



U
N
E
X
P
O

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA
TRABAJO DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD MECÁNICA METALÚRGICA DE
LA ALEACIÓN 304 H UTILIZADA EN LA FALDA DEL REACTOR 40,
EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA FINMET®**

**AUTOR:
GONZÁLEZ ANISLEIDYS
C.I.: 18.828.433**

CIUDAD GUAYANA, MARZO DE 2011



U
N
E
X
P
O

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA
TRABAJO DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD MECÁNICA METALÚRGICA DE
LA ALEACIÓN 304 H UTILIZADA EN LA FALDA DEL REACTOR 40,
EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA FINMET®**

**AUTOR:
GONZÁLEZ ANISLEIDYS
C.I.: 18.828.433**

Trabajo que se presenta para cumplir
como requisito de aprobación para la
asignatura Trabajo de Grado

CIUDAD GUAYANA, MARZO DE 2011



U
N
E
X
P
O

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA
TRABAJO DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD MECÁNICA METALÚRGICA DE
LA ALEACIÓN 304 H UTILIZADA EN LA FALDA DEL REACTOR 40,
EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA FINMET®**

Tutor Académico:

Ing. Luz Esther Salazar

Autor:

González Anisleidys

Tutor Industrial:

Ing. Reinaldo Mejías

CIUDAD GUAYANA, MARZO DE 2011



U
N
E
X
P
O

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA
TRABAJO DE GRADO

ACTA DE APROBACIÓN

Quien suscribe, miembros del Jurado Evaluador designados para examinar el Trabajo de Grado por el ciudadano: **González Rivas Anisleidys Sofía**, portador de la cédula de identidad **18.828.433**, titulado **Evaluación de la integridad mecánica metalúrgica de la aleación 304 H utilizada en la falda del reactor 40, en el proceso de reducción directa FINMET®**, considerando que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por el reglamento vigente de la asignatura, y de acuerdo con los criterios establecidos para la aprobación, lo declaramos: APROBADO

En Ciudad Guayana a los _____ días del mes de Marzo de 2011.

Ing. Miriam Romero
JURADO

Ing. Luisa Boet
JURADO

Ing. Luz E. Salazar
TUTOR ACADÉMICO

Ing. Reinaldo Mejías
TUTOR INDUSTRIAL

Anisleidys S. González R.

Evaluación de la integridad mecánica -metalúrgica de la aleación 304H utilizada en la falda del reactor 40, en el proceso de reducción directa FINMET®

Puerto Ordaz, Marzo de 2011.

Trabajo de Grado

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Vice-Rectorado Puerto Ordaz. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Departamento de Entrenamiento Industrial

Tutor Académico: Ing. Luz E. Salazar.

Tutor Industrial: Ing. Reinaldo Mejías.

Referencias Bibliográficas. Página 108.

- 1) Deformación Plástica
- 2) Corrosión intergranular
- 3) Falda del reactor
- 4) Endurecimiento por precipitación
- 5) Recristalización

Agradecimientos

Le doy Gracias a Dios por cada experiencia vivida, por concederme paciencia y motivación y sobre todo por permitirme conocer a personas tan especiales sin las cuales no hubiese podido alcanzar tan anhelada meta.

A la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" por ser mi casa de estudio y por permitirme adquirir los conocimientos necesarios para la realización de mi carrera como profesional.

Agradezco a mis padres por darme la educación y valores que poseo y porque a pesar de la distancia se hicieron sentir presentes cada día, gracias por alentarme a seguir adelante.

A mi novio Rubén Turmero, por la confianza que difundiste en mí, por el apoyo ilimitado y por permitirme culminar a tu lado esta gran etapa.

A la Sra. Milena y el Sr. Iván Turmero por tanto cariño y buenos consejos, les estaré inmensamente agradecida por su gran apoyo y por ser para mí como mis segundos padres.

A la Ing. Msc. Luz Esther Salazar mi tutora académica por su tiempo, confianza y por la gran oportunidad de desarrollar este trabajo en su compañía.

A mi tutor industrial el Ing. Reinaldo Mejías por su colaboración y dedicación en la realización de este proyecto, gracias por el apoyo brindado.

A la Ing. Patricia Yanes por enseñarme a ser perseverante, por su paciencia y ayuda incondicional en todo lo que necesité, eres una gran amiga y un ejemplo a seguir. Gracias por todo Pattyyyy.

A mi querida profesora Miriam Romero, por su amistad y comprensión.

A Milagros Morantes, por compartir sus conocimientos en pro de mi investigación, a José Núñez por su colaboración absoluta durante el desarrollo de este trabajo y a Wilmer Figuera por su asesoría brindada.

A mi gran amiga María Álvarez, por tanto cariño, por impulsarme a seguir cada día y por esa alegría que me transmites. Gracias por todo madre.

A mis amigos de la Universidad que han estado pendientes de mi bienestar y con quienes he compartido buenos momentos, en especial a María Alejandra Gutiérrez, María Gabriela Bello, Arly Pinto y Jesús López, gracias por todo amigos.

Al equipo de Inspección y Corrosión Jazmal, Jesús, Cruz Jaime, Edgar y José Luis por compartir buenos momentos y por hacer tan agradable mi estadía en planta.

Al grupo de Ediperca por su ayuda y colaboración durante la realización de los ensayos aplicados en este trabajo.

Que afortunada soy al poder contar de contar con todos ustedes muchísimas Gracias.

Dedicatoria

A Dios sobre todas las cosas por brindarme la fortaleza para seguir día a día a pesar de las dificultades.

A mis padres Elsina, José A. y Angel por cuidarme, apoyarme y orientarme siempre por el mejor camino.

A mi hermana Camila Sofía por ser una luz que ilumina mi mundo.

Y a ti abuelita hermosa porque te recuerdo cada día y porque me enseñaste a luchar mis sueños, preciosa donde quiera que estés, esto es para Ti

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	V
DEDICATORIA.....	VII
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XIV
INDICE DE GRÁFICOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
CAPÍTULO I	
EL PROBLEMA.....	19
1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.2 Objetivo General.....	21
1.3 Objetivos Específicos.....	22
1.4 Justificación.....	22
1.5 Delimitación o Alcance.....	23
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 Antecedentes.....	24
2.1.1 Reporte de Inspección. Gerencia Técnica. Coordinación de Inspección y Corrosión.....	24
2.1.2 Reporte de inspección, parada N°19 del tren 3.....	26
2.2 Bases Teóricas.....	28
2.2.1 Proceso FINMET®.....	28
2.2.2 Descripción del proceso de reducción.....	32
2.2.3 Aceros Inoxidables.....	36
2.2.4 Soldabilidad.....	51
2.2.5 Soldadura.....	53
2.2.6 Soldabilidad en aceros inoxidables austeníticos.....	55

2.2.7	Defectos cristalinos	56	
2.2.8	Deformación plástica	59	
2.2.9	Deformación inducida por esfuerzo o temperatura.....	60	
2.3	Glosario de Términos.....	60	
2.3.1	Parrilla	60	
2.3.2	Falda	60	
2.3.3	Electrodo revestido.....	61	
2.3.4	Soldadura por Fusión	61	
2.3.5	Material de Base	61	
2.3.6	Material de Adición o Aporte	61	
2.3.7	Proceso SMAW	62	
CAPÍTULO III			
MARCO METODOLÓGICO			63
3.1	Tipo de Investigación	63	
3.2	Diseño de la Investigación	64	
3.3	Población y muestra	65	
3.3.1	Población	65	
3.3.2	Muestra	65	
3.4	Instrumentos y técnicas de recolección de datos.....	65	
3.4.1	Técnicas de recolección de datos	65	
3.4.2	Instrumentos para la Recolección de Datos.....	67	
3.5	Procedimiento de recolección de datos	69	
3.5.1	Recopilación de información relacionada con las condiciones operativas reales, e historial de servicio de la falda del reactor R40.	69	
3.5.2	Caracterización de la aleación 304 H en cuanto a composición química, microestructura y propiedades mecánicas.	70	
3.5.3	Evaluación del procedimiento de soldadura especificado por el fabricante, mediante ensayos de tracción y doblado.	78	
3.6	Procesamiento de la información.....	82	
3.7	Tipos de análisis a realizar	83	

CAPÍTULO IV

RESULTADOS	84
4.1 Analizar las condiciones operativas reales, e historial de servicio, a fin de establecer los posibles mecanismos de degradación mediante el basamento teórico.....	84
4.1.1 Variables de diseño.....	84
4.1.2 Variables operacionales	87
4.2 Caracterización de la aleación 304 H nueva y después de 19 ciclos operacionales, mediante análisis químico, microscopía y ensayo mecánico de dureza y tracción.	90
4.2.1 Análisis químico	90
4.2.2 Análisis Metalográfico	92
4.2.3 Microscopía electrónica de barrido.....	96
4.2.4 Ensayo de dureza	99
4.2.5 Ensayo de Tracción.....	100
4.3 Evaluar el procedimiento de soldadura especificado por el fabricante para la falda luego de 19 corridas, mediante ensayos de tracción y doblado, a fin de optimizar procedimientos de reparación existentes.	101
4.4 Correlacionar las propiedades de la aleación AISI 304 H luego de 19 corridas con la norma especificada para el material, a fin de evaluar los cambios mecánicos-metalúrgicos que se han presentado y de esta manera determinar si la aleación puede seguir cumpliendo la función para la cual fue diseñada.....	103
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS.....	110

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Diagrama representativo de la falda y algunos de sus accesorios.....	26
Figura N° 2: Diagrama del proceso <i>FINMET</i> [®]	29
Figura N° 3: Reactor R40-R30	31
Figura N° 4: Reactor R20-R10	32
Figura N° 5: Esquema del proceso de reducción	33
Figura N° 6: Tipos de boquillas para los 4 reactores reductores.....	33
Figura N° 7: Parrilla distribuidora del gas reductor del reactor	34
Figura N° 8: Sistema parrilla-falda. Vista frontal y sección transversal.	35
Figura N° 9: Detalles del plano de parrilla del reactor R40.	36
Figura N° 10: Árbol genealógico de los aceros inoxidables	39
Figura N° 11: Solubilidad de varios elementos en Fe-18Cr-8Ni a 0.1 MPa y 1600°C.....	41
Figura N° 12: Evolución de del límite elástico y la tensión de rotura en función de la reducción en espesor en aceros AISI 301, 304 y 316	43
Figura N° 13: Alargamiento de tres aceros inoxidables AISI 301, 304 y 316 en función de la reducción en espesor	43
Figura N° 14: Evolución del límite elástico al 0,2% en función de la temperatura para tres aceros inoxidables 301, 304 y 316.	44
Figura N° 15: Ejemplo de microestructuras sensibilizadas de diferentes aceros inoxidables austeníticos.	46
Figura N° 16: Representación esquemática de la precipitación del carburo de cromo en la frontera de grano de un acero inoxidable AISI 304 sensibilizado.....	46
Figura N° 17: Variación del contenido en cromo correspondiente al entorno de dos cristales contiguos con presencia de carburos de cromo precipitados de un acero inoxidable austenítico del tipo AISI 304.	48

Figura N° 18: Sección representativa de un ciclón de 304H donde se demuestra la carburación superficial después de 24 años. Mag. 35x.....	51
Figura N° 19: Zonas generadas en el cordón de soldadura.....	55
Figura N° 20: Dislocación de borde, el deslizamiento de la dislocación bajo un esfuerzo produce deformación plástica.....	57
Figura N° 21: Dislocaciones en una muestra metálica vistas al microscopio electrónico de transmisión	58
Figura N° 22: Muestras de estudio de las zonas previamente identificadas de la falda del R40 del tren 3	71
Figura N° 23: Seccionamiento e identificación de las zonas de la falda del R40.....	72
Figura N° 24: Distribución de las muestras para el análisis metalográfico	73
Figura N° 25: Representación de las indentaciones realizadas en el ensayo de dureza	75
Figura N° 26: Distribución de las muestras seleccionadas para microscopía electrónica.....	76
Figura N° 27: a) Imagen del ensayo de tensión. b) Etapas de rotura que experimenta la probeta durante el ensayo.....	77
Figura N° 28: Probetas de Tracción fabricadas en Fretorca. a) Probetas sin soldadura, b) probetas con cordón de soldadura.....	78
Figura N° 29: Diseño de junta simple en “V”	79
Figura N° 30: a) Fabricación de las juntas. b) Láminas de acero inoxidable 304 H antes de soldar.....	79
Figura N° 31: a) Limpieza con removedor, b) Aplicación de tinte penetrante, c) Remoción de exceso de tinte, d) Aplicación del revelador.....	81
Figura N° 32: Probetas para el ensayo de doblado	82
Figura N° 33: Esquema de la zona bajo parrilla del reactor.....	86
Figura N° 34: Detalle de la ubicación e instalación de las láminas de acero inoxidable SA240-304 H	86
Figura N° 35: Placas de acero inoxidable instalada en la falda del reactor R40.....	87
Figura N° 36: Fotomicrografías de la lámina nueva de acero inoxidable 304H. a) 200x, b)500x	92

Figura N° 37: Microestructuras de las zonas deformadas de la falda (200x), se observa la presencia de precipitados rodeando el borde de grano y atravesando la matriz.....	94
Figura N° 38: Microestructuras de las zonas deformadas (1000x) para detallar los precipitados orientados hacia los bordes de grano.....	95
Figura N° 39: Microanálisis por EDX de la muestra de la falda nueva.....	96
Figura N° 40: Microanálisis por EDX de las muestras deformadas de la falda.....	98
Figura N° 41: Probeta de tracción ensayada	100
Figura N° 42: Probetas del ensayo de doblado, para visualizar el cordón de soldadura.....	102

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Distancia entre los soportes de la parrilla y la falda del R40, del tren 3.....	27
Tabla N° 2: Deformación promedio de la falda del R40 registrada desde la parada N° 8 hasta la N°19.....	27
Tabla N° 3: Variables operacionales del reactor 40.....	30
Tabla N° 4: Composición química de los aceros inoxidable austeníticos más usuales.....	40
Tabla N° 5: Problemas potenciales de la soldabilidad.....	52
Tabla N° 6: Especificaciones de diseño del R40.....	84
Tabla N° 7: Composición química del gas reductor.....	85
Tabla N° 8: Composición química de la aleación 304H según la norma ASTM A-240.....	91
Tabla N° 9: Composición química de las muestras en estudio obtenida por Fundiciones Lanz.....	91
Tabla N° 10: Valores de dureza obtenidos experimentalmente y establecido por la norma ASTM A-240.....	99
Tabla N° 11: Propiedades mecánicas de la aleación 304 H según norma ASTM A-240.....	100
Tabla N° 12: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción.....	101
Tabla N° 13: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción para las probetas soldadas.....	103

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfica N° 1: Deformación promedio por parada de la falda del R40 del tren 1.....	25
Gráfica N° 2: Comportamiento de la temperatura del R40 durante la corrida N°14 del tren 3.....	88
Gráfica N° 3: Comportamiento de la temperatura del R40 durante la corrida N° 14 del tren 3.....	89
Gráfica N° 4: Comportamiento de la temperatura del R40 durante la corrida del tren 3.....	90



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA
“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA
TRABAJO DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD MECÁNICA METALÚRGICA DE LA ALEACIÓN 304 H UTILIZADA EN LA FALDA DEL REACTOR 40, EN EL PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA FINMET®

Autor: Anisleidys S. González Rivas

Tutor Académico: Ing. Luz E. Salazar

Tutor Industrial: Reinaldo Mejías

RESUMEN

El presente trabajo desarrollado en la Superintendencia de Inspección y Corrosión de la empresa Orinoco Iron S.C.S. tiene como objetivo la evaluación de la integridad mecánica y metalúrgica de la aleación 304 H utilizada en la falda del reactor 40 de dicha empresa. Para el estudio metalúrgico se realizaron diversos ensayos tales como análisis químico, microscopía óptica y electrónica a 4 muestras representativas de las zonas deformadas de la falda, así como a la muestra original, para tener una referencia a la hora de comparar los resultados. Además se efectuaron ensayos de dureza y tracción con el objetivo de estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas después de que la aleación estuvo sometida a las condiciones de operación. Conjuntamente se aplicó el procedimiento de soldadura establecido por diseño para las faldas nuevas, a fin de verificar si el material conservaba características de soldabilidad luego de haber manifestado deformación plástica y estar en servicio durante 35.736 horas. De acuerdo a los estudios realizados se observó que el material corresponde con la aleación 304 H establecida en la norma ASTM-240, desde el punto de vista metalúrgico presentó granos deformados con precipitados ricos en cromo, en cuanto a las propiedades mecánicas se observó un incremento de la dureza y de la resistencia a la tracción, lo que se traduce en una disminución de la ductilidad y en lo que se refiere a la evaluación de la soldabilidad se comprobó que el procedimiento de soldadura aplicado al material en servicio cumplió con los criterios de aceptación establecidos en la norma ASME sección IX.

Palabras Claves: Deformación Plástica, Corrosión intergranular, Falda del reactor, Endurecimiento por precipitación, Recristalización.

INTRODUCCIÓN

Cuando se tienen equipos y componentes metálicos sometidos a condiciones severas de servicio tales como: altas temperaturas, elevadas presiones y movimientos de fluidos a elevadas presiones, etc., se debe considerar, evaluar y hacer seguimiento del equipo con el fin de evitar la posible aparición de fallas prematuras las cuales pudieran provocar accidentes con pérdidas humanas, pérdidas de producción, entre otros. Por lo tanto al momento de realizar cualquier estudio del comportamiento mecánico y metalúrgico es importante obtener tantos datos como sean posibles de la propia pieza o componente, además de examinar las condiciones de servicio a la cual estuvo expuesto el objeto de estudio.

En este trabajo se realizó una evaluación del desempeño mecánico y metalúrgico de la aleación *AISI 304 H* instalada en la falda del reactor 40 – T3, de *Orinoco Iron*[®] S.C.S. para prevenir que ocurran fallas posteriores y obtener un patrón de referencia que sirva para optimizar procedimientos de reparaciones existentes.

La falda del reactor es un componente interno del mismo, constituida por placas de acero inoxidable que van soldadas entre sí a la parrilla, que es un componente cuya función es distribuir el gas de forma homogénea dentro del reactor, y a lo que se denomina falsa falda o parte inferior del reactor.

Las faldas de los reactores 40 han venido presentando un elevado grado de deformación plástica pero aún sigue cumpliendo su función que es servir de soporte principal a la falda facilitando que el gas pase a través de ésta. Por lo tanto como se desconoce el estado de la microestructura de la

aleación en servicio y el comportamiento mecánico que presenta en estado deformado, se propuso una evaluación del comportamiento del mencionado componente estructural.

El presente trabajo de investigación posee una estructura compuesta por los capítulos descritos a continuación: El Capítulo I, trata de la temática del problema de investigación. El Capítulo II, engloba el marco referencial y revisión de bibliografía referente al problema de investigación. El Capítulo III expone la metodología experimental utilizada en este trabajo para la recolección de información. El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos con sus respectivas discusiones. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en este estudio.



CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Orinoco Iron[®] S.C.S, es una empresa de reducción directa cuyo funcionamiento se basa en la tecnología Finmet[®] donde se reducen finos de mineral de hierro, empleando gas reductor en lecho fluidizado a temperatura y presión elevada, hasta obtener hierro con alto porcentaje de metalización. El mineral ingresa por la pared lateral del reactor superior, desde las tolvas de alimentación entrando en contacto en contracorriente con el gas reductor, permitiendo mantener los sólidos en estado fluidizado. El producto final es hierro briqueteado en caliente y para lograrlo, la planta cuenta con cinco áreas funcionales: Mineral y Producto, Servicios, Planta de Gas, Briqueteadora y Reactores.

Esta última, consta de cuatro reactores en serie R40, R30, R20 y R10, los cuales están constituidos por ciertos componentes estructurales como son la parrilla, (placa plana perforada) cuya función es distribuir de forma homogénea el gas dentro del reactor manteniendo el lecho fluidizado, la falda, que tiene forma cilíndrica y sirve como soporte principal de la parrilla facilitando que el gas pase a través de ésta, los ciclones, que se emplean para separar el polvo del gas reductor y finalmente el plenum o parte superior del reactor; de allí la corriente de gas reductor pasa al reactor superior, de forma similar va pasando por cada uno de los reactores siguientes, hasta



llegar al R40 donde es enviado a un sistema de enfriamiento y lavado de gases.

Las faldas de los reactores R40 están sometidas a las condiciones del proceso de reducción, que comprende aproximadamente una temperatura de 455 °C y presión de 11bar, las mismas están fabricadas con el material *ASTM A240-304H* el cual es un acero inoxidable austenítico con un contenido de carbono controlado para mejorar su resistencia a elevadas temperaturas. Sin embargo al realizar las paradas programadas en planta, se evidencia en la falda del reactor deformación plástica crítica en varias zonas, más no en toda su extensión. Es importante destacar que diversas inspecciones reflejaron que zonas de la falda que tenían mayor deformación en alguna parada, presentaron menor deformación en la parada posterior y viceversa, evidenciándose que el material a elevadas temperaturas experimenta una continua deformación plástica.

En el caso de la falda del R40, tren 3, se evidenció deformación plástica significativa luego de 19 corridas (35.726 horas), por lo tanto como se desconoce si el componente podría seguir desempeñando su función aún deformado, se procedió a extraerlo para evaluar sus propiedades mecánicas y metalúrgicas, además de definir su condición de reemplazo.

Debido a los eventos antes mencionados, se inició una investigación para determinar un promedio del porcentaje de deformación y utilizarlo como referencia a fin de establecer una condición de reemplazo de dicha falda, para ello en cada parada se registra la distancia en determinados puntos, entre los soportes de la parrilla y la falda, con el propósito de graficar dichos valores y tener un control de su deformación.



Sin embargo esta técnica solo permite obtener una deformación promedio por parada, es por esto que se desea evaluar los cambios mecánicos y metalúrgicos que experimentó la falda, a fin de establecer un posible mecanismo de degradación, que permita determinar si la aleación puede seguir cumpliendo la función para la cual fue diseñada y a su vez optimizar los procedimientos de reparación existentes.

La deformación presente en la falda, dificulta la alineación de los conos en la periferia de la parrilla con respecto a la dirección del flujo de gas; por lo que se hace necesario en parada cortarlos en la zona donde hacen contacto con la protuberancia de la falda contribuyendo a mantener la fluidización en operación. Además la continua deformación plástica genera grietas que deben ser reparadas mediante soldadura para garantizar el correcto funcionamiento de la falda.

El problema se fundamenta básicamente en el deterioro crítico que experimentó la falda del R40 del tren 3 luego de 1488 días de operación. La misma presentó deformación plástica por efecto de la temperatura, generando zonas de fluidización deficiente, agrietamiento y dificultad para instalar los conos de la parrilla.

1.2 Objetivo General

Evaluar la integridad mecánica y metalúrgica de la falda del reactor R40, en el proceso de reducción directa FINMET®.



1.3 Objetivos Específicos

- 1.3.1** Analizar las condiciones operativas reales, e historial de servicio, a fin de establecer los posibles mecanismos de degradación mediante el basamento teórico.
- 1.3.2** Caracterizar la aleación *SA240-304H* nueva y después de 19 corridas, mediante análisis químico, microscopía y ensayo mecánico de dureza y tracción.
- 1.3.3** Evaluar si el procedimiento de soldadura especificado por el fabricante para la falda nueva es aplicable a la muestra extraída luego de 19 corridas, mediante ensayos de tracción y doblado, a fin de optimizar procedimientos de reparación existentes.
- 1.3.4** Correlacionar las propiedades de la aleación *SA240-304H* luego de 19 corridas con la norma especificada para el material, a fin de evaluar los cambios mecánicos-metalúrgicos que se han presentado y de esta manera determinar si la aleación puede seguir cumpliendo la función para la cual fue diseñada.

1.4 Justificación

La investigación es realizada ya que en la condición actual de las faldas no es posible asegurar su integridad, debido a que se desconoce si las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la aleación se conservan luego de experimentar deformación plástica continua, por lo tanto no se garantiza que la falda pueda seguir cumpliendo su función, esta problemática genera posibles problemas operativos y un incremento tanto de los días de paradas programadas como de los costos variables que se producen con el reemplazo e instalación de las faldas.



1.5 Delimitación o Alcance

Esta investigación se realizará en la empresa *Orinoco Iron*[®] S.C.S, destinada al estudio analítico y descriptivo de cuatro (04) muestras de la aleación *SA240-304H* de la falda del reactor R40, tren 3 que presentó deformación plástica durante su tiempo en servicio a fin de evaluar el comportamiento mecánico-metalúrgico del componente estructural del reactor.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En las inspecciones de parada realizadas por la Superintendencia de Inspección y Corrosión de la empresa *Orinoco Iron*[®] S.C.S., la falda de los reactores 40 de los diferentes trenes de producción ha presentado deformación plástica en prácticamente toda su extensión, es por esta razón que se ha estudiado el comportamiento de dicho componente estructural a fin de llevar un control de la deformación de la misma.

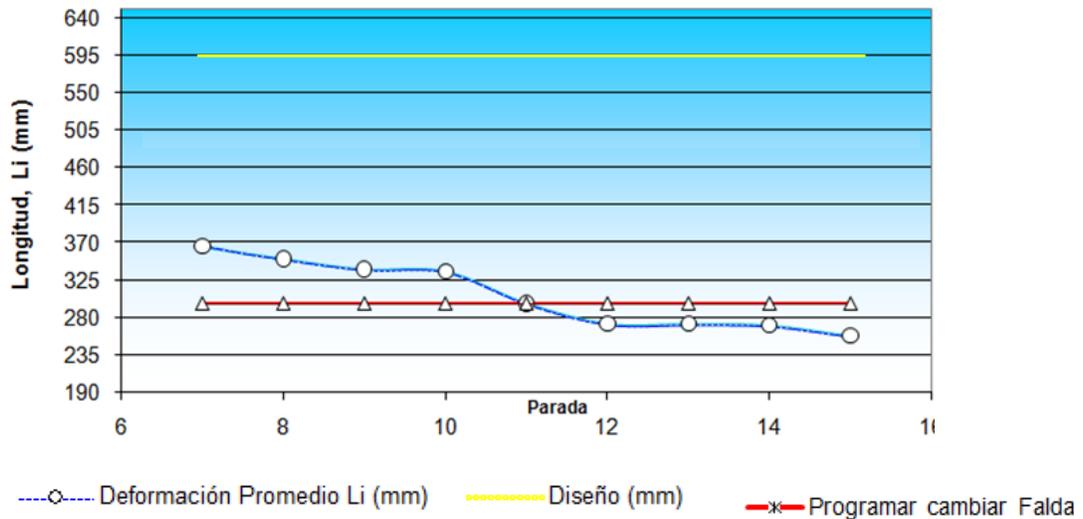
A continuación se presenta una recopilación de información que han sido los precedentes de esta investigación.

2.1.1 Reporte de Inspección. Gerencia Técnica. Coordinación de Inspección y Corrosión

Es uno de los principales antecedentes del presente proyecto, realizado por (Irigoyen, 2009) perteneciente a la Superintendencia de Inspección y Corrosión. En dicho reporte se describen las inspecciones realizadas en la parada 24 del tren 1, específicamente en el reactor 40, en donde se realizó una evaluación del grado de deterioro de la falda encontrándose diversas desviaciones; entre las más importantes se menciona que la falda del reactor 40, presentó deformación de moderada a alta, con un valor promedio de 268,8 mm equivalente a un 55% de deformación con respecto al valor de



diseño ($V_{\text{Diseño}}=595\text{mm}$). En la gráfica N° 1, se muestra la deformación promedio por parada.



Gráfica 1: Deformación promedio por parada de la falda del R40, tren 1

Fuente: Superintendencia de Inspección y Corrosión (2009)

La deformación presente en la falda crea zonas de fluidización deficiente, dificulta la alineación de los conos en la periferia de la parrilla con respecto a la dirección del flujo de gas; por lo que se hace necesario realizar cortes en los conos por encima de la zona donde hacen contacto con la protuberancia de la falda. Entre otras de las desviaciones se menciona una disminución en la longitud de diseño de los conos de la periferia, específicamente los conos en la primera y segunda fila, cuya longitud encontrada fue de 100mm aproximadamente, siendo el valor de diseño 380mm. Debido al grado crítico de deformación de la falda se recomendó programar el reemplazo de la misma y se acordó mantener evaluación continua sobre los mencionados componentes en cada parada.



2.1.2 Reporte de inspección, parada N°19 del tren 3

Se hace referencia a la continua deformación que viene presentando la falda del reactor 40; para ello toman como referencia las distancias que hay entre los soportes internos del reactor, hasta las placas de la falda, encontrándose que dichas medidas en vez de aumentar progresivamente varían, aumentando y disminuyendo en cada parada. Las mediciones registradas reflejan que las placas del reactor fabricadas en la aleación SA240-304H manifiestan deformación plástica y fatiga por efecto de la temperatura de moderado a severo, haciendo imposible asegurar la integridad de la misma, ni el tiempo de vida remanente antes de que pudiera ocurrir la falla.

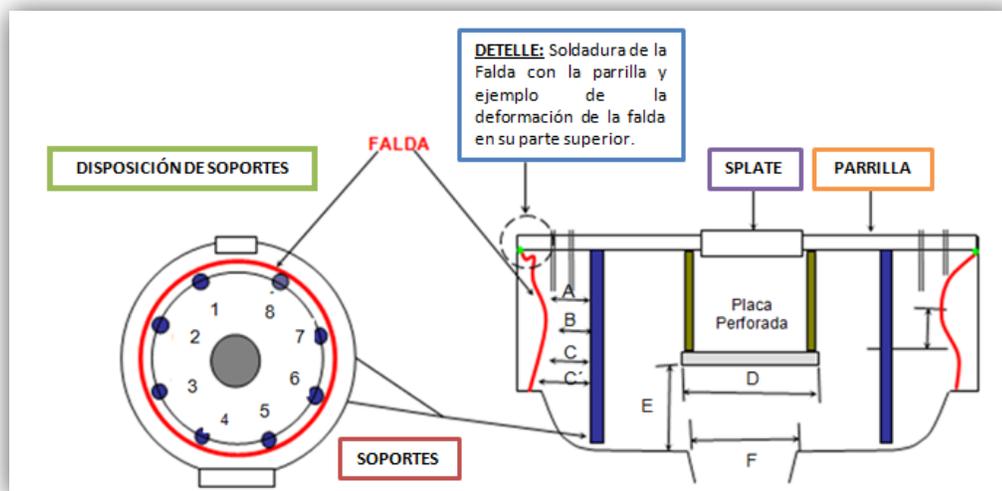


Figura 1: Diagrama representativo de la falda y algunos de sus accesorios

Fuente: Superintendencia de Inspección y Corrosión

La figura N°1 permite representar los soportes centrales de la parrilla, así como los puntos de referencia para las mediciones cuyos valores se registraron en la tabla N°1, a su vez se esquematiza la falda deformada y el detalle de la soldadura falda-parrilla.



Tabla 1: Distancia entre los soportes de la parrilla y la falda del R40, del tren 3

		1	2	3	4	5	6	7	8
R 40	A	271	245	231	195	260	245	225	205
	B	272	225	158	148	220	235	144	160
	C	260	252	220	155	219	145	200	189
	AVG	267,7	240,7	203	166	233	208,33	189,7	184,7
	C'	180	200	155	182	150	175	165	163

Tabla 2: Deformación promedio de la falda del R40 registrada desde la parada N° 8 hasta la N°19.

PARADA	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Defor. Promedio (mm)	350,3	337,7	335,2	296,7	272,0	271,6	270,0	257,3	248,8	213,6	213,3	211,6
Diseño (mm)	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0	595,0
% Defor.	41,1	43,2	43,7	50,1	54,3	54,4	54,6	56,8	58,5	64,1	64,2	64,4
Cambiar falda	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296

Como condición general de reemplazo se señala que una vez se exceda el 50% de deformación debe programarse el cambio de la falda. Sin embargo se observa en la tabla N°2 que a partir de la parada N°11 debió indicarse la sustitución de la misma, a pesar de esto, no se recomendó debido a que los valores registrados son prácticos y solo permiten tener un control de la deformación que presente la falda, mas no implica que una vez que se exceda el 50% de deformación admisible el componente deje de cumplir la función para la cual fue diseñada.



2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Proceso *FINMET*[®]

Orinoco Iron[®] S.C.S, es considerado el mayor productor de hierro briqueteado en caliente en América (HBI). La planta usa la tecnología *FINMET*[®] (finos metalizados) de origen venezolano la cual surge como producto de un análisis y planteamiento de mejoras del proceso utilizado por *FIOR* de Venezuela S.A.

El proceso *FINMET*[®] (Finos Metalizados) es un proceso de reducción directa que utiliza finos de mineral de hierro como alimentación para luego obtener un producto altamente metalizado. Consta de una batería de reactores de lecho fluidizado conectados en serie donde se ponen en contacto el mineral proveniente de los sistemas de alimentación y el gas de reducción que fluye en contracorriente, el cual, está compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono.

El mineral proveniente de la última etapa de reducción pasa luego a la etapa de briqueteado para la obtención del HBI. La calidad físico - química del producto es similar a las briquetas *FIOR*[®], lo cual constituye una excelente fuente metálica para complementar o sustituir la chatarra. La implementación del proceso *FINMET*[®] trajo consigo una serie de ventajas de carácter operativo y económico. Además de lograrse un alto grado de flexibilidad operativa, con bajo consumo energético obteniéndose así un producto con alto contenido metálico y bajo residual. El diagrama del proceso simplificado que se muestra en la figura N° 2

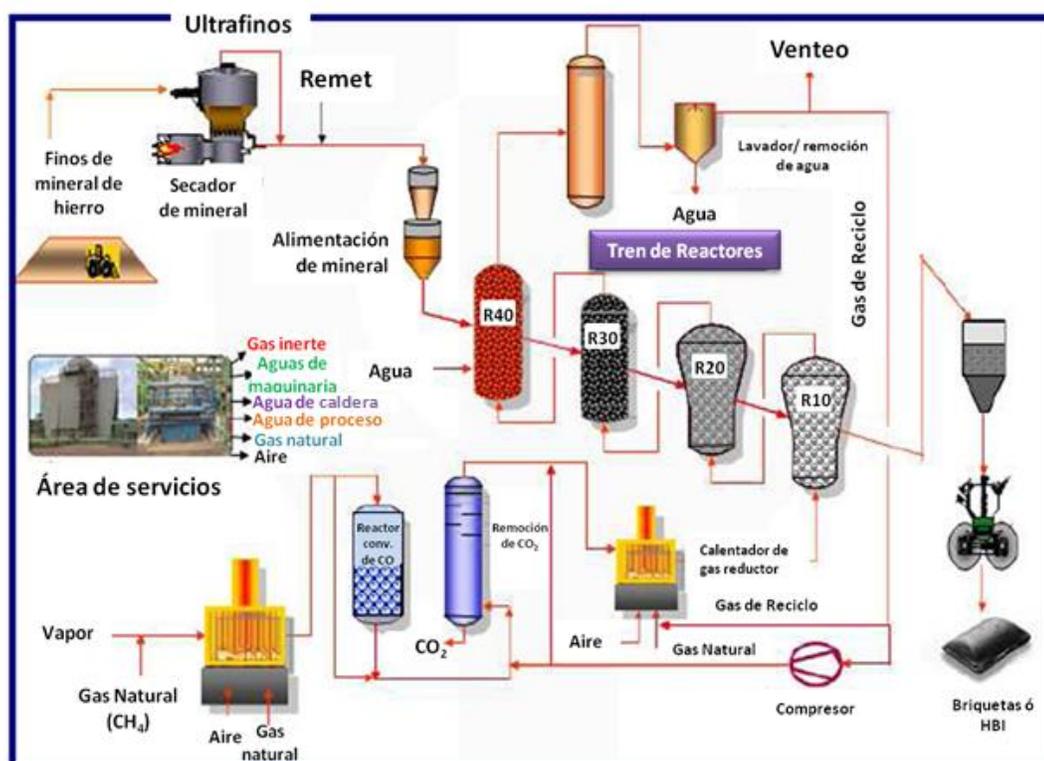


Figura 2: Diagrama del proceso *FINMET*[®]

Fuente: (Bryan, 2009)

2.2.1.1 Descripción del área de reactores

Esta área es el corazón del proceso *FINMET*[®]. Consta de dos módulos, los cuales están compuestos de dos trenes cada uno y estos trenes a su vez contienen cuatro reactores reductores conectados en serie, en donde ocurren las reacciones de reducción. El mineral proveniente de los sistemas de alimentación de mineral fluye por gravedad a través de los reactores ubicados en serie descendente, entrando en contacto con el gas reductor. A medida que el mineral desciende, sufre una reducción continua hasta adquirir propiedades metálicas. En cada reactor se realiza una reacción química diferente dependiendo de las condiciones de presión y temperatura a la cual se trabaje.



2.2.1.1.1 Reactor R-40

Es el primer reactor del tren y su forma es cilíndrica. Su principal función es eliminar el agua de cristalización que posee el mineral. Se puede considerar que actúa como un secador, debido a que el porcentaje de reducción es mínimo. La reacción ocurre aproximadamente a 520 - 540 °C. El calentamiento en este reactor es producido por una corriente de gas proveniente del reactor 30 que fluidiza el lecho. Luego que el mineral es deshidratado y precalentado, baja por gravedad en forma continua al subsiguiente reactor. A continuación se presenta la reacción química que ocurre en el reactor 40. (López, 2009) ^[3]

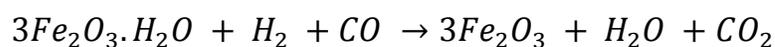
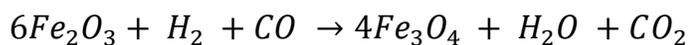


Tabla 3: Variables operacionales del reactor 40

Propiedad	R-40
Flujo nominal (ton/h)	104,1
Flujo máximo (ton/h)	130
Fe ₂ O ₃ %wt	93,8
Fe _{total} %wt	65,61
Al ₂ O ₃ %wt	0,88
SiO ₂ %wt	0,95
H ₂ O libre %wt	3,82
% carbono	0

2.2.1.1.2 Reactor R-30

Aquí toda la hematita proveniente del R-40 se reduce a magnetita a través de la reacción redox. La temperatura de operación es de 641°C en el reactor cilíndrico.



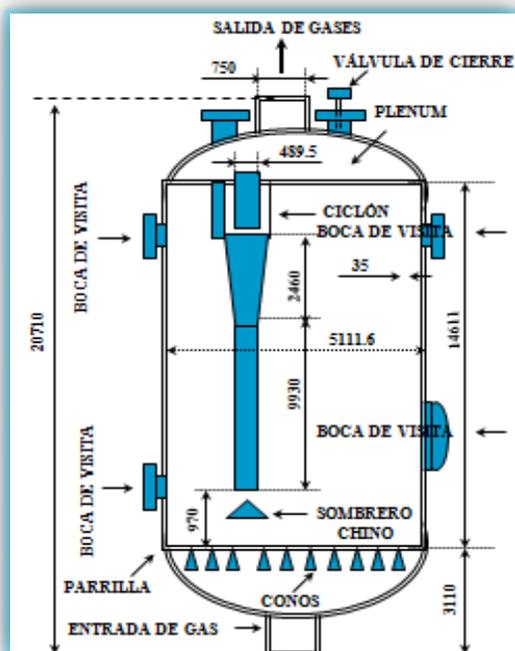
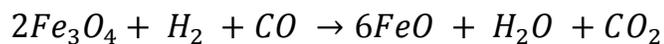


Figura 3: Reactor R40-R30

Fuente: *Orinoco Iron*

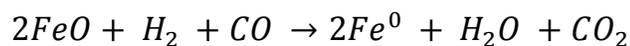
2.2.1.1.3 Reactor R-20

En este reactor se reduce toda la magnetita a wustita a una temperatura de 730 °C. El reactor es tipo *swedged*, es decir, el diámetro en el tope del reactor aumenta.



2.2.1.1.4 Reactor R-10

Ocurre la etapa final de reducción de la wustita a hierro metálico a una temperatura de 800 °C aproximadamente. Reactor tipo *swedged*.



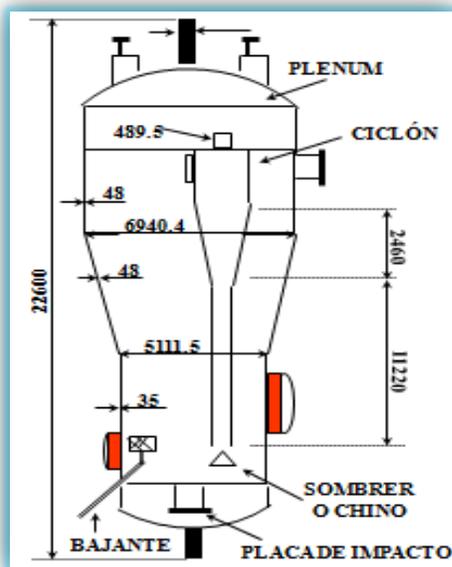


Figura 4: Reactor R20-R10

Fuente: *Orinoco Iron*

2.2.2 Descripción del proceso de reducción

Para iniciar el mineral ingresa por la pared lateral del reactor (R40), desde las tolvas de alimentación y fluye por gravedad de un reactor a otro a través de los bajantes, este flujo de gas mantiene los sólidos en el reactor en estado fluidizado reaccionando con el oxígeno de mineral para producir agua y dióxido de carbono. El mineral permanece en el reactor durante un tiempo establecido hasta que rebose por la línea de transferencia hacia el próximo reactor inferior en serie.

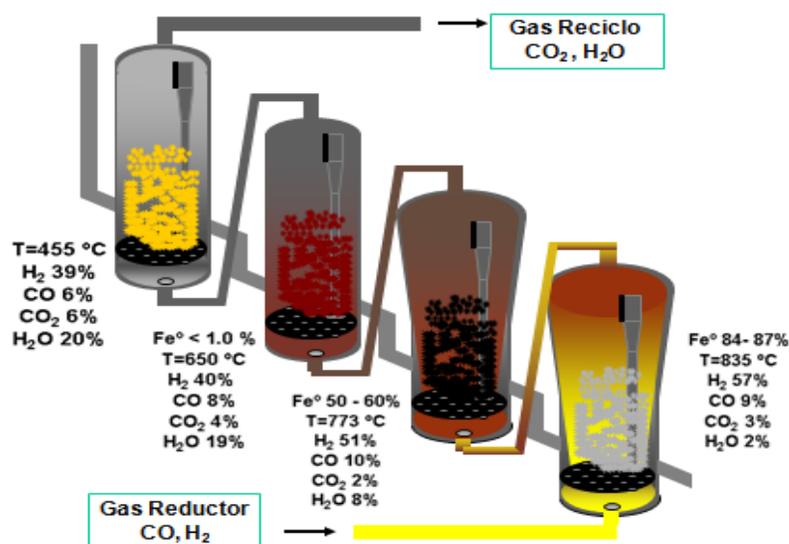


Figura 5: Esquema del proceso de reducción

Fuente: *Orinoco Iron*

El gas reductor a la temperatura y presión requerida por el proceso, es introducido por el fondo del reactor más bajo (R10), el flujo pasa a través de la parrilla, atraviesa el lecho fluidizado, la fase diluida y abandona el reactor a través de los ciclones, el plenum y la línea de salida de gas; de allí la corriente de gas reductor pasa en la misma forma por cada uno de los reactores subsiguientes de la serie. Cada reactor está equipado con una parrilla plana (placa perforada) para distribuir el gas reductor. Los reactores R20/30/40 poseen boquillas cónicas en la parrilla, mientras la parrilla del reactor R10 tiene tubos cilíndricos rectos.

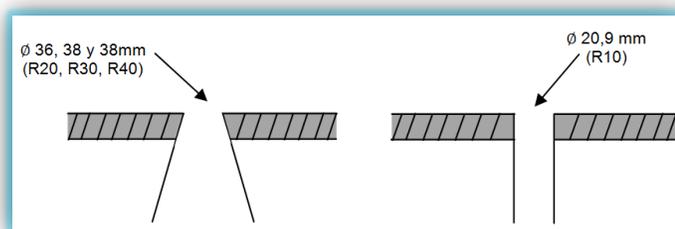


Figura 6: Tipos de boquillas para los 4 reactores reductores.

Fuente: El autor



Las boquillas cónicas en la parrilla son usadas en los reactores superiores por las características aglomerantes de los sólidos que entran al reactor, las cuales han sido acarreadas por el gas reductor desde el reactor anterior inmediato. Cada reactor tiene una falda que sirve de soporte a la parrilla, la cual se ubica internamente en la parte inferior del mismo, entre sus funciones se encuentra mantener el lecho fluidizado y distribuir uniformemente el flujo de gas reductor en el interior del reactor, su ubicación se puede ilustrar en la figura N°7. (López, 2009)

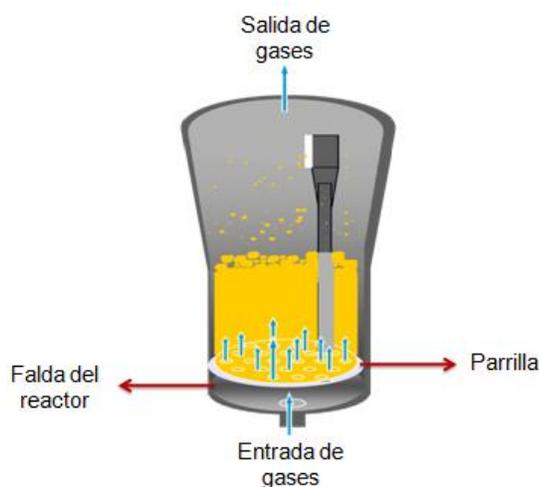


Figura 7: Parrilla distribuidora del gas reductor del reactor

Fuente: (López, 2009)

La falda del reactor está fabricada en la aleación *SA240-304H*, para darle la forma cilíndrica se hacen soldar las láminas de acero inoxidable bajo un procedimiento de soldadura establecido, su función principal es de servirle de soporte a la parrilla, de acuerdo a los planos de diseño se evidencia que entre la carcasa del reactor y la falda se instala material refractario. A continuación se presenta en la figura N° 8, el sistema parrilla-falda.

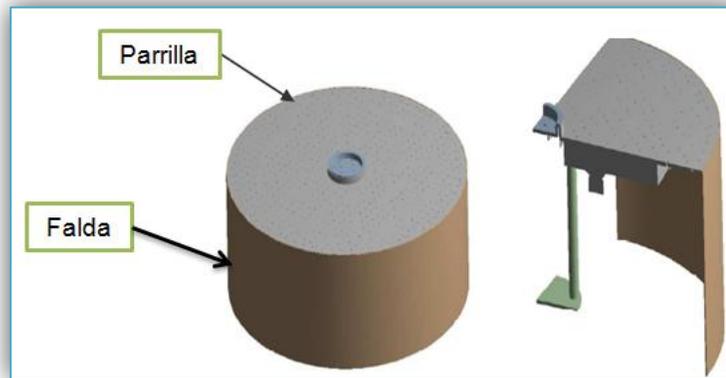
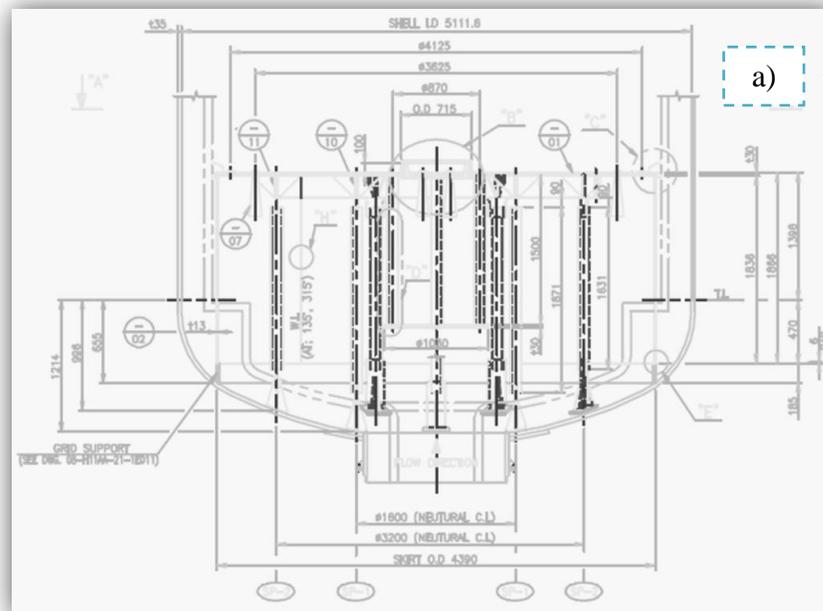


Figura 8: Sistema parrilla-falda. Vista frontal y sección transversal.

Fuente: (López, 2009).

Las dimensiones de la falda del Reactor R40, así como la disposición de material refractario se detallan en figura N° 9, perteneciente al plano de detalle VRF.RF1.2.BCC10-MWSZ 11E.



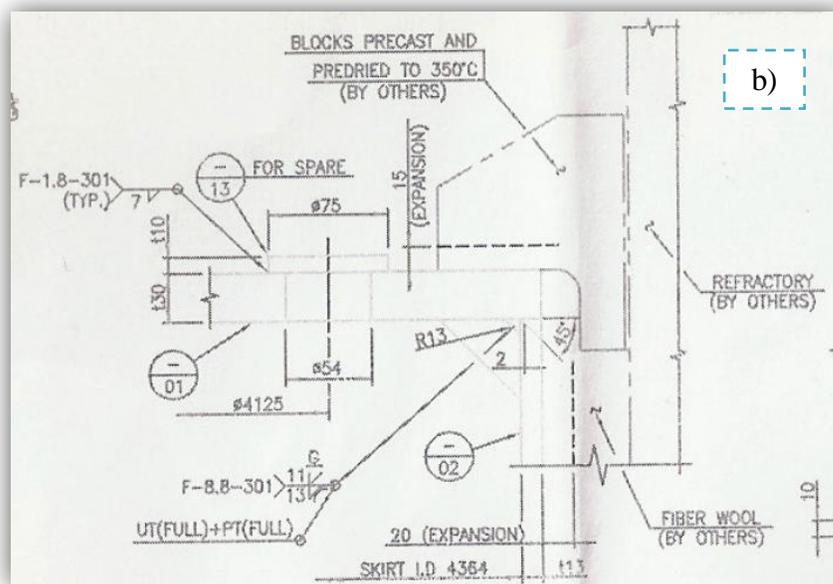


Figura 9: Detalles del plano de parrilla del reactor R40. a) Sección transversal del reactor. b) Disposición de material refractario

Fuente: Plano VRF.RF1.2.BBC40-MWSZ111E

Gerencia Técnica de Orinoco Iron S.C.S.

2.2.3 Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de hierro, cromo, carbono y otros elementos, principalmente, níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio, entre otros, que les confieren una resistencia particular a algunos tipos de corrosión en determinadas aplicaciones industriales. Naturalmente, la presencia de cada elemento en determinadas porcentajes produce variaciones distintas de las características intrínsecas de los diversos tipos.

La característica de buena resistencia a la corrosión se debe a la propiedad de estas aleaciones de pasivarse en un ambiente oxidante. La formación de una película superficial de óxido de cromo sirve para la protección del acero inoxidable. Dicha película pasiva se vuelve a reconstruir



cuando se la daña si el ambiente es suficientemente oxidante manteniendo una protección permanente del acero.

Los aceros inoxidable son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. Los principales elementos después del hierro son el cromo, el carbono y el níquel. El porcentaje de dichos elementos y su variación cambia la porción de las fases presentes, lo cual da lugar atendiendo a su estructura metalúrgica y a su composición química a los aceros inoxidable llamados martensíticos, ferríticos, austeníticos, austenítico/ferríticos (dúplex) y de endurecimiento por precipitación. Cada una de esas familias posee una microestructura única, elementos aleantes específicos y propiedades mecánicas determinadas.

2.2.3.1 Aceros inoxidable martensíticos

Los aceros inoxidable martensíticos tienen un contenido en cromo situado entre el 11 y el 18%, y entre 0,1 y 1,4% de carbono. Se endurecen cuando se enfrían desde la temperatura de soldadura (temple), produciendo fragilidad y tendencia al agrietamiento, por lo cual no se recomienda su soldadura. Son magnéticos y tienen menor coeficiente de expansión y menor conductividad térmica que un acero al carbono.

Se utilizan en plantas químicas sometidas a condiciones medianamente corrosivas, y si a pesar de todo deben soldarse, es preciso precalentarlos a temperaturas entre 200 y 400 °C para, después de la soldadura, pasar a enfriarlos lentamente y así reducir la dureza y el peligro de grietas. También es recomendable un calentamiento posterior a 650-700°C. El tipo de electrodo a utilizar debe ser lo más parecido al metal base.



2.2.3.2 Aceros inoxidables ferríticos

Tienen un contenido en cromo situado entre el 16 y el 28% y entre 0,01 y 0,35% en carbono. Debido a su bajo contenido en cromo, su estructura es casi completamente ferrítica. Son magnéticos y más fáciles de soldar que los martensíticos porque no son endurecibles en modo alguno por tratamiento térmico; solo un poco por deformación en frío o en caliente. Poseen unas propiedades moderadas en cuanto a la tenacidad y ductilidad. Manifiestan crecimiento de grano y fragilización a temperaturas superiores a los 900 °C. Para su soldadura es preciso precalentarlos a 200 °C. Después de ésta, debe realizarse un tratamiento posterior a 750 °C para ayudarles a recuperar su ductilidad.

2.2.3.3 Aceros inoxidables dúplex

Los aceros dúplex se caracterizan por un alto límite elástico, que varía entre 550 y 690 MPa. El aumento del nitrógeno en los aceros dúplex aumenta el porcentaje de la austenita hasta aproximadamente un 50%. Entre la serie de aceros dúplex están el 312, 315, 318 325 y 329. Son aleaciones base hierro con Cr y Mo, con suficiente cantidad de estabilizadores de la austenita, Ni y N para lograr el balance entre ferrita y austenita. El resultado es una adecuada combinación de estas dos fases, la austenita confiere ductilidad y la ferrita resistencia a la corrosión bajo tensión (CBT). El Mo hace más resistente a la capa pasivante. Los carburos de Cr tienden a precipitar en la interfase ferrita-austenita pero obteniendo el Cr de la ferrita en donde la difusión es más rápida y la homogeneización del Cr en la misma es mayor que si fuese austenita y por lo tanto la disminución de la concentración de Cr en el borde de grano no es tan pronunciada impidiendo la corrosión intergranular.



2.2.3.4 Aceros inoxidables austeníticos

Su contenido en cromo oscila entre 17 y 27%, en carbono es inferior al 0,1% y contiene además un 8% de níquel aproximadamente. El níquel aporta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión y controla el crecimiento de grano debido a la presencia de cromo. El cromo tiende a formar carburos, mientras que el níquel tiende a descomponerlos. La adición de molibdeno a estos aceros mejora aún más la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas. No son magnéticos poseen estructura cúbica centrada en las caras, presentan excelentes propiedades de tenacidad, soldabilidad y ductilidad, y tienen una gran estabilidad estructural. Son ampliamente conocidos y utilizados.

La figura N° 10, muestra la clasificación de los aceros inoxidables, los cuales se encuentran al final de dicha estructura como consecuencia de su alto grado de aleación.



Figura 10: Árbol genealógico de los aceros inoxidables

Fuente: (Di Caprio, 1999).



La selección del tipo de acero inoxidable en particular para una aplicación en específico, depende de factores como la resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas, facilidad para la construcción de piezas y costo. Sin embargo, para aplicaciones tales como bombas, válvulas, sujetadores, tuberías de gases, etc., se debe tener en cuenta el comportamiento tribológico del material a usar para evitar grandes costos que ocasionan las fallas inesperadas y el reemplazo de piezas por defectos que acortan su vida útil.

2.2.3.4.1 Los aceros inoxidables austeníticos AISI 304

En la familia de los aceros inoxidables austeníticos, se distinguen dos grupos: el de los austeníticos al cromo-níquel, por una parte y al cromo-manganeso-níquel por otra. El primer grupo es el más importante, dado que a él pertenecen la mayor parte de los aceros inoxidables comúnmente empleados, y está compuesto por aleaciones hierro-carbono-cromo-níquel con aporte ocasional de otros elementos, como el molibdeno, el titanio, el niobio, etc. El segundo grupo es cuantitativamente más modesto (ver tabla 4) y está formado por aleaciones de (hierro- carbono - cromo-manganeso-níquel) con contenido de níquel inferior al 6% (Di Caprio, 1999).

Tabla 4: Composición química de los aceros inoxidables austeníticos más usuales.

Tipo	C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Si (%)	Mn (%)	N (%)	P (%)	S (%)
201	<0,15	16-18	3,4-5,5	<1	5,5-7,5	0,05-0,25	0,045	<0,015
201	<0,15	17-19	4,0-6,0	<1	7,5-10,5	0,05-0,25	0,045	<0,015
205	0,12-0,25	16,5-18	1-1,75	<0,5	14-15,5	0,32-0,4	0,03	<0,03
301	<0,15	16-18	6,0-8,0	<1	<2	-	0,045	<0,03
302	<0,07	17-19	8,0-10	<1	<2	-	0,045	<0,03
304	<0,07	17-19,5	8,0-10,5	<1	<2	<0,11	0,045	<0,015



La modificación de la composición química tiene como objetivo conseguir determinadas propiedades mecánicas para ciertas aplicaciones. Tomando al acero inoxidable austenítico AISI 304 como punto de referencia se añade cromo y níquel para mejorar las características mecánicas y la resistencia a la oxidación. Sin embargo, para aumentar la resistencia a la corrosión intergranular hay varias vías: añadir niobio y tantalio o molibdeno disminuyendo el carbono. En este caso se trata de aceros tipo 304L, 316L y 317L. Añadir molibdeno sólo aumenta la resistencia a la corrosión localizada.

El aumento del contenido de carbono sirve para mejorar las características mecánicas pero perjudica la resistencia a la corrosión. Sin embargo, el azufre favorece la maquinabilidad pero disminuye la resistencia a la corrosión como consecuencia de la formación de sulfuros. La introducción del nitrógeno en los aceros inoxidables austeníticos requiere un conocimiento de su límite de solubilidad dentro de la matriz a altas temperaturas. La figura N° 11 muestra la solubilidad de varios elementos en un líquido base Fe-18Cr-8Ni bajo una presión de 0,1 MPa y temperatura de 1600°C.

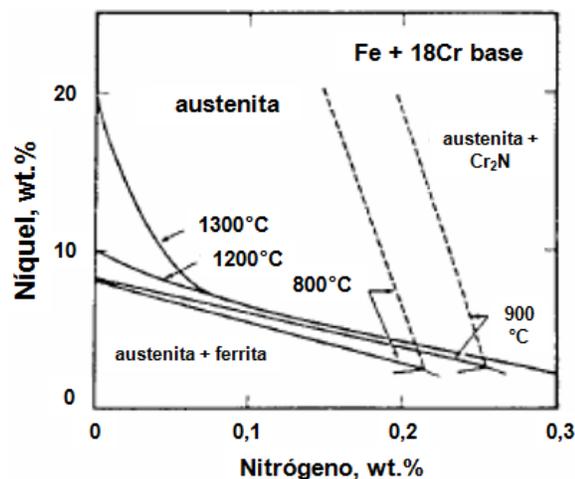


Figura 11: Solubilidad de varios elementos en Fe-18Cr-8Ni a 0.1 MPa y 1600°C

Fuente: (Di Caprio 1999).



La solubilidad del nitrógeno aumenta con el cromo y baja con el níquel en los aceros inoxidable austeníticos. Es importante señalar que la solubilidad del carbono en solución sólida es similar a la del nitrógeno en temperaturas intermedias (800-1000°C).

2.2.3.4.1.1 Propiedades mecánicas

Cuando los aceros inoxidable austeníticos son deformados en frío se produce una transformación parcial de austenita en martensita, una fase frágil y dura. Mientras el 304 es deformado más martensita se va formando y el material pasa a tener una resistencia mecánica mayor, pero va perdiendo ductilidad. Mientras tanto, una reducción de Ni por debajo del 8% (como en el acero 301, 17Cr – 7Ni), lleva a la producción de un acero con austenita menos estable, que forma más martensita y endurece más rápidamente en la deformación en frío y que tiene mejores propiedades mecánicas.

El conformado en frío es una vía para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable, específicamente el límite elástico, por considerarse relativamente bajo con respecto a otros materiales. La reducción en sección, o el trabajo en frío, aumenta el límite elástico y la tensión a la rotura, mientras disminuye la capacidad del acero al alargamiento. En la figura N° 12 se puede observar una comparación de la evolución de estos tres últimos parámetros en función de la reducción en sección para tres aceros inoxidable comerciales, uno tipo 301, otro y dos tipo 304 y finalmente un 316 muestra un aumento del límite elástico y la tensión de rotura de una forma casi similar en los aceros 304 y 316.

Sin embargo, una fuerte reducción de espesor disminuye la capacidad de los aceros al alargamiento como muestra la figura N°13.

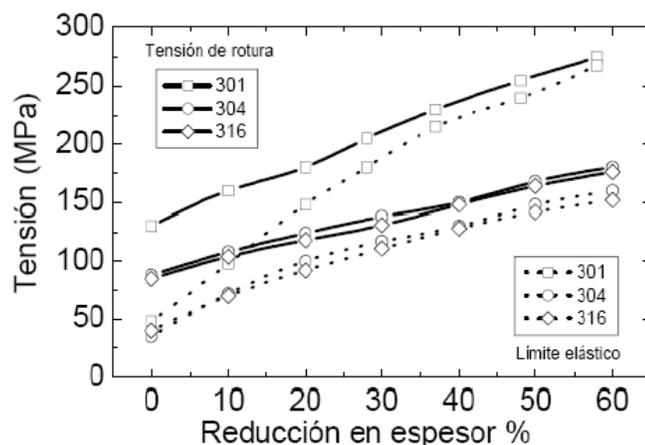


Figura 12: Evolución de del límite elástico y la tensión de rotura en función de la reducción en espesor en aceros AISI 301, 304 y 316

Fuente: (Di Caprio 1999).

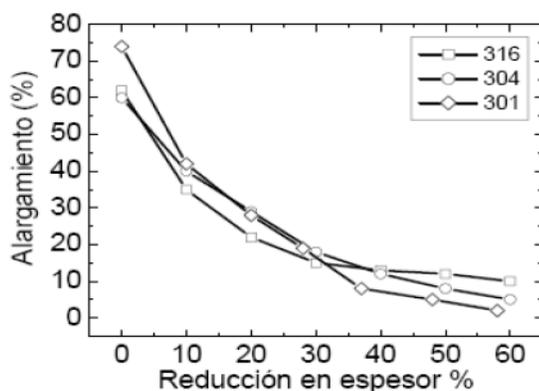


Figura 13: Alargamiento de tres aceros inoxidables AISI 301, 304 y 316 en función de la reducción en espesor

Fuente: (Di Caprio 1999).

Las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables dependen, evidentemente, de la temperatura, pudiéndose distinguir entre tres rangos de temperatura: bajas temperaturas, temperatura ambiente y altas temperaturas. En el rango de altas temperaturas, disminuye el límite elástico (ver figura N° 14). Sin embargo, la presencia de algunos elementos de aleación puede modificar



fuertemente el comportamiento mecánico del acero inoxidable, como es el caso del nitrógeno que conduce a un importante aumento del límite elástico.

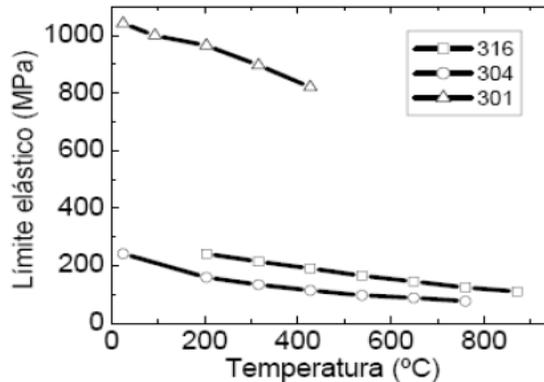


Figura 14: Evolución del límite elástico al 0,2% en función de la temperatura para tres aceros inoxidables 301, 304 y 316.

Fuente: (Di Caprio 1999).

La inherente plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de la austenita transmite su tenacidad, reducción en área y excelente resistencia al impacto aun a temperaturas criogénicas a estos aceros. A pesar de su ductilidad característica es necesario controlar algunos factores para obtener resultados óptimos, sobre todo si se refiere a procesos de soldadura u otros procesos que utilicen altas temperaturas.

2.2.3.4.2 Mecanismos de daño más comunes en aceros inoxidables

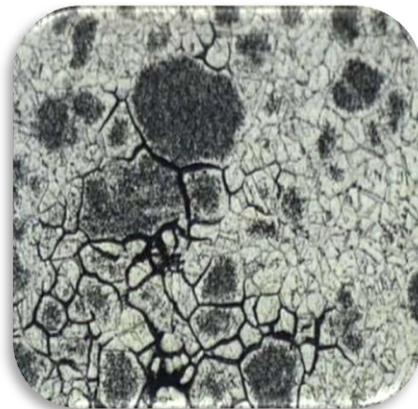
2.2.3.4.2.1 Corrosión intergranular (Sensibilización)

La mayoría de las aleaciones son susceptibles al ataque intergranular cuando son expuestas a entornos específicos. Esto es porque los bordes de granos son sitios para la precipitación y la segregación, que los hace química y físicamente diferente a los mismos granos. El ataque intergranular se define como la disolución selectiva de los límites de grano, o regiones cercanas sin ataque apreciable de los mismos granos. Esto se debe a

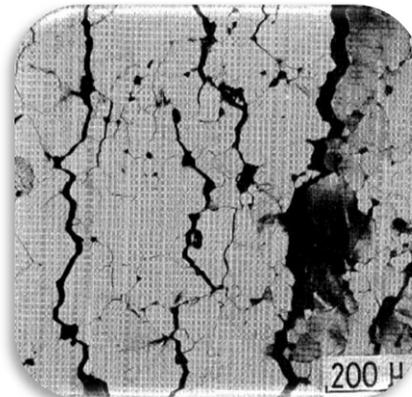


diferencias de potencial entre los límites de granos, fases y precipitados en cualquier región, compuestos intermetálicos, o impurezas que se forman en los límites de grano. El mecanismo real difiere con cada sistema de aleación. (Standard ASTM, 2004).

Uno de los ejemplos más importantes de corrosión intergranular es la que tiene lugar en algunos aceros inoxidable austeníticos (18% Cr 8% Ni) cuando son calentados o enfriados lentamente a través del rango de temperaturas de 500 a 800°C. En este rango de temperaturas, sensibilizado, los carburos de cromo (Cr_{23}C_6) pueden precipitar en las interfases del límite de grano, como se muestra en la figura N° 15. A temperaturas superiores (1035°C) los carburos de cromo son completamente disueltos; por su parte si los aceros inoxidable austeníticos se enfrían rápidamente por debajo de 425°C aproximadamente, los carburos no precipitan, y el acero será inmune a la corrosión intergranular. El porcentaje máximo de precipitación de carburo se produce alrededor de los 675 ° C. originando una pérdida de la resistencia de la aleación e incluso la desintegración en los bordes de grano. (Standard ASTM, 2004).



a) Acero inoxidable AISI 310 en presencia de carburos de cromo precipitados en los bordes de grano



b) Morfología de granos segmentados por coalescencia de carburos de cromo, acero inoxidable 316



e) Corrosión intergranular del acero inoxidable 317



d) Aspecto de la corrosión intergranular del acero inoxidable 304 tras la sensibilización del mismo.

Figura 15: Ejemplo de microestructuras sensibilizadas de diferentes aceros inoxidables austeníticos.

Fuente: (Standard ASTM, 2004).

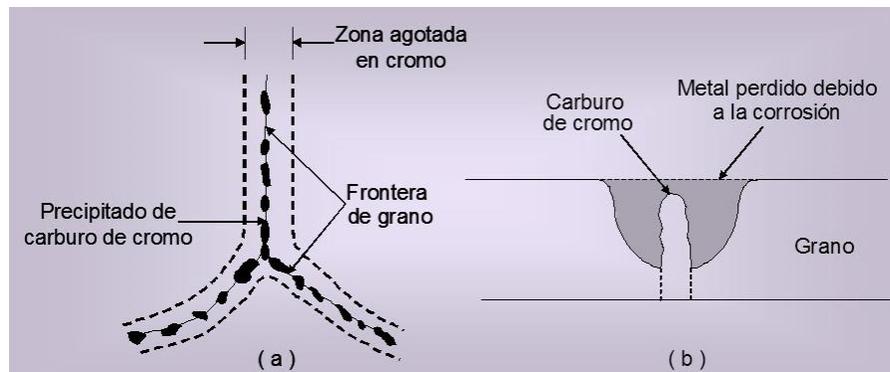


Figura 16: Representación esquemática de la precipitación del carburo de cromo en la frontera de grano de un acero inoxidable AISI 304 sensibilizado

Fuente: (Arcerlor Mittal, 2008).

Los precipitados que se forman como resultado de la exposición de los metales a temperaturas elevadas (por ejemplo, durante la producción, fabricación y soldadura) a menudo se nuclean y crecen preferentemente en



los límites de grano. Si estos precipitados son ricos en elementos de aleación que son esenciales para la resistencia a la corrosión, las regiones adyacentes a la frontera de grano se agotan de estos elementos. El metal es, pues, sensibilizado y susceptible al ataque intergranular en un ambiente corrosivo. Por ejemplo, en los aceros inoxidable austeníticos, como el tipo AISI 304H, la causa del ataque intergranular es la precipitación de carburos ricos en cromo $[(Cr, Fe_{23}C_6)]$ en los límites de grano. Estos precipitados ricos en cromo, están rodeados por el metal que se agota en cromo, por lo tanto, son más rápidamente atacados en estas zonas que en las superficies de metal no empobrecido. La susceptibilidad al ataque intergranular depende de la solución corrosiva y en la medida de la precipitación intergranular, que es una función de la composición de la aleación, fabricación, y los parámetros de tratamiento térmico. (ASM Metals HandBook, 2000).

La corrosión intergranular se considera el principal punto débil en los aceros inoxidable austeníticos. Este fenómeno consiste en la formación de carburos de cromo preferencialmente en los bordes de grano que conduce a la formación de bandas empobrecidas en cromo alrededor de los carburos formados, tal como se observa en la figura N° 16 facilitando, en consecuencia, el progreso de la corrosión debido a que el cromo libre descende en la zona adyacente al carburo a contenidos inferiores al límite de pasividad de la aleación. La precipitación de los carburos de cromo puede ocurrir también durante la operación de soldadura, A pocos milímetros del cordón de soldadura esta precipitación sensibiliza a los materiales ya que disminuye la cantidad de Cr disponible para la resistencia a la corrosión y los materiales sensibilizados pueden sufrir corrosión en medios que normalmente no los atacarían. (ASM Metals HandBook, 2000).



Cualquier proceso que ocasione que el acero sobrepase el intervalo de temperaturas comprendido entre 500 a 800°C favorece la potencialidad del acero a la corrosión intergranular durante el servicio del equipo. No solo se depende de la composición química para que el material sea sensibilizado, también depende de la historia térmica del componente como: tratamientos térmicos dados durante los procesos de manufactura del acero, soldadura/calentamiento durante la fabricación del equipo y de las condiciones de temperatura operacionales en planta.

Una de las soluciones para aumentar la resistencia a la corrosión es disminuir el contenido de carbono y/o añadir elementos estabilizadores como niobio y/o titanio para que formen los correspondientes carburos evitando así la formación de carburos de cromo. Así, por ejemplo, se tiene el acero inoxidable 304L, con un contenido máximo de C 0,030%, este acero es usado en aquellas aplicaciones en que la precipitación de carburos de cromo que ocurre en los procesos de soldadura puede provocar problemas de corrosión. Sin embargo, contenidos de carbono excesivamente bajos perjudican la dureza de los aceros inoxidables a temperatura ambiente.

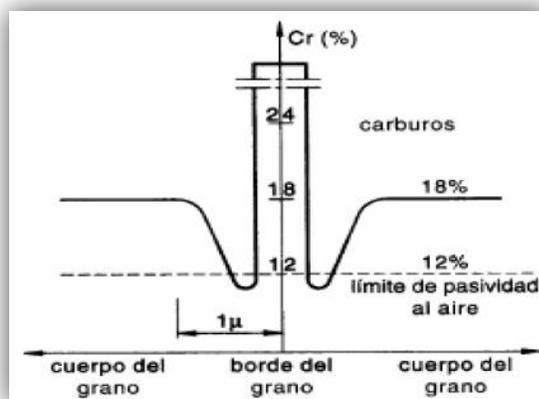


Figura 17: Variación del contenido en cromo correspondiente al entorno de dos cristales contiguos con presencia de carburos de cromo precipitados de un acero inoxidable austenítico del tipo AISI 304.

Fuente: (Di Caprio, 1999).



Así como la precipitación de carburos de cromo disminuye la resistencia a la corrosión, en otras ocasiones, para aplicaciones en altas temperaturas, estos precipitados son benéficos. El acero inoxidable 304H es un acero con contenido mínimo de 0,04% de carbono y es utilizado en aplicaciones en que el material trabaja en temperaturas en que la precipitación ocurre, pero en medios que no son capaces de provocar problemas de corrosión que sean consecuencia de esa precipitación. Una red de carburos de cromo precipitados ayuda a este material a conservar mejor sus propiedades mecánicas en altas temperaturas.

2.2.3.4.2.2 Carburación

Este fenómeno se evidencia cuando el carbono es absorbido en un material a elevadas temperaturas, mientras que está en contacto con un material carbonoso, o bien con la carburación del medio ambiente. Entre los materiales que se ven afectados por la carburación se encuentran los aceros al carbono y aceros de baja aleación, así como aceros de la serie 300 y 400, aleaciones de níquel base con contenido de hierro significativa (por ejemplo, aleaciones de la serie 600 y 800). (API, 2000).

2.2.3.4.2.2.1 Factores críticos

a) Deben cumplirse tres condiciones:

- i) La exposición del material a un ambiente de carburación o materiales carbonosos.
- ii) La temperatura debe ser lo suficientemente alta como para permitir la difusión de carbono en el metal (normalmente por encima de 590°C).
- iii) El material debe ser sensible a dicho fenómeno.



-
- b) Condiciones que favorecen la carburación que incluyen una fase gaseosa de alta actividad de carbono tales como hidrocarburos, coque, gases ricos en oxígeno, las emisiones de CO, CO₂, metano y etano.

 - c) En un principio, se difunde en el componente de carbono a un ritmo alto y luego disminuye a medida que aumenta la profundidad de carburación.

 - d) En los aceros al carbono y aceros de baja aleación, el carbono reacciona para formar una estructura dura y frágil en la superficie que puede agrietarse al enfriarse.

 - e) Las aleaciones de la serie 300 son más resistentes que el acero al carbono y que los aceros de baja aleación debido al aumento del contenido de cromo y níquel.

 - f) La carburación puede resultar en una disminución de la ductilidad, así como pérdida de soldabilidad y resistencia a la corrosión.

2.2.3.4.2.2 Aspecto o morfología de los daños

- a) La carburación se puede confirmar mediante un aumento sustancial en la dureza y la pérdida de la ductilidad.

- b) En una etapa más avanzada, puede haber un aumento del volumen en el componente afectado.

- c) Puede ocurrir un cambio (aumento) del nivel de ferromagnetismo en algunas aleaciones.

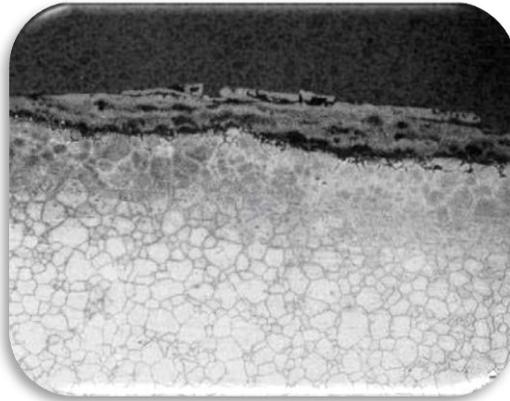


Figura 18: Sección representativa de un ciclón de 304H donde se demuestra la carburación superficial después de 24 años. Mag. 35x

Fuente: (American Petroleum Institute, 2000)

2.2.3.4.2.3 Prevención y Mitigación

- a) Seleccionar las aleaciones con resistencia adecuada a la carburación, incluidas las aleaciones con un óxido en la superficie o formadores de sulfuro (de silicio y aluminio).
- b) Reducir la actividad de carbono del medio ambiente mediante temperaturas más bajas y mayores presiones parciales de oxígeno y azufre. El azufre inhibe la carburación y se agrega a menudo en la corriente de proceso en pequeñas cantidades.

2.2.4 Soldabilidad

La soldabilidad de un material se define como la facilidad con la que un material puede ser unido por el mayor número posible de soldeos normales, para conseguir una unión con las adecuadas propiedades mecánicas para soportar las condiciones de servicio que están prevista por diseño. Uno de los factores más significantes que determinan la soldabilidad de los aceros es la habilidad de resistir al agrietamiento en la zona de soldadura y a veces es evaluada sobre la base de la sensibilidad al agrietamiento o templabilidad.



Otro de los problemas potenciales que se presenta en la soldadura es cuando no se aporta el calor adecuado, que causa que el metal depositado queda pegado (falta de fusión) con el metal base o entre pases, como sucede con las proyecciones; por eso, para saber si el metal de aporte ha quedado bien unido (fundido) con el metal base o entre pases o simplemente pegado se recurre a una prueba muy sencilla denominada prueba de plegado. Esta prueba también indica la habilidad del soldador para ejecutar soldaduras sanas. (Salazar, L.)

Los principales factores que influyen sobre la soldabilidad son:

- Composición
- Calor de entrada
- Rata de enfriamiento.

Estos factores producen varios efectos tales como crecimiento de grano, cambios de fase, expansión y contracción. De los tres factores, el calor de entrada y rata de enfriamiento son característicos del proceso, técnica de soldadura y de la sección de la junta por lo que, los problemas potenciales de la soldabilidad son:

Tabla 5: Problemas potenciales de la soldabilidad

Inherentes al proceso de soldadura	Agrietamiento en frío
	Agrietamiento en caliente
	Agrietamiento por alivio de tensiones
	Porosidad
Dependientes del comportamiento en servicio	Agrietamiento por tratamiento térmico
	Corrosión
	Resistencia estática
	Rotura estática
	Desgarre laminar
	Rotura frágil
	Resistencia a la fatiga



2.2.5 Soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido que puede ser metal o plástico, el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido (baño de soldadura) que, al enfriarse, se convierte en una unión fija.

La calidad de una soldadura también es dependiente de la combinación de los materiales usados para el material base y el material de relleno. No todos los metales son adecuados para la soldadura, y no todos los metales de relleno trabajan bien con materiales base aceptable.

2.2.5.1 Aspectos metalúrgicos de la soldadura

En el proceso de soldadura, el arco acarrea en realidad pequeños glóbulos de metal fundido, procedentes de la punta del electrodo, hacia la zona fundida que se forma sobre la superficie de la pieza formando lo que se denomina baño de soldadura. El principio clave del proceso es, sin embargo, la protección, la cual se obtiene por la descomposición del recubrimiento del electrodo en el arco. El recubrimiento desempeña, dependiendo del proceso, una o las siguientes funciones:

- La creación de una atmósfera inerte que protege al metal de soldadura (baño) del contacto con el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, u otros contaminantes, del aire.
- La adición de desoxidantes o limpiadores para refinar la estructura granular del metal de soldadura.



-
- La formación de una película de escoria, de rápida solidificación, que protege al baño de soldadura.
 - La adición de elementos estabilizadores del arco.

Como se puede apreciar, el proceso de soldadura acarrea durante el calentamiento y enfriamiento un cierto número de fenómenos, como son:

- Modificaciones químicas
- Absorción de gases
- Precipitación de compuestos de la solución sólida madre
- Modificaciones estructurales

Las modificaciones químicas en el baño de soldadura son del tipo oxidoreducción y pueden tener una influencia favorable o desfavorable sobre las propiedades de la unión, tales como las pérdidas de elementos útiles como el C en los aceros, así como la fijación de un tanto exagerado de otros elementos los cuales producen modificaciones en un sentido u otro.

La absorción de gases por el baño de soldadura da lugar a óxidos, nitruros e hidrógeno ocluido. La absorción de oxígeno depende del procedimiento de soldadura, naturaleza del metal de aporte, revestimientos y gases que rodean el baño de soldadura.

La fusión puede producir la salida de la solución sólida de un compuesto y por esta razón, la modificación de las propiedades químicas y mecánicas de la unión, como aspectos metalúrgicos de lo que tiene lugar en la zona de la soldadura durante el enfriamiento difieren algo de los que se observan durante el enfriamiento de una pieza fundida.

En la figura N° 19, correspondiente a un corte transversal de una unión soldada, se identifican las zonas presentes como consecuencia del proceso



de soldadura. El metal fundido, procedente del electrodo, o metal de aporte, se deposita en la junta y junto con el metal fundido de los bordes, se solidificará para formar una junta sólida. (Salazar, L).

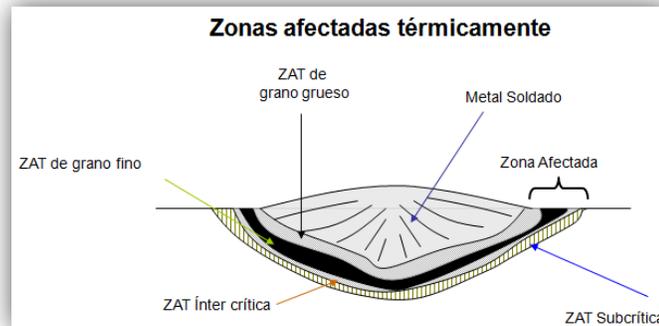


Figura 19: Zonas generadas en el cordón de soldadura

Fuente: Introducción a la Soldadura

2.2.6 Soldabilidad en aceros inoxidables austeníticos

En la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos es práctica generalizada mantener la temperatura del material base lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Es una práctica corriente limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70°C).

Los aceros inoxidables austeníticos son consideradas como las más soldables de los aceros de alta aleación y puede ser soldado por todos los procesos de fusión y de soldadura por resistencia. Las aleaciones 304 y 304L son típicas de los aceros inoxidables austeníticos. Conservar la resistencia a la corrosión, y evitar las grietas son consideraciones importantes en la producción de las juntas de soldadura en los aceros inoxidables austeníticos



Cuanto más alto sea el nivel de carbono del material a soldar, mayor será la probabilidad de que el ciclo de soldadura térmica dé lugar a la precipitación de carburo de cromo, lo cual es perjudicial para la resistencia a la corrosión. Como alternativa, se aplica un recocido completo para disolver el carburo de cromo y restaurar un alto nivel de resistencia a la corrosión. Si el metal posee una estructura completamente austenítica será más susceptible al agrietamiento durante la operación de soldadura, por esta razón las aleaciones 304 y 304L están diseñadas para volver a solidificar con una pequeña cantidad de ferrita para reducir al mínimo susceptibilidad al agrietamiento.

2.2.7 Defectos cristalinos

El arreglo de los materiales cristalinos no es perfecto. Un lugar que debería estar ocupado por un átomo a veces está vacío, este defecto recibe el nombre de vacancia. En un metal con elementos aleantes, un lugar que normalmente está ocupado por el metal huésped puede ser ocupado por otro átomo de radio atómico similar, este defecto se llama átomo de impureza sustitucional. Cuando los átomos de impureza son considerablemente más pequeños que los átomos del metal huésped, pueden alojarse en los huecos e intersticios de la red cristalina, denominándose entonces átomo de impureza intersticial.

En una aleación los elementos presentes pueden reaccionar dando lugar a compuestos diversos. También sucede que los elementos aleantes pueden simplemente distribuirse como átomos individuales alojados en la red cristalina del metal huésped. En tal caso se habla de una solución sólida, la cual puede ser sustitucional o intersticial. En una aleación los elementos aleantes pueden estar en solución sólida como intersticial o sustitucional, o bien pueden estar presentes formando parte de compuestos.



De singular importancia en las propiedades de los metales son los defectos llamados dislocaciones. Éstas son un defecto en el ordenamiento que se manifiesta como líneas. En la figura N° 20 se ilustra un esquema de un tipo de dislocación llamada de borde.

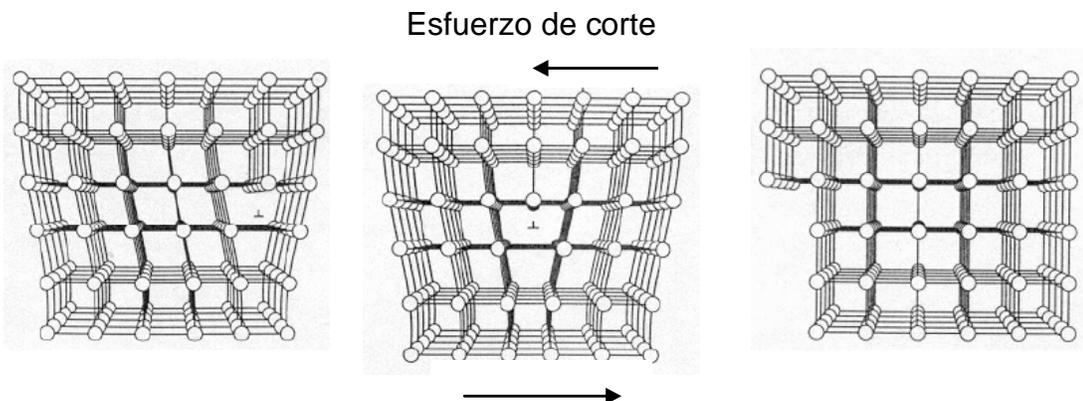


Figura 20: Dislocación de borde, el deslizamiento de la dislocación bajo un esfuerzo produce deformación plástica

Fuente: (Hinojosa, 2000).

Aunque los deslizamientos o desplazamientos atómicos pueden ocurrir en cerámicos y polímeros, estos procesos son particularmente útiles para entender el comportamiento mecánico de los metales. Primero que todo, el deslizamiento atómico explica porque la resistencia de los metales es mucho más baja que el valor teórico predicho de los enlaces metálicos. Cuando los deslizamientos ocurren, solo una pequeña fracción de todos los enlaces metálicos a lo largo de la interfase necesita ser roto y la fuerza requerida para deformar el metal es pequeña. Segundo, los deslizamientos proveen ductilidad en los metales. Si no estuvieran presentes las dislocaciones, una barra de hierro sería frágil y los metales no podrían ser moldeados por varios procesos tales como forjado. Tercero, es posible controlar las propiedades mecánicas de un metal o aleación interfiriendo con el movimiento de las



dislocaciones. Un obstáculo introducido dentro del cristal evita que una dislocación se deslice a menos de que se aplique una fuerza muy grande.

En la figura N° 21 se muestra el aspecto que presentan las dislocaciones al ser observadas mediante un microscopio electrónico de transmisión.

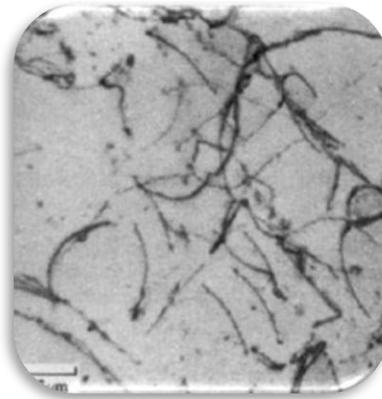


Figura 21: Dislocaciones en una muestra metálica vistas al microscopio electrónico de transmisión

Fuente: (Hinojosa, 2000).

Las dislocaciones son responsables de la ductilidad de los metales. La línea de las dislocaciones puede deslizarse sobre planos cristalinos de la estructura cuando se aplica esfuerzo a los metales produciendo deformación plástica. Existen en un gran número en los metales y se generan desde el proceso de solidificación. Una muestra de acero recocido de un cm^3 de volumen contiene típicamente cerca de un millón de dislocaciones. En un acero laminado en frío la cantidad de dislocaciones puede ser millones de veces más elevada. La deformación a su vez produce más dislocaciones. Es sabido que un metal recocido es suave y de baja resistencia mecánica, esto es debido a la moderada cantidad de dislocaciones que contiene y que son relativamente libres de moverse bajo la acción de esfuerzos bajos. Cuando el metal es deformado en frío su dureza y resistencia aumentan, esto es debido



a que las dislocaciones experimentan gran dificultad para deslizarse y solo lo hacen en cantidad limitada bajo esfuerzos muy elevados.

Los metalurgistas teóricos se han planteado el problema de calcular la resistencia de los metales en condición libre de defectos, esto es, sin dislocaciones. El resultado indica que un metal libre de dislocaciones solo puede deformarse o romperse bajo esfuerzos que son del orden de cien a mil veces superiores a los valores de resistencia reales encontrados en metales procesados convencionalmente.

2.2.8 Deformación plástica

La deformación plástica de los materiales es la deformación permanente de los mismos como consecuencia de la aplicación de una tensión externa. A temperatura ambiente, son dos los mecanismos responsables de la deformación plástica de cristales: deslizamiento y maclado. Cada uno tiene características particulares, que se pueden apreciar mediante la observación en el microscopio óptico de la superficie pulida de una muestra. La activación de uno de estos mecanismos o de ambos y el orden en que se activen depende de la estructura cristalina del material.

La deformación plástica de los metales tiene lugar principalmente por el proceso de deslizamiento, que involucra un movimiento de las dislocaciones. El deslizamiento usualmente tiene lugar sobre los planos más compactos y en las direcciones compactas. La combinación de un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento constituye un sistema de deslizamiento. Los metales con un alto número de sistemas de deslizamiento son más dúctiles que aquellos con sólo unos pocos sistemas de deslizamiento. Muchos metales se deforman con formación de maclas cuando el deslizamiento es difícil. Los límites de grano a bajas temperaturas, usualmente endurecen los



metales por proporcionar barreras al movimiento de las dislocaciones, sin embargo, bajo algunas condiciones de deformación a alta temperatura, los límites de grano se vuelven regiones de debilidad debido al deslizamiento del límite de grano.

2.2.9 Deformación inducida por esfuerzo o temperatura

Este fenómeno ocurre cuando la deformación elástica en un componente de una maquinaria, debido a las cargas impuestas por los esfuerzos o temperaturas de operación, se incrementan lo suficiente para interferir con la función normal de trabajo de la maquinaria. La solución de fallas resultantes de piezas sometidas a sobreesfuerzos depende de la determinación de factores como el esfuerzo sobre la pieza y la resistencia requerida para soportar ese esfuerzo. Dependiendo del tipo de carga y de la geometría de la pieza puede haber esfuerzo simple axial o un sistema complejo de esfuerzos multiaxiales. El esfuerzo total puede incluir esfuerzos internos residuales originados en la fabricación o tratamiento térmico, así como esfuerzos debidos a cargas externas.

2.3 Glosario de Términos

2.3.1 Parrilla

Es un componente estructural del reactor cuya función es distribuir de forma homogénea el gas dentro del reactor manteniendo el lecho fluidizado.

2.3.2 Falda

Este componente está constituido por láminas de acero inoxidable soldadas entre si hasta lograr la forma cilíndrica, su función es servir como soporte principal de la parrilla, facilitando que el gas reductor pase a través de ésta.



2.3.3 Electrodo revestido

Electrodo usado en soldadura al arco consistente en un alambre con un revestimiento relativamente grueso que provee una atmósfera de protección para el metal derretido impidiendo la acción del oxígeno. Los ingredientes que forman el revestimiento son triturados, medidos y mezclados hasta obtener una masa homogénea. La masa es conformada sobre las varillas metálicas, con un tamaño patrón a partir de 300 mm. Enseguida el revestimiento de una de las extremidades es removido para permitir el contacto eléctrico con el portaelectrodo. La toma de corriente se hace en una extremidad, y el arco arde en la otra. La escoria formada por los ingredientes del revestimiento determina el resultado deseado, como electrodos básicos, ácidos, etc.

2.3.4 Soldadura por Fusión

La energía es aplicada para producir calor capaz de fundir al material base. En este caso se dice que la solubilización ocurre en la fase líquida que caracteriza al proceso de soldadura por fusión. Asimismo, en la fusión, la soldadura es obtenida por la solubilización en la fase líquida de las partes a unir, y del aporte.

2.3.5 Material de Base

Es el material que constituye las partes a unir, es decir el material que va ser soldado.

2.3.6 Material de Adición o Aporte

Es el material que será usado como aporte en el proceso de soldadura (de la misma naturaleza que el material base), capaz de rellenar el espacio entre las superficies a unir. El material de adición es de la misma naturaleza de las partes y será usado para asegurar la continuidad de las propiedades



en caso de la soldadura por fusión, de chapas y de piezas relativamente gruesas. Ella rellenara el espacio entre las superficies.

2.3.7 Proceso SMAW

También conocido como Soldadura Manual con Electrodo Revestido, es un proceso para soldar por fusión, donde la unión es producida por un arco eléctrico obtenido entre un electrodo recubierto y el metal base. El material de aporte es suministrado por el electrodo y para efectos de lograr la unión no se utiliza presión. La protección de material fundido es obtenida por la descomposición del revestimiento.



CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En éste capítulo se presentan los aspectos referentes al diseño metodológico empleado para la elaboración del proyecto, por lo que se expondrá el tipo de estudio llevado a cabo, diseño de la investigación, así como también la población y muestra, entre otros puntos de importancia, con la finalidad de cumplir a cabalidad con los objetivos planteados.

3.1 Tipo de Investigación

La investigación que se desarrolla es descriptiva debido a que se trabaja con hechos reales enfocándose en lograr un correcto análisis e interpretación de las diferentes actividades que se realizan para la evaluación del desempeño mecánico metalúrgico de la aleación 304 H utilizada en la falda del reactor 40, en el proceso de reducción directa FINMET®

El registro y análisis de dichas actividades facilitan la obtención de las conclusiones finales y las recomendaciones que pueden provocar mejoras de las condiciones estudiadas.

Con mucha frecuencia, el propósito del investigador consiste en describir situaciones, eventos y hechos. Esto es, decir cómo es y cómo se manifiesta determinado fenómeno, además se encarga de recoger datos sobre la base de una hipótesis o teoría, exponer y resumir la información de manera cuidadosa para luego analizar minuciosamente los resultados, a fin de extraer generalizaciones significativas que contribuyan al conocimiento. De



acuerdo con la perspectiva mencionada, Tamayo y Tamayo (1997), señalan que:

La investigación descriptiva comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre como una persona, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente.

Describir en términos metodológicos consiste en indicar todas las características del fenómeno que se estudia, destinada en un principio a precisar cómo ocurren los hechos.

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación se basa la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. Esta investigación requirió la revisión de información técnica a través de documentos pertenecientes a la empresa, como por ejemplo, registros, historiales, e informes a fin de conocer el funcionamiento, condiciones de operación e identificar algún antecedente. De igual forma se analizó información referida a las bases teóricas para sintetizar las ideas primordiales de dicha investigación.

El estudio de campo consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos sin controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes. Este trabajo se realiza con este tipo de investigación debido a que se recopilan datos necesarios sobre variables operacionales, así como entrevistas no estructuradas al personal relacionado con esta área.



3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

Arias (1999), señala que “es el conjunto de elementos con características comunes que son objetos de análisis y para los cuales serán validas las conclusiones de la investigación”. La población está representada por las faldas de los cuatro reactores R40 de la empresa Orinoco Iron[®] S.C.S.

3.3.2 Muestra

Se define como un subconjunto de la población o parte representativa, para su recolección se extrajeron muestras de cuatro zonas de la falda del reactor 40 del módulo dos, tren tres, de la empresa Orinoco Iron[®] S.C.S., con el propósito de evaluar los distintos estados de las mismas luego de un tiempo en funcionamiento, identificando las zonas de la misma para su futura evaluación.

3.4 Instrumentos y técnicas de recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

Arias (1999), menciona que “las técnicas de recolección de datos son las distintas formas de obtener información”. Es por esto que se analizaron las posibles fuentes de información, así como los instrumentos necesarios para obtener los datos. Haciendo referencia a las técnicas de recolección de datos que se utilizaron en esta investigación, se tiene:



3.4.1.1 Técnica de observación directa:

Según Hernández, Fernández y Baptista (2002), “la observación consiste en el registro sistemático, cálido y confiable de comportamientos o conductas manifiestas”. La técnica de observación es primordial para la obtención de datos reales entre ellas se mencionan:

- La existencia de láminas nuevas de la aleación 304 H distribuidas en el almacén de la empresa Orinoco Iron[®] S.C.S. las cuales son destinadas para ser instaladas en la falda del reactor.
- Identificación de la ubicación de la falda del reactor, realizando inspecciones en la parte interna del R40, específicamente la zona bajo parrilla, a fin de tener una idea de las condiciones de operación del proceso que las involucra.
- Inspección visual de la falda (parada) evidenciando la deformación plástica presente en diversas zonas de la misma. Además se observó la instalación de láminas nuevas, para conformar la falda del reactor.

3.4.1.2 Revisión bibliográfica y documental

Para la revisión bibliográfica es primordial consultar tanto las bases teóricas para concretar ideas así como información técnica que permita adquirir conocimientos de interés y recopilar datos necesarios sobre los antecedentes, el tiempo de servicio, reportes de inspección, variables operacionales, planos de diseño de los equipos involucrados y condiciones encontradas. Además, por vía electrónica a través de la red interna de la empresa “Intranet” se puede acceder a documentos importantes que aportan gran cantidad de información para realizar esta investigación cubriendo diversos aspectos para la obtención de buenos resultados. La información es



recopilada con el objeto de verificar las condiciones reales de operación a las que estuvo expuesta la falda del reactor y compararlas con lo establecido en el diseño.

3.4.1.3 Entrevista no estructurada

Se realizaron entrevistas no estructuradas de forma directa y personal con preguntas abiertas e inquietudes del investigador, sin un orden preestablecido, adquiriendo características de conversación, con el propósito de recolectar información referente al área de reactores y detalles relacionados con esta investigación que pudieron ser pasados por alto.

Además de utilizar las técnicas antes mencionadas también fue necesaria la realización de metalografías, microscopía electrónica de barrido, análisis químico, así como ensayos de dureza y tracción a las muestras de la falda del reactor, utilizando tanto muestras nuevas, como aquellas expuestas a las condiciones de servicio.

3.4.2 Instrumentos para la Recolección de Datos

Según Arias (1999), "Los instrumentos son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información" (pág.53). Para recopilar datos e información relevantes, se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Sierra automática marca *SABI* modelo MJM MACC360, con hoja de 18". Ubicada en el taller de *RDI* de la empresa Orinoco Iron[®] S.C.S.
- Microscopio óptico marca *Nikon* Eclipse y modelo TS100 se encuentra instalado en el Centro de Investigación y Corrosión de la UNEXPO, es capaz de amplificar imágenes de 50X hasta 1000X.



-
- Equipo multifuncional para desbaste grueso, desbaste fino, pulido grueso y pulido fino *Buehler Metaserv 2000*.
 - Analizador de imágenes marca *LECO* modelo IA-32.
 - Secador de cabello marca *Conair*.
 - Durómetro marca *Wolpert*, modelo *Testor HT 2003*, con una carga de 100Kg., se encuentra instalado en el Centro de soldadura y Ensayos Mecánicos de la UNEXPO.
 - Microscopio electrónico de barrido modelo *Quanta 600*, marca *Phillips* instalado en Fundacite.
 - Spectrolab ubicado en el laboratorio de Fundiciones Lanz.
 - Equipo universal para ensayo de tracción y doblado, ubicado en el Centro de soldadura y Ensayos Mecánicos de la UNEXPO.
 - Cámara fotográfica digital marca *SONY* para realizar registros de las condiciones iniciales y durante el desarrollo de la investigación.

3.4.2.1 Materiales

- Alúmina de grano grueso (1 micrón).
- Alúmina de grano fino (0,05 micrones).
- Discos de lija 8", grano 60, 120, 180, 240, 320 400, 600, 2400. Para desbaste grueso y fino.
- Paños de fieltro y terciopelo para pulido grueso y fino respectivamente.
- Cinta métrica.
- Algodón.
- Alcohol Isopropílico.
- Gliceregia (60% HCl, 20% HNO₃, 40% glicerol).
- Hoja de sierra de 18".
- Vidrio de reloj.



-
- Kit Spotcheck para ensayo de tintes penetrantes (Limpiador/Removedor, Penetrante y Revelador).
 - Electrodo E308H-16, suministrado por la empresa para realizar el procedimiento de soldadura establecido.

3.5 Procedimiento experimental

A continuación se detallan las etapas o fases necesarias en la realización de la investigación para cumplir a cabalidad los objetivos planteados.

3.5.1 Recopilación de información relacionada con las condiciones operativas reales, e historial de servicio de la falda del reactor R40.

Para la recolección de información sobre el tiempo de servicio, historial de fallas y condiciones reales de operación, fue necesario tener acceso a la base de datos de la Superintendencia de Inspección y Corrosión a través de la revisión de las unidades “Q y J” en las cuales se almacena un registro de los reportes de inspección e informes de gestión realizados durante las paradas de planta, así como presentaciones de capacitación interna de la empresa donde se describen las variables involucradas en el proceso de reducción. Conjuntamente con la ayuda del personal de Ingeniería de Proceso se consiguieron los planos de diseño del reactor 40, información que sirvió de base para conocer la aleación utilizada para la fabricación de la falda, sus dimensiones y ubicación dentro del reactor.

Mediante la red interna de la empresa se logró ingresar a la página de IBH en donde se archivan reportes diarios de los diferentes turnos, de esta forma se registraron los datos de temperatura a la cual estuvo expuesta la falda del R40 durante el tiempo de servicio establecido. Una vez obtenido los



datos se empleó la herramienta computacional PHD para graficar dichos valores en función del tiempo y así observar las fluctuaciones presentes. Aunado a esto se realizaron visitas al área de reactores así como entrevistas no estructuradas al personal relacionado con esta área.

3.5.2 Caracterización de la aleación 304 H en cuanto a composición química, microestructura y propiedades mecánicas.

3.5.2.1 Inspección visual

Se realiza un reconocimiento previo del área de reactores específicamente en la zona bajo parrilla del R40, tren tres; en donde se encuentra la falda y parrilla, para establecer tanto su ubicación como su función en el proceso de reducción. Seguidamente se realiza una inspección completa de las muestras suministradas de la falda, identificando las zonas que presentan deformación plástica para la posterior recolección de muestras representativas y registro fotográfico de las condiciones iniciales.

3.5.2.2 Corte de las muestras

De la falda del reactor se escogieron cuatro zonas representativas (S-E y N) que representan las láminas con deformación crítica y (S-O y N-O) las láminas con deformación leve. Dichas muestras de estudio fueron obtenidas durante el reemplazo de la falda del R40, en la parada N°19 del módulo uno, tren tres.

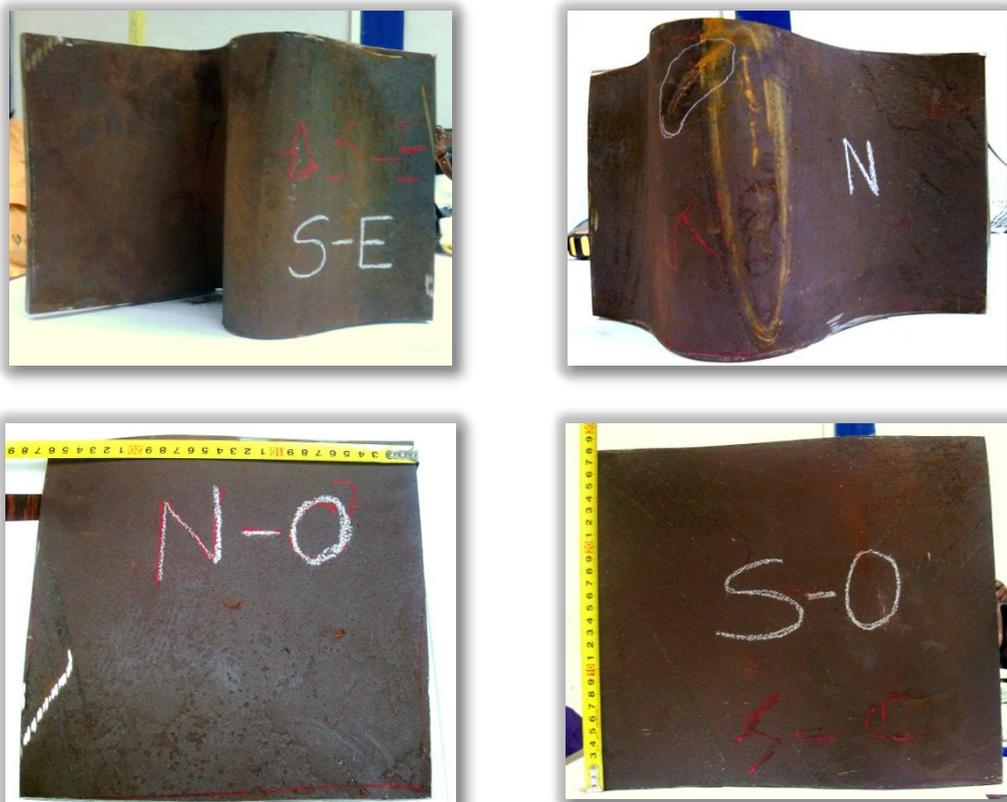


Figura 22: Muestras de estudio de las zonas previamente identificadas de la falda del R40 del tren 3

Una vez recopilada la información necesaria y establecida las condiciones de operación, se tomaron fotografías de las cuatro muestras de la falda antes del corte, como parte de la inspección visual. Posteriormente para el análisis metalográfico se seleccionaron tres muestras (S-E, N y N-O) de las cuales se eligieron dos zonas de cada una para cortarlas a un tamaño adecuado ($\approx 2 \times 2$) cm, haciendo uso de refrigerante para evitar que se calienten y presenten cambios en su microestructura. De igual forma se realizó el corte de una muestra representativa perteneciente a una lámina de la misma aleación completamente nueva, ubicada en el taller de la empresa *Orinoco Iron*[®] S.C.S.



A continuación se presenta la distribución de las muestras deformadas de la falda para la realización de los ensayos planteados anteriormente en los objetivos.

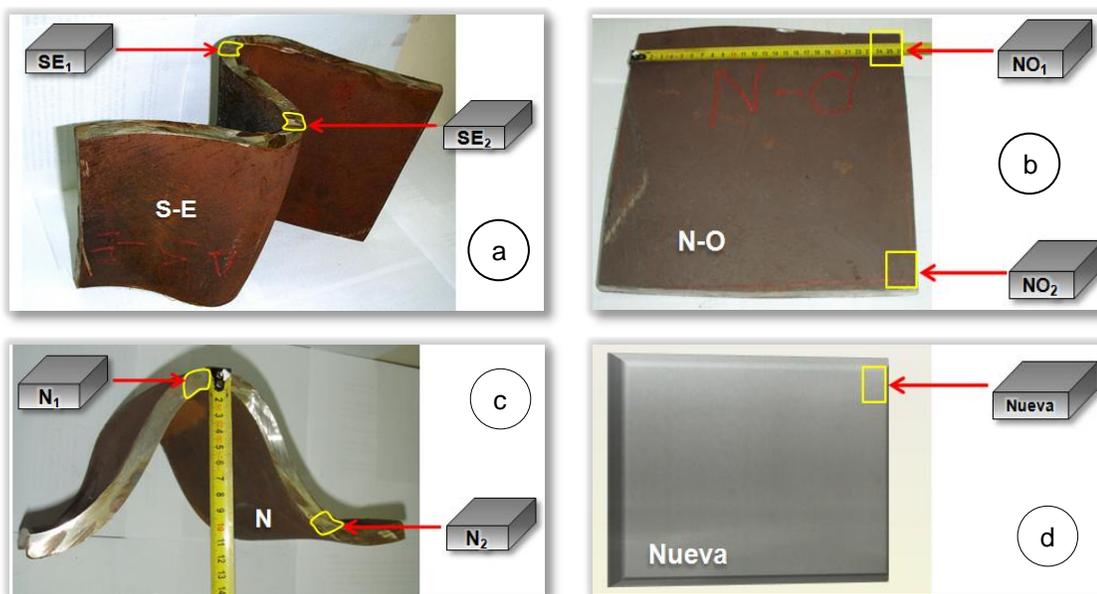


Figura 23: Seccionamiento e identificación de las zonas de la falda del R40. a) zona Sur-Oeste, b) zona Nor-Oeste, c) zona Norte, d) Lámina nueva.

3.5.2.3 Análisis Metalográfico

Para la realización de la metalografía se seleccionaron siete muestras de las zonas de la falda previamente cortadas e identificadas, tal y como se indica en la figura N° 3.

Al momento de iniciar la preparación metalográfica se debe seleccionar la superficie transversal y longitudinal más adecuada es decir aquella que presente menor desnivel, una vez elegida se comienza con el desbaste grueso, para ello se utilizan discos abrasivos de grano (60, 120, 180) y agua



como refrigerante para disminuir el calentamiento en las muestras debido a la fricción producida.

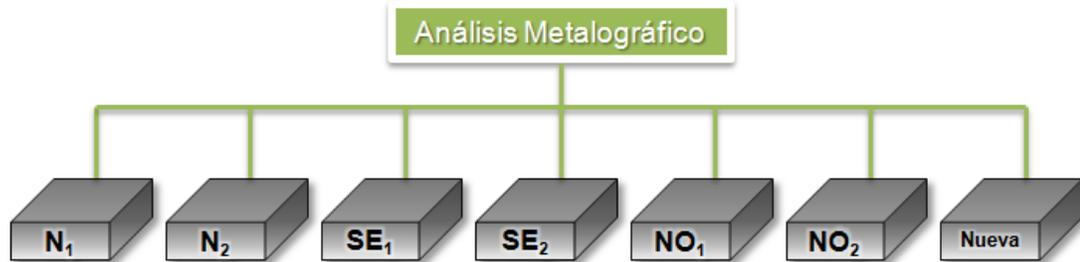


Figura 24: Distribución de las muestras para el análisis metalográfico.

Posteriormente se aplica el desbaste fino con cuatro tipos de lijas de las siguientes granulometrías: (240, 320, 400, 600, 2400). La finalidad es eliminar o remover cualquier tipo de imperfecciones presentes en la superficie tales como rayas, picos o desniveles.

El procedimiento consiste en hacer pasar la superficie de la probeta por el papel abrasivo de menor granulometría en un solo sentido por un periodo aproximado de 5 min, luego aplicando un giro de 90° se pasa al siguiente papel abrasivo repitiendo el procedimiento con las lijas restantes hasta lograr un afino de las rayas.

Después de obtener una pieza lo suficientemente lisa se le realiza un pulido grueso, utilizando un disco giratorio que consta de un paño de fieltro, una solución de alúmina de 1 micrón y agua, la probeta se gira en sentido contrario al giro del disco mojando el paño tanto con agua como con alúmina. Seguidamente se debe efectuar un pulido fino cambiando el fieltro por terciopelo y la alúmina a 0,05 micras, obteniendo en este paso una pieza con una superficie especular.



Para realizar el ataque químico la sección transversal de la probeta previamente pulida se lava con agua, luego se humedece con alcohol y se seca con aire caliente. Rápidamente se sumerge la superficie pulida en un vidrio de reloj que contiene el reactivo *Gliceregia* por un tiempo aproximado de 10 segundos. A continuación la superficie atacada se impregna con alcohol nuevamente y para finalizar es secada con aire caliente garantizando que no queden manchas de agua.

Haciendo uso del microscopio óptico se toman imágenes de la pieza en la sección longitudinal (para determinar inclusiones presentes) y en la sección transversal (para observar la microestructura) a diferentes campos y distintos aumentos. El nivel de inclusiones se determinó usando el Método A de la norma ASTM E45-05 para óxidos globulares, seleccionando el peor campo de la muestra, es decir, el campo con mayor número de inclusiones.

3.5.2.4 Ensayo de Dureza

Se seleccionaron las siete muestras utilizadas para el análisis metalográfico, una vez esto se estandarizó el durómetro a una escala de *HRB*; al colocar la probeta, se ajustaron tanto las agujas del durómetro, como la altura del punzómetro de manera tal, que ésta hiciera contacto con la superficie de la pieza, iniciando así la indentación de las mismas con una esfera de acero y una carga de 100 Kg, siguiendo los pasos establecidos en la norma *ASTM E-18*. El objetivo es registrar la magnitud de dureza obtenida para cada pieza, cabe destacar que a cada muestra se le realizaron cinco incisiones como se muestra en la figura N°4, con el fin de obtener un valor promedio más cercano a la realidad que permitiera comparar los resultados con una tabla de dureza establecida en la norma de la aleación ASTM A240.

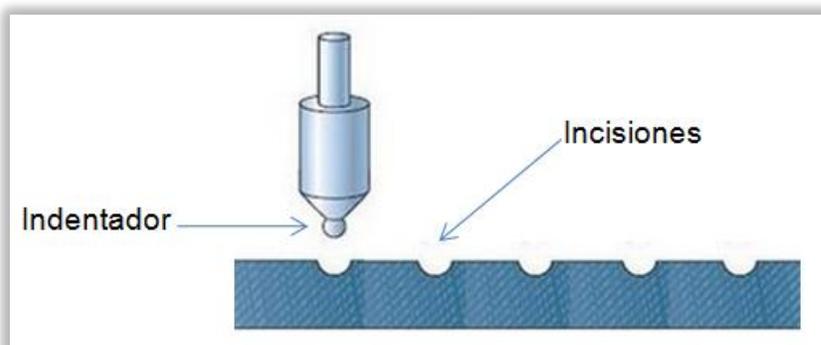


Figura 25: Representación de las indentaciones realizadas en el ensayo de dureza

3.5.2.5 Microscopía electrónica de barrido

De las muestras preparadas para la metalografía se seleccionan una de cada zona deformada, (N_1 , NO_2 , SE_1) además de la muestra nueva, dichas muestras se trasladan a Fundacite Bolívar quien cuenta con el personal calificado para la ejecución de la microscopía electrónica. El procedimiento consiste en aplicar un barrido en la superficie indicada utilizando un sistema de emisión de campo a través de un haz de electrones que atraviesan la probeta de tal forma que la muestra se refleje en una pantalla fluorescente y pueda ser observado por el ojo humano. Se obtienen imágenes con alta resolución y brillo que permiten detectar alguna fase presente.

De igual forma se realiza un microanálisis químico elemental con EDX puntual, el cual tiene como finalidad determinar la composición química de ciertos elementos presentes en la microestructura. Un esquema de las muestras seleccionadas se observa en la figura N° 26.

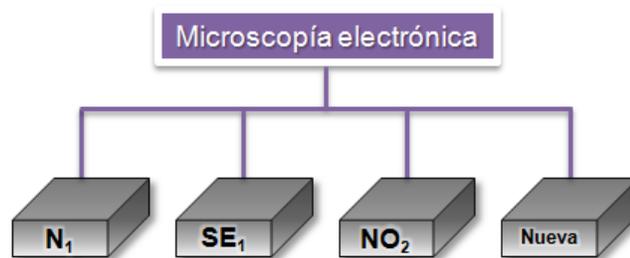


Figura 26: Distribución de las muestras seleccionadas para microscopía electrónica

3.5.2.6 Análisis químico

Se eligieron dos muestras para realizar análisis químico S-E₂ que representa la zona crítica deformada y la muestra nueva, ambas se enviaron para Fundiciones Lanz para la realización de análisis químico por espectrometría de emisión óptica (o de chispa), este tipo de análisis permite determinar los elementos presentes en una muestra así como el porcentaje de cada uno de ellos. El método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa, para ello trabajan con un equipo fijo de la marca SPECTROLAB.

El estándar más popular para este tipo de análisis en materiales metálicos es el ASTM-E415, considerándose el método más exacto. Por medio de este análisis se podrá determinar la composición química de la aleación de estudio y verificar si corresponde con la de 304 H, especificada en la norma ASTM- A240.



3.5.2.7 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

Para la realización de este ensayo se trabajó con la muestra N-O y S-O, las cuales se enviaron para el taller FRETORCA, ubicado en la zona industrial los Pinos de Ciudad Guayana, para proceder a la fabricación de dos probetas según la norma ASTM E8-04 tal como se observa en la figura N° 28, dichas probetas son del tipo rectangular usada para el ensayo de placas.

Una vez realizado el ensayo se procede a comparar los resultados obtenidos con una tabla del valor mínimo de resistencia última a la tensión requerida por la norma ASTM A240. Adicionado a esto, para evaluar el procedimiento de soldadura se fabricaron dos probetas según la norma ASME Sección IX.

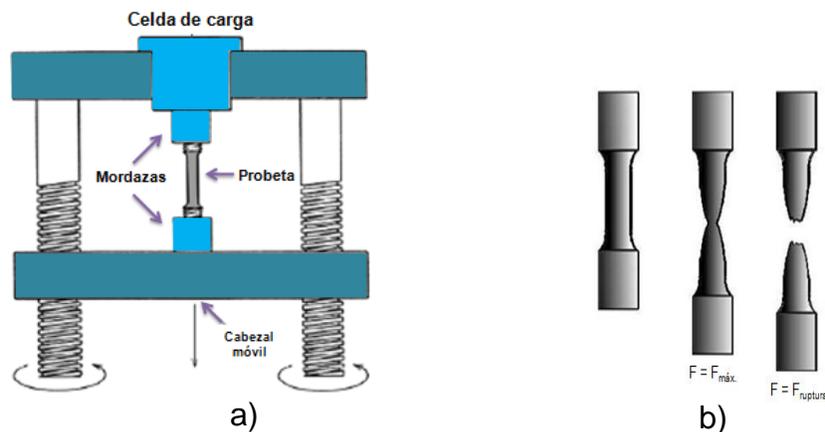
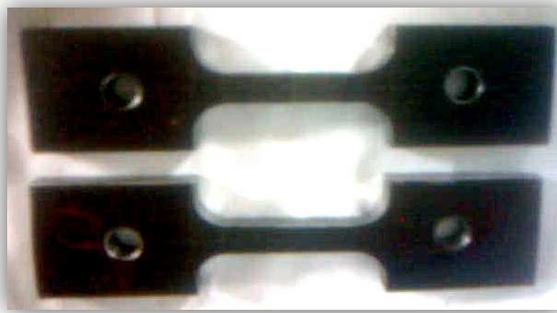
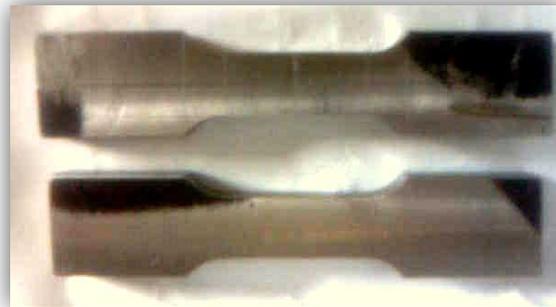


Figura 27: a) Imagen del ensayo de tensión. b) Etapas de rotura que experimenta la probeta durante el ensayo



a)



b)

Figura 28: Probetas de Tracción fabricadas en Fretorca. a) Probetas sin soldadura, b) probetas con cordón de soldadura

3.5.3 Evaluación del procedimiento de soldadura especificado por el fabricante, mediante ensayos de tracción y doblado.

3.5.3.1 Procedimiento de Soldadura

El procedimiento fue realizado de acuerdo al WPS N°: AWS Precalificado B2.1-8-023-94R. El metal base empleado lo constituyen dos láminas de acero inoxidable 304 H de ($\approx 11 \times 12$ cm) cada una pertenecientes a la zona S-O con un espesor aproximado de $1/2''$, una vez establecido el metal base se procedió a realizar el diseño de la junta establecida en el procedimiento citado anteriormente, el cual especifica una junta en "V" tal y como se muestra en la figura N° 29.

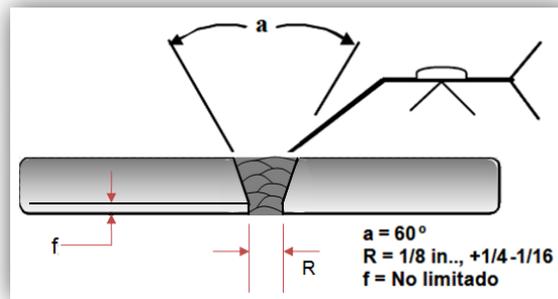


Figura 29: Diseño de junta simple en “V”

Fuente: Superintendencia de Inspección y Corrosión

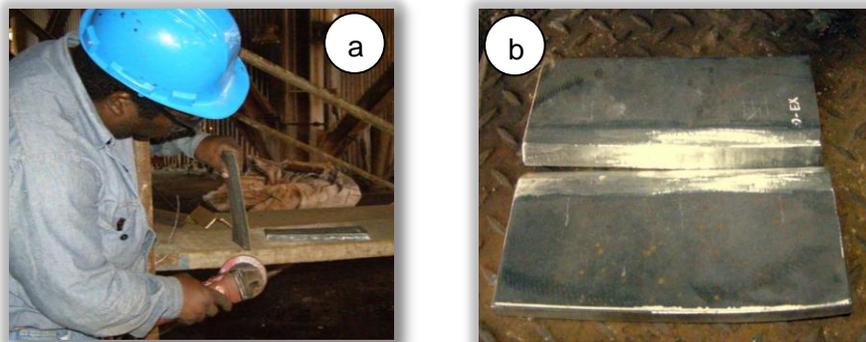


Figura 30: a) Fabricación de las juntas. b) Láminas de acero inoxidable 304 H antes de soldar

El proceso de soldadura aplicado fue SMAW empleando un electrodo revestido del tipo E308H-16 (1/8”). Antes de iniciar se entregó al soldador el procedimiento seleccionado a fin de familiarizarse con el mismo y poder verificar tanto las reglas de seguridad y limpieza del metal, así como la correcta instalación eléctrica. Rápidamente se aseguró que las juntas del material por soldar quedaran libres de herrumbre, escamas, pinturas o polvo, una vez esto, se hizo necesario colocar pequeños soportes en la parte posterior de las placas a fin de poder asegurar una superficie plana entre las mismas, El soldador empleó la posición plana la cual generalmente es más fácil y rápida, además de proporcionar mayor penetración. Después de ejecutar cada cordón lo más regular posible y antes de depositar el siguiente,



se limpió la superficie con piqueta y cepillo de alambre, eliminando todo rastro de escoria, también se limpiaron los cordones finales.

El soldador tuvo precaución de que el volumen de metal depositado tuviera en todo momento la máxima simetría posible asimismo contó con fácil acceso en todo momento y posición óptima de trabajo asegurando el depósito limpio y perfecto del material de aportación.

3.5.3.2 Ensayo de Tintes penetrantes

3.5.3.2.1 Limpieza de la superficie para el ensayo

Para efectuar el proceso de limpieza se remueve restos de pinturas, suciedad u óxidos, una vez esto se recubre la sección a ser inspeccionada con Limpiador/Removedor permitiendo que el mismo permanezca en la pieza el tiempo suficiente para que el sucio se disuelva, luego se seca con un paño limpio y se repite el proceso para garantizar mejores resultados. Después de efectuar la última limpieza se deje transcurrir tiempo suficiente para que el área se seque.

3.5.3.2.2 Aplicación del tinte penetrante

Estando la superficie seca, se aplica una película uniforme de tinte penetrante manteniendo el aerosol a una distancia de 30 cm. de la superficie, dejando transcurrir un tiempo de penetración de 5 a 10 minutos. Una vez culminado el tiempo se remueve el exceso de la superficie con un paño limpio y seco y luego levemente humedecido con limpiador/removedor. Se repitió esta operación para garantizar que todo el exceso de penetrante se remueva de la superficie de ensayo.



3.5.3.2.3 Aplicación del revelador

Se agita bien el aerosol revelador para homogeneizar la suspensión del mismo y a continuación se aplica enseguida una película fina y uniforme sobre la superficie, manteniendo el aerosol a una distancia de aproximadamente 30 cm. de la misma. Se aguarda un tiempo estimado de 3 a 10 minutos antes de iniciar la inspección del área respectiva.

Una vez transcurrido el tiempo se evalúan las indicaciones presentes en la capa de revelador y asociarlas con posibles discontinuidades existentes en el material o soldadura inspeccionada. En la figura N° 31 se muestran las etapas del ensayo de tintes penetrantes.

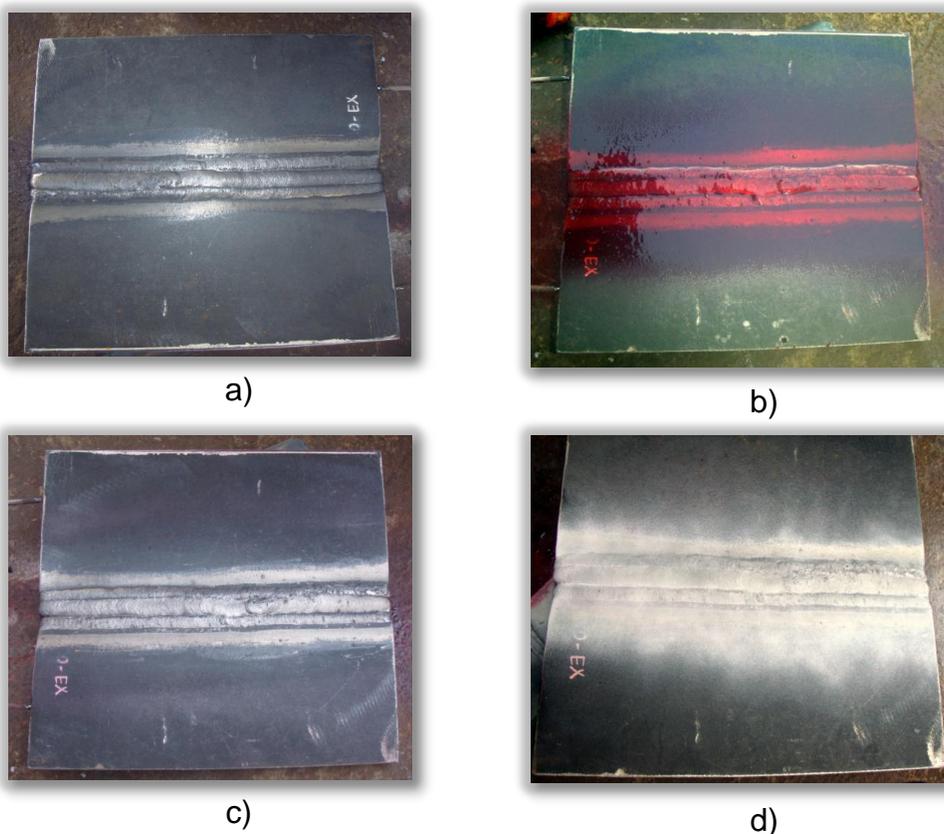


Figura 31: a) Limpieza con removedor, b) Aplicación de tinte penetrante, c) Remoción de exceso de tinte, d) Aplicación del revelador.



3.5.3.3 Ensayo de doblado

Una vez fabricadas las dos probetas según el código ASME sección IX se llevan al centro de Soldadura y Ensayos Mecánicos de la Unexpo para proceder a realizar el ensayo, el cual consiste en doblar una probeta hasta provocar la fractura de la misma, para ello se coloca la probeta debidamente preparada en dos apoyos, se somete a una carga progresiva en el centro de la misma y se dobla hasta la aparición de grietas o hasta que se considere suficiente. El ángulo de doblado, y el estudio de la zona del doblado, es decir las grietas si las hay, los pliegues y demás detalles de esa zona proporcionan información útil sobre la soldadura aplicada y la ductilidad del material. El interés en dicho ensayo se resume en observar el comportamiento cualitativo de la forma de la rotura de las fallas de ensayo.



Figura 32: Probetas para el ensayo de doblado

3.6 Procesamiento de la información

El procesamiento de la información consultada tanto en informes técnicos como en bibliografías es un aspecto primordial, ya que nos ayudará al momento dar respuesta a las interrogantes o hipótesis planteadas durante la investigación. Es fundamental llevar a cabo un registro de todas las



inspecciones realizadas de manera que resulte más cómodo organizar la información recopilada para su coherente interpretación. Los datos obtenidos en este trabajo se presentarán a través de tablas y figuras donde se encuentran evidencias e información referente al comportamiento del material de estudio.

3.7 Tipos de análisis a realizar

El análisis de la investigación es del tipo cualitativo ya que la finalidad es obtener ideas relevantes, de las distintas fuentes de información, con el propósito de almacenar y recuperar la información contenida. El propósito es identificar la información "útil", es decir, aquella que interesa al investigador, a partir de una gran cantidad de información.

Este análisis de datos permite la elaboración de las conclusiones finales recopilando la información relevante y las recomendaciones que pueden provocar mejoras de las condiciones estudiadas.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En función de los objetivos planteados, se procederá a desarrollar los resultados obtenidos en ésta parte del trabajo para cada uno de ellos.

4.1 Análisis de las condiciones operativas reales, e historial de servicio, a fin de establecer los posibles mecanismos de degradación mediante el basamento teórico.

4.1.1 Variables de diseño

Para el logro de este objetivo se solicitó información referente a las variables de operación del R40 así como las especificadas en el diseño haciendo uso de documentos pertenecientes a la empresa Orinoco Iron[®] S.C.S. A continuación se muestra en la tabla N° 6 la información técnica referente al reactor 40 lo cual permitió tener una idea de las condiciones a las que está expuesta la falda del reactor.

Tabla 6: Especificaciones de diseño del R40

Variables de diseño del R40	
Temperatura del gas de entrada al R40 (°C)	655
Presión (bar)	11
Material de la Falda	SA240-304H
Dimensiones de las láminas de la falda (mm)	1.386 x 13.751
Espesor de las láminas (mm)	13
Dimensiones de la parrilla (mm)	Øint=721 - Øext =4352 Espesor= 38
Peso de la parrilla (Kg)	4450
Material de la Parrilla	SA240-304H



Tabla 7: Composición química del gas reductor del R40

Gas reductor (% Vol.)						
CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄	S ppmv
9,1	3,33	56,6	1,53	4,09	25,4	21,2

Como se expuso anteriormente la falda del reactor está constituida por placas de acero inoxidable SA240-304 H las cuales tienen una dimensión aproximada de (1879 x 13741) mm², dichas placas están expuestas al gas reductor proveniente del reactor 30 el cual tiene una composición química establecida tal y como se presenta en la tabla N° 7.

En las visitas realizadas al área de reactores se logró ingresar al reactor 40 y de esta forma conocer la distribución de las placas que conforman la falda, así como la ubicación del sistema falda-parrilla, en la figura N° 33 podemos apreciar con detalle la representación de la parte interna del reactor específicamente la zona bajo parrilla.

De igual forma se verificó que las placas van soldadas entre ellas, a la parrilla y a la parte inferior del reactor en lo que se denomina “falsa falda”, la figura N° 34 representa la ubicación de las uniones soldadas además de la forma en que van distribuidas en la falda del reactor, el procedimiento de soldadura por el cual se rigen para realizar la unión falda-falda es el WPS N°: AWS Precalificado B2.1-8-023-94R, el cual fue sugerido por el fabricante y puede ser observado en el anexo 1.

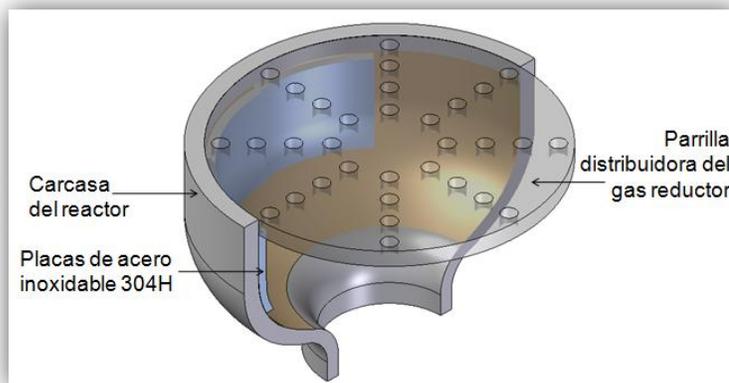


Figura 33: Esquema de la zona bajo parrilla del reactor.

Fuente: El autor

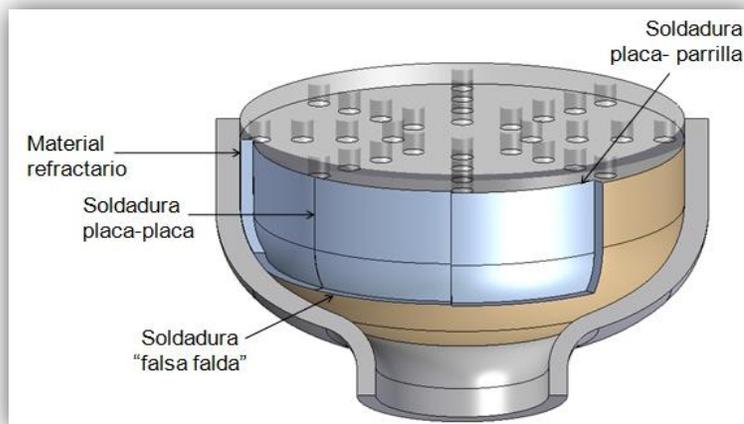


Figura 34: Detalle de la ubicación e instalación de las láminas de acero inoxidable SA240-304 H

Según los planos de diseño entre la carcasa del reactor y las placas de acero inoxidable se ubica una capa de material refractario aislante y una capa de material refractario denso resistente a la abrasión. En la figura N° 35 se muestra una de las placas al momento de ser instaladas.



Figura 35: Placas de acero inoxidable instalada en la falda del reactor R40

4.1.2 Variables operacionales

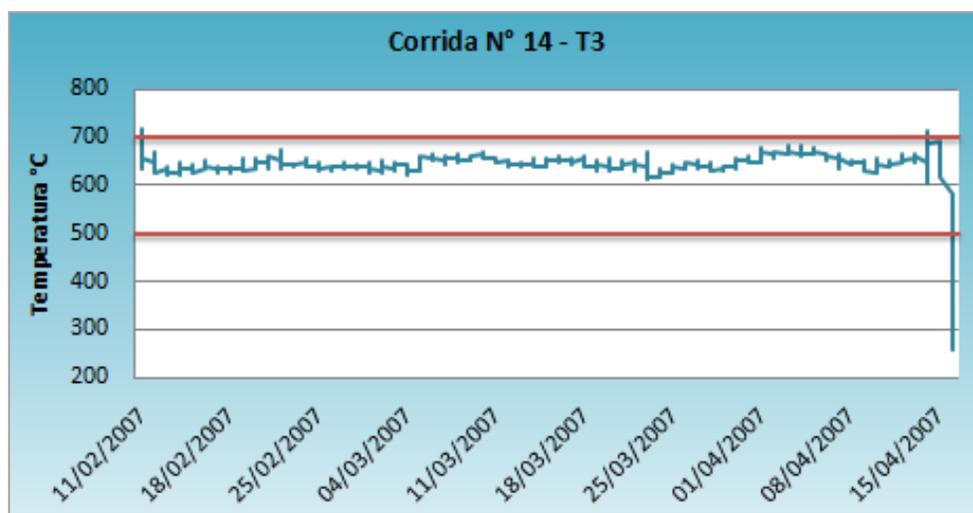
Las láminas de acero inoxidable 304 H que son objetos de estudio fueron instaladas en el reactor 40 del tren tres desde los inicios de la planta en el año 2004, sin embargo, debido a la continua deformación plástica fueron desinstaladas luego de transcurrir 19 corridas operacionales, es decir, un tiempo aproximado de 35.726 horas en servicio. Es por esta razón que se recopilieron datos referentes a las variables reales que se involucran en el proceso a fin de tener una idea de las condiciones de servicio a las que estuvo expuesta dicha aleación.

A continuación se presenta mediante la gráfica N° 2 la temperatura real a la cual estuvo expuesta la falda del reactor en diferentes corridas; es importante destacar que no se utilizaron datos desde el inicio de la instalación debido a que los archivos de la red interna solo almacenan datos desde la corrida N°14, por lo tanto se tomó como referencia las corridas N°

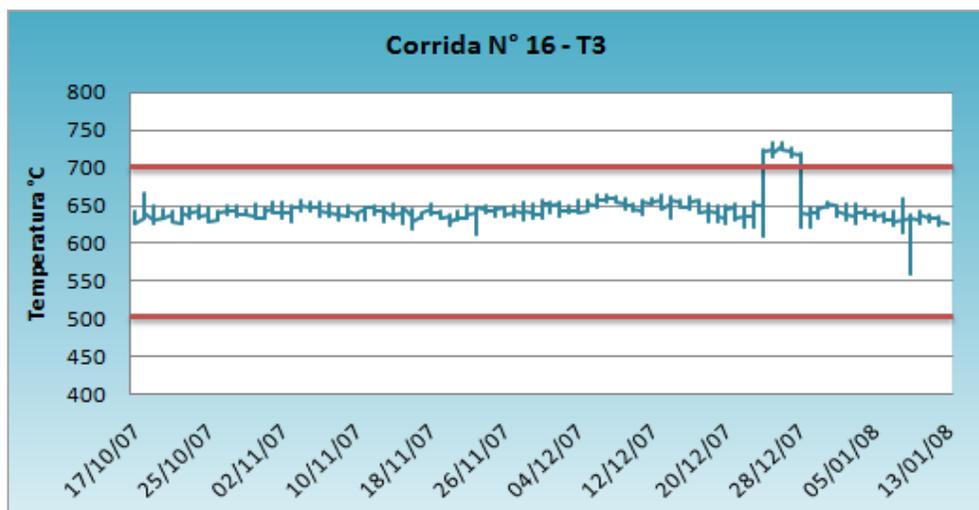


14, 16 y 19 que fue la última corrida antes de proceder al reemplazo de la falda.

Los valores de temperatura fueron registrados mediante unos sensores situados en la boca de salida del gas del reactor 30 del tren tres, esto es debido a que no hay un dispositivo ubicado bajo parrilla que permita tener una temperatura que se acerque más a la realidad, por lo tanto estos valores solo permitirán tener una aproximado de las temperaturas reales. A continuación se presentan las gráficas obtenidas a fin analizar el comportamiento de la temperatura en función del tiempo de servicio establecido.

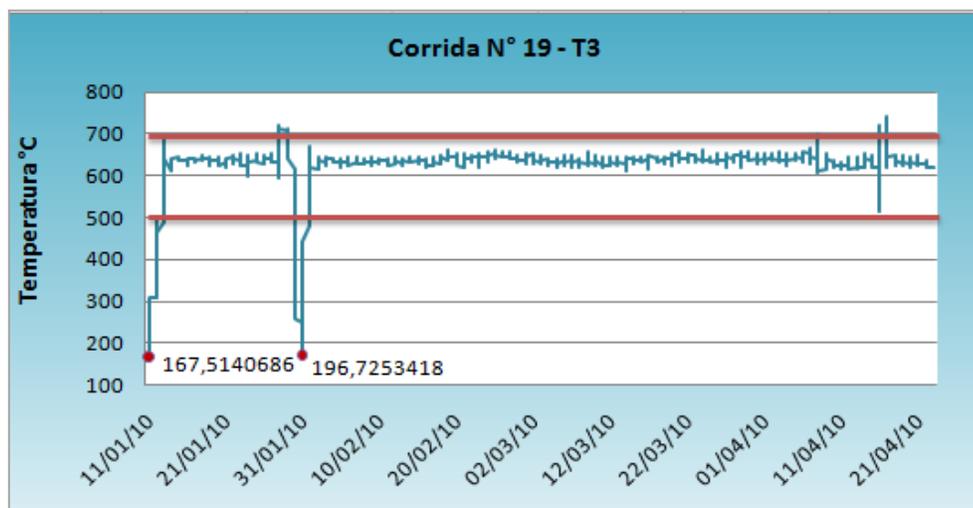


Gráfica 2: Comportamiento de la temperatura del R40 durante la corrida N° 14 del tren 3



Gráfica 3: Comportamiento de la temperatura del R40 durante la corrida N° 16 del tren 3

Por diseño se indica que la temperatura de operación del R40 bajo parrilla es aproximadamente 655°C, se puede observar en las gráficas 2, 3 y 4 que la temperatura real de operación oscila entre los 600 y 700°C, evidenciándose un comportamiento similar en todas las gráficas en donde el rango de temperatura permanece constante, sólo varía en caso de que el reactor sea expuesto a condición de gas inerte por dificultades presentadas dentro del mismo que interfieran con la producción, tal como se observa en la gráfica N° 4, donde se señalan los valores que están fuera de rango.



Gráfica 4: Comportamiento de la temperatura del R40 durante la corrida N° 19 del tren 3

De acuerdo a lo descrito anteriormente se puede distinguir que las variables de operación se encuentran dentro de las especificaciones de diseño con respecto a la temperatura promedio y composición de gas reductor que debe existir en la zona bajo parrilla, por lo tanto al revisar la bibliografía consultada se observó que las variables estudiadas no son influyentes en lo que respecta a la degradación que manifestó la falda del reactor 40.

4.2 Caracterización de la aleación 304 H nueva y después de 19 ciclos operacionales, mediante análisis químico, microscopía y ensayo mecánico de dureza y tracción.

4.2.1 Análisis químico

La composición química del material fue verificada teóricamente en la norma establecida para la aleación tal como se muestra en la Tabla N° 8,



mientras que los resultados obtenidos mediante espectrometría de chispa, se resumen en la Tabla N° 9 y se comparan con los límites de Norma.

Tabla 8: Composición química de la aleación 304H según la norma ASTM A240

UNS Designación	Tipo	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni
S30409	304H	0,04–0,10	0,75	2,00	0,045	0,030	18,0–20,0	8,0–10,5

Tabla 9: Composición química de las muestras en estudio obtenida por Fundiciones Lanz

Muestra	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Al	% Cu
1	0,055	0,586	1,000	0,009	0,002	16,900	0,102	8,720	0,018	0,209
2	0,032	0,433	1,370	0,002	0,002	17,090	0,090	8,190	0,015	0,096
Muestra 1: Falda deformada (S-E₂)						Muestra 2: Falda nueva				

En la tabla N° 9 se presenta el resultado del análisis químico realizado tanto a la muestra en servicio (S-E₂) como a la muestra nueva de la falda, donde se puede observar que la mayoría de los elementos se encuentran en los porcentajes similares a los especificados por la norma de la aleación, en general los valores de C, Si, Mn, Cr y Ni se hallan cerca de los límites inferiores, incluso el Cr se ubica levemente por debajo del mínimo admisible. Esto podría comprometer la resistencia a la corrosión del material, y la estabilidad de la resistencia mecánica a alta temperatura.



En este contexto, el contenido de Mo podría haber contribuido a mantener la resistencia del material a la temperatura de trabajo, es un elemento habitual del acero y aumenta mucho la profundidad de endurecimiento, así como su tenacidad, además se reveló la presencia de otros elementos como el Al y el Cu a pesar de no estar presente en la composición establecida por la norma. Se asume que el fabricante suministra el material con esos elementos adicionales y que son propios de la aleación, ya que la empresa no tiene un control de calidad establecido para verificar la composición química de las diversas aleaciones que ingresan a la planta.

4.2.2 Análisis Metalográfico

4.2.2.1 Microscopía Óptica

Se evaluó microestructuralmente la aleación *304H* mediante la observación microscópica de las muestras deformadas de la falda, a fin de identificar cualquier cambio o variaciones que puedan haber ocurrido en la misma luego de haber sido sometida durante 19 corridas a las condiciones de servicio como son temperatura aproximada de 655°C y presiones de 11 bar.

4.2.2.1.1 Microestructuras de la muestra nueva de la falda

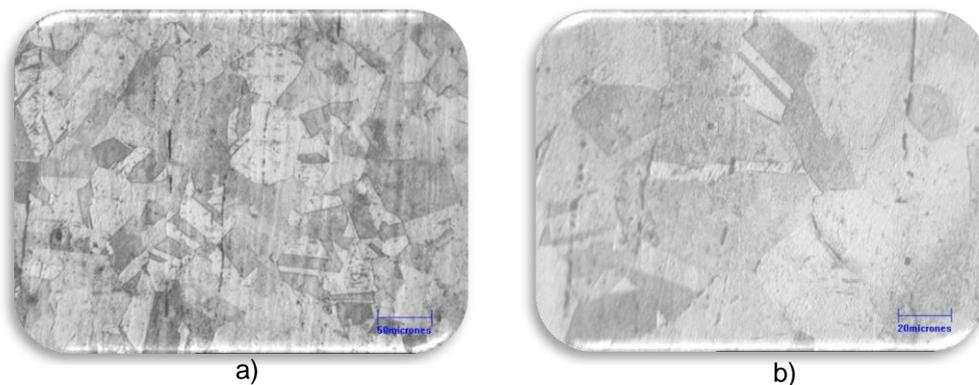


Figura 36: Fotomicrografías de la lámina nueva a) 200x, b)500x

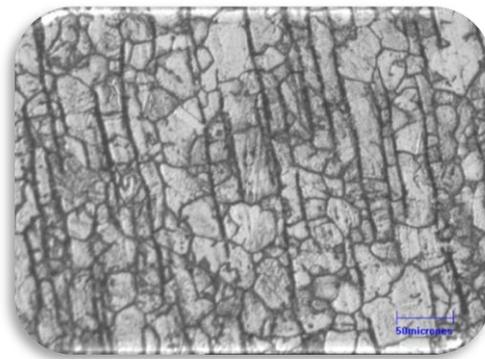


En las microfotografías correspondientes a la aleación nueva se observa la presencia de maclas que se identifican microestructuralmente como subgranos estrechos con bordes bastante rectilíneos y paralelos que dividen el grano inicial, dichas maclas son características de los aceros inoxidables y corresponden en este caso a la etapa de deformación durante la recristalización que se lleva a cabo en el proceso de la laminación en caliente. Conjuntamente se reveló la existencia leve de precipitados dispersos en la matriz, los cuales se pueden atribuir al proceso de manufactura, debido a que la temperatura utilizada para laminar en caliente debe ser superior a la temperatura de recristalización la cual es aproximadamente 0,4 veces la temperatura absoluta de fusión del metal, en ese rango de temperatura tiene lugar la disolución preferencial de precipitados en la matriz de los aceros inoxidables austeníticos.

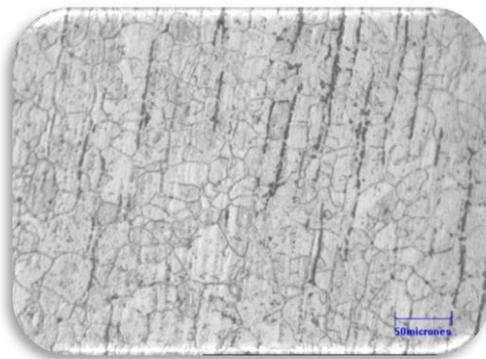
4.2.2.1.2 Microestructuras de las zonas deformadas de la falda



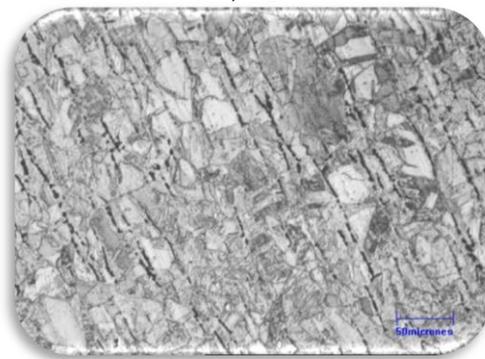
a) N_1



b) N_2



c) $N-O_2$



d) $N-O_1$

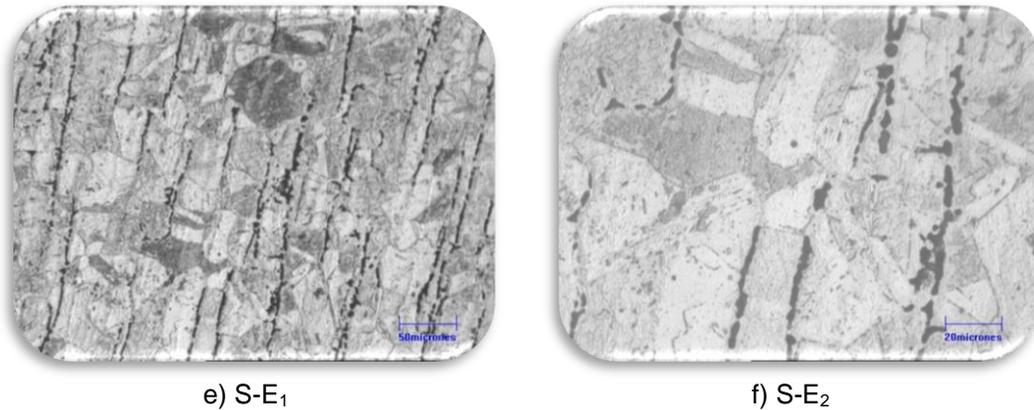


Figura 37: Microestructuras de las zonas deformadas de la falda (200x), se observa la presencia de precipitados rodeando el borde de grano y atravesando la matriz.

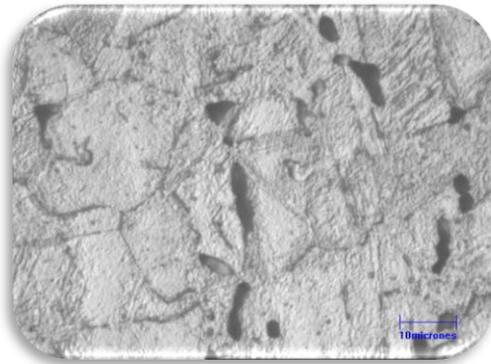
Las microestructuras que se presentan en la figura N° 37 exponen granos similares en todas las zonas deformadas, observándose precipitados alineados en la matriz austenítica, así como precipitados que coalescen orientándose preferencialmente hacia los bordes de grano; la figura 37b (200x) muestra algunos granos donde este proceso está más desarrollado debido a que pertenece a una de las zonas con deformación plástica severa.

Por otra parte se distinguen granos irregulares de diversos tamaños, esto ocurre porque durante la deformación plástica, la forma de los granos cambia manteniendo la cohesión de los límites de grano, y como es sabido el material experimentó durante su servicio una continua deformación plástica, dando lugar a una constante recristalización tal y como se observan en los granos de las microestructuras deformadas.

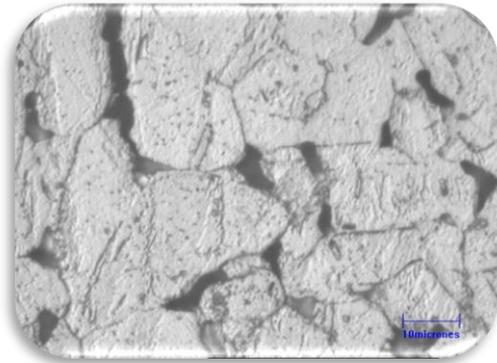
A continuación en la figura N° 38 se detallan las microestructuras de las zonas deformadas a un mayor aumento para distinguir la forma en que los precipitados se orientan hacia los bordes de grano, observándose la degradación de los mismos. La evidencia metalográfica muestra claramente



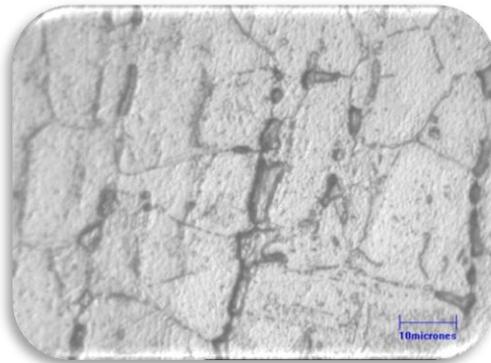
a un material sometido a fuertes deformaciones plásticas a elevada temperatura.



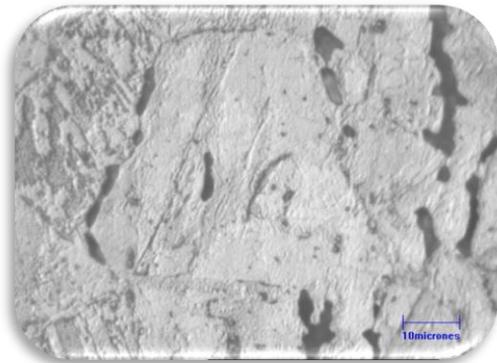
a) N₁



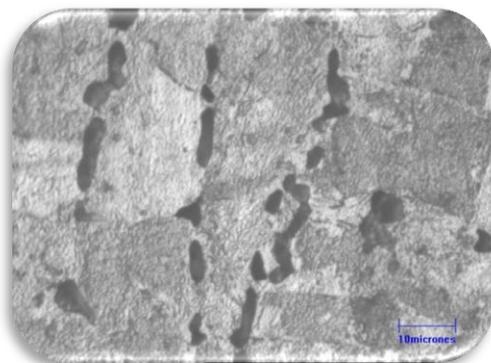
b) N₂



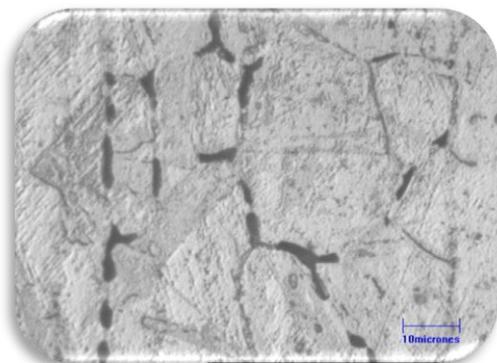
c) N-O₂



d) N-O₁



e) S-E₁



f) S-E₂

Figura 38: Microestructuras de las zonas deformadas (1000x) para detallar los precipitados orientados hacia los bordes de grano.



4.2.2.2 Microscopía electrónica de barrido

A continuación se presentan los microanálisis puntuales determinados con la técnica de EDX, a fin de conocer la composición química de los precipitados observados en la microscopía óptica y de esta forma establecer si su presencia es perjudicial o no para la aleación en estudio.

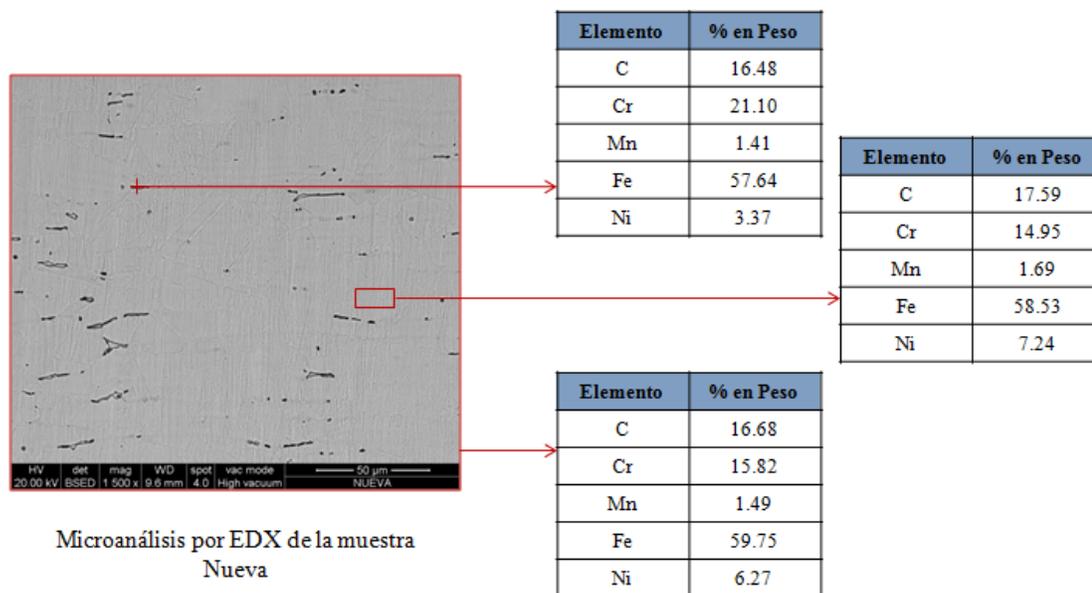
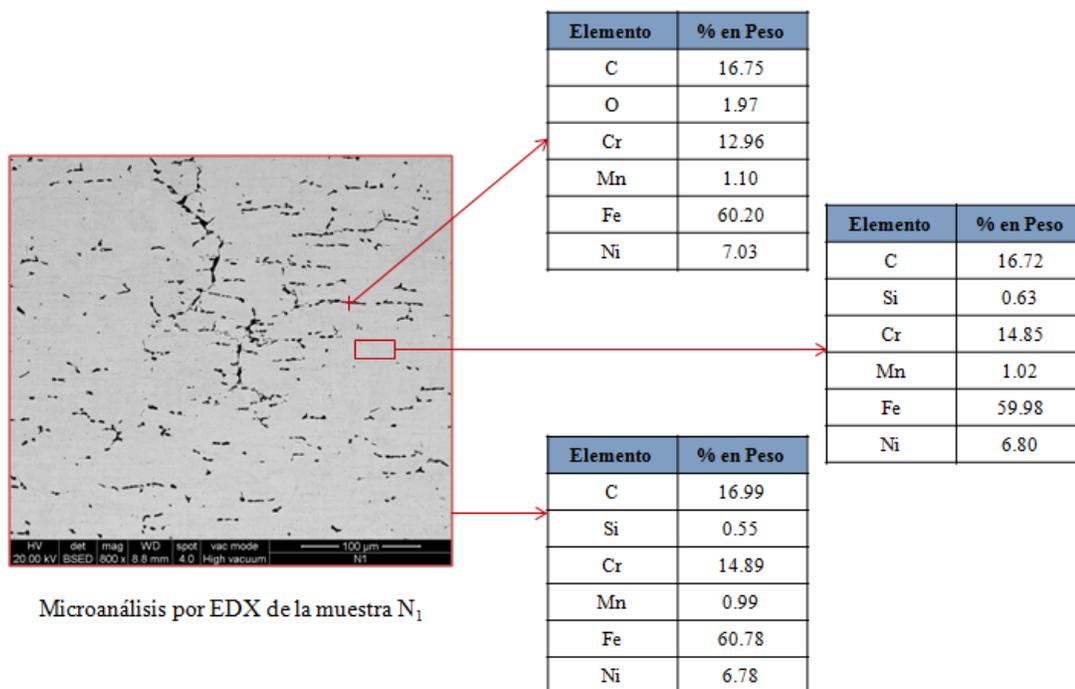


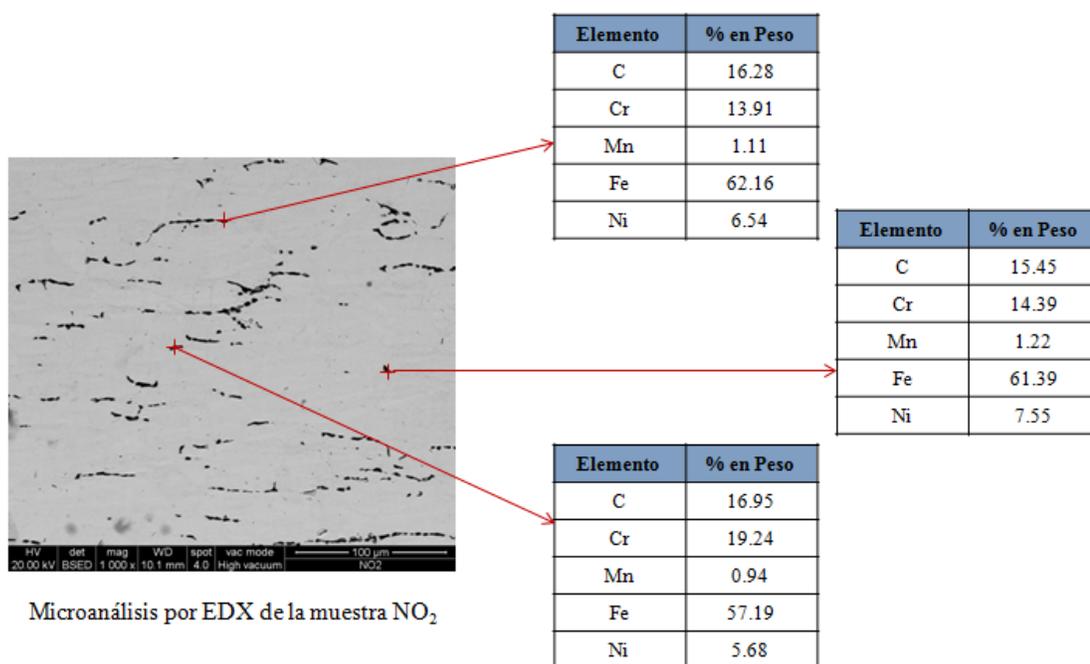
Figura 39: Microanálisis por EDX de la muestra de la falda nueva

Fuente: Fundacite Bolívar

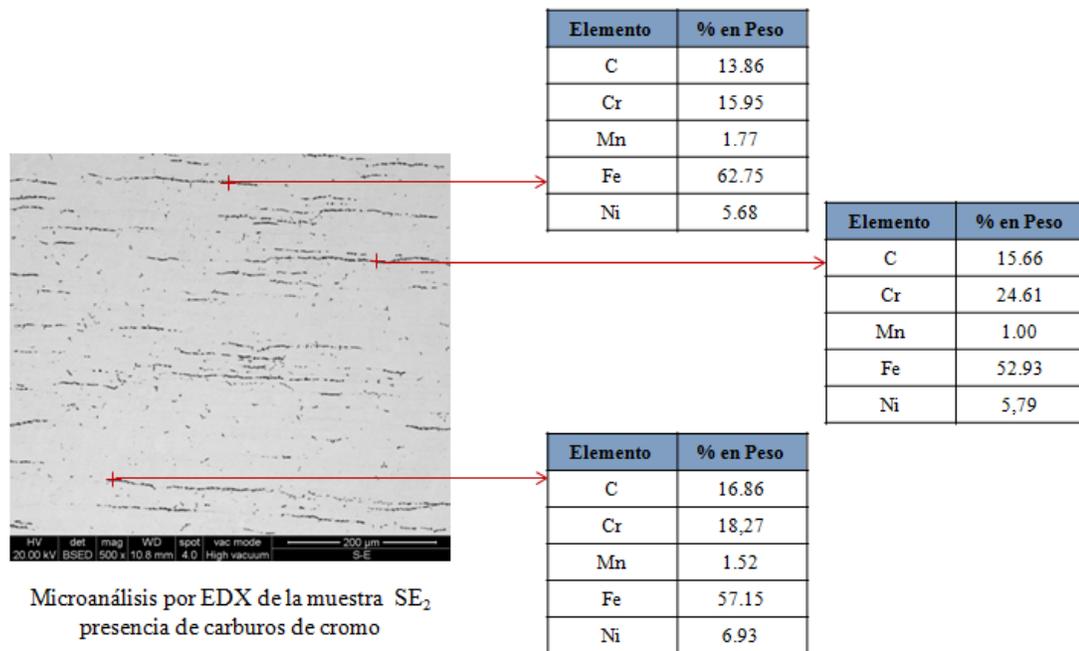
Como era de esperarse la muestra nueva de la falda posee pocos carburos de cromo dispersos en la matriz, (figura N° 39) su aparición como se mencionó en la microscopía óptica está asociada al proceso de fabricación de la lámina, por otra parte, el microanálisis realizado a una zona de la matriz refleja que se encuentran presentes elementos propios de la aleación.



a) Microanálisis de la muestra N₁



b) Microanálisis de la muestra NO₂



c) Microanálisis de la muestra SE₂

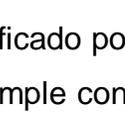
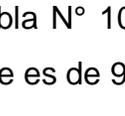
Figura 40: Microanálisis por EDX de las muestras deformadas de la falda
Fuente: Fundacite Bolívar

En la figura N° 40 se presentan los microanálisis realizados a las zonas deformadas de la falda, se observan en todos carburos de cromo tanto alineados en la matriz como en los bordes de grano, además se detectan elementos propios de la aleación y dentro de los límites establecidos en la norma ASTM A240. Los carburos de cromo presentes se atribuyen a la temperatura de trabajo a la que estuvo expuesta la aleación, debido a que la exposición térmica en ese rango de temperatura provoca la disolución preferencial de carburos de cromo, por ser el elemento que tiene mayor afinidad con el carbono. (ASM Metals HandBook, 2000).



4.2.3 Ensayo de dureza

Tabla 10: Valores de dureza obtenidos experimentalmente y establecido por la norma ASTM A-240

		Escala utilizada: HRB 100 (carga)								
MUESTRA		Valores de Dureza					Valor Promedio	Dureza máx. ASTM A-240		
Menor dureza DEFORMACIÓN LEVE	NUEVA		78	78	78	79	79	78,4	92 HRB	
	N-O (1)		78	79	79	80	80	79,2		
	N-O (2)		78	79	77	77	75	77,2		
Mayor dureza DEFORMACIÓN SEVERA	N(1)		85	87	87	87	86	86,4		
	N(2)		79	82	83	81	80	81,0		
	S-E (1)		85	87	86	86	85	85,8		
	S-E (2)		88	88	89	88	89	88,4		

El valor promedio de la muestra nueva obtenido experimentalmente está por debajo del valor especificado por la norma ASTM A240 manifestando sin embargo que el material cumple con las especificaciones de dureza exigidas tal como se indica en la tabla N° 10 donde se puede observar que el valor máximo de dureza aceptable es de 92 HRB.

Sin embargo, al analizar las muestras deformadas, y compararlas con la nueva se hace evidente el aumento del valor de dureza el cual se atribuye entre otras causas a un endurecimiento por deformación causado por la deformación plástica soportada por la falda a elevadas temperaturas, que trae como consecuencia en este caso un aumento de la densidad de



dislocaciones originando una disminución de la ductilidad del material. Además no debe descartarse el endurecimiento provocado en el material producto de la formación de precipitados tanto en la matriz como en los bordes de grano.

4.2.4 Ensayo de Tracción

En este ensayo no solo se puede verificar la resistencia a la tracción de la probeta deformada, sino que además se obtuvieron datos respecto a la resistencia a la fluencia, así como el porcentaje de elongación, los cuales permitirán inferir sobre el comportamiento mecánico de la aleación en servicio y compararlos a su vez con las propiedades mecánicas especificadas en la norma de la aleación, en la figura N° 41 se puede observar la probeta de tracción una vez finalizado el ensayo.



Figura 41: Probeta de tracción ensayada

Tabla 11: Propiedades mecánicas de la aleación 304 H según norma ASTM A240

UNS Designación	Tipo	Resistencia a la tracción, min		Resistencia a la fluencia min		Elongación min. %
		ksi	Mpa	ksi	Mpa	mm
S30409	304H	75	515	30	205	40



Tabla 12: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción

Probeta	Resistencia a la tracción experimental		Resistencia a la fluencia	Máx. deformación
	ksi	Mpa	Ksi	%
1	80,16	553,87	40,64	39,31

El resultado arrojado en este ensayo reflejó en comparación con la norma un incremento tanto de la resistencia a la tracción como de la resistencia a la fluencia, que trae como consecuencia una disminución del porcentaje de elongación esto se traduce a su vez en un material con mayor dureza pero menor ductilidad.

Esto corrobora los resultados obtenidos en el ensayo de dureza, al existir mayor concentración de precipitados se obtiene un material más duro que ofrece mayor resistencia a la tracción sin embargo, este incremento de propiedades se ve influenciado en la ductilidad del material ya que al ser más duro brinda menos porcentaje de deformación.

4.3 Evaluación del procedimiento de soldadura especificado por el fabricante para la falda luego de 19 corridas, mediante ensayos de tracción y doblado, a fin de optimizar procedimientos de reparación existentes.

El procedimiento de soldadura aplicado a las placas de la zona SO fue el WPS Precaif.B2.1-8-023-94R Falda-Falda, suministrado por la empresa Orinoco Iron S.C.S, al momento de evaluar dicho procedimiento se tomaron en cuenta ciertas variables como el electrodo utilizado el cual fue E308L, además se controló la temperatura de interpasos la cual no superó los 735°C



y se cumplió con el diseño de juntas en (V) establecido en el procedimiento. Una vez soldadas las placas se procedió a realizar un ensayo de tintes penetrantes en el cual no se observó ninguna discontinuidad en la superficie. Para continuar se evaluó el procedimiento con ensayos de doblado y tracción a fin de verificar si las placas aún deformadas conservaban sus propiedades de soldabilidad, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

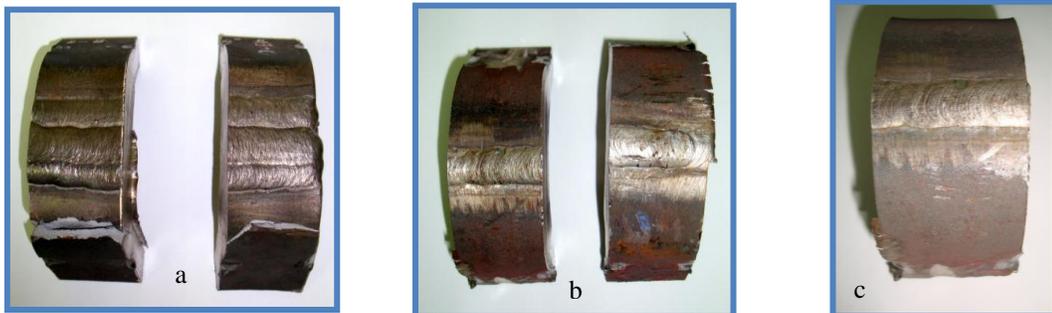


Figura 42: Probetas del ensayo de doblado, para visualizar el cordón de soldadura; a) cara, b) raíz; c) detalle del cordón.

Como se puede observar en la figura N° 42 el cordón de soldadura resistió la prueba de doblado, en la zona cara de la probeta se observa que se agrietó el metal base más no la zona afectada por el calor, estas evidencias fueron comparadas con los criterios de aceptación de la prueba de doblez establecidos en el código ASME Sección IX el cual describe que se acepta el procedimiento siempre y cuando la probeta no se agriete ni en el cordón de soldadura ni en la zona afectada térmicamente.

Siguiendo este orden de ideas se mostraran los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.



Tabla 13: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción para las probetas soldadas

Probeta	Resistencia a la tracción experimental		ASTM A-240 (metal base)	
	ksi	Mpa	ksi	Mpa
1	83,47	576,73	75	515
2	85,61	591,53		

Al comparar los resultados con la norma de la aleación se observa un aumento de la resistencia a la tracción de la probeta soldada, este resultado era de esperarse debido a que el material de aporte en combinación con el metal base debería ofrecer una mayor resistencia a esfuerzos de tracción de la que posee por sí solo el metal base, al igual que en el ensayo de doblez las evidencias encontradas se compararon con los criterios de aceptación de la prueba de tensión del código ASME Sección IX, en el que se corrobora que la probeta debe fracturar por el cordón de soldadura siempre y cuando la resistencia del espécimen sea mayor que la resistencia a la tracción ofrecida por el metal base por lo tanto el procedimiento de soldadura aplicado se considera aprobado.

4.4 Correlación de las propiedades de la aleación AISI 304 H luego de 19 corridas con la norma especificada para el material, a fin de evaluar los cambios mecánicos-metalúrgicos que se han presentado y de esta manera determinar si la aleación puede seguir cumpliendo la función para la cual fue diseñada.

La exposición de la falda a constantes ciclos térmicos que se producen tanto al iniciar el arranque como la parada del tren, luego de estar sometida a temperaturas aproximadas de 655 °C por tiempos prolongados, da lugar a



una continua recristalización, razón por la cual en la microscopía óptica se distinguen granos de diversos tamaños y morfologías, adicionado a esto, la temperatura de operación a la que se encontró expuesta la aleación es propensa para que en los aceros inoxidable austeníticos se dé la disolución preferencial de precipitados en los bordes de grano.

Por otra parte lo anterior dicho pudo corroborarse de otra manera por un análisis cuantitativo de microscopia electrónica de barrido al afirmar la presencia de carburos de cromo alojados en los bordes de grano que conforman dicha estructura, confirmando de que el material se encontró operando en el rango de susceptibilidad a la corrosión intergranular.

La corrosión intergranular afecta las propiedades mecánicas, es por esto que las evidencias encontradas en el ensayo de dureza y tracción reflejan un aumento de las propiedades mecánicas entre las que se tiene dureza y tracción generando una disminución de la ductilidad.

Dicho lo anterior y comparando los resultados con el estudio realizado a la aleación original, se evidencia que la aleación que estuvo en servicio manifestó cambios tanto en su microestructura como en sus propiedades mecánicas, microestructuralmente se observó degradación en los límites de grano y precipitados de carburos de cromo, orientados en los bordes de grano, lo que das indicio a un ataque intergranular. (Standard ASTM, 2000).

En lo que se refiere a las propiedades mecánicas se corroboró una degradación del material, aunado a esto es importante añadir el tiempo de servicio al que estuvo sometida la aleación.



CONCLUSIONES

- 1) Las variables de operación estudiadas se encuentran dentro de las especificadas en el diseño y al analizar su comportamiento se comprobó que el rango de temperatura de servicio (655 °C) es propenso para que se dé la corrosión intergranular.
- 2) El análisis químico realizado demuestra que la aleación en estudio corresponde a un acero inoxidable 304 H según la norma ASTM A-240. Mediante la microscopía óptica se observó en la muestra nueva una microestructura con maclas características de aceros inoxidables y existencia de precipitados dispersos en la matriz, mientras que en la muestra que estuvo en servicio se distinguieron granos deformados con presencia de precipitados orientados preferencialmente en los bordes de grano. El estudio microestructural por la técnica de EDX reflejó que los precipitados observados en la microscopía óptica contienen alto contenido de carbono y cromo, detectándose además elementos propios de la aleación.
- 3) El procedimiento de soldadura aplicado al material en servicio cumplió con los criterios de aceptación establecidos en la norma ASME sección IX.
- 4) La correlación de las evidencias encontradas señala que la aleación que estuvo expuesta en servicio, manifestó desde el enfoque microestructural granos deformados, con precipitados que de acuerdo a la temperatura de



operación y tipo de material dan indicio a carburos de cromo, indicando por lo tanto, que el material se encuentra sensibilizado. Desde el punto de vista mecánico el material presentó una degradación de las propiedades mecánicas, generando un incremento de la dureza y la resistencia a la tracción, lo que se traduce en una disminución de la ductilidad, afirmando entonces que el material en servicio presentó cambios desfavorables desde el punto de vista mecánico y metalúrgico.



RECOMENDACIONES

- 1) Establecer un seguimiento de metalografías y ensayos de dureza, in situ de manera tal que las microestructuras y datos obtenidos en este trabajo sirvan de referencia para evaluar otras faldas.
- 2) Realizar un estudio de plasticidad que permita verificar si la deformación plástica de la falda es solo producto de ciclos térmicos.
- 3) Considerando los resultados en el estudio de plasticidad y descartada la influencia de otras variables en la degradación del componente, proponer un material que se adapte a las condiciones de servicio y así garantizar que presente un mejor comportamiento, tales como los aceros inoxidables estabilizados con Niobio y Titanio (AISI 321 y el AISI 347).
- 4) Implementar un control de calidad para verificar composición química del material que ingresa a la planta.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) American Petroleum Institute (API). Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry.
- (2) ARIAS, F. (1999) El proyecto de Investigación. Guía para su elaboración, 3ra. Edición. Caracas. Pág. 53, 98.
- (3) ARCERLOR MITTAL. Boletín Técnico N°5 Noviembre/2008.
- (4) ASM Metals HandBook Volume 13 – Corrosión. Tomo 13. Pág. 534, 537, 565, 566, 567.
- (5) BRYAN, F. (2009). Evaluación del sistema que dosifica finos de hierro metalizado (remet) al proceso de reducción directa FINMET® en Orinoco Iron S.C.S; “Informe de Práctica Profesional” Puerto Ordaz (Venezuela). Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Pág. 10.
- (6) DI CAPRIO G. (1999). Los Aceros Inoxidables, ed. Grupinox, Milano
- (7) HERNÁNDEZ, C, C., FERNÁNDEZ, P, BATISTA (2002). Metodología de la investigación. México. Mc Graw-Hill. Pág. 309.
- (8) HERNÁNDEZ, R. (1997). Metodología de la Investigación. Pág. (58-59, 63-66).



-
-
- (9) HINOJOSA, M. (2000). La estructura cristalina de los metales. Ingenierías, vol.III, No. 8. Pág. 23-24.
- (10) LÓPEZ, E. (2009). Análisis de falla de la parrilla distribuidora de gas reductor del reactor R10 de la empresa Orinoco Iron[®] S.C.S. “Informe de Trabajo de Grado” Puerto Ordaz (Venezuela). Universidad Gran Mariscal de Ayacucho. Pág. 12, 17.
- (11) MÉNDEZ C. (1995). Metodología “Guía para elaborar diseños de investigación en ciencias económicas, contables y administrativas”. Pág. 145.
- (12) SALAZAR L. Tecnología de la Soldadura.
- (13) Standard ASTM Materiales Ferrosos A 262. Pág. 4, 5.
- (14) VELÁSQUEZ, E. (2010). Efecto de la adición de remet en el potencial de metalización y el grado de adherencia de la mezcla mineral-remet alimentada al proceso FINMET[®] de Orinoco Iron S.C.S; “Informe de Práctica Profesional” Puerto Ordaz (Venezuela). Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Pág. 10. Pág. 26.