] B. Vargas-Arista, A. Albiter, C. Angeles-Chavez y J.M. Hallen, Metall. Mater. Trans. A 37 (2006) 2.683-2.690.

[38] Hashimoto T. y Komizo Y. (1983) Development of low Pcm X-70 Grade line pipe for Prevention of Cracking During Grith Welding in Energy Related Project, Welding Institute of Canada, Toronto.

[39] Hulka K. (1983) Rolling and Alloying as Influencing Factors on Pipe steel and Hard Materials. Ed. N.R. Comins and J.B. Clarck, Pergamon Press, Oxford, United Kindom.

[40] Hulka K., Heisterk F. y Frantou I.I. (1990) An Economic Approach to pipe steels with High Toughness and Good Weldability, Pipe line Technology Conf. Proc. Ed. R. Denys Antwerpen, Belgium.

[41] Mendoza R. Huante J.; Lugo G. Alvarez Fregozo O. y Juarez Islas J.A. (1999) Development of on API X-70 Steel Grade For Sour gas Resistance Pipe line J. of Materials Science and Performance, pp 549-555

[42] Mendoza R. Huante J.; Alanis M., Gonzalez Rivera C. y Juarez Islas J.A. (2000) Processing of Ultra Low Carbon Steels with Mechanicals Properties Adequate for Automotive Applications Science and Engineering, pp. 203-209

[43] Mendoza R. Huante J.; Alanis M., Gonzalez Rivera C. y Juarez Islas J.A. (2000) Evaluation of the mechanical properties and corrosión Behaivor of Ultra Clean Steels, J. of Materials Processing Technolofy, pp. 238-244

[44] B. Arellano Ayala "Efecto del proceso de expansión en soldadura por arco sumergido con aplicación a 2 y 3 arcos en la fabricación de tubería para uso de ambiente amargo" pp. 8-21

[45] Sindo Kou "Welding Metallurgy" pp 122-130 Wilery Interscience 2003

[46] Standard Practice for Preparing, Clearing, and Evaluating Corrosion Test Specimens (ASTM G1-03, 2003)

[47] Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements (ASTM G5-94, 1994)

[48] Standard Practice for Conventions Aplicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing (ASTM G3-89, 1989)

[49] B. Vargas Arista "Análisis del comportamiento mecánico, microestructural y corrosión del envejecimiento artificial en la uniones soldadas de tubo de acero API 5L grado X 52" p 54- 134 Tesis Politecnico Nacional 2007

[50] Nace 1D-182 wheel test method used for evaluation of film-persistent Corrosion Inhibitors for oilfield applications 1995.

[51] Ming-Chum ZHOU, Bei Tang, Yi-Yin Shan "Role of microstructure on SSC of oil and gas pipeline steels" Materials Science & Engineering 2007.

[52] Ma H., Cheng X. et al. The Influence of hydrogen Sulfide of iron under different conditions. Corrosion Science, volume 42 (issue 10), 2000, 1669-1683.

[53] Fragiel A., Serna S., Pérez R. Electrochemical Study of two Microalloyed Pipeline Steels in H₂S Environments. International Journal of hydrogen Energy, volume 30 (issue 12) 2005, 1303-1309.

[54] Brown B. Leek L. et al. Corrosion in Multifase Flow Containing Small Amounts of H₂S. Corrosion 2003, San Diego (Ca) NACE International. Paper 03341.

[55] Kobayashi Y. et al. The resistance of Welded Landpipes to Sulfide Stress Corrosion. Corrosion Science, Volume 27 (issues 10-11) 1986. Pp. 1117-1135.

[56] API STANDARD 1104 "Welding of Pipeline and Related Facilities". Pipeline Segment Twentieth Edition, 2005; pp. 1-82.

[57] ASTM G-61-86(2009) Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, pp.1-5.

[58] ASTM E-1382 "Standard Tests Methods for determining average grain size using semiautomatic and automatic image analysis", 2004; pp.1-22.

[59] ASTM E-112 “Standard test method for determining average grain size”, 2004; pp. 1-26.

[60] ASTM E-8 “Standard tests methods for tension testing of metallic materials”, 2004; pp. 1-24.

[61] ASTM E-23 “Standard Methods for notched bar impact testing of metallic materials, 2006; pp. 1-27.

[62] ASTM E-384 “Standard test method for microindentación hardness of materials”; 2006, pp. 1-33.

[63] ASTM E-140 “Standard hardness conversion tables for metals” relationship amongbrinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, Rockwell superficial hardness, knoop hardness, and scleroscope hardness 2000. pp. 1-21.

[64] ASTM E-92 “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, 1997. Pp. 1-9.

[65] ISO 7539-2 Corrosion of Metals and Alloys- Stress Corrosion Testing – Part 2: Preparation and of bend-beam specimens.

[66] ASTM G-1 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, 1999, pp 1-7.

[67] ISO 3183-3 Petroleum and natural gas industries – Steel Pipe for pipes – Technical delivery Condition – Part 3: Pipe of requirement class C.

[68] ASTM E-3 “Standard Practice for Preparation of metallographic specimens” 1995, pp. 1-8.

[69] ASTM E-7 “Standard Terminology Relating to Metallographic” 2000, pp. 1-29.

[70] ASTM E-45 “Standard Test Methods for Determining the inclusion content of steel”, 1997, pp. 1-15.

[71] ASTM E-370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Products.

[72] API-5L “Specification for Line Pipe.”

[73] ISO 6892 “Metallic materials – Tensile Testing”

[74] API 5CT “Specification for casting and tubing.”

[75] ISO 148 “Metallic materials – charpy pendulum – impact test.”

[76] G.A. Zhang, Y.F. Cheng Micro-electrochemical characterization of corrosion of welded X70 pipeline steel in near-neutral pH solution. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, 2500 University Drive NW, Calgary, Alta., Canada T2N 1N4.

[77] S.R. Taylor, Progress in Organic Coatings 43 (2001) 141.

[78] J.R. Davis, Corrosion of Weldments, ASM International, 2006.

[79] V.S. Voruganti, H.B. Luft, D. de Geer, S.A. Bradford, Corrosion 47 (1991) 343

[80] F. León Bello /M.G. Aamaya “Acción galvánica superficial en una matriz de acero al carbono constituida por microceldas con granos de perlita y ferrita”, Revista Mexicana de Ingeniería Química, ISSNC (versión impresa):1665-2738.

[81] Zhang Liang, LI Xiao-gang, DU Cui-wei Effect of Environmental Factors on Electrochemical Behavior of X70 Pipeline Steel in Simulated Soil Solution (School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China).

[82] Morales, P (2004) Influencia del envejecimiento artificial de aceros tipo API 5L sobre la susceptibilidad a la corrosión en medios acuosos conteniendo CO_3^{2-} o Cl^- , Tesis de maestría, UAM Azcapotzalco, México.

[83]. "Cutting and Welding Equipment" - Broco Arcair, pág. 206.

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso de soldadura submarina (MMA) realizada por un buzo.

Figura 2.2 Representación esquemática del proceso SMAW

Figura 2.3 Algunos defectos de la soldadura

Figura 2.4 Clasificación de los defectos en las soldaduras según el IIW.

Figura 2.5 Proceso de fabricación de tubería para la industria petrolera por procesos de soldadura SAW y ERW

Figura 3.1 Esquema que indica la orientación y ubicación correcta de las probetas a ensayar de SSC en metal base y soldadura.

Figura. 3.2 Montaje de la probeta en el soporte de cuatro puntos para el ensayo de SSC

Figura 3.3 Diagrama esquemático de purgado y saturación para el ensayo de SSC.

Figura. 3.4 Probetas expuestas al ácido sulfhídrico después de 15 días.

Figura 3.5 Probeta montada en el soporte de SSC al final del ensayo.

Figura 3.6 Esquema que indica la orientación y ubicación correcta de las probetas de HIC en metal base y soldadura.

Figura 3.7 Diagrama esquemático de purgado y saturación para el ensayo de HIC

Figura 3.8 Esquema para la evaluación de la probeta de HIC después del ensayo

Figura 3.9 Esquema de las indentaciones realizadas en los ensayos de dureza vickers.

Figura 3.10 Tipo de indentador y la forma geométrica de la indentación con la cual se determina el valor de dureza Vickers.

Figura 4.1 Micrográficas del proceso SMAW.

Figura 4.2 Microestructura de la ZAC e interfase con la soldadura proceso SMAW

- Figura 4.3** Microestructuras del proceso MMA
- Figura 4.4** Microestructura de la ZAC y metal base
- Figura 4.5** Grafica de durezas de los procesos MMA y SMAW
- Figura 4.6** Curvas potenciodinámicas de las diferentes zonas ZAC, MB, SOL, de los procesos MMA y SMAW
- Figura 4.6** Diagrama de Nyquist. MB, Soldadura MMA y SMAW
- Figura 4.7** Diagrama de Nyquist. ZAC de Soldadura MMA y SMAW
- Figura 4.8** Diagrama de Bode para las diferentes zonas en los procesos MMA y SMAW.
- Figura 4.9** Formación de la capa pasiva en probeta MMA
- Figura 4.10** Superficie de la probeta con soldadura SMAW a tensión.
- Figura 4.11** Superficie de la probeta con soldadura SMAW a compresión.
- Figura 4.12** Superficie de la probeta con soldadura MMA a tensión.
- Figura 4.13** Superficie la probeta con soldadura MMA a compresión.
- Figura4.14** Lado de la probeta sometido a tensón.
- Figura 4.15** Lado de la probeta sometida a compresión
- Figura 4.16a** Área de Fractura de la probeta con soldadura MMA.
- Figura 4.16b.** Topografía de la zona de la fractura.
- Figura 4.17a** Intersección de dos grietas a 200 μ m.
- Figura 4.17b.** Topografía de la zona de la fractura.
- Figura 4.18a.** Intersección de dos grietas a 100 μ m
- Figura 4.18b.** Topografía de la zona de la fractura.
- Figura 4.19a.** Superficie de la soldadura después del ensayo de SSC.
- Figura 4.19b.** Topografía de la zona de la fractura.
- Figura 4.20** Espectro de Difracción de Rayos X, MB al 75%.
- Figura 4.21.** Espectro de difracción de rayos X, soldadura MMA al 75%
- Figura4.22** Gráfica de dureza en la soldadura MMA
- Figura 4.23** Corte transversal de la probeta HIC para su evaluación.
- Figura 4.24** Gráfica de comportamiento de dureza vickers en metal base y soldadura MMA.
- Figura 4.25** Imagen obtenida con el durómetro Vickers a 20X.

Figura. 4.26 Fisura en los límites de grano a 20X,

Figura 4.27 Imagen tomada a 5X identificando la transición de la ZAC-Soldadura

Figura 4.28 Imagen tomada a 5X identificando el metal base

Figura 4.29 Imagen tomada a 5X identificando la Soldadura MMA

Figura 4.30 Imagen tomada a 5X de la ZAC y Soldadura

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales contaminantes del gas amargo.

Tabla 2.1 Procesos de Soldadura por arco eléctrico

Tabla 2.2 Clasificación de los defectos de la soldadura según el IIW

Tabla 2.3. Clase, grado y uso de tubos.

Tabla 2.4 Composición química del metal base API 5L X-70 en %wt

Tabla 2.5 Composición química del electrodo en %wt.

Tabla 3.1 Herramientas y Equipo para ensayo de SSC

Tabla3.2 Reactivos químicos para ensayo de SSC

Tabla 3.3 Parámetros para ensayo de SSC

Tabla 3.4 Herramientas y Equipo

Tabla 3.5 Reactivos Químicos

Tabla 3.6 Reactivos de la solución No. 1

Tabla 3.7 Reactivos de la solución No. 2

Tabla 3.8 Parámetros para el ensayo de HIC

Tabla 3.9 Herramientas y equipo para preparación metalográfica

Tabla 3.10 Herramientas y Equipo

Tabla 3.11 Equipo para determinación de inclusiones no metálicas

Tabla 4.1 Datos de Potencial, Corriente y Velocidad de Corrosión.

Tabla 4.2 Valores de resistencia obtenidos para las diferentes zonas ZAC, MB, Sol.

Tabla 4.3 Potenciales de corrosión y porcentaje de la fase presente.

Tabla 4.4 Valores obtenidos de Dureza Vickers en un acero API X-70 con soldadura MMA

Tabla 4.5 Valores obtenidos de Dureza Vickers en un acero API X-70 después del ensayo de HIC.

GLOSARIO

MMA: Manual Metal Arc (Arco Manual Metálico)

SMAW: Shielded Metal Arc Welding (Soldadura por arco metálico protegido)

API: American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)

ESW: Electroslag Welding (Soldadura por electroescoria)

Temperatura T_p : Temperatura subcrítica

ZAC: Zona Afectada por el Calor

°C: Grados centígrados

ppm: partes por millón

mm: milímetros

IIW: internacional Institute of Welding (Instituto Internacional de Soldadura)

AWS: American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura)

atm: atmósfera

MPa: Mega Pascales

SPEC: Especificación

CE: Carbono Equivalente

Ksi: Kilopound per square inch (Kilolibra por pulgada cuadrada)

Fy: Esfuerzo de cedencia

Psi: Pound per square inch (libras por pulgada cuadrada)

cm: centímetros

mg: miligramos

m³: metros cúbicos

SAW: Submerged Arc Welding (Soldadura por Arco Sumergido)

ERW: Electromagnetic Resistance Welding (Soldadura por Resistencia Electromagnética)

FÓRMULAS

$$Q = (I \cdot v) / S$$

$$Y = \sigma (3H^2 - 4A^2) / 12 E t$$

$$HV = P/As = 2 P \sin(\alpha/2) / d^2 = 1.8544 P/d^2$$