

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL HIDRÓGENO EN LA ZONA TÉRMICAMENTE
AFECTADA (ZAT) DE UN ACERO 2 ¼ Cr - 1 Mo EN CONDICIÓN DE
ENVEJECIDO ARTIFICIALMENTE**

**MILATHY JOHANNA MARTÍNEZ BRICEÑO
YELITZA KAREN LÓPEZ PLATA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2013**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL HIDRÓGENO EN LA ZONA TÉRMICAMENTE
AFECTADA (ZAT) DE UN ACERO 2 ¼ Cr - 1 Mo EN CONDICIÓN DE
ENVEJECIDO ARTIFICIALMENTE**

**MILATHY JOHANNA MARTÍNEZ BRICEÑO
YELITZA KAREN LÓPEZ PLATA**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero metalúrgico**

**DIRECTOR:
M.Sc. IVÁN URIBE PÉREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar hasta aquí y regalarme la voluntad y perseverancia para lograr este sueño.

A mis padres ANDELFO MARTINEZ y NURIA BRICEÑO, por su apoyo y dedicación durante este proceso, porque siempre tuvieron fe en mí, por hacer de mí una persona de valores y capacidades; A mi hermana Karend Julieth por brindarme su afecto y apoyo. A mi hijo Deivy Steventh por ser mi mayor motivación y la fuerza que me impulsa para lograr mis metas.

A mi tía Ana Myriam por su gran colaboración y apoyo durante todos estos años, por demostrarme su gran cariño y afecto.

En especial dedico este triunfo a toda mi familia y a las personas que hicieron parte de este proceso, a mi gran amiga Jessica por sus consejos y motivación.

A mi compañero y amigo Cesar A, porque con su inmenso cariño y apoyo durante estos años.

MILATHY JOHANNA MARTÍNEZ BRICEÑO

DEDICATORIA

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece” Filipenses 4:13. Con este lema en mi corazón dedico la culminación de esta etapa de mi vida a Dios por guiar mi camino y permitirme llegar hasta aquí.

A mis tíos ELSA PLATA y PEDRO GARCIA (Q.E.P.D.) por su cariño, apoyo total y confianza depositada en mí, ayudándome a realizar este proyecto en mi vida.

A mi hermano JONATHAN LÓPEZ, mis amigos y compañeros por la alegría brindada, sus consejos y motivaciones constantes.

A mi amigo y novio JHEISSON CELIS por regalarle alegría a mi vida, por su entrega y compromiso acompañándome en momentos de felicidad y tristeza.

Finalmente a los motores de mi vida, mi madre NELCY MARIA PLATA por su cariño, paciencia y apoyo incondicional haciendo de cada cosa algo maravilloso y a mi padre JOSE HERNANDO LÓPEZ (Q.E.P.D.) por enseñarme el verdadero significado de entrega total y amor insaciable por la vida y por la familia; a pesar de no alcanzar a compartir este triunfo contigo, por ti y para ti es este logro.

YELITZA KAREN LÓPEZ PLATA

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Iván Uribe Pérez, Director y precursor de este proyecto, por su orientación y consejos, durante este proceso de desarrollo académico.

A Ambrosio Carrillo por su gran colaboración, disposición y amistad brindada en el transcurso de nuestra carrera y desarrollo de este proyecto.

A todos los profesores del claustro Universitario por ser fuente de admiración, de ese gran conocimiento que difunden y profesan y a los técnicos Domingo, Fermín, Javier y Mario por su colaboración durante el desarrollo de la carrera.

Al ingeniero Aldrin B. Velosa por colaborarnos incondicionalmente.

A todos nuestros compañeros y amigos de Universidad en especial a Jessica Rodríguez, Diana Pabón, Jairo Sebá, Fredy y Harrison que de una u otra forma contribuyeron a este gran logro.

A mi compañera y amiga, Yelitza Karen por su apoyo durante estos años y por qué juntas luchamos hasta el final para poder lograr este sueño.

A mi compañera y amiga Milathy Martínez por brindarme su amistad incondicional y querer ser parte de esta gran lucha final.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	20
1.1. Generales	20
1.2. Específicos	20
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
2.1. Aceros cromo molibdeno (Cr - Mo)	21
2.1.1. Microestructura de los aceros 2 ¼ Cr – 1Mo	22
2.2. Características de soldadura de los aceros 2 ¼ Cr-1Mo	23
2.2.1. Microestructura de la ZAT de un arco 2 ¼ Cr-1Mo	24
2.3. Tratamiento térmico "Steep Cooling" para simular la fragilización por revenido de acero 2 ¼ Cr - 1Mo	25
2.4. Hidrógeno en aleaciones metálicas	27
2.4.1. Daño por hidrógeno	27
2.5. Ensayo de impacto charpy	28
2.6. Ensayo de tracción	29
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	31
3.1. Condiciones iniciales de la placa	32
3.1.1. Material	32
3.2. Composición química	32
3.2.1. Metal base	32
3.2.2. Metal de aporte	32
3.3. Elaboración de la junta soldada	33
3.3.1. Elaboración de la junta	33
3.3.2. Junta soldada	34
3.4. Tratamientos térmicos	35
3.4.1. Post Welding (PWHT)	35
3.4.2. Step Cooling	36
3.5. Condición de las probetas	38
3.6. Análisis metalográfico	38
3.6.1. Microscopia óptica	38

3.7. Microdureza	40
3.8. Absorción de hidrógeno por polarización catódica	40
3.9. Ensayos mecánicos	43
3.9.1. Ensayo charpy	43
3.9.2. Ensayos de tracción	43
4. RESULTADOS	45
4.1. Composición química	45
4.1.1. Metal base	45
4.1.2. Metal de aporte	46
4.2. Análisis metalográfico	46
4.2.1. Microscopia óptica	46
4.3. Resultados del ensayo de Impacto (charpy)	48
4.4. Resultados ensayo de tracción	50
4.5. Resultados del ensayo de microdureza	53
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
5.1. Composición química	55
5.1.1. Metal base	55
5.2. Análisis metalográfico	55
5.3. Análisis del ensayo de impacto	57
5.4. Análisis del ensayo de tracción	59
5.5. Análisis de la fractura charpy	60
5.6. Análisis de fractura tracción	62
6. CONCLUSIONES	65
7. RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1. Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) del acero 2.25 Cr-1Mo	23
Figura N° 2. Regiones de un cordón de soldadura.	24
Figura N° 3. Curva del tratamiento térmico de “Step Cooling”	26
Figura N° 4. Tipos de entalla charpy	29
Figura N° 5. Probeta de ensayo de tracción	30
Figura N° 6. Diagrama de desarrollo de actividades	31
Figura N° 7. a. Biselado en K b. Geometría de las juntas	34
Figura N° 8. a. Calentamiento de la placa al inicio y entre pases – b. Guía de separación para realizar el primer pase - c. SMAW - d. Medida de temperatura entre pase y pase – e. Muestra del segundo pase – f. Limpieza del cordón por medio de una grata – g. Limpieza final del cordón mediante una grata – h. Cordón de soldadura finalizado.	36
Figura N° 9. Placa soldada en T.T. de PWHT	37
Figura N° 10. Curva de PWHT	37
Figura N° 11. Placa soldada en T.T. de Step Cooling	38
Figura N° 12. a. Probeta charpy con entalla en V – b. Probeta charpy con ataque de Nital 2% – c. Probetas de tracción entalladas.	39
Figura N° 13. a. Pulido en lija – b. Pulido en paño – c. Probetas en pulido Espejo	40
Figura N° 14. Esquema de hidrogenación de probetas	41
Figura N° 15. a. Probetas charpy – b. Celda electrolítica inicial probetas charpy – c. Celda electrolítica final probetas charpy – d. Probetas tracción – e. Celda electrolítica inicial probetas tracción – f. Celda electrolítica final probetas tracción	42
Figura N° 16. a. Máquina de impacto – b. Ubicación de la probeta charpy	44
Figura N° 17. Estado de entrega del material	46
Figura N° 18. Estado de envejecimiento artificial “Step Cooling”	47

Figura N° 19. Energía absorbida del acero sin hidrógeno	49
Figura N° 20. Energía absorbida del acero con hidrógeno	49
Figura N° 21. Curva de esfuerzo Vs deformación	51
Figura N° 22. Comparación de UTS [MPa] probetas tracción	52
Figura N° 23. Comparación de Ys [MPa] probetas tracción	52
Figura N° 24. Comparación de % Elongación probetas tracción	53
Figura N° 25. Comparación de microdureza Vickers	54
Figura N° 26. Estado de entrega del material	55
Figura N° 27. Estado de envejecimiento artificial “Step Cooling”	56
Figura N° 28. Análisis de fractura en probetas envejecidas-no hidrogenadas	60
Figura N° 29. Análisis de fractura en probetas envejecidas-hidrogenadas	61
Figura N° 30. Análisis de fractura	62
Figura N° 31. Probetas de tracción fracturadas	63

LISTAS DE TABLAS

Tabla N° 1. Resultados de análisis químico	33
Tabla N° 2. Energía de entrada de los electrodos	35
Tabla N° 3. Rampas de PWHT	37
Tabla N° 4. Numero de probetas para ensayo charpy	39
Tabla N° 5. Numero de probetas para ensayo de tracción	39
Tabla N° 6. Cálculos para determinar la corriente	42
Tabla N° 7. Composición química del acero 2 ¼ Cr – 1 Mo	45
Tabla N° 8. Composición química electrodo AWS E9018-B3	46
Tabla N° 9. Resultados energía absorbida en el ensayo charpy	48
Tabla N° 10. Resultados ensayo de tracción	51
Tabla N° 11. Datos de microdureza	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados composición química	69
Anexo B. Material de trabajo	70
Anexo C. Cortes longitudinales del material a analizar	70

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL HIDRÓGENO EN LA ZONA TÉRMICAMENTE AFECTADA (ZAT) DE UN ACERO 2 ¼ Cr - 1 Mo EN CONDICIÓN DE ENVEJECIDO ARTIFICIALMENTE*.

AUTORES: MARTINEZ BRICEÑO MILATHY JOHANNA
LÓPEZ PLATA YELITZA KAREN.**

PALABRAS CLAVES: Daño por Hidrógeno, Aceros Cromo Molibdeno, Tenacidad, Ensayo Charpy, Ensayo Tracción, Step Cooling y Zona Afectada Térmicamente.

DESCRIPCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar la resistencia al impacto en la zona térmicamente afectada de un acero 2 ¼ Cr-1Mo el cual según su composición química corresponde al acero ASTM A-387 grado 22, normalmente empleado para la fabricación de calderas y recipientes a presión diseñados para operar a altas temperaturas y elevadas presiones como lo son los reactores de hidrot ratamiento en los cuales se obtienen productos derivados del petróleo más nobles y de mejor calidad.

Para tal efecto, se toma como base de estudio una placa de acero 2 ¼ Cr-1Mo a la cual se le aplica una técnica de soldadura (soldadura a tope con bisel en K), un tratamiento térmico que simula el envejecimiento artificial o deterioro del material como consecuencia de su puesta en servicio respecto al metal base (Step Coling) y un cargamento catódico para observar el comportamiento de dicho material bajo presencia de hidrógeno; a dichas probetas por último se le realizaran ensayos de impacto utilizando probetas charpy y de tracción, entalladas según las normas, códigos y especificaciones aplicables para la construcción de recipientes a presión soldados.

Este proyecto surge como complemento de otras investigaciones desarrolladas en esta universidad en las cuales se ha estudiado el comportamiento de las propiedades mecánicas del acero 2¼ Cr-1Mo, utilizado en la construcción de reactores de hidrot ratamiento, recipientes a presión y en la refinación de petróleo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: M.Sc. Iván Uribe Pérez

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF THE HYDROGEN IN THE ZONE THERMALLY AFFECTED (HAZ) OF A STEEL 2 ¼ Cr - 1 Mo IN CONDITION OF AGED ARTIFICIALLY*.

AUTHORS: MARTINEZ BRICEÑO MILATHY JOHANNA
LOPEZ PLATA YELITZA KAREN.**

KEYWORDS: Damage by Hydrogen, Molybdenum Chromium Steels, Tenacity, Trial Charpy, Trial Traction, Step Cooling and Zone Affected Thermally (HAZ).

DESCRIPTION

The present work has as purpose to evaluate the resistance to the impact in the zone thermally affected of a steel 2 ¼ Cr-1Mo which according to their chemical composition corresponds to the steel ASTM TO-387 degree 22, normally employee for the production of kettles and containers to pressure designed to operate to high temperatures and high pressures like are it the reactors of hidrotratamiento in which by-products of the petroleum are obtained Nobler and of better quality.

For such effect, is taken like base of study a plate of steel 2 ¼ Cr-1Mo to which applies a technique of welding (welding to stop with bevel in K), a heat treatment that simulates the artificial aging or deterioration of the material as a result of its put in service with respect to the metal base (Step Cooling) and a cathode cargo to observe the behavior of said material low presence Of hydrogen; to said test tubes finally they were carried out him test tubes utilizing impact trials charpy and of traction, tailored according to the norms, codes and applicable specifications for the construction of containers to pressure soldiers.

This project arises like complement of other investigations developed in this university in which the behavior of the mechanical properties of the steel has been studied 2¼ Cr-1Mo, utilized in the construction of reactors of hidrotratamiento, containers to pressure and in the refining of petroleum.

* Undergraduate work

** Physicochemical Faculty of Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science, Director: Ivan Perez Uribe.

INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo cada año son destinados millones de dólares a la reparación o remplazo de tubos que presentan fallas provocadas por procesos de degradación de las propiedades mecánicas del acero asociados con el ambiente de trabajo de esas estructuras. Un fenómeno que se cita con frecuencia es la Fragilización por Hidrógeno - FH, clasificada en Fragilización por Hidrógeno Ambiental - FHA y Fragilización por Hidrógeno Interno - FHI (ASM, 1987).

La FHA ocurre por la adsorción de hidrógeno molecular generado en una atmósfera hidrogenada, o por una reacción de corrosión, y su absorción en el reticulado cristalino luego de su disociación a la forma atómica. La FHI ocurre en ausencia de una atmósfera hidrogenada y es causada por el hidrógeno que ingresa en el reticulado durante la producción del acero y en algunos de los procesos de fabricación de las estructuras, como la soldadura, antes de las pruebas o del inicio del servicio. Ese ingreso es facilitado debido a que la solubilidad del hidrógeno en el metal fundido es mucho más alta que cuando está en estado sólido. Una vez en el reticulado, y en presencia de tensiones, el hidrógeno fragiliza el material luego de un período de tiempo que es función de la concentración, temperatura y del estado tensional de la matriz [1].

Estructuras y recipientes funcionales de las refinerías como tuberías, reactores o calderas, llevan consigo metales pesados, hidrocarburos, residuos de altos horno y derivados de otros procesos, que están operando a altas temperaturas (400°C-600°C) y elevadas presiones (Mayores a 10MPa), por largos periodos de servicio, generando un deterioro en el material y fragilización del acero. Por eso la importancia de caracterizar los aceros y escoger el más adecuado para las condiciones requeridas. El acero al carbono no es muy utilizado para elaborar estos sistemas, pues el hidrógeno penetra la superficie y reacciona con el carbono, que al formar metano causa pérdida en la ductilidad y fracturas por

agrietamiento, dada la presión generada. La adición de elementos aleantes como Molibdeno y/o cromo, mejoran tanto la resistencia a éste tipo de ataque, como la resistencia a la fluencia y a la oxidación.

El acero 2 ¼ Cr - 1 Mo, estipulado según la norma ASTM A 387 grado 2 clase 2 debe ser normalizado y revenido o templado y revenido para satisfacer las propiedades mecánicas requeridas, ya que es utilizado ampliamente en este tipo de estructuras o recipientes. Este acero puede presentar fragilización por revenido, debido a diferentes factores como tiempo de operación, grandes espesores y presencia de uniones soldadas. Las uniones soldadas aumentan la fragilización por revenido, debido a los cambios en la microestructura tanto en la región del metal de soldadura (MS), como en la zona térmicamente afectada (ZAT), sumándole a esto la presencia de un ambiente hidrogenado. Por otro lado el choque térmico entre la temperatura de fusión y el enfriamiento rápido de la soldadura, modifican la microestructura alrededor del cordón soldado. La no homogeneidad en la Zona térmicamente afectada (ZAT) unida con la absorción y difusión del hidrogeno afectan seriamente el material cuando actúan conjuntamente.

Este proyecto surge como complemento de otras investigaciones desarrolladas en esta universidad en las cuales se ha estudiado el comportamiento de las propiedades mecánicas del acero 2¼ Cr-1Mo, utilizado en la construcción de reactores de hidrotreatmento, recipientes a presión y en la refinación de petróleo. Nuestro enfoque será la Zona Térmicamente Afectada con el fin de poder estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas debido que la construcción de reactores y equipos está unida con la soldadura del mismo.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la resistencia al impacto en la ZAT a temperatura ambiente de un acero ASTM A 387 Grado 22 (2 1/4 Cr-1Mo), tratado térmicamente por Step Cooling (enfriamiento escalonado) en probetas hidrogenadas por cargamento catódico.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar la técnica de soldadura a tope con bisel en K a las muestras de un acero de acuerdo con la norma ASME sección VIII división I.
- Evaluar la resistencia al impacto de la zona térmicamente afectada (ZAT) y en la zona fundida en probetas envejecidas por Step Cooling e hidrogenadas por cargamento catódico mediante probetas entalladas para ensayo Charpy.
- Analizar los cambios microestructurales y dureza de la zona térmicamente afectada (ZAT) y la zona fundida en probetas envejecidas por Step Cooling e hidrogenadas por cargamento.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. ACEROS CROMO-MOLIBDENO (Cr-Mo)

Los aceros cromo molibdeno son ampliamente usados hoy en día por sus excelentes propiedades mecánicas como la resistencia al creep (termofluencia), resistencia a la corrosión, mayor ductilidad, mayor resistencia a la grafitización en las industrias de refinación y petroquímica, en plantas de generación de energía, industria nuclear, incineradores industriales, industria del papel, turbinas y motores de aviones.

Estos aceros están diseñados especialmente para trabajar a elevadas temperaturas. El cromo mejora su resistencia a la oxidación a través de la formación de una capa de óxido de cromo muy uniforme y adherente al substrato metálico. El molibdeno mejora fuertemente la resistencia a la termo fluencia o creep. El resultado son aceros de buena resistencia a la corrosión por gases calientes y sulfurosos, buena resistencia mecánica a temperaturas mayores a las que producen ablandamiento o termo fluencia rápida en los aceros al carbono, tienen un amplio rango de aplicaciones en calderas, industria nuclear y petroquímica, contienen entre 0,5% y 9% en peso de cromo y de 0,5% a 1,0% porcentaje en peso de molibdeno. El contenido de carbono se suele mantener bajo 0,15% en peso para reducir el riesgo de fisuración.

La mayoría de estos aceros se utilizan en condición de temple y revenido, y en esas condiciones son susceptibles a la fragilización por hidrógeno. Suelen sufrir también degradación de su tenacidad al estar expuestos por tiempos prolongados a temperaturas entre los 360°C y 550°C. En general requieren tanto precalentamiento, como tratamiento térmico post-soldadura. [2]

La principal ventaja de los aceros al Cr-Mo comparados con los aceros al carbono es la mayor resistencia a la fluencia que presentan por la adición de Cr y Mo, a su vez el Cr incrementa la resistencia a la oxidación. La resistencia a la fluencia en los aceros al Cr-Mo se deriva de dos fuentes:

- Endurecimiento por solución sólida de la matriz ferrítica con C, Mo y Cr
- Endurecimiento por precipitación de carburos.

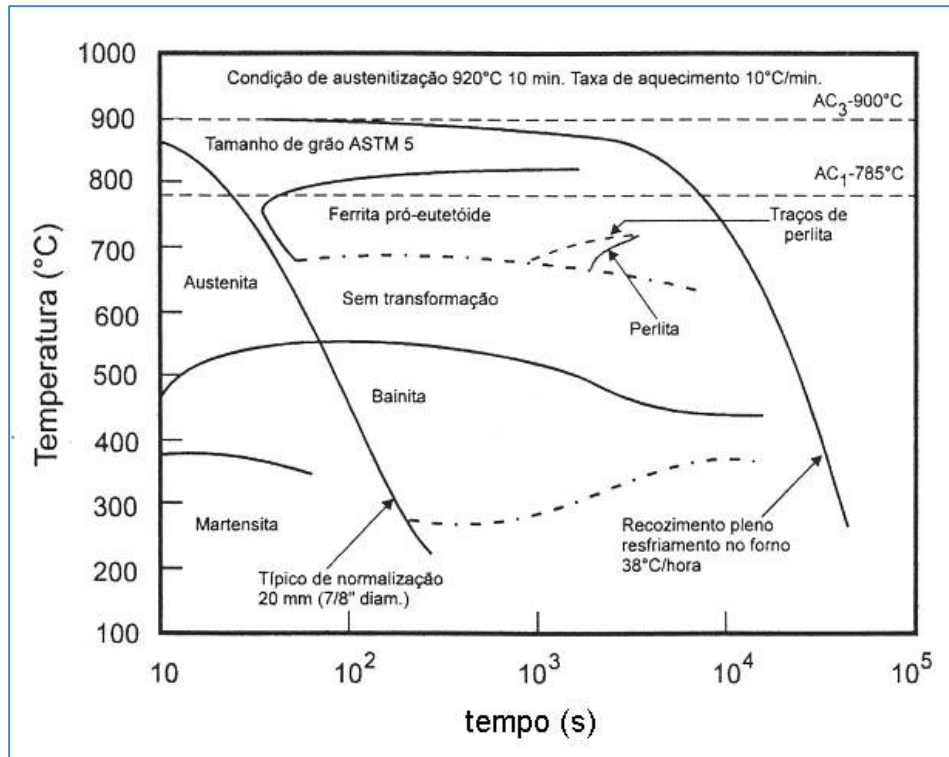
2.1.1. MICROESTRUCTURA DE LOS ACERO 2 ¼ Cr – 1 Mo

La microestructura y las propiedades de los aceros Cr-Mo dependen de la composición química y de los tratamientos térmicos tal como se explicó anteriormente. Las velocidades de enfriamiento más comunes implican la formación de ferrita y perlita, en cuanto que la bainita y martensita requieren mayores velocidades de enfriamiento. La temperatura de austenización de los aceros 2,25 Cr-1Mo está en el rango de 920 a 1.016°C. De acuerdo con el diagrama de enfriamiento continuo del acero 2.25 Cr – 1Mo (Figura N°1), existe un amplio rango de microestructuras que pueden ser obtenidas modificando la velocidad de enfriamiento partiendo de la temperatura de austenización [2]. En el caso del acero 2 ¼ Cr – 1Mo los tratamientos térmicos aplicados más comunes son:

- **Recocido:** Austenización entre 910 y 940°C durante cierto tiempo, seguido de un enfriamiento en el horno (velocidad de enfriamiento lenta). La microestructura final está compuesta de ferrita y perlita.
- **Normalizado y revenido:** Austenización entre 910°C y 940°C seguido de un enfriamiento al aire y revenido realizado por calentamiento entre 580°C Y 720°C. La microestructura final está compuesta de ferrita y bainita.

- **Temple y revenido:** Austenización entre 940°C y 980°C seguido de un enfriamiento en aceite y revenido entre 570°C y 705°C. La microestructura final es una mezcla de martensita y bainita.

Figura N°1. Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) del acero 2.25 Cr-1Mo.



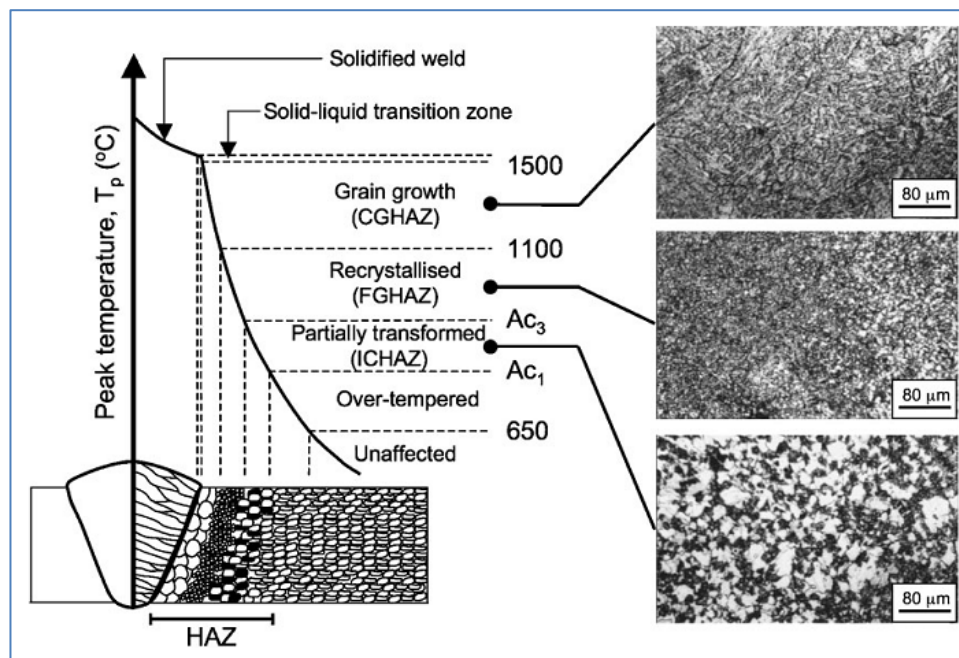
Fuente: Referencia [3]

2.2. CARACTERÍSTICAS DE SOLDADURA DE LOS ACEROS 2 ¼ Cr - 1Mo

Una de las técnicas de soldadura más utilizadas en la fabricación o ensamble de aceros Cr-Mo se encuentra el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), soldadura por arco sumergido (SAW) y soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección a gas (GTAW), siendo la soldadura con SMAW la más utilizada en aceros 2 ¼ Cr - 1 Mo. [4]

El proceso de soldadura somete al metal base a ciclos térmicos intensos que resulta en una significativa alteración de la microestructura adyacente al metal de soldadura (Figura N°2). Esta región es conocida como la zona afectada térmicamente (ZAT) y se puede dividir en varias sub-zonas de acuerdo con la microestructura desarrollada como una consecuencia del historial térmico de soldadura. [2]

Figura N°2. Regiones de un cordón de soldadura.



Fuente: Referencia [5]

2.2.1. MICROESTRUCTURA DE LA ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE DE UN ACERO 2 ¼ Cr - 1 Mo

La microestructura tanto del metal de soldadura, como de la ZAT es muy compleja porque están controladas por la interacción de campos térmicos producidos por el calor de entrada del proceso de soldadura, la fase de transformación y el crecimiento del grano. En términos de microestructura la ZAT tiene tres zonas (CGZAT, FGZAT y ICHAZ), vistas en detalle en la figura N°2.

Las microestructuras presentes en la ZAT dependen de los picos de temperatura obtenidos en las diferentes regiones durante la soldadura de múltiples pasadas. Las regiones más cercanas a la línea de fusión experimentan un pico de temperatura por encima de la línea A_{c3} . A esta temperatura, hay suficiente calor para disolver los carburos y un grano de austenita grueso se obtiene, convirtiéndose en una estructura degradada de grano bainítico. A medida que la distancia desde la línea de fusión aumenta, la temperatura se disminuye en el material de la ZAT, dando como resultado una estructura bainítica de grano fino. Esta región de granos finos (FGHAZ) se define como la región donde los granos de austenita formada durante el proceso de soldadura se dividen en pequeñas colonias de perlita y granos de ferrita. Cuando la ZAT está sometida a un ciclo térmico entre A_{C1} y A_{C3} , sólo ocurre una transformación parcial a austenita en el calentamiento y durante el enfriamiento se produce una mezcla de productos y se obtiene ferrita austenita.

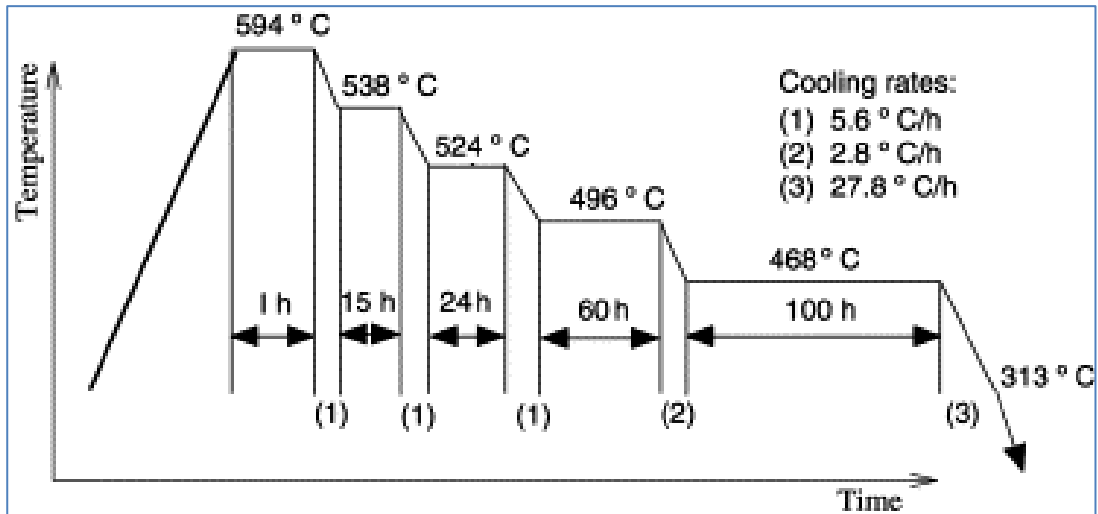
2.3. TRATAMIENTO TÉRMICO "STEP COOLING" PARA SIMULAR LA FRAGILIZACIÓN POR REVENIDO DE ACERO 2 ¼ Cr - 1Mo

La susceptibilidad a la fragilización por revenido en cualquier acero es evaluada, en particular por dos tipos de tratamientos térmicos ampliamente utilizados: el isotérmico "envejecimiento" y el tratamiento térmico de enfriamiento por niveles o pasos "Step Cooling". En la investigación de este acero, para evaluar su tenacidad es necesario determinar qué susceptibilidad de fragilización por revenido tiene y qué relación existe con las diferentes temperaturas en la cual es sometido en servicio. La figura N°3 muestra esquemáticamente el tratamiento de "Step Cooling". Este "Step Cooling" modificado se convirtió en estándar para los estudios de fragilización por revenido en acero 2,25 Cr - 1 Mo. [6]

La susceptibilidad por revenido en los aceros Cr-Mo, depende de su microestructura, composición química y de los tratamientos térmicos a los cuales

están sometidos. Este último involucra la temperatura de austenización y las velocidades de enfriamiento, factores que conducen a obtener diferentes microestructuras con propiedades características, que pueden favorecer a la resistencia al creep y aumentar el tiempo de servicio del acero. [7]

Figura N°3. Curva del tratamiento térmico de “Step Cooling”



Fuente: Referencia [8]

Las propiedades mecánicas del acero a analizar disminuyen y se ven afectadas con el paso de los años y el tiempo en servicio, especialmente cuando este acero está expuesto a condiciones agresivas de temperatura y ambiente; estas propiedades mecánicas son: tenacidad a la fractura, resistencia a la tensión, dureza, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga, fragilización por hidrogeno, entre otras [9].

Si el material es sometido a extensos períodos de altas temperaturas que oscilan entre los 350°C a 600°C, se presenta una disminución de la dureza que se conoce como envejecimiento por revenido. Este cambio metalúrgico genera el aumento de la temperatura de transición dúctil-frágil. Los cambios microestructurales comunes que se presentan son esferoidización y crecimiento

de carburos. El crecimiento de carburos produce un aumento inicial de la dureza y la resistencia, que más adelante con el cambio estructural causan un desgaste gradual de las propiedades mecánicas, especialmente la de la resistencia al creep [9].

2.4. HIDRÓGENO EN ALEACIONES METÁLICAS

2.4.1. Daño por Hidrógeno

Aunque la degradación producida por el hidrógeno puede aparecer bajo distintas formas los casos más importantes se agrupan en dos categorías; hidrógeno combinado e hidrógeno en solución.

➤ Hidrógeno Combinado

Se puede citar el ataque por hidrógeno y ampollamiento inducido por hidrógeno. Se presentan características como daño irreversible y ausencia de tensiones. El ataque por hidrógeno, resulta en los aceros a partir de la exposición a temperaturas superiores a 200°C y con la presencia de presión parcial de hidrógeno. Los aceros que presentan este daño sufren una fuerte descarburación con reducción de su tenacidad y resistencia mecánica. El mecanismo de daño consiste en que el hidrógeno presente en el material reacciona con el carbono descarburizando el material y formando metano (CH₄), las burbujas de metano se alojan preferencialmente en los límites de grano, ocasionando fisuración intergranular [24].

➤ Hidrógeno en Solución

La fragilización por hidrógeno es el principal problema que ocasiona el hidrógeno en solución. Este daño se presenta en diversos aceros, tanto de baja como de alta resistencia mecánica. La falla involucra la pérdida de propiedades mecánicas inducida por el hidrógeno que puede derivar en la iniciación o propagación de fracturas mecánicas; teniendo como algunas

características principales: La ductilidad del acero disminuye progresivamente con el aumento de este elemento, la resistencia a la fractura disminuye con el aumento del contenido de hidrógeno en el acero, la presencia de hidrógeno en el acero puede cambiar el tipo de fractura, de una morfología típicamente dúctil a otra esencialmente frágil [24].

Los efectos de la fragilización ocurren principalmente en el intervalo de temperaturas entre -100 a 100°C, teniendo el efecto máximo a temperatura ambiente. La fragilización por hidrógeno ocurre solamente cuando el material es sometido a esfuerzos de tensión. Depende del tratamiento termo – mecánico y de la microestructura del acero, los más susceptibles son aquellos que han sido endurecidos (microestructura martensítica) [10]. La disminución de tenacidad por presencia de hidrógeno se presenta tanto en aleaciones ferrosas como no ferrosas. La interacción inicial puede provenir tanto de los procesos de fabricación como de los procesos de uso en servicio. Esta caída de tenacidad es fuente de grandes perjuicios económicos y por ello es observada y estudiada en industrias químicas, petroquímicas y sistemas de generación de energía.

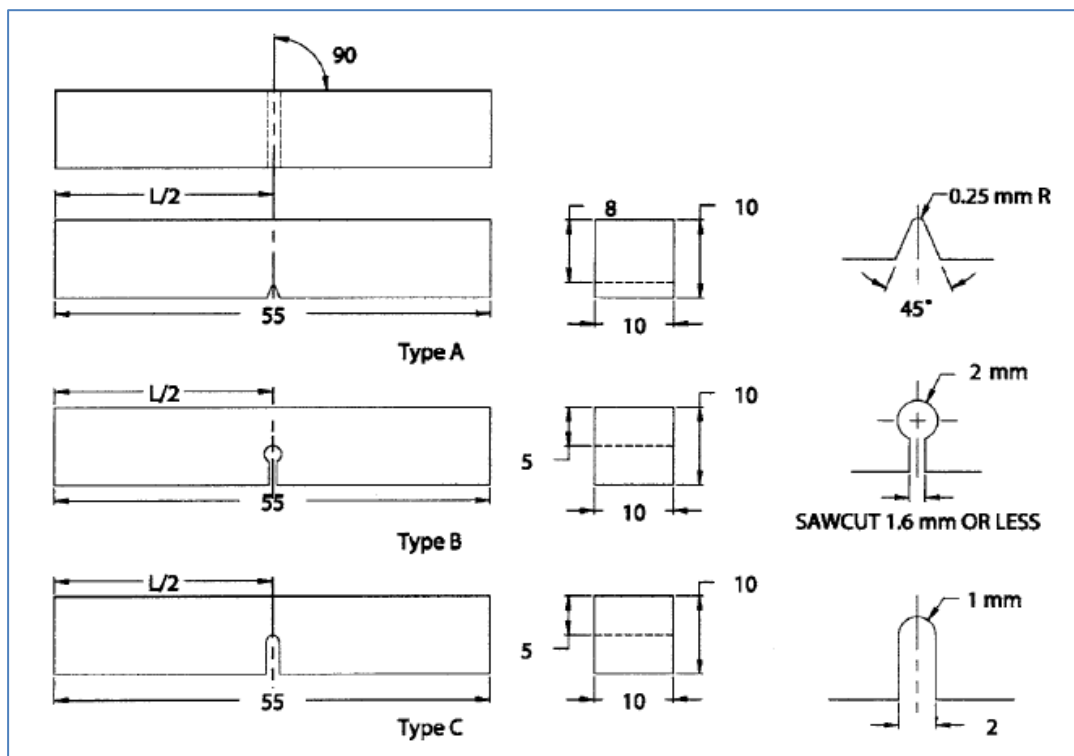
2.5. ENSAYO DE IMPACTO CHARPY

El ensayo charpy es el ensayo de impacto por excelencia y se trata de una prueba realmente sencilla, que consiste en romper un espécimen mediante un péndulo obteniendo la energía absorbida por el espécimen.

Las pruebas de impacto charpy se realizan según normas internacionales en las cuales se detallan las dimensiones de las probetas empleadas en este tipo de ensayo, así como la forma de reportar los resultados de los mismos. De acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM E23-07 [11], las muestras que se utilizan en el ensayo charpy tienen forma de paralelepípedo y se pueden utilizar tres tipos

de entalla, tal como se muestra en la figura N°4. Con respecto a los tipos de entalla mostrados en la figura N°7, la probeta charpy tipo A (entalla en V) es la más utilizada para caracterizar el comportamiento dúctil-frágil de los aceros, debido a que este tipo de entalla proporciona mejores resultados con respecto a la resistencia de los materiales a la propagación de grietas [12].

Figura N°4. Tipos de entalla charpy



Fuente: Referencia [11]

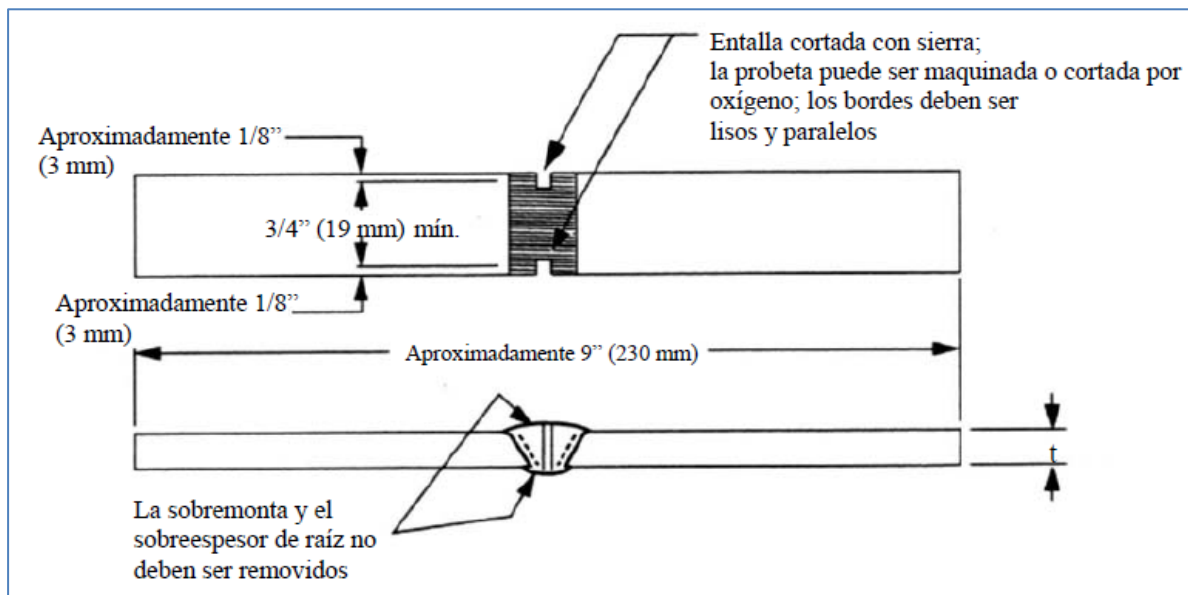
2.6. ENSAYO TRACCIÓN

El ensayo de tensión se emplea para evaluar la resistencia a la tensión del acero y otros tipos de materiales. Se encuentra estandarizado bajo la norma ASTM A370-12a [13] y consiste en someter el material a cargas o esfuerzos los cuales se van incrementando a velocidades constantes, en donde se genera deformaciones elásticas y/o plásticas como respuesta según el nivel de la carga.

Este ensayo suministra información sobre la resistencia y ductilidad del acero bajo esfuerzos de tensión uniaxial. De este se pueden obtener propiedades mecánicas de gran importancia como: límite de fluencia, resistencia máxima a la tensión, porcentaje de elongación y porcentaje de reducción en el área, entre otras.

Las probetas para el ensayo de tracción según la norma API 1104 (Figura N°5) deben ser de aproximadamente 9" (230 mm) de longitud y aproximadamente 1" (25 mm) de ancho. Ellos pueden ser maquinados o cortados con oxígeno y no es necesaria otra preparación a menos que los lados estén con muescas o no sean paralelos. Si es necesario, las probetas deben ser maquinados hasta que los lados estén lisos y paralelos [14] .

Figura N°5. Probeta de ensayo de tracción

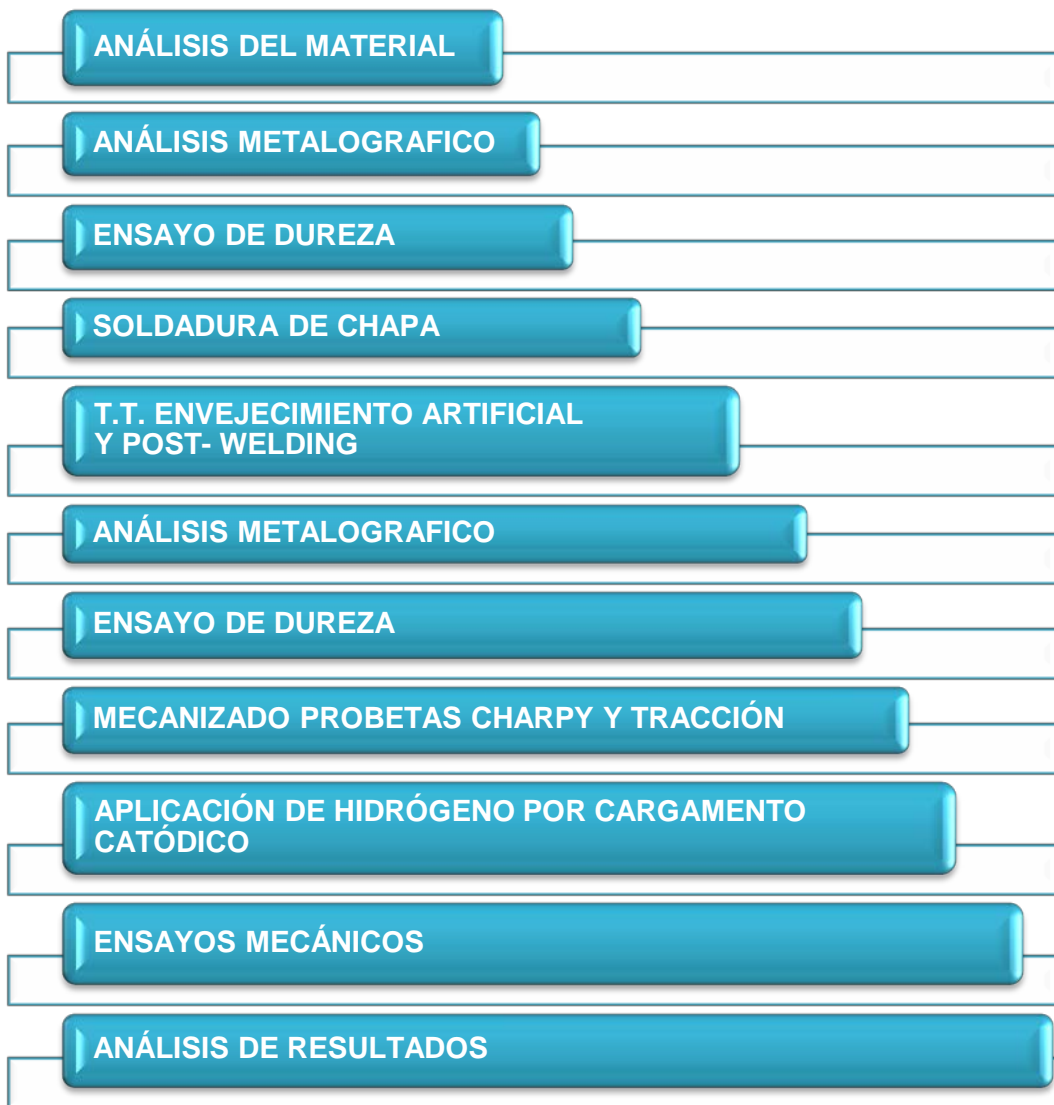


Fuente: Referencia [14]

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología de las actividades desarrolladas para el presente estudio se ilustra en la siguiente figura N°6:

Figura N°6. Diagrama de desarrollo de actividades



Fuente: Autores del proyecto

3.1. CONDICIONES INICIALES DE LA PLACA

3.1.1. MATERIAL

Se utilizó una placa de acero 2¼ Cr-1Mo (ASTM A 387 grado 22) en estado de entrega (normalizado-revenido), con medidas de 300 mm largo x 200 mm ancho x 12 mm de espesor (Anexo 2). Dicha placa fue soldada por la técnica de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW) con el objetivo de generar la zona térmicamente afectada (ZAT).

Posterior al proceso de soldadura se realizaron los tratamientos térmicos Post Welding y el envejecimiento artificial “Step Cooling”. Finalmente se realizó el cargamento catódico con el fin de analizar y comparar las variantes microestructurales y la resistencia al impacto, tanto en el metal base, como en la zona fundida y la zona térmicamente afectada (ZAT) a temperatura ambiente.

3.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA

3.2.1. METAL BASE. El análisis de composición química realizado a una muestra previamente pulida de acero 2¼ Cr – 1Mo en condición de entrega, se realizó por medio de la técnica de espectrometría de emisión óptica en el laboratorio de caracterización de materiales de la Universidad Nacional sede Medellín. Los resultados obtenidos se dan en porcentaje en peso (Tabla N°1).

3.2.2. METAL DE APORTE. Según especificaciones de la norma ASME sección VIII, División II, la soldadura de recipientes a presión de aceros 2 ¼ Cr- 1 Mo por el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW), requiere del electrodo E 9018-B3 de 1/8 de pulgada.

Tabla N°1. Resultados de análisis químico

ELEMENTO	MUESTRA: SOLDADURA 290512-132
Carbono (C)	0.160
Silicio (Si)	0.299
Manganeso (Mn)	0.486
Azufre (S)	0.005
Fosforo (P)	0.023
Níquel (Ni)	0.048
Cromo (Cr)	2.328
Molibdeno (Mo)	1.000
Aluminio (Al)	0.040
Cobre (Cu)	0.057
Plomo (Pb)	0.007
Estaño (Sn)	0.005
Titanio (Ti)	0.005
Vanadio (V)	0.010
Antimonio (Sb)	0.012
Calcio (Ca)	0.001
Zirconio (Zr)	0.000

Fuente: Referencia [15]

3.3. ELABORACIÓN DE LA JUNTA SOLDADA

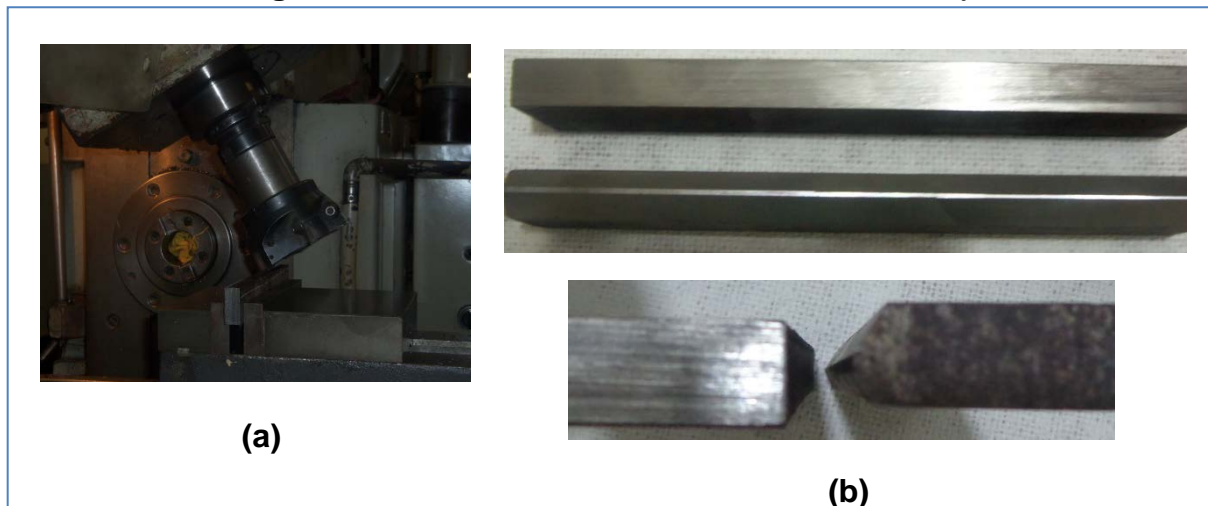
Las especificaciones del proceso de soldadura (EPS) se realizaron basándose en la norma ASME Sección VIII, División I, el cual se emplea en placas utilizadas en la producción de reactores HDT. Todo el procedimiento de preparación del material y elaboración de la junta se llevaron a cabo en las instalaciones de la Empresa Industrias Acuña, INAL, Bucaramanga, Santander.

3.3.1. ELABORACIÓN DE LA JUNTA. Para soldar la placa se requirió de una preparación previa, para ello, inicialmente se realizaron cinco cortes longitudinales, mediante una sierra eléctrica, con el fin de no modificar la

estructura durante el proceso de corte y una limpieza mediante pulidora y lima metálica para retirar la capa de óxido (Anexo 3).

La geometría de las juntas soldadas no se realizó en bisel en U, como lo indica el procedimiento original según la norma ASME. Se optó por utilizar bisel en K, con el fin facilitar la extracción de las probetas charpy en la zona térmicamente afectada (ZAT), ya que de esta forma se obtiene una ZAT uniforme. Este procedimiento se realizó en una máquina de arranque por viruta (fresadora convencional) (Figura N° 7).

Figura N°7. a. Biselado en K b. Geometría de las juntas



Fuente: Autores del proyecto

3.3.2. JUNTA SOLDADA. La junta soldada se ejecutó por el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) Por medio del electrodo AWS E9018-B3 de 1/8". Como se indicó anteriormente, con la soldadura se busca generar la ZAT, por lo que parámetros como energía de entrada, tipo de corriente y polaridad toman relevancia en nuestro estudio (Tabla N° 2).

Tabla N° 2. Energía de entrada de los electrodos

Electrodo AWS	Dimensión	Amperajes recomendados
E 9018-B3	3.2 X 350 mm (1/8")	100-145 A

Fuente: Autores del proyecto

El electrodo por ser de bajo hidrógeno requiere de almacenamiento y calentamiento previo a 200°C por 3 horas y se realizaron 3 pases por cara de la siguiente forma:

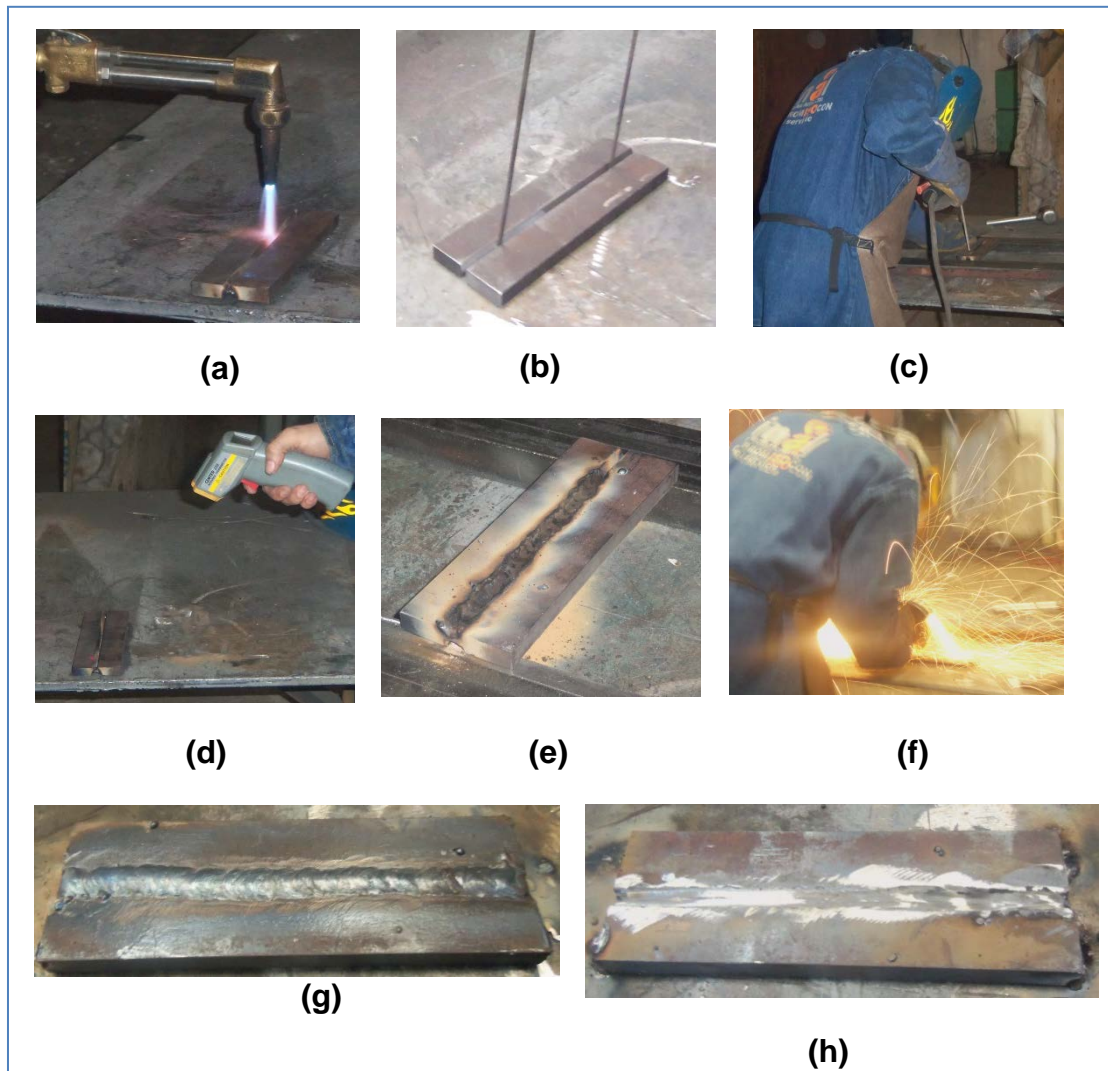
1. Primer pase - cordón de raíz
2. Segundo pase - Cordón de relleno
3. Tercer pase - Cordón de presentación

Previo al inicio de la soldadura se precalentó la placa a soldar, según lo indicado en ASME Sección XIII, división I a 240°C, proceso que se llevó a cabo durante todo el procedimiento entre la aplicación de un pase y el otro, con el fin de no provocar en el material basé distorsiones debido al choque térmico; una vez la junta ha sido soldada, la placa es dejada al aire para su enfriamiento (Figura N° 8).

3.4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

3.4.1. POST WELDING (PWHT). El objetivo de este tratamiento es aliviar tensiones residuales. Este tratamiento se realizó a una de las placas soldadas y fue llevado a cabo en la mufla del laboratorio del Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará (Figura N°9). La curva que describe el PWHT realizados se observa en la figura N°10 y los datos para cada rampa de observan en la tabla N°3.

Figura N°8. a. Calentamiento de la placa al inicio y entre pases - b. Guía de separación para realizar el primer pase - c. SMAW - d. Medida de temperatura entre pase y pase – e. muestra del segundo pase – f. Limpieza del cordón por medio de una grata – g. Limpieza final del cordón mediante una grata – h. cordón de soldadura finalizado.



Fuente: Autores del proyecto

3.4.2. STEP COOLING. La fragilización por revenido artificial se realizó al resto de las placas soldadas y fue llevado a cabo en la mufla del laboratorio del Grupo de investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará (Figura N°11). El tratamiento de Step Cooling, consistió en un calentamiento brusco a 593°C, seguido de una serie de sostenimientos y

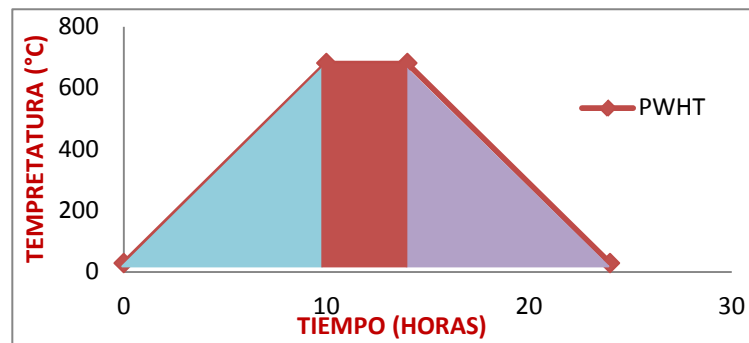
enfriamientos a tiempos y velocidades establecidas, para un total de 233 horas (Figura N°3). Esto con el fin de simular tiempo en servicio del material objeto de estudio.

Figura N°9. Placa soldada en T.T. de PWHT



Fuente: Autores del proyecto

Figura N°10. Curva de PWHT



Fuente: Autores del proyecto

Tabla N° 3. Rampas de PWHT

Rampas	Rango T° (°C)	Diferencia T° (°C)	Tiempo (h)	Velocidad (°C/h)
1-2	28-680	652	12	51,37
2-3	680	0	0.45	0
3-4	680-28	652	12	51,37

Fuente: Autores del proyecto

Figura N°11. Placa soldada en T.T. de Step Cooling



Fuente: Autores del proyecto

3.5. CONDICIÓN DE LAS PROBETAS

El mecanizado de las probetas se realizó según las especificaciones nombradas en la sección 2.5. y 2.6. en las instalaciones de la empresa Industrias Acuña INAL (Bucaramanga, Santander) (Figura N°12) y se dividieron conforme indican las tablas N°4 y N°5.

3.6. ANÁLISIS METALGRÁFICO

3.6.1. MICROSCOPIA ÓPTICA. Una muestra tomada de cada tratamiento térmico fue sometida a preparación metalográfica bajo norma ASTM E3, consistiendo de una secuencia de lijas hasta granulometría 1500 y posterior pulido en paño fino y grueso con alúmina 3μ y 0.5μ respectivamente (Figura N°13). El revelado de la microestructura fue realizado a través de ataque químico con inmersión en una solución de Nital 2% durante 120 segundos [16]. Las diferentes microestructuras fueron observadas a 50X, 100X, 200X, 500X en el microscopio óptico marca OLYMPUS. El análisis metalográfico se realizó en las instalaciones del laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, UIS.

Tabla N° 4. Número de probetas para ensayo charpy.

Condición del material	N° probetas	Ubicación de la entalla
Post Welding (PWHT)	3	Zona afectada térmicamente (ZAT)
	3	Zona fundida (ZF)
Step Cooling (SC)	3	Zona afectada térmicamente (ZAT)
	3	Zona fundida (ZF)
	3	Metal base (MB)
Cargamento catódico (CC)	4	Zona afectada térmicamente (ZAT)
	4	Zona fundida (ZF)
	4	Metal base (MB)

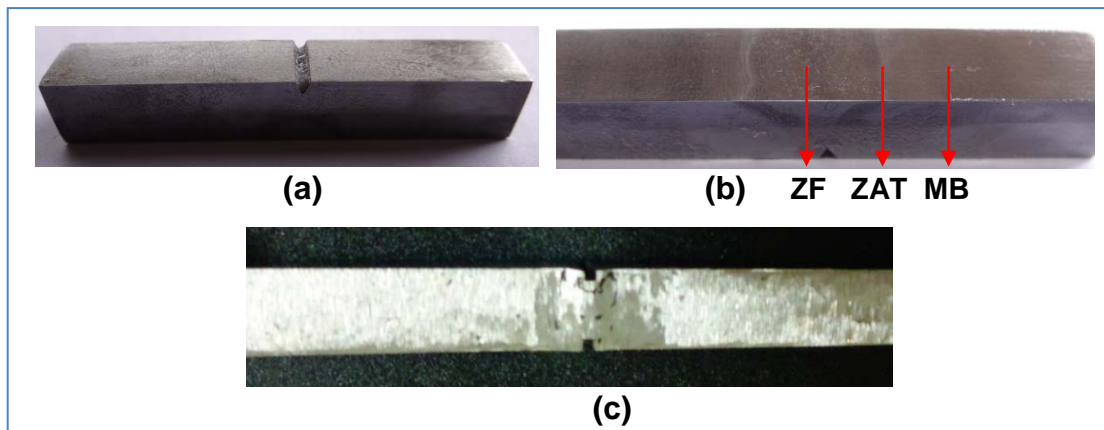
Fuente: Autores del proyecto

Tabla N°5. Número de probetas para ensayo de tracción.

Condición del material	N° probetas	Ubicación de la entalla
Step Cooling (SC)	1	Zona afectada térmicamente (ZAT)
Cargamento catódico (CC)	2	Zona afectada térmicamente (ZAT)

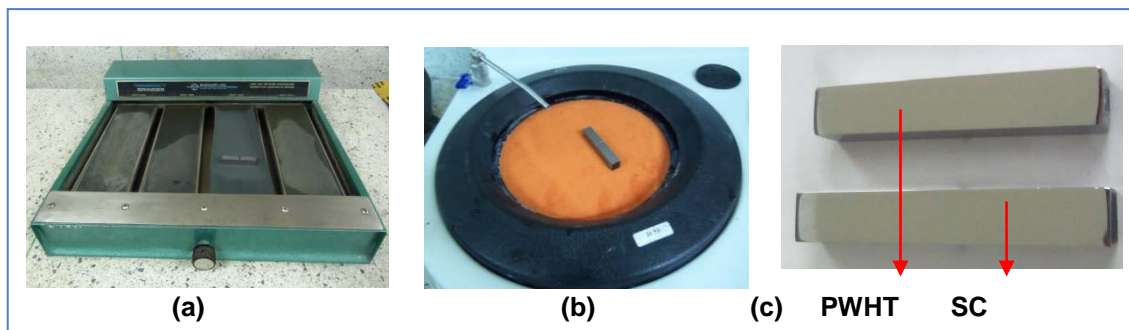
Fuente: Autores del proyecto

Figura N°12. a. Probeta charpy con entalla en V – b. Probeta charpy con ataque de Nital 2% – c. Probetas de tracción entalladas.



Fuente: Autores del proyecto

Figura N°13. a. Pulido en lija – b. Pulido en paño – c. Probetas en pulido espejo



Fuente: Autores del proyecto

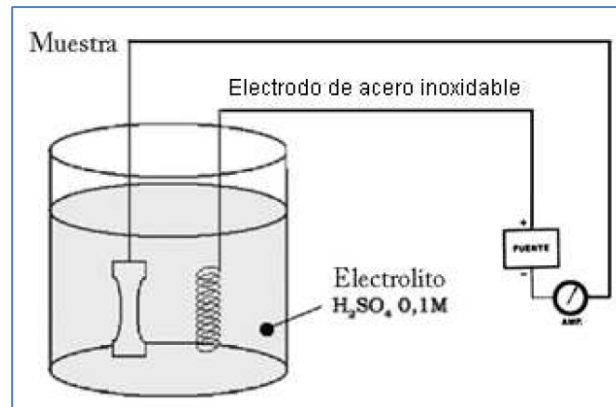
3.7. MICRODUREZA

Es un método que se utiliza para medir la resistencia de un material a ser penetrado. La huella producida por este método es tan pequeña que se observa con la ayuda de un microscopio para ser medida y valorada. El estándar que se utiliza más frecuentemente para la realización de esta prueba es la norma ASTM E-92 [17]. La toma de microdureza vickers se realizó en las instalaciones de la empresa TRANSEJES, Girón, Santander.

3.8. ABSORCIÓN DE HIDRÓGENO POR POLARIZACIÓN CATÓDICA

El proceso de absorción de hidrógeno por polarización catódica realizado a las probetas para evaluar la fragilización por hidrógeno se basa en la disociación de una solución de H_2SO_4 0.1 Molar, en una celda electrolítica cuyo cátodo está formado por la probeta y el ánodo por un electrodo de acero inoxidable (Figura N°14). Este procedimiento se realizó en las instalaciones del laboratorio de Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, UIS.

Figura N°14. Esquema de hidrogenación de probetas



Fuente: Autores del proyecto

Durante el proceso se mantiene una intensidad de corriente constante que es proporcional a la superficie de la probeta expuesta a la fragilización y necesaria para la generación de hidrógeno sobre la probeta. Se tuvo especial cuidado en evitar la adherencia de las burbujas que se forman en la superficie de la probeta, ya que aumentan la resistencia al paso de corriente disminuyendo la intensidad, para ello, se agregaron dos gotas de veneno (sulfato de carbono SC₂) a cada celda electrolítica.

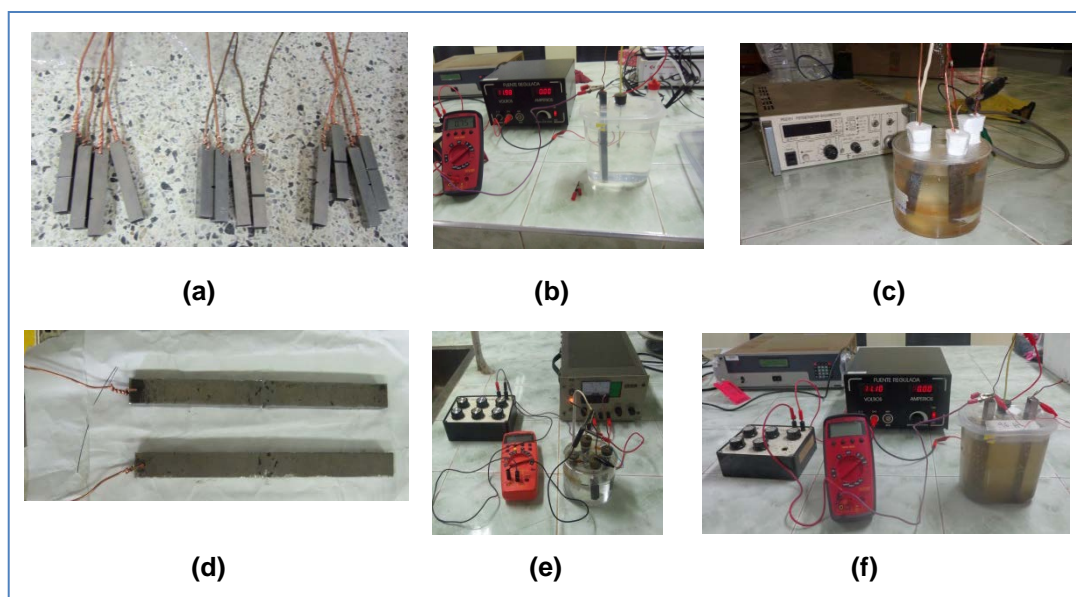
El tiempo de electrolisis es calculado teniendo en cuenta los resultados de difusibilidad y solubilidad obtenidos en ensayos de permeación realizados al mismo acero en estudio en la misma condición de envejecido artificialmente¹. A partir de las curvas de polarización potenciodinámica se tomó como base una densidad de corriente de 10 mA/cm² como un valor constante en la zona de concentración², lo que permite la generación de hidrógeno en la superficie de cada

¹ Aldrin Belisario Velosa Pacheco. Estudio del Proceso de Generación y Comportamiento de Grietas en un Acero 2 ¼ Cr - 1 Mo. Trabajo de grado de Maestría. UIS, 2004 página 68.

² Aldrin Belisario Velosa Pacheco. Estudio del Proceso de Generación y Comportamiento de Grietas en un Acero 2 ¼ Cr - 1 Mo. Trabajo de grado de Maestría. UIS, 2004 página 88.

probeta. La figura N°15 y la tabla N°6 muestra el montaje realizado y los datos calculados respectivamente.

Figura N°15. a. Probetas charpy – **b.** Celda electrolítica inicial probetas charpy – **c.** Celda electrolítica final probetas charpy – **d.** Probetas tracción – **e.** Celda electrolítica inicial probetas tracción – **f.** Celda electrolítica final probetas tracción



Fuente: Autores del proyecto

Tabla N° 6. Cálculos para determinar la corriente

N° probeta	Probeta	Ap (cm ²)	Ae (cm ²)	At (cm ²)	Corriente (mA)	Tiempo de Hidrogenación (horas)
1	charpy	2400	23,04	2376	237,6	24 - 48 - 72 - 96
1	tracción	7888	246	7642	764,2	

Fuente: Autores del proyecto

Dónde las ecuaciones de área son:

CHARPY

$$A_{\text{probeta}} = 2(ab + ac + bc)$$

$$A_{\text{entalla}} = A_{\text{base}} + A_{\text{triangulo}}$$

$$A_{\text{total}} = A_{\text{probeta}} - A_{\text{entalla}}$$

TRACCIÓN

$$A_{\text{probeta}} = 2(ab + ac + bc)$$

$$A_{\text{entalla}} = 2(ab + ac + bc)$$

$$A_{\text{total}} = A_{\text{probeta}} - A_{\text{entalla}}$$

$$\text{Corriente } I = [(10\text{mA}/\text{cm}^2) * A_{\text{total}}]$$

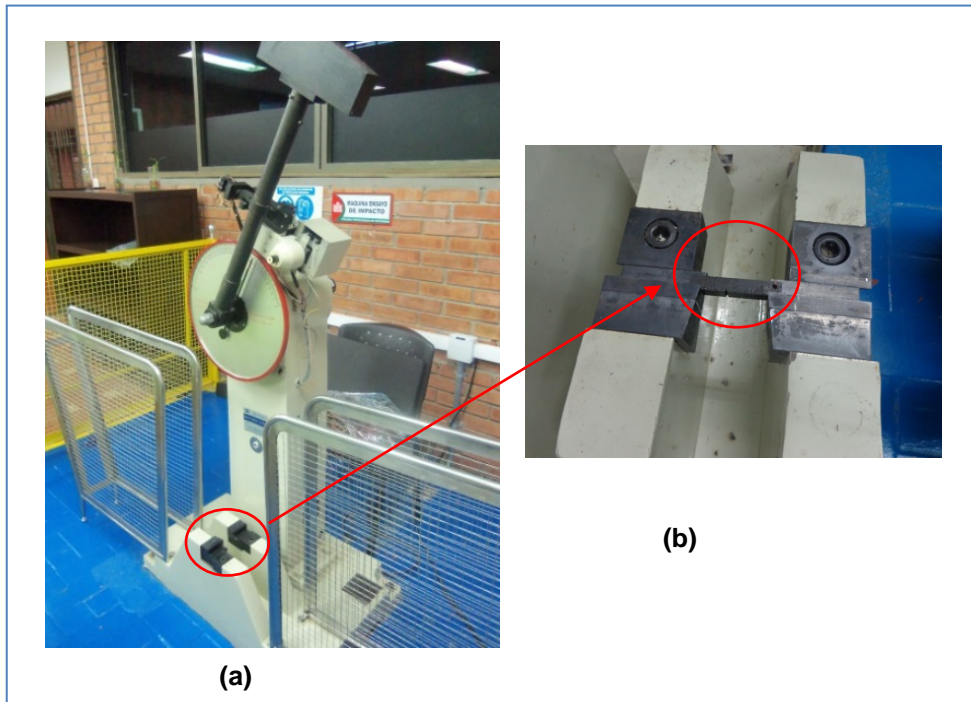
3.9. ENSAYOS MECÁNICOS

3.9.1. ENSAYO CHARPY. Las pruebas del ensayo de impacto se efectuaron a temperatura ambiente bajo los lineamientos de la norma ASTM E23-07a [11]. Fueron ensayadas tres probetas en condiciones de Post Welding y Step Cooling para condición de la ubicación de la entalla y cuatro probetas hidrogenadas a diferentes tiempos para cada condición de la ubicación de la entalla. En la sección 2.5. y en la tabla N°4 se especifica las dimensiones de las probetas y la distribución respectivamente. Este ensayo se realizó en las instalaciones del laboratorio de resistencia de materiales de las Unidades Tecnológicas de Santander, UTS (Figura N°16).

3.9.2. ENSAYO DE TRACCIÓN. Las pruebas del ensayo de tracción se efectuaron a temperatura ambiente de acuerdo con la norma ASTM A 370. Fueron ensayadas dos probetas hidrogenadas a diferentes tiempos de hidrogenación y una probeta en estado nuevo o en estado de envejecimiento artificial, con el propósito de comparar los resultados obtenidos y determinar los efectos del hidrógeno sobre la fragilización del acero estudiado. En la sección 2.6. y en la tabla N°5 se especifica las dimensiones de las probetas y la distribución

respectivamente. Los ensayos de tracción fueron realizados en el laboratorio de resistencia de materiales del Instituto Colombiano del petróleo, ICP. Utilizando una máquina universal de ensayos MTS.

Figura N°16. a. Máquina de impacto – b. Ubicación de la probeta charpy



Fuente: Autores del proyecto

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los diferentes ensayos establecidos en el desarrollo experimental.

4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

4.1.1. **METAL BASE.** En la tabla N°7 se presenta el análisis químico de las muestras.

Tabla N°7. Composición química del acero 2¼ Cr – 1 Mo

ELEMENTO		COMPOSICIÓN	
		ASTM A 387 GR 22	CONDICIÓN ENTREGA
ELEMENTOS PRINCIPALES	CARBONO (C)	0,05-0,15	0.160
	SILICIO (Si)	0,50 MAX	0.299
	MANGANESO (Mn)	0,30-0,60	0.486
	AZUFRE (S)	0,025 MAX	0.005
	FÓSFORO (P)	0,025 MAX	0.023
	NÍQUEL (Ni)	2-2,50	0.048
	CROMO (Cr)	2,00-2,50	2.328
	MOLIBDENO (Mo)	0,90-1,10	1.000
ELEMENTOS RESIDUALES	ALUMINIO (Al)		0.040
	COBRE (Cu)		0.057
	PLOMO (Pb)		0.007
	ESTAÑO (Sn)		0.005
	TITANIO (Ti)		0.005
	VANADIO (V)		0.010
	ANTIMONIO (Sb)		0.012
	CALCIO (Ca)		0.001
	ZIRCONIO (Zr)		0.000

Fuente: Referencia [19]

4.1.2. METAL DE APORTE. El electrodo utilizado AWS E 9018-B3 presenta la composición química indicada en la tabla N°8 que recomienda la AWS para la soldadura de Aceros 2¼ Cr – 1 Mo, éste último tiene similar composición química a la del metal base a soldar.

Tabla N°8. Composición química electrodo AWS E9018-B3

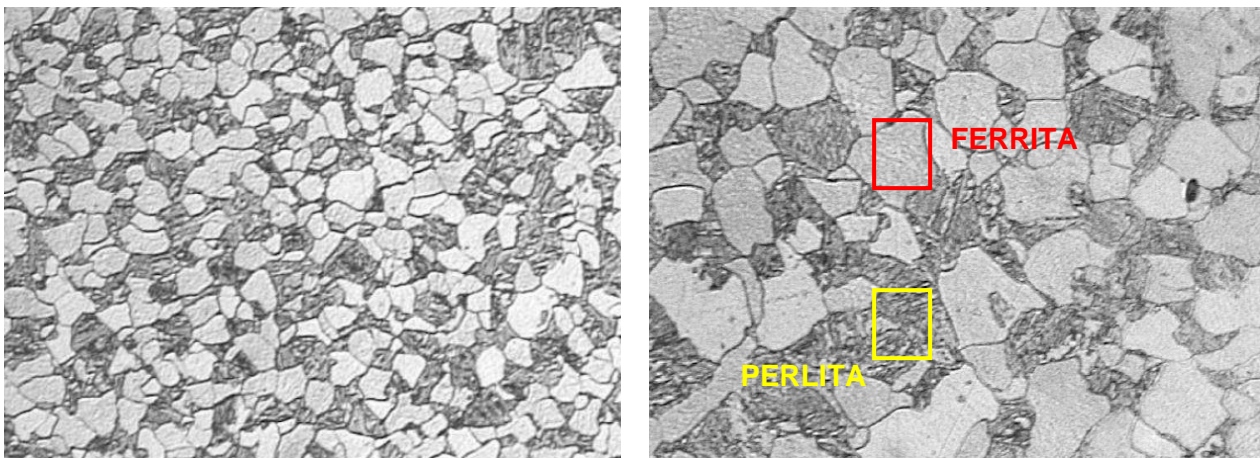
Composición química electrodo AWS E9018-B3			
C	0.05-0.12% máx	Mn	0.90% máx.
Si	0.80% máx.	S	0.04% máx.
Mo	0.90%-1.20% máx	P	0.03% máx.
Cr	0.90%-1.20% máx		

Fuente: Referencia [20]

4.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

4.2.1. MICROSCOPIA ÓPTICA. En Las figuras N°17 y N°18 se presenta la microestructura metalográfica del acero 2 ¼ Cr-1Mo en condición nueva y envejecida artificialmente con y sin soldadura, sin hidrógeno y con hidrógeno.

Figura N°17. Estado de entrega del material (sin hidrógeno - sin soldadura)



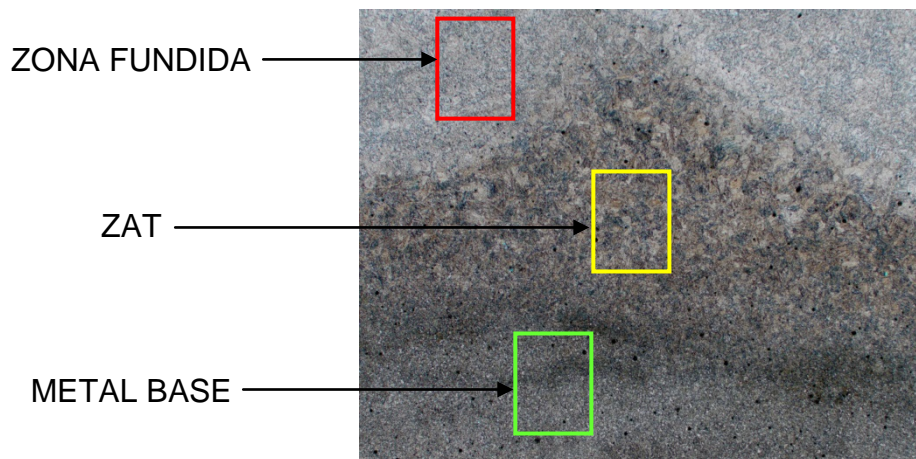
(A) 100X

(B) 200X

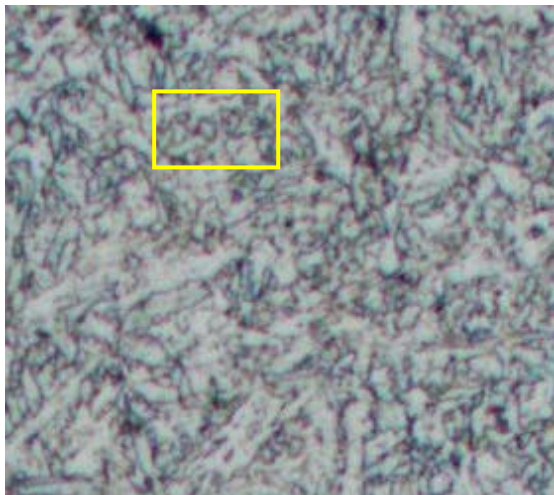
Fuente: Autores del proyecto

En condición de entrega se pueden observar una microestructura de matriz bainítica compuesta por granos de ferrita, granos de perlita y un gran número de carburos finamente dispersos dentro de los granos.

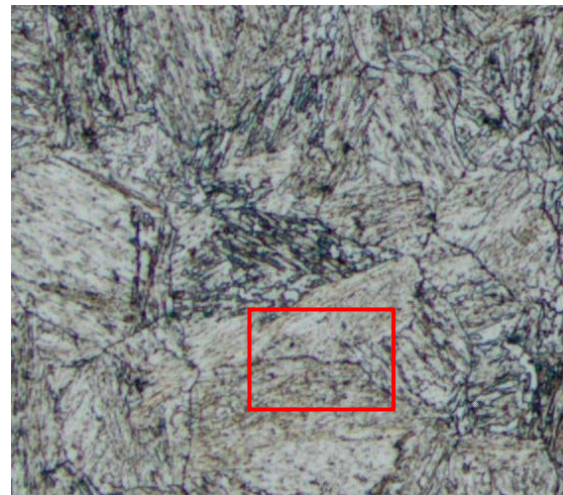
Figura N°18. Estado de envejecimiento artificial "Step Cooling" (con hidrógeno - con soldadura)



(A) 50X



(B) Zona fundida-100X



(C) ZAT -200X

Fuente: Autores del proyecto

Por efecto del envejecimiento la matriz bainítica se desdobra quedando ferrita acicular (seleccionado con el recuadro amarillo) con precipitados tanto en el interior del grano austenítico como en su límite de grano, de igual manera inicia la esferoidización de carburos. Algunos carburos en los granos de ferrita (seleccionado con el recuadro rojo).

4.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO (CHARPY)

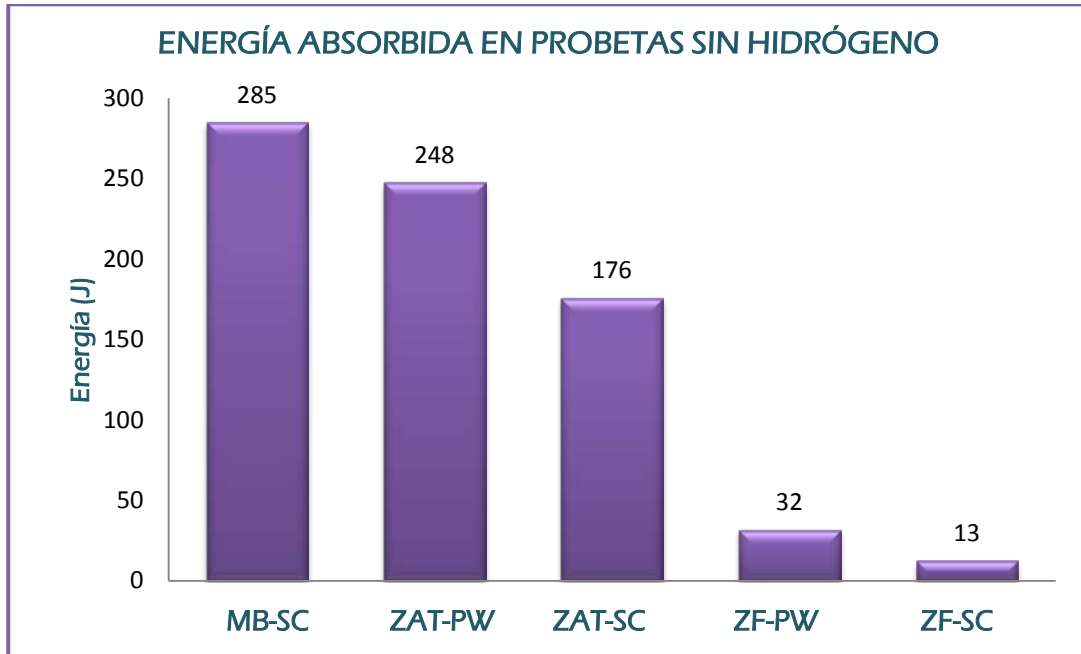
En la Figura N°19 y N°20 se muestran la comparación de la energía absorbida para el acero 2¼ Cr-1Mo hidrogenado y no hidrogenado; los valores obtenidos del ensayo de impacto (charpy) se presentan en la tabla N°9.

Tabla N° 9. Resultados energía absorbida en el ensayo charpy

ESTADO	UBICACIÓN ENTALLA	CVN (Joules)	CVN (Joules)	CVN (Joules)	CVN (Joules)	PROM (J)
Post Welding	Zona fundida	31	33	32	-	32
	ZAT	229	227	290	-	248.6
Step Cooling	Zona fundida	12	9	18	-	13
	ZAT	150	154	224	-	176
	Metal base	281	279	296	-	285
Horas cargamento catódico		24 horas	48 horas	72 horas	96 horas	-
Cargamento catódico	Zona fundida	5	5	4	3	4.25
	ZAT	158	144	112	97	127.7
	Metal base	164	148	138	127	144.2

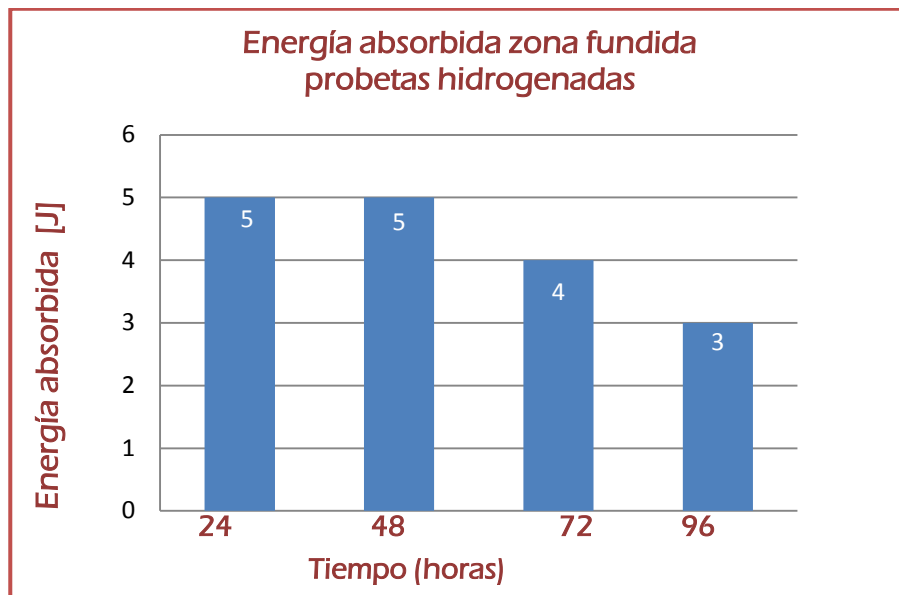
Fuente: Autores del proyecto

Figura N°19. Energía absorbida del acero sin hidrógeno

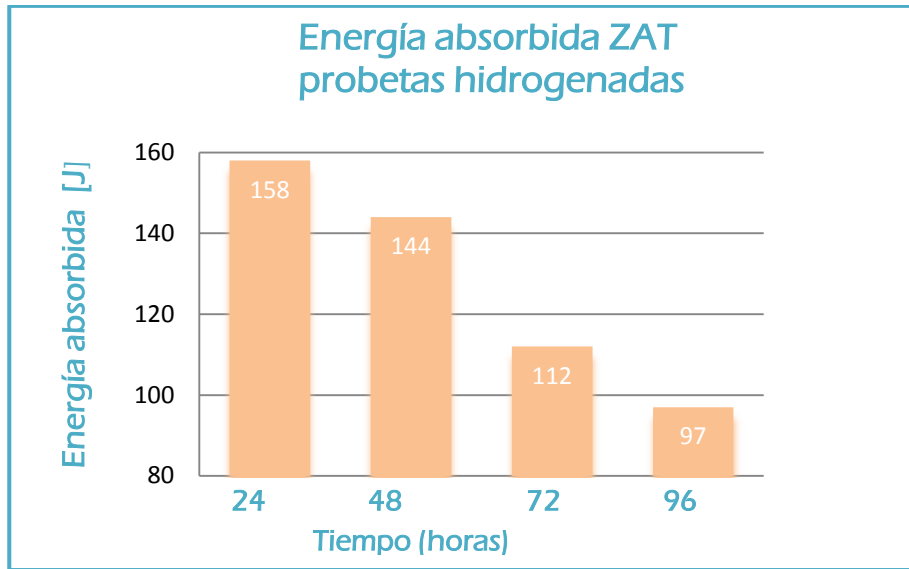


Fuente: Autores del proyecto

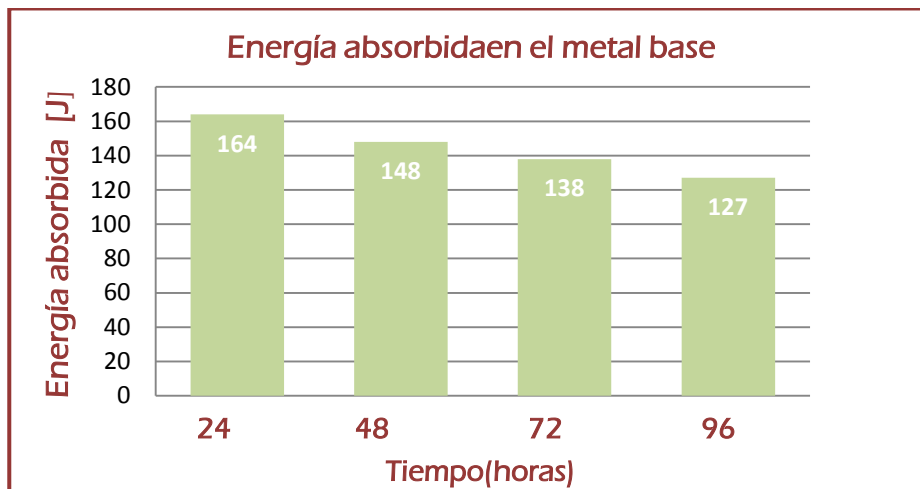
Figura N° 20. Energía absorbida del acero con hidrógeno



(A)



(B)



(C)

Fuente: Autores del proyecto

4.4. RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN

En la siguiente Figura N°21 se muestran las curvas de tensión - deformación y en las figuras N°22 a N°24 se muestra la comparación de los valores promedios de

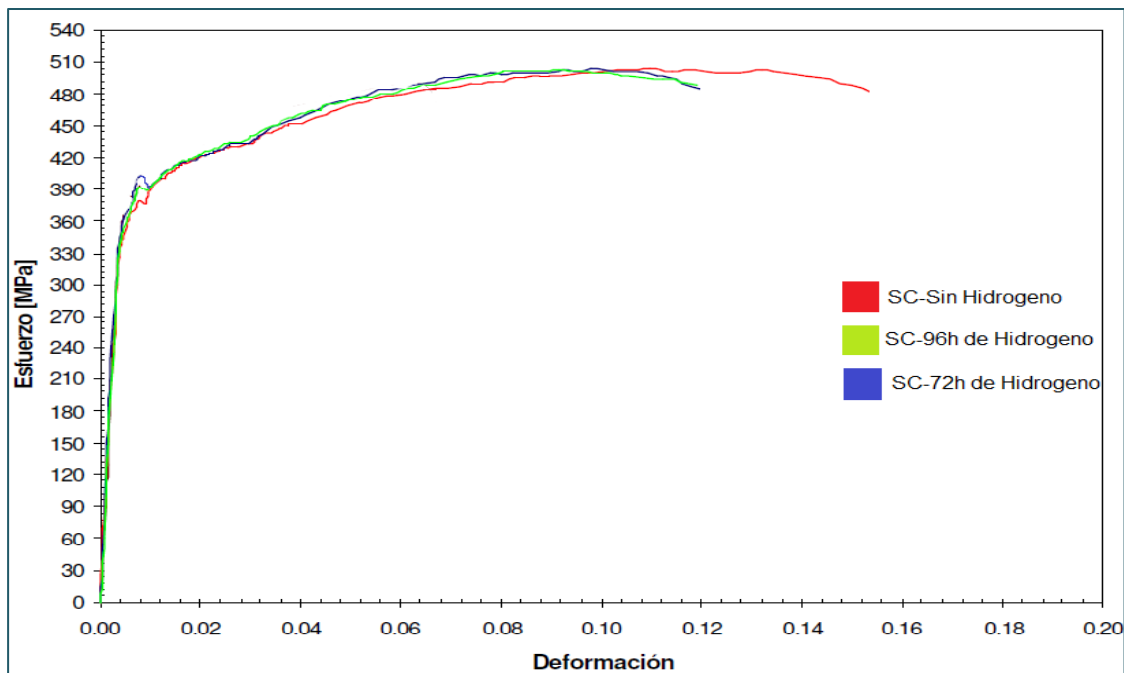
las propiedades mecánicas obtenidas a partir de la curva para el acero 2¼ Cr-1Mo hidrogenado y no hidrogenado; los valores obtenidos del ensayo de tracción se presentan en la tabla N°10.

Tabla N°10. Resultados ensayo de tracción

Condición de las probetas	UTS [MPa]	Ys [MPa]	%Elongación
SC- SIN hidrógeno	502.12	403.12	8.5
SC -72h de hidrógeno	496.25	391.65	6.6
SC- 96h de hidrógeno	501.18	383.85	5.5

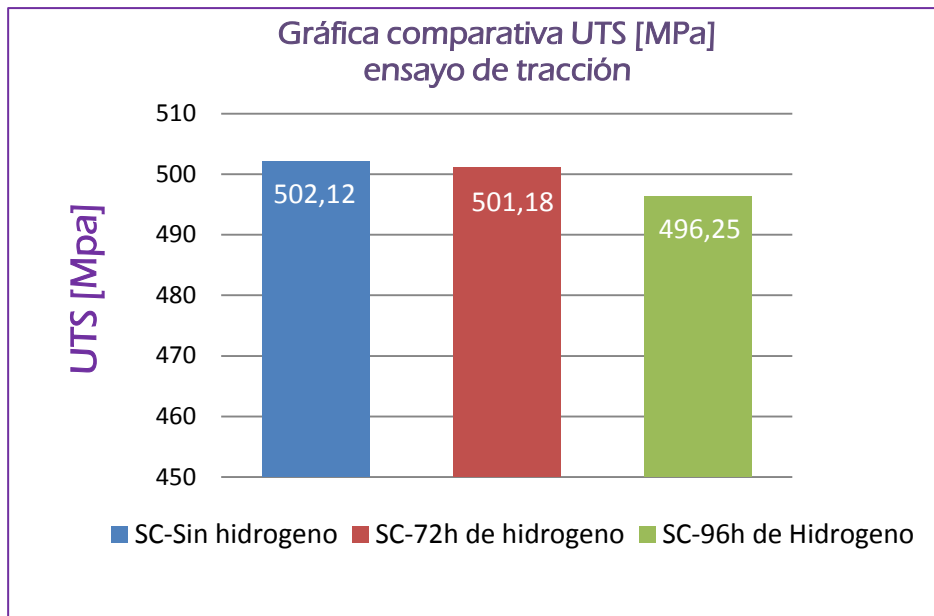
Fuente: Autores del proyecto

Figura N°21. Curva de esfuerzo Vs deformación, tracción con hidrógeno y sin hidrógeno.



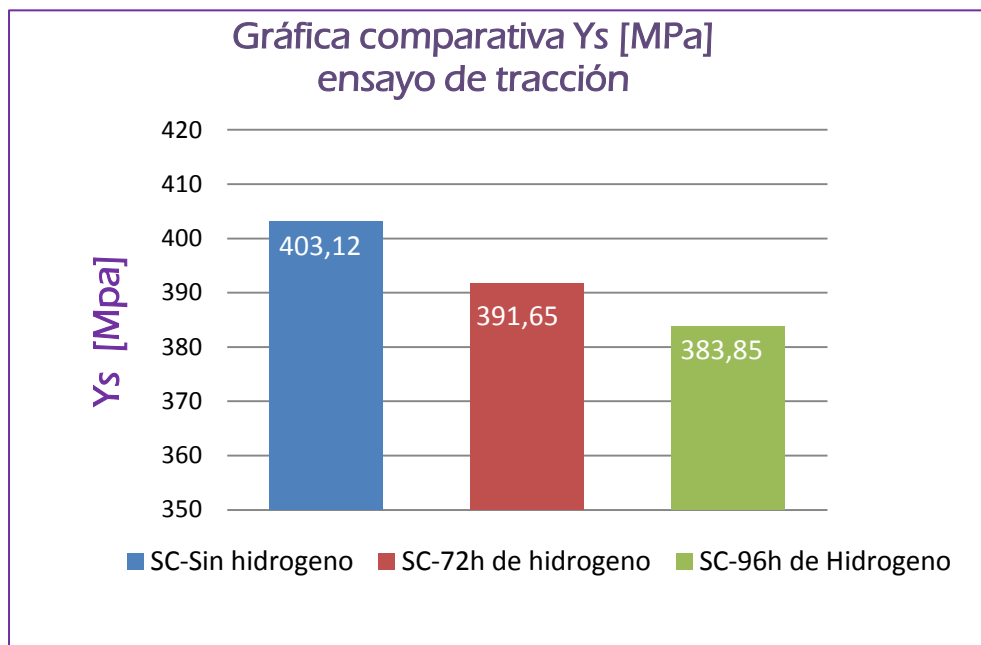
Fuente: Autores del proyecto

Figura N°22. Comparación de UTS [MPa] probetas tracción



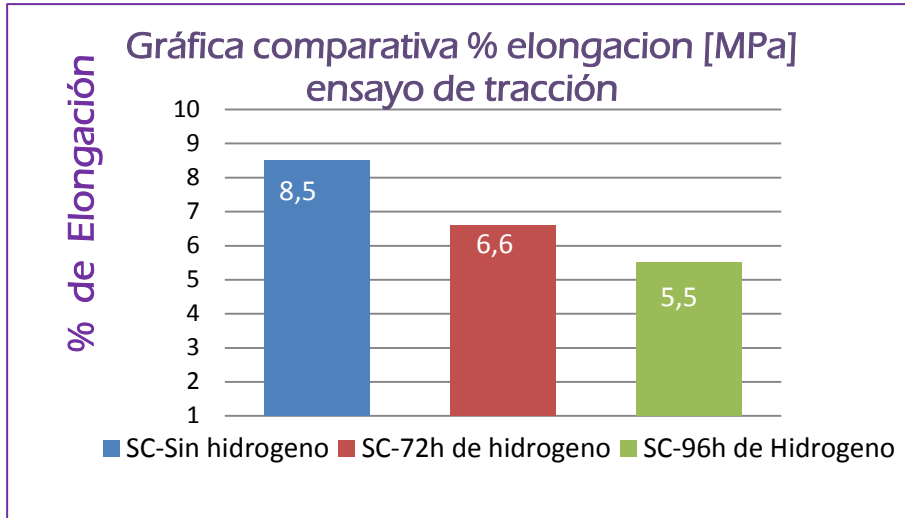
Fuente: Autores del proyecto

Figura N°23. Comparación de Ys [MPa] probetas tracción



Fuente: Autores del proyecto

Figura N°24. Comparación de % Elongación probetas tracción



Fuente: Autores del proyecto

4.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE MICRODUREZA

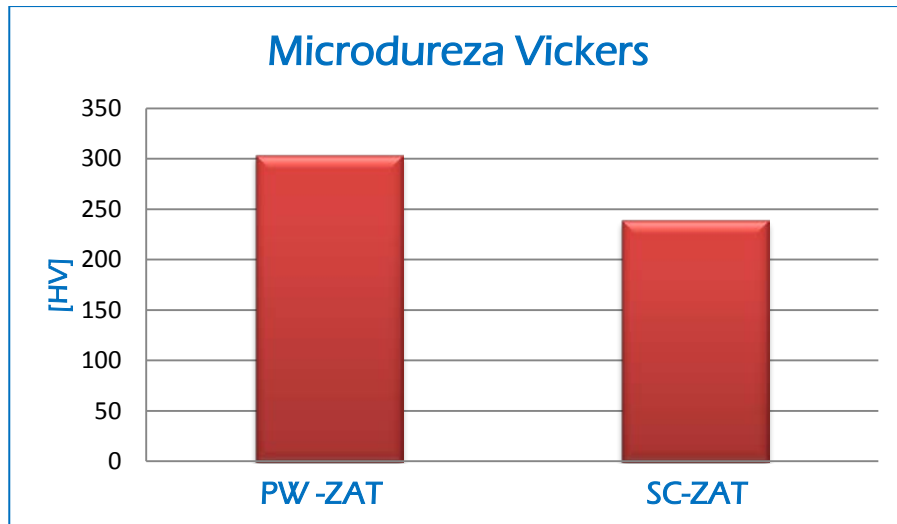
Los datos de microdureza fueron tomados a 0.7 mm de la entalla. Se utilizó una carga de 1000 [Kg] y una distancia de 1.0 mm entre cada punto.

Tabla N°11. Datos de microdureza

MICRODUREZA DE LAS PROBETAS [HV] EN LA ZAT	
STEP COOLING (Enfriamiento escalonado)	POST WELDING
236	300
248	311
233	312
241	303
238	295
Prom : 239.2	Prom: 304.2

Fuente: Autores del proyecto

Figura N°25. Comparación de microdureza Vickers



Fuente: Autores del proyecto

Observando los resultados de microdureza, en donde se hizo un barrido de 5 puntos en la ZAT, se puede notar que existe una variación notoria en los resultados entre las probetas con Post Welding y Step Cooling, esto debido al tratamiento térmico en donde se realizó la toma de microdureza. En este punto (ZAT) es donde la matriz bainítica al calentarse empieza a liberar el poco carbono que contiene combinándose con los elementos de aleación Cr y Mo, los cuales se precipitan en forma de carburo, razón por la cual donde se encontraba una estructura bainítica en forma de placas se desdobla, quedando ferrita acicular, con carburos precipitados lo que nos permite comprobar que el material está más afectado en envejecimiento artificial.

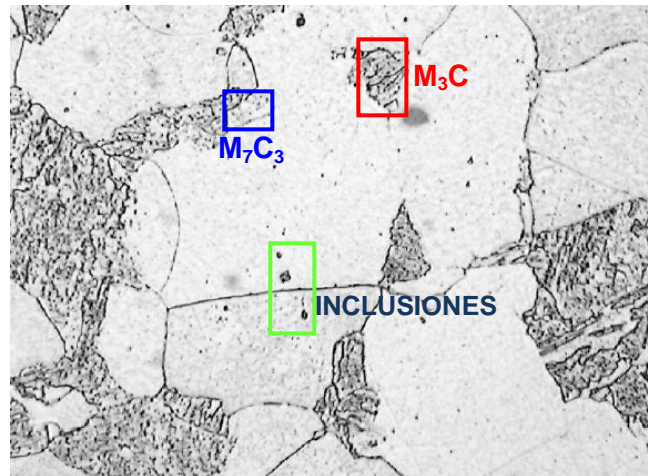
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

5.1.1. METAL BASE. Los valores indicados en la tabla N°7 encontrados por análisis químico, muestra que la composición química de los elementos encontrados en la muestra de acero 2 ¼ Cr-1Mo, se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma ASTM A 387/A 387 M-99 para materiales de Grado 22, Clase 2. Al comparar, no se encuentran discrepancias. En la norma no se especifican elementos residuales.

5.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Figura N°26. Estado de entrega del material (sin hidrógeno - sin soldadura)



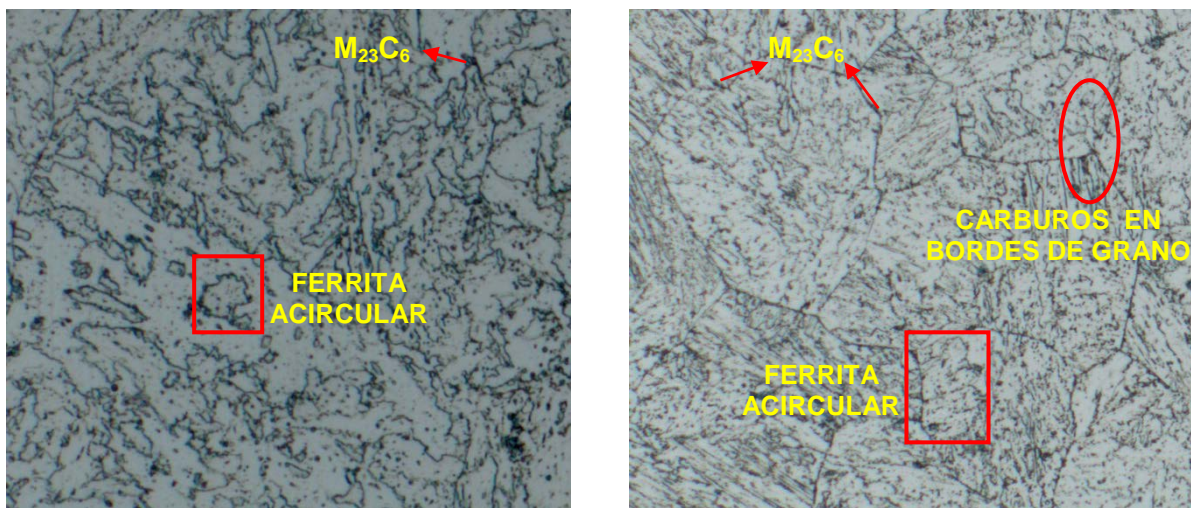
500X

Fuente: Autores del proyecto

En condición de entrega del material sin hidrógeno ni aplicación de soldadura, se observan granos de ferrita y perlita con algunos carburos finamente dispersos tanto al interior como en los bordes de grano ferrítico. Se presume que estos son de tipo M_3C que es el responsable de la mayor resistencia de la aleación y M_7C_3 ,

donde M es esencialmente molibdeno son carburos típicos de muestras no envejecidas, es decir sin ser expuestas a alta temperaturas y por tiempos prolongados. Normalmente los precipitados de tipo M_2C , carburos pequeños y más claros, aparecen en gran cantidad dentro de los granos en forma de bastones. [22]

Figura N°27. Estado de envejecimiento artificial “Step Cooling” (con hidrógeno - con soldadura)



(A) Zona fundida-500X

(B) ZAT-500X

Fuente: Autores del proyecto

En condición de envejecida artificialmente, la matriz bainítica al calentarse empieza a liberar el poco carbono que contiene combinándose con los elementos de aleación Cr y Mo, los cuales se precipitan en forma de carburo, razón por la cual donde se encontraba una estructura bainítica en forma de placas se desdobra, quedando ferrita acicular, con carburos precipitados. Se aprecia un aumento en la precipitación de carburos y la presencia de aglomerados (indicativo de coalescencia), se presume que son de tipo $M_{23}C_6$ o de tipo M_7C_3 que por lo general se presentan en una coloración más clara. [22]

5.3. ANÁLISIS ENSAYO DE IMPACTO

En la tabla N°9 y la figura N°19 se pueden observar los resultados de las diferentes probetas ensayadas a las que se les realizó Step Cooling (envejecimiento artificial) sin presencia de hidrógeno. Se aprecia la variación de la energía absorbida en las diferentes zonas del acero 2¼ Cr-1Mo, observando que la menor energía se presenta en la zona fundida reportando un valor promedio de 13 Joules, arrojando como resultado una resistencia al impacto muy baja en el ensayo a temperatura ambiente. Ahora bien, si se observa el MB reporta una energía de 285 Joules, alta, comparada con la de la zona de fusión en estado de Step Cooling por lo que se puede concluir que la zona del MB presenta mayor energía debido a que es la zona que está menos expuesta a cambios microestructurales ocasionados por la soldadura aunque sufre cambios por el envejecimiento artificial, sigue reportando una muy buena resistencia al impacto sin presencia de hidrógeno.

Por otro lado se ensayaron probetas bajo las condiciones de Step Cooling a diferentes tiempos de cargamento de hidrógeno. Observando la figura N° 20 (A) se puede apreciar que la resistencia al impacto a temperatura ambiente en la zona fundida, disminuye con el aumento del tiempo de hidrogenación y que este reporte de energía absorbida es aún más bajo que el de las probetas a las que se les realizó solamente envejecimiento artificial. En la figura la N° 20 (B) se reportan los resultados de resistencia al impacto de la zona térmicamente afectada y de forma progresiva se observa como disminuye la resistencia al impacto realizado a temperatura ambiente a medida que aumenta el tiempo de exposición del cargamento por hidrógeno. Notando así que el hidrógeno influye notoriamente, al ir disminuyendo dicha energía absorbida. En la figura N°20 (C) se observan los resultados de la energía absorbida ensayados a temperatura ambiente, en el material base con los respectivos tiempos de hidrogenado y el descenso que ocurre en la resistencia al impacto en función de tiempo de hidrógeno se aprecia

allí de una forma no tan pronunciada, pero mostrando que el hidrógeno si afecta esta resistencia al impacto.

Enfatizando, en el estudio de la zona térmicamente afectada (ZAT), después de realizarse el tratamiento de Step Cooling y de cargamento por hidrógeno, se concluye que estos valores bajos de energía absorbida van asociados con el hecho de que la ZAT por sí sola, sufre un cambio brusco en la morfología de los granos al haber sido sometido a cambios de temperatura como consecuencia de la soldadura y posterior a eso fue sometida a un tratamiento de envejecimiento artificial y generación de una atmosfera de hidrógeno. Los cambios microestructurales que sufre el acero en especial la zona térmicamente afectada y las demás zonas adyacentes, van deteriorando las propiedades mecánicas y la condición envejecida presenta mayor susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno debido a la gran cantidad de acumulación de este en la muestra y la presencia de inclusiones y de carburos precipitados de forma no homogénea que contribuye a la segregación preferencial de hidrógeno en un grano en relación a otro.

A manera de documentación bibliográfica de otros estudios realizados se puede decir que los aceros tienen adecuada tenacidad a temperatura ambiente. Sin embargo, severos mecanismos de fragilización pueden ocurrir durante el servicio a alta temperatura. Los ensayos de tenacidad y ductilidad son usados para evaluar dichos mecanismos. Un método para evaluar la tenacidad es estimar la temperatura de transición de dúctil a frágil de un material, ensayando probetas charpy con entalla a varias temperaturas.

Los aceros son susceptibles a absorber menor energía de impacto con la disminución en la temperatura de ensayo. Este cambio de energía es acompañado por una transición de apariencia en la fractura fibrosa (frágil) a apariencia cristalina (dúctil). La temperatura a la cual cambia la apariencia de la fractura se define

como la temperatura de transición (FATT), define un cambio en el modo de fractura causado por un mecanismo de corte y es un concepto comúnmente usado para medir la degradación de la tenacidad debido a la fragilidad por la fragilización durante el servicio [25]

5.4. ANÁLISIS ENSAYO DE TRACCIÓN

En la figura N°21 y la tabla N°10 se muestra la curva y resultados de los ensayos de tracción realizado a las 3 probetas, una sin cargamento catódico de hidrógeno y dos con tiempo de cargamento de 72 horas y 96 horas de hidrógeno, entalladas en la ZAT. Se observa en la condición de envejecido artificial sin hidrógeno los mayores valores de límite de fluencia, último esfuerzo, y % de elongación, con una diferencia no tan pronunciada en comparación con las dos probetas envejecidas e hidrogenadas. El efecto del hidrógeno en las propiedades mecánicas como la pérdida de ductilidad es uno de los efectos ocasionados en la ZAT y en general en los aceros 2 ¼ Cr-1Mo, puesto que esta zona ha sufrido constantes cambios microestructurales desde que se realizó la aplicación de la soldadura. Al existir una zona térmicamente afectada (ZAT) es de esperarse que en condición envejecida artificialmente presente mayor susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno debido a la gran retención de este en esta zona y a lo largo de todo el acero. Otro factor influyente es la presencia de inclusiones y de carburos precipitados de forma no homogénea que contribuye a la segregación preferencial de hidrógeno en un grano en relación a otro.

Observando los datos de la curva de la muestra que no contiene hidrógeno, se puede decir que la variación que se da en comparación de las otras muestras con hidrógeno se atribuye a la dispersión de partículas finas y la presencia de un campo elástico de deformación elástica en la matriz debido a la presencia de elementos en solución sólida que representan barreras efectivas al movimiento de las dislocaciones [20].

Es importante resaltar que estos aceros están diseñados para soportar condiciones de altas temperaturas y por ende el comportamiento de sus propiedades mecánicas serán las mejores, pero este estudio se enfoca en la influencia de del hidrógeno como factor de deterioro y fragilizador de este acero, en especial de la zona térmicamente afectada como consecuencia de cambios microestructurales sufridos por el proceso de soldadura y el proceso de envejecimiento artificial "Step Cooling". En la curvas observadas se nota que hay una leve diferencia entre los datos de la probeta no hidrogenada y las hidrogenadas, teniendo en cuenta que el ensayo se realizó a temperatura ambiente, pero si se hace referencia a consulta bibliográfica y estudios realizados de este acero 2¼ Cr-1Mo, es muy importante decir que las propiedades mecánicas de ductilidad y resistencia se vean afectadas con el incremento de tiempo a exposición en atmósferas de hidrógeno cuando estos equipos o piezas se encuentren en servicio a temperaturas altas o agresivas.

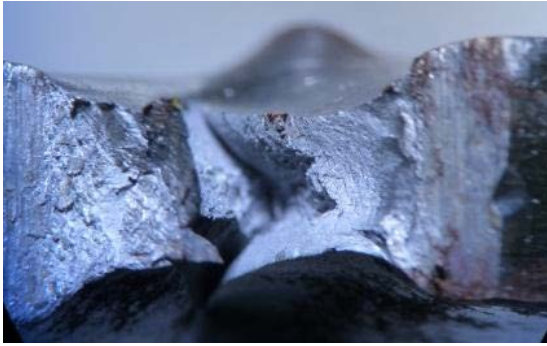
5.5. ANÁLISIS DE LA FRACTURA CHARPY

Figura N°28. Análisis de fractura en probetas envejecidas - no hidrogenadas



La fractura que se presenta es una fractura dúctil, de aspecto fibroso y rugoso, se observa una gran deformación de la probeta, pero no alcanza a romper en su totalidad, este proceso absorbió gran cantidad de energía.

(A) Post Welding - ZAT



Fractura dúctil, aspecto fibroso, y a esto se le atribuye a que el material haya absorbido más energía. Hay una mayor deformación y un corte casi del 100%.

(B) Step Cooling - ZAT

Fuente: Autores del proyecto

Figura N° 29. Análisis de fractura en probetas envejecidas – hidrogenadas
ZAT



(A) SC- Con hidrógeno a 48 horas



(B) SC - con hidrógeno 72horas



(C) SC –con hidrógeno a 96 horas

Fuente: Autores del proyecto

Las anteriores fotografías muestran las probetas que se cargaron con hidrógeno a 48, 72 y 92 horas, respectivamente. Podemos apreciar una fractura dúctil, de aspecto fibroso, rugoso y color mate. Se observa claramente que estas probetas a pesar de estar expuestas al hidrógeno absorbieron alta energía al ser impactadas. Como aspecto importante se analiza la forma de deformarse la probeta que viene marcada por un desprendimiento progresivo en función del tiempo de exposición en hidrógeno y por ultimo estas tienden a separarse totalmente .

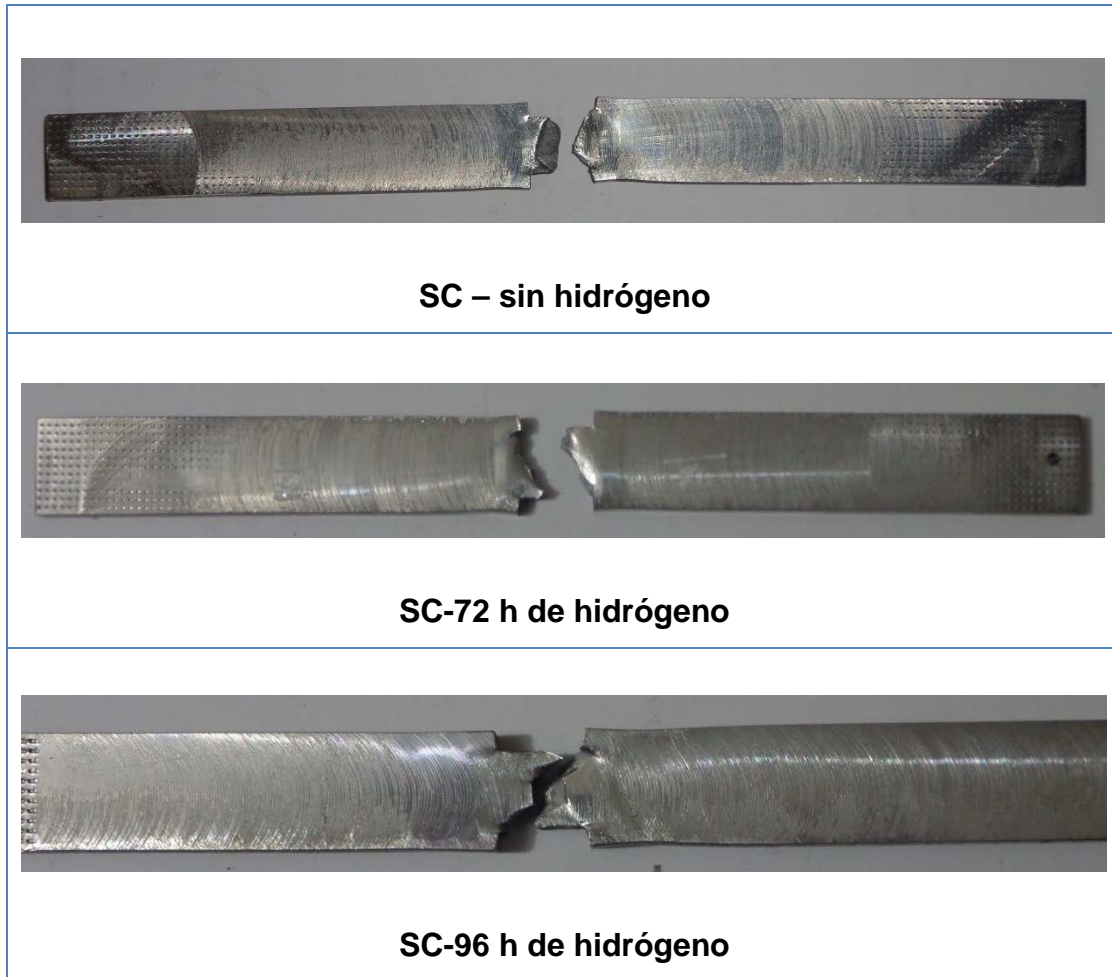
5.6. ANÁLISIS DE LA FRACTURA TRACCIÓN

Figura N° 30. Análisis de fractura en probetas envejecidas – hidrogenadas y no hidrogenadas



Fuente: Autores del proyecto

Figura N° 31. Probetas de tracción fracturadas



Fuente: Autores del proyecto

Una entalla superficial, además de ser un concentrador de esfuerzos, produce un estado triaxial de esfuerzos; en estas muestras tenemos una zona fibrosa, rugosa y de color mate, típica de una fractura dúctil, fisuras por desgarro que se debe a la gran cantidad de deformación plástica, que se va desplazando del centro al extremo de la entalla.

El proceso de soldadura evita el intenso acuellamiento o elongación del material y que la zona térmicamente afectada sufra deformación plástica por elongación de

sus granos. Se podría esperar el aspecto de fractura frágil que va asociada a la presencia de hidrógeno, pero como se aprecia en los resultados (Tabla N°10) se puede analizar que este acero presenta buena resistencia a la fragilización por hidrógeno y aunque se evidencia que este elemento si afecta al acero ya que hay zonas de cuasi clivaje, no se obtienen superficies típicas de fractura frágil.

6. CONCLUSIONES

Este estudio permitió aplicar los principales fundamentos teóricos del comportamiento del hidrógeno en la ZAT de un acero 2 ¼ Cr -1 Mo con tratamiento térmico de envejecimiento artificial “Step Cooling” y la variación de sus propiedades mecánicas.

Las condiciones analizadas para el acero 2,25 Cr-1Mo en estado entrega y envejecido artificialmente se espera una microestructura bainítica predominantemente con carburos homogéneamente dispersos. La zona térmicamente afectada y el acero 2¼ Cr- 1Mo en proceso de envejecimiento presenta una microestructura bainítica, con granos más gruesos y matriz ferrítica con una fuerte precipitación de carburos finos,

Los resultados arrojados en los ensayos realizados a temperatura ambiente, demuestran que hay disminución de la resistencia al impacto y ductilidad con el aumento de la concentración de hidrógeno y el T.T de Step Cooling, pero no hubo una modificación significativa de la resistencia mecánica, ni la dureza.

La tendencia de leve fragilización que se presenta en el análisis de fractura, se da como consecuencia del transporte de los átomos de hidrógeno por las dislocaciones. Cuando los átomos de hidrógeno y las dislocaciones interactúan se dificulta el deslizamiento plástico, lo que produce, que el proceso de deformación plástica se altere. El hidrógeno favorece el mecanismo de fractura con deformaciones macroscópicas menores de las esperadas.

Con la presencia de hidrógeno, se observó un cambio en el modo de fractura dúctil a casi clivaje y finalmente intergranular debido al envejecimiento.

7. RECOMENDACIONES

Realizar este estudio, pero sujeto a servicio y deterioro en condiciones naturales.

Efectuar ensayo charpy y ensayo de tracción en atmosferas de hidrógeno a diferentes rangos de temperaturas.

Realizar este estudio en aceros más avanzados y de mejores propiedades mecánicas con fines comparativos.

Simular las condiciones de juntas soldadas con operación del reactor en ambiente de hidrógeno y altas condiciones de presión y temperatura, de modo que se evalué la posibilidad de fragilización por hidrógeno en la ZAT y la variación de sus propiedades mecánicas.

Efectuar otros estudios enfocados a los efectos sinérgicos de la fragilización por revenido y la fragilización por hidrógeno aplicando las técnicas de charpy instrumentado, CTOD y tracción con entalla con probetas soldadas, para avanzar en el conocimiento de este acero y el comportamiento de la ZAT.

Plantear un esquema de análisis para saber cuánto hidrógeno difunde y verificar si las probetas si están hidrogenadas.

Realizar ensayos no destructivos para poder analizar la calidad de la soldadura antes del cargamento catódico y los ensayos mecánicos.

Hacer dos ensayos, uno con probetas en estado de entrega y sin soldadura y otro con todos los tratamientos térmicos y ensayos posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jaime Eduardo Beltrán Caicedo. Evaluación de la fragilización por revenido de un acero 2¼ Cr-1Mo. Trabajo de grado. UIS, 2012 página 13.
- [2] ASM. Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys. Metal Handbook, volumen.1, Metals Park, Ohio, 1990.
- [3] American Petroleum Institute. Steels for hydrogen service at elevated temperatures and pressures in petroleum refineries and petrochemical plants, Supplement 1. Publication 941, Washington, 1998.
- [4] Radaj D. Heat effects of welding; temperature field, residual stress, distortion. Springer-Verlag Berlin, 1992.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. Properties and Selection of Iron, Steels and High Performance Alloys. Ed digital PDF. United States of America: ASM Volumen 1. Páginas 943-960.
- [6] Erwin W.E. Ekerr J.G. The use of quenched and tempered 2V₄C₁ - 1Mo Steel for thick wall reactor vessels in petroleum refinery processes: an interpretative review of 25 Years of research and application. New York, USA: *Welding Research Council*, v.275, 64 p, Feb., 1982.
- [7] Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products, United States: ASTM A370-10.
- [8] American Petroleum Institute, materials and fabrication of 2 1/4cr-1mo, 2 1/4cr 1mo-1/4v, 3cr-1mo, and 3cr-1mo-1/4v Steel heavy wall pressure Vessels for high-temperature, High-pressure hydrogen service, API recommended practice 934-a second edition, may 2008.
- [9] Claudia Fernanda Gamboa Jaime. Estudio de ataques selectivos para la identificación de carburos en el acero 2.25 Cr - 1Mo envejecidos en servicio y artificialmente por medio de metalografía óptica. Trabajo de grado. UIS, 2012 página 32.
- [10] Aldrin Belisario Velosa Pacheco. Estudio del Proceso de Generación y Comportamiento de Grietas en un Acero 2 ¼ Cr - 1 Mo. Trabajo de grado de Maestría. UIS, 2004, página 51.
- [11] AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing Of Metallic Materials, United States: ASTM E23-07.

[12] Maurício De Carvalho Silva. Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona térmicamente afetada de junta soldada de aço API 5l x80, Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutorem Engenharia.2009

[13] ASTM A370 - 12a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

[14] ESTÁNDAR API 1104VIGÉSIMA EDICIÓN, Sector Tuberías, Noviembre 2005

[15] Gerson Becerra Pérez. Carolina Figueroa Madero. Evaluación de la zona térmicamente afectada (ZAT) de un acero 2 ¼ Cr - 1 Mo en estado normalizado - revenido y envejecido artificialmente, Trabajo de grado. UIS, 2012, página 78, anexo 1.

[16] ASTM E3 – 11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

[17] ASTM E92-82(2003)e2. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials (Withdrawn 2010).

[19] Gerson Becerra Pérez. Carolina Figueroa Madero. Evaluación de la zona térmicamente afectada (ZAT) de un acero 2 ¼ Cr - 1 Mo en estado normalizado - revenido y envejecido artificialmente, Trabajo de grado. UIS, 2012, página 51.

[20] Gerson Becerra Pérez. Carolina Figueroa Madero. Evaluación de la zona térmicamente afectada (ZAT) de un acero 2 ¼ Cr - 1 Mo en estado normalizado - revenido y envejecido artificialmente, Trabajo de grado. UIS, 2012, página 52.

[21] ASME boiler & pressure vessel code an international code, table 2a (cont'd) section III, class 1 and section VIII, division 2 design stress intensity values for ferrous materials, 2004

[22] BAKER, R.G.; NUTTING, J.; 1959. "The tempering of 2 1/4 Cr-1Mo steel after quenching and normalizing". Journal of Iron and Steel Institute, 192, pp. 257-268 apud ASM METALS HANDBOOK, 1990, ECKSTEIN, 2002.

[23] PD395 - API 579-1/ASME FFS-1- Fitness-for Service. September 2012

[24] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Energy. Fitness-For-Service API 579-1/ASME FFS-1. SECOND EDITION. Cap. 9. 2007.

[25] IWADATE, T. Life Prediction Methodology of High -Temperature/Pressure. Reactors made of Cr-Mo Steels. En: LIAW, P. et al. First International Conference on Microstructures and Mechanical properties of Aging Materials. Pennsylvania: TMS, 1993. p. 19-26. Proceedings of a Symposium sponsored by The Mineral, Metals, and Materials Society, Chicago, November 1992.

ANEXOS

Anexo A. Resultados composición química

Medellín, Mayo 17 de 2012

Señor (es):
GERMAN ALBERTO SIERRA GALLEGO
Director
LABORATORIO DE CARACTERIZACION DE MATERIALES
UNIVERSIDAD NACIONAL
Medellín



Asunto: Informe composición Química muestras marcadas así:

No. Consecutivo	Descripción de la Muestra	
290512 – 132	MUESTRA: SOLDADURA	A

Estamos enviando los resultados del análisis químico, efectuado a la muestra suministrada por ustedes y realizada en: **ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN OPTICA MARCA SHIMADZU, MODELO: OES 5500**. Estándares de verificación **BAS 432/1 y B-13**.

LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SOLO SON VALIDOS PARA LAS MUESTRAS AQUÍ ANALIZADAS.

Cualquier información adicional con gusto la atenderemos.

Cordialmente,

Ing. Paula Andrea Pérez Espitia
Directora – Laboratorio de Fundición
Universidad de Antioquia

Reportes	Fecha	Realizado por
TELEFONO		
EMAIL	Mayo 17 de 2012	Fco. Javier Sánchez Q.
RECIBO COPIA		

Anexo B. Material de trabajo



Fuente: Autores del proyecto

Anexo C. Cortes longitudinales del material a analizar



Fuente: Autores del proyecto