



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL
DEL ACERO DUPLEX SAF 2507 EXPUESTO A UNA
SOLUCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO A BAJAS
TEMPERATURAS**

Fabricio A. Rodríguez M.
Tomás D. Loaiza C.

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO DUPLEX SAF 2507 EXPUESTO A UNA SOLUCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO A BAJAS TEMPERATURAS

Trabajo Especial de Grado Presentado ante la Ilustre:
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
Para Optar al Título de:
INGENIERO MECÁNICO

Tutor académico:
Laura Sáenz. *Ing. MSc. Dra.*

Autores:
Fabricio A. Rodriguez M
Tomás D. Loaiza C

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Evaluación de la degradación microestructural del acero dúplex SAF 2507 expuesto a una solución de ácido clorhídrico a bajas temperaturas”**, presentada por los bachilleres: **Fabricio A. Rodríguez M, Tomás D. Loaiza C.** y portadores de la Cédula de Identidad N°: **18.928.905** y **17.066.044**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Laura Sáenz, *Ing. MSc.Dra.*
Presidente del jurado

Prof. Gennifer Aparicio, *Ing. MSc.*
Miembro del jurado

Prof. Eleazar Díaz, *Ing. MSc.*
Miembro del jurado

Naguanagua, Mayo de 2011

Dedicatoria

A mi madre Matilde, por ser valiente ejemplo de perseverancia y constancia.

A mi padre Rodrigo, por brindarme siempre todo el apoyo y ser ejemplo de honestidad y solidaridad.

A mi hermana Delitmar, por ser la mejor hermana del mundo y brindarme alegría todos los días.

A mi abuela Lucia, a mi abuela Ana, a mis tíos y tías, primos y primas, y todos mis familiares por siempre poder contar con ustedes.

En especial a Marianny, por haber aparecido en mi vida de forma tan especial y por compartir gratos momentos.

Fabricio Ali Rodríguez Meléndez

Dedicatoria

Primeramente dedico mi trabajo de grado a Dios quien me sostuvo todo el tiempo con su diestra, Jesucristo quien fue mi inspiración a no desmayar y seguir adelante y al Espíritu Santo que nunca me dejó solo, a pesar de los momentos difíciles que atravesé siempre estuvo hay pendiente de mi, siempre me mostro la salida a los problemas que enfrentaba

A mis padres Joel Rivero y Elsa Santana quienes fueron mi apoyo incondicional, mi provisión y mi ejemplo a seguir

A mis otros padres Rubén Loaiza y Kasandra España quienes me enseñaron el valor de la resistencia

A mis familiares que ya no están con vida mis abuelos Tomas y David, mi tío Tomas y mi abuela mercedes que durante su vida me enseñaron muchas cosas de la vida

A todos mis familiares mi abuela audelina, mi tío Luis, mi tía Emma, mis prima Fabiola, que de una forma u otra me dieron palabras de aliento en esos momentos que mas necesite

A mis amigos que estuvieron en las buenas y en las malas y que siempre pude contar con ellos

Tomas David Loaiza Santana

Agradecimientos

A Dios todopoderoso, por guiarnos por buen camino en todos los momentos.

A nuestra tutora Laura Sáenz, por su dedicación y colaboración en el desarrollo del trabajo de grado.

A los profesores Gennifer Aparicio y Eleazar Díaz, que prestaron su valioso tiempo para realizar las correcciones a nuestra tesis de grado.

Al profesor Alfredo Castillo encargado del laboratorio de Química general por permitarnos utilizar los implementos necesarios para la realización de los ensayos.

A la profesora Vanesa Altomare y al Lic. Mario Sánchez por su valiosa asesoría en el laboratorio de Química orgánica.

Al profesor Esteban Barrios, encargado del laboratorio de microscopía electrónica de barrido en el Tecnológico de la región capital, por colaborar en el análisis de las probetas.

A la compañía Sandven steel, c.a. En especial a la ingeniero Abby Sánchez por prestarnos colaboración indispensable para la realización de nuestro estudio experimental.

A la técnico del laboratorio de Materiales, Lic. Yosmari, por su valiosa colaboración en la preparación metalográfica de las probetas.

A todas las personas que de alguna forma colaboraron en la realización de nuestro trabajo de grado. Llegue a ustedes nuestro más sincero agradecimiento.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo Especial de Grado para optar al título de:
INGENIERO MECÁNICO

**EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL
ACERO DÚPLEX SAF 2507 EXPUESTO A UNA SOLUCIÓN DE ÁCIDO
CLORHÍDRICO A BAJAS TEMPERATURAS**

Autores: Fabricio A. Rodríguez M.
Tomás D. Loaiza C.

Tutor: Prof. Laura Sáenz, Ing. Msc. Dra.

Fecha: Mayo 2011

RESUMEN

El objetivo del estudio consistió en evaluar la degradación microestructural del acero dúplex Saf 2507 expuesto a una solución acuosa de ácido clorhídrico con concentraciones de 3%, 4% y 5%. A temperaturas de trabajo de 27°C, 47°C y 65°C. El tiempo de duración para cada condición ensayada fue de 24, 48 y 72 horas respectivamente. La técnica para determinar la velocidad de corrosión promedio fue basada en el método de la pérdida de peso, de conformidad con la norma ASTM 262-c. Para evaluar la microestructura, la composición química y la dureza se realizó un estudio de microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersa de rayos X y ensayos de microdureza Vickers. Los resultados en las velocidades de corrosión se expresan en un rango desde 0,67 mm/año para la concentración de 3% de ácido clorhídrico a temperatura de 27°C hasta 49,17 mm/año para la condición más crítica de 65°C a 5% de HCl. La velocidad de corrosión mostró un comportamiento constante para una misma condición de ensayo. A nivel microscópico el deterioro se evidenció picaduras, pérdida de la fase ferrita, pérdida de límite de grano y separación intergranular. Mediante el análisis de espectroscopía de energía dispersa de rayos X se demostró la pérdida de la fase de ferrita a partir de condiciones de temperatura de 47°C y concentraciones de 4% de ácido clorhídrico.

Tabla de contenidos

	Pag
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	vii
Símbolos y abreviaturas.....	viii
Tabla de contenidos.....	ix
Índice de figuras	xii
Índice de tablas	X
INTRODUCCIÓN	X
CAPÍTULO 1 Situación Problemática	1
1.1 El Problema.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Alcance.....	4
1.5 Limitaciones.....	4

1.6 Antecedentes.....	4
CAPÍTULO 2 Fundamentos Teóricos	08
2.1 Aceros dúplex.....	08
2.1.1 aceros dúplex SAF 2507.....	14
2.2 Corrosión.....	20
2.2.1 Tipos de corrosión.....	21
2.2.2 Aireación.....	33
2.2.3 Sensibilización.....	33
2.2.4 Efectos de la temperatura en la velocidad de corrosión....	33
2.2.5 Acido clorhídrico como agente corrosivo.....	34
2.2.6 velocidad de corrosión.....	36
2.2.7 Desviación estándar.....	37
2.3 Corrosión en la industria petrolera.....	38
2.3.1 Agentes corrosivos.....	38
CAPITULO 3 Metodología	40
3.1 Nivel de la investigación.....	40
3.2 Diseño de la investigación.....	40
3.3 Etapa de la metodología.....	40
3.3.1 Adquisición del material.....	42
3.3.2 Mecanizado de las probetas.....	42
3.3.3 Sensibilización de las muestras.....	43
3.3.4 Preparación metalográfica.....	43
3.3.5 Identificación de las muestras.....	44
3.3.6 Preparación de reactivos químicos y soluciones.....	45
3.3.7 Montaje de los ensayos de corrosión.....	46
3.3.8 Determinación de la pérdida de peso.....	47
3.3.9 Estudio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.....	49
3.3.10 Ensayo de microdureza.....	50
CAPITULO 4 Análisis de Resultados y Discusión	52
4.1 Evaluación de pérdida de peso y velocidad de corrosión del acero dúplex SAF 2507.....	52
4.1.1 Ensayos a temperatura de 27°C.....	52
4.1.2 Ensayos a temperatura de 47°C.....	57
4.1.3 Ensayos a temperatura de 65°C.....	61
4.1.4 Evaluación de la influencia de la temperatura en la velocidad de corrosión.....	65

4.1.5 Evaluación de la influencia de la concentración de ácido clorhídrico en la velocidad de corrosión.....	66
4.2 Evaluación de microestructura del acero dúplex SAF 2507 a través de imágenes de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido con EDX.....	68
4.2.1 Muestras del material original.....	70
4.2.2 Muestras sensibilizadas.....	72
4.2.3 Muestras de acero duplex a temperatura de 27°C.....	77
4.2.4 Muestras de acero duplex a temperatura de 47°C.....	81
4.2.5 Muestras de acero duplex a temperatura de 65°C.....	83
4.3 Análisis del contenido de cromo y níquel presentes en las muestras ensayadas	87
4.4 Resultado de los ensayos de microdureza Vickers (Hv).....	89
4.4.1 Muestras a condiciones de temperatura de 27°C.....	92
4.4.2 Muestras a condiciones de temperatura de 47°C.....	94
4.4.3 Muestras a condiciones de temperatura de 65°C.....	96
CAPITULO 5 Conclusiones y Recomendaciones	101
5.1 Conclusiones.....	101
5.2 Recomendaciones.....	103
Referencias Bibliográficas	104
Anexos	105

Índice de figuras

2.1 Estructura de las fases que componen al acero dúplex.....	10
2.2 Solidificación de acero dúplex.....	11
2.3 Acero dúplex Saf 2507.....	15
2.4 Velocidad de corrosión en ebullición de mezclas de 50% de ácido acético y proporciones variables de ácido fórmico. Pruebas de 24, 48 y 72 horas..	16
2.5 Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido fórmico aireado	16
2.6 Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido sulfúrico aireado. (0,1 mm/año, 4 mpy).....	17
2.7 Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido clorhídrico aireado. (0,1 mm/año, 4 mpy).....	17
2.8 Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido sulfúrico aireado con 2000 ppm Cl (0,1 mm/año, 4 mpy).....	18
2.9 Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2304 en ácido nítrico. (0,1mm/año, 4 mpy).....	18
2.10 Valores de dureza para el acero Saf 2507.....	19
2.11 Corrosión húmeda.....	21
2.12 Corrosión filiforme.....	23
2.13 Corrosión intergranular.....	25
2.14 Corrosión intergranular.....	25
2.15 Corrosión en grietas.....	27
2.16 Corrosión en grietas.....	29
2.17 Corrosión intergranular.....	30
2.18 Corrosión selectiva.....	31
2.19 Corrosión selectiva.....	33
3.1 Metodología utilizada en el estudio.....	41
3.2 Forma geométrica de las probetas del ensayo.....	42
3.3 Banco de desbaste grueso.....	44

3.4 Código utilizado en la identificación de las muestras.....	45
3.5 Montaje de los ensayos.....	46
3.6 Microdurómetro.....	51
4.1 Gráfica de pérdida de peso promedio en función del tiempo a temperatura de 27°C.....	54
4.2 Gráfica de la velocidad de corrosión en función del tiempo a temperatura de 27°C.....	56
4.3 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl a temperatura de 27°C.....	56
4.4 Gráfica de la pérdida de peso promedio función del tiempo a temperatura de 47°C.....	58
4.5 Gráfica de la velocidad de corrosión en función del tiempo a temperatura de 47°C.....	60
4.6 Gráfica de velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl a temperatura de 47°C.....	60
4.7 Gráfica de la pérdida de peso porcentual en función del tiempo a temperatura de 65°C.....	62
4.8 Gráfica de la velocidad de corrosión en función del tiempo a temperatura de 65°C.....	64
4.9 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl a temperatura de 65°C.....	64
4.10 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la temperatura.....	66
4.11 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl.....	67
4.12 Acero dúplex SAF 2507, Condición original, MEB 1500X.....	68
4.13 Acero dúplex SAF 2507, Condición original, MEB 100X.....	69
4.14 Condición original del acero dúplex SAF 2507, fase austenita.....	69
4.15 Análisis de EDX, Condición original del acero dúplex SAF 2507, fase ferrita.....	70
4.16 Acero duplex SAF 2507, Condición sensibilizada, MEB 1500X.....	71
4.17 Análisis de EDX, Condición sensibilizada del acero dúplex SAF 2507, fase austenita.....	71
4.18 Análisis de EDX, Condición sensibilizada del acero dúplex SAF 2507, fase ferrita.....	72
4.19 Acero duplex SAF 2507, Condición 27°C a 3% HCl. 400X.....	73
4.20 Acero duplex SAF 2507, Condición 27°C a 4% HCl. 1500X.....	73
4.21 Análisis de EDX, Condición 27°C, 3% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase ferrita.....	74
4.22 Análisis de EDX, Condición 27°C, 3% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.....	75
4.23 Acero dúplex SAF 2507, Condición 27°C, 4% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X,.....	76
4.24 a) Análisis de EDX, Condición 27°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase ferrita.....	76
4.25 a) Análisis de EDX, Condición 27°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507,	

fase austenita	77
4.26 Acero duplex SAF 2507, Condición 47°C, 3% HCl, fase ferrita.....	78
4.27 acero dúplex SAF 2507, Condición 47°C, 4% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X,	78
4.28 a) Análisis de EDX, Condición 47°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, borde de grano	79
4.29 a) Análisis de EDX, Condición 47°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita	80
4.30 Acero duplex SAF 2507, Condición 47°C, 5% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X,	81
4.31 Análisis de EDX, Condición 47°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita	81
4.32 Análisis de EDX, Condición 47°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita	82
4.33 a) Acero dúplex SAF 2507, Condición 65°C, 3% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X.....	83
4.34 Análisis de EDX, Condición 65°C, 3% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita	83
4.35 Análisis de EDX, Condición 65°C, 3% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita	84
4.36 Acero dúplex SAF 2507, Condición 65°C, 4% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X.....	84
4.37 Análisis de EDX, Condición 65°C, 4% HCl, acero dúplex 2507.....	85
4.38 Análisis de EDX, Condición 65°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.....	85
4.39 a) Acero dúplex SAF 2507, Condición 65°C, 5% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X.....	86
4.40 Análisis de EDX, Condición 65°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.....	87
4.41 Análisis de EDX, Condición 65°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.....	87
4.42 Comparación de concentraciones de cromo y níquel del acero duplex SAF 2507 en la fase austenita.....	88
4.43 Comparación de concentraciones de cromo y níquel del acero duplex SAF 2507 en la fase ferrita	89
4.44 Microdureza vickers en función del tiempo para cada condición de ensayo. Fase austenítica.....	91
4.45 Microdureza vickers en función del tiempo para cada condición de ensayo. Fase ferrítica	92
4.46 Gráfica de microdureza vickers para ferrita y austenita a temperatura de 47°C.....	94
4.47 Gráfica Vickers vs Tiempo.....	96

Índice de tablas

2.1 Composición química del acero Dúplex 2507. Fuente: Sandvik.....	14
2.2 Propiedades mecánicas del acero Dúplex 2507. Fuente: Sandvik....	14
2.3 Clasificación de la velocidad de corrosión.....	37
3.1 Composición química del acero dúplex 2507.....	42
3.2 Datos técnicos Maquina de electroerosión.....	43
3.3 Datos de placa de la devastadora.....	44
3.4 Condición de los ensayos de corrosión.....	47
3.5 Datos de placa microscopio óptico.....	49
3.6 Datos de placa del microscopio electrónico de barrido.....	49
3.7 Datos de placa microdurómetro digital.....	50
4.1 Pérdida de peso para el acero dúplex 2507 a temperatura de 27°C.....	53
4.2 Velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 a temperatura de 27°C	55
4.3 Pérdida de peso para el acero Dúplex 2507 a temperatura de 47°C.	57
4.4 Velocidad de corrosión del acero dúplex 2507 a temperatura de 47°C	59
4.5 Pérdida de peso para el acero Dúplex 2507 a temperatura de 65°C.	61
4.6 Velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 a temperatura de 65°C	63
4.7 Resultados de velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 en función de la temperatura.	65

4.8 Velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 en función de la concentración de ácido clorhídrico.....	67
4.9 Resultados de microdureza en austenita a temperatura de 27°C...	90
4.10 Resultados de microdureza en ferrita a temperatura de 27°C.....	92
4.11 Resultados de microdureza en austenita a temperatura de 47°C.	94
4.12 Resultados de microdureza en ferrita a temperatura de 47°C.....	94
4.13 Resultados de microdureza en austenita a temperatura de 65°C.	95

Introducción

El estudio de los aceros en la industria petrolera y la apropiada selección de los mismos, constituye una labor de gran relevancia que implica aspectos productivos, económicos y de seguridad para los trabajadores y el medio ambiente.

Uno de los problemas más frecuentes es el deterioro por corrosión que sufren las tuberías de los intercambiadores de calor y los condensadores, debido a la presencia de ácido clorhídrico. Esto ocasiona altos costos de mantenimiento, contaminación de productos refinados y pérdida de eficiencia térmica.

En la actualidad la industria siderúrgica internacional ofrece aceros dúplex de tercera generación que proporciona una combinación óptima de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, diseñados especialmente para las condiciones de trabajo en las refinerías de petróleo y plataformas petroleras de extracción.

Este trabajo pretende estudiar condiciones específicas de temperatura y concentración de ácido clorhídrico para evaluar el comportamiento del acero dúplex SAF 2507 frente al fenómeno de la corrosión, utilizando el método de pérdida de peso para determinar la velocidad de corrosión. También se realiza un estudio de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con EDX y microdureza Vickers.

Con los resultados obtenidos en los ensayos de corrosión se trata de contribuir a la selección apropiada del acero dúplex SAF 2507 para condiciones de trabajo en ambientes con alto contenido de cloruro.

CAPÍTULO 1

Situación problemática

1.1 El problema.

Los procesos de refinación del petróleo representan un entorno donde existe una gran variedad de operaciones con elevadas exigencias en los materiales de construcción. Entre las operaciones críticas en esta industria se destacan: la recuperación de calor de los procesos que se pueden utilizar como fuente de energía en otras partes de las operaciones. Esto involucra el uso de intercambiadores de calor.

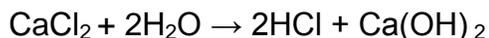
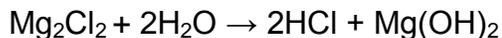
Las severas condiciones dentro de intercambiadores de calor requiere el uso de materiales resistentes a la corrosión para reducir la necesidad de mantenimiento, prevenir la contaminación de los productos refinados y minimizar la pérdida de calor causada por la contaminación del equipo. [1]

El segundo ejemplo el proceso de refinación atmosférica de petróleo, en los sistemas de condensadores de tope. Con el espesor limitado de los tubos en comparación con otras partes del sistema, los efectos negativos de la corrosión tendrán un pronunciado efecto en el rendimiento general del sistema.

La corrosión los sistemas de condensación de tope en unidades de destilación del crudo es un problema común en las refinerías de todo el mundo. Las causas de la corrosión son por ejemplo cloruros (inorgánicos y orgánicos), sulfuro de hidrógeno, formación de sales y ácidos.

Existen condiciones ácidas a partir de sales de cloruro presentes en el aceite crudo, incluso después de la desalinización, hay algunos residuos de sales dejados en el crudo que se hidroliza con HCl.

Las reacciones típicas que ocurren para la formación de HCl en las unidades de crudo son:



El HCl generado no es corrosivo en forma de vapor, pero se activa cuando la temperatura cae por debajo del punto de rocío del ácido. En este punto de condensación inicial, donde el pH más bajo se manifiesta, las condiciones para los materiales se tornan severas.

El uso de los aceros inoxidable de la serie AISI 300 (austeníticos) se ha limitado principalmente por la susceptibilidad inherente a la corrosión intergranular y corrosión bajo tensión en ambientes con elevados contenidos de cloruros, y al alto costo inducido por la adición de la gran cantidad de níquel en su fabricación [1].

Los aceros dúplex SAF provienen de una gama de aleaciones de última generación que presentan dos fases: ferrita y austenita, con un contenido típico de ferrita entre 40% y 60%. Las aleaciones dúplex ofrecen la ventaja con respecto a otros aceros ordinarios de poseer la mayor resistencia a la corrosión y presentar mejores propiedades mecánicas.

El presente trabajo busca evaluar y cuantificar el daño, producto de la degradación microestructural que sufre el acero dúplex SAF 2507 en contacto con una solución acuosa de ácido clorhídrico a tres (3) concentraciones a bajas temperaturas. Con este estudio será posible determinar experimentalmente la velocidad de corrosión del acero dentro de un rango de condiciones de temperaturas y concentraciones de ácido clorhídrico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluación de la degradación microestructural del acero dúplex SAF 2507 debido a la estimulación con ácido clorhídrico

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las muestras de los aceros inoxidable dúplex 2507, mediante el análisis químico, microdureza y metalografía
- Sensibilizar las muestras a una temperatura de 675 °C durante 1 h. según la norma ASTM 262-02a práctica C.
- Determinar la velocidad de corrosión por el método de pérdida de peso para cada condición de estudio.
- Estudiar la microestructura de las muestras corroidas.
- Evaluar la microdureza de las muestras de acero después de la exposición al medio corrosivo.

1.3 Justificación

Debido a la gran diversidad de aplicaciones que tiene el acero en la industria en general, es de suma importancia conocer, entre otras propiedades, la resistencia de estos materiales a la corrosión. La mayoría de los problemas de corrosión que a diario se encuentran, deben su influencia o implican de algún modo a los ácidos minerales o sus derivados.

Es ampliamente reconocido que la resistencia a la corrosión es un objetivo que debe ser alcanzado conjuntamente con los requerimientos mecánicos. Por lo tanto el presente trabajo busca complementar la información actual del acero dúplex SAF 2507 para contribuir con el proceso de selección de materiales resistentes a la corrosión por estimulación con ácido clorhídrico.

1.4 Alcance

- El material objeto de estudio es el acero dúplex SAF 2507.
- Se utilizarán seis (6) probetas para cada condición de estudio con las siguientes dimensiones: 30mm de diámetro y 3mm de espesor. De conformidad con la Norma ASTM G4-01.
- El medio corrosivo se logrará con una solución acuosa de ácido clorhídrico a concentraciones de 3%, 4% y 5% m/v.
- Las condiciones de temperatura para cada ensayo serán de 27 °C, 47 °C y 65 °C.
- Los períodos de exposición tendrán una duración de 24, 48 y 72 horas.
- Se utilizará microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para evaluar el deterioro microestructura.

1.5 Limitaciones

1. La adquisición y mecanización del acero dúplex SAF 2507 tiene un alto costo y su disponibilidad es limitada.
2. La accesibilidad a los laboratorios ubicados en la ciudad de los Teques de microscopía electrónica de barrido con EDX es por previa cita y su disponibilidad es limitada.
3. Existe peligro latente en la manipulación del ácido clorhídrico por lo que su uso es delicado y requiere de personal con experiencia para evitar posibles accidentes.

1.6 Antecedentes

Viloria *et al*, en 1996, Evaluaron el comportamiento del acero dúplex 22Cr sometido a la acción de diferentes fluidos de acidificación, en condiciones reales de presión y temperatura de operación en la estimulación de pozos petroleros.

Adicionalmente estudiaron la acción de un inhibidor comercial producido por la compañía H221, recomendado para el control de la corrosión del acero dúplex 225Cr durante procesos de acidificación. La metodología consistió en realizar ensayos de pérdida de peso en autoclaves, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM 31-72, a presiones de 400 – 1000 lb/pie² y temperaturas (150 y 177 °C) de fondo de pozo, estudios morfológicos, análisis de superficie y espectroscopía fotoelectrónica de Rayos X, del material expuesto a diferentes fluidos. Las soluciones utilizadas se prepararon a partir de ácido clorhídrico, bifluoruro de amonio y agua desionizada. La preparación previa de las probetas, así como el tratamiento posterior al ensayo estuvo basado en la norma ASTM G1-88.

Se utilizó 0,05 lbm/pie² como valor máximo permitido de pérdida por corrosión, por ser una cifra ampliamente aceptada para las temperaturas de interés en el área Sur del Lago de Maracaibo. Las pérdidas de material con los fluidos de: 2/3 de HCl (al 28%) + 1/3 Gasoil (utilizando 4% inhibidor) y 9% HCl (utilizando 0,5% B-14, 4% inhibidor, 2% NH₄HF₂ y 2,5% U-100) fueron extremadamente altas (superiores a 0,35 lbm/pie²). Finalmente se demostró que para los tiempos inferiores a seis horas la cantidad de material consumido de acero dúplex 22Cr, expuesto a los fluidos de: 5% HCl (utilizando 4% inhibidor) y 80% HCl (al 5%) + 20% Claysol™ (utilizando 4% inhibidor y 3% NH₄HF₂) fue inferior al valor máximo aceptado (0,05 lbm/pie²).

Más tarde Sánchez *et al*, en 2008, evaluaron la resistencia a la corrosión localizada en juntas soldadas utilizando dos procesos de soldadura: PAW y GTAW, tomando como parámetros de estudio la corrosión localizada y la evolución microestructural de las diferentes zonas que conforman una junta en un acero inoxidable dúplex saf 2205. Se construyeron curvas de polarización cíclica para cada caso de soldadura estudiado. En ellas, se midieron la resistencia a la corrosión en un medio de solución salina al 5% para el metal base, la zona de fusión y la zona afectada por el calor

Se determinó que la junta soldada GTAW presentó una mayor resistencia a la corrosión localizada (picadura) y generalizada que la junta soldada PAW. El proceso tecnológico GTAW modifica apreciablemente la fracción volumétrica y la microestructura de la fase austenita en las zonas que componen la junta (ZF y ZAC). Se pudo demostrar que la resistencia a la corrosión localizada (picadura) y generalizada del acero inoxidable duplex SAF 2205 después de soldado es significativamente superior a la del acero inoxidable AISI/SAE 316L.

Pevalonic y García en 2009, estudiaron la susceptibilidad al ataque intergranular en acuerdo a la norma ASTM A262 de los aceros inoxidables AISI 316 y SAF 2507 expuestos al ácido nítrico con 65% de concentración. Emplearon treinta cupones de acero AISI 316 y treinta cupones de SAF 2507 los cuales fueron sometidos a 5 periodos de 48 horas de exposición al medio corrosivo. Posteriormente se realizaron análisis por pérdida de peso, microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido, espectroscopia de energía dispersiva de rayos X y microdureza vickers

En la evaluación se observó un comportamiento progresivo de la pérdida de peso en función de los periodos de exposición para el acero AISI 316 en 4.52% y en el SAF 2507 en 24.33%. El deterioro de la microestructura mostró la pérdida del límite de grano, separación intergranular, presencia de picadura y pérdida de homogeneidad de la microestructura, determinándose por el medio visual un mayor deterioro para el acero SAF 2507 en comparación para el acero AISI 316 mediante el análisis de espectroscopia de energía dispersa de rayos X se corrobora la migración de los elementos Cromo y Níquel en ambos casos y finalmente se demostró en el análisis de microdureza un incremento proporcional de dureza en ambos aceros

Recientemente Villasana y Ossa en 2010 Evaluaron la susceptibilidad al ataque intergranular de conformidad a la norma ASTM-A262 en aceros inoxidables dúplex 2507 y austenítico 316L sometidos a sulfato férrico – ácido sulfúrico al 96,5% de concentración a 30°C, 45°C y ebullición. Realizaron análisis por pérdida

de peso, microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido, espectroscopia de energía dispersa de rayos X y Microdureza Vickers.

La evaluación arrojó un comportamiento progresivo de pérdida de peso en función al aumento de temperatura para el acero austenítico 316L de 3,26% y en el acero dúplex 2507 de 13,12%. Visualmente el deterioro de la microestructura presentó picadura, pérdida de homogeneidad, pérdida de límite de grano, socavación del grano y separación intergranular, reflejando el mayor deterioro para el acero dúplex 2507, a través del análisis de espectroscopia de energía dispersa de rayos X se verificó la migración de cromo y níquel en ambos aceros.

CAPÍTULO 2

Fundamentos teóricos

2.1 Aceros Dúplex

Los aceros dúplex austeno-ferríticos se caracterizan, por estar constituidos por una estructura bifásica compuesta por granos de ferrita, denominada α o δ , y austenita, γ , en proporciones variables entre el 30 % y el 70 %, por lo que combinan características de cada una de estas fases. La proporción de fases depende principalmente de la composición química de la aleación y de la historia termomecánica del material. Debido a esto, presentan una resistencia superior a la de los aceros austeníticos, y una ductilidad bastante aceptable. Durante la solidificación de los dúplex se obtiene una microestructura formada completamente por granos de ferrita, y es durante el proceso de enfriamiento cuando ocurre la transformación parcial de la ferrita en austenita. La composición química de estos materiales suele caracterizarse, generalmente, por presentar contenidos de cromo entre 18 y 28 %, níquel entre 4 y 6 % y molibdeno entre 1,5 y 3 % [3].

Estos aceros son utilizados en aplicaciones donde sea necesaria una buena soldabilidad, elevadas propiedades mecánicas y una alta resistencia a la corrosión bajo tensiones y por picaduras. La buena combinación de propiedades presentada por los aceros inoxidables dúplex se debe a su composición química y a una microestructura formada por fracciones de volumen similares de austenita y ferrita.

Los aceros súper dúplex 2507 forman parte de los dúplex de tercera generación, y poseen 25% de cromo, 7% de níquel y contenidos de nitrógeno superiores a 0,2%. Las altas concentraciones de cromo y molibdeno aumentan la resistencia a la corrosión intergranular y por picaduras en los aceros súper dúplex. Mientras que la adición de nitrógeno contribuye a aumentar la resistencia de la

austenita por el mecanismo de solución sólida intersticial, incrementando por lo tanto la resistencia del acero sin afectar a su tenacidad [4].

Se desarrollaron considerando que los aceros inoxidable austeníticos son vulnerables al agrietamiento por corrosión de tensiones (SCC) en ambientes de cloruro, aunque presentan una excelente soldabilidad. Los aceros inoxidable ferríticos tienden a ser frágiles y son difíciles de soldar pero resisten el SCC. Los aceros inoxidable dúplex combinan algunas de las mejores características de los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos. La Austenita proporciona ductilidad y la Ferrita resistencia al SCC. Debido al balance existente entre estas dos fases, presentan ventajas en severas condiciones de temperatura y contenido de cloruros, donde los Inoxidables austeníticos sufren SCC, picaduras y rendijas.

Características básicas.

- Comparados con los grados austeníticos, los aceros inoxidable dúplex presentan mayor resistencia mecánica y una resistencia considerablemente mayor al SCC en soluciones de cloruro a expensas de una tenacidad, ductilidad y soldabilidad levemente menor.
- Alta resistencia a la tracción y punto de fluencia respecto a los aceros austeníticos y ferríticos.
- Buena soldabilidad y maleabilidad.
- Resistencia intermedia a la corrosión por fatiga inducida por cloruros, entre los aceros austeníticos y ferríticos.
- Resistencia a la corrosión general y por picado, igual o mejor que la del tipo 316L, en muchos ambientes corrosivos.
- Resistencia a la corrosión intergranular, debido al bajo contenido de carbono.
- Buena resistencia a la erosión y abrasión.

- Coeficiente de expansión térmica cercano al del acero al carbono, lo cual puede resultar en menores tensiones en las soldaduras que involucren inoxidables dúplex con acero al carbono.
- Se utilizan en un rango de temperaturas entre $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. [5]

En la figura 2.1 se puede observar la estructura de fases constituyentes del acero dúplex ferrítico-austenítico.

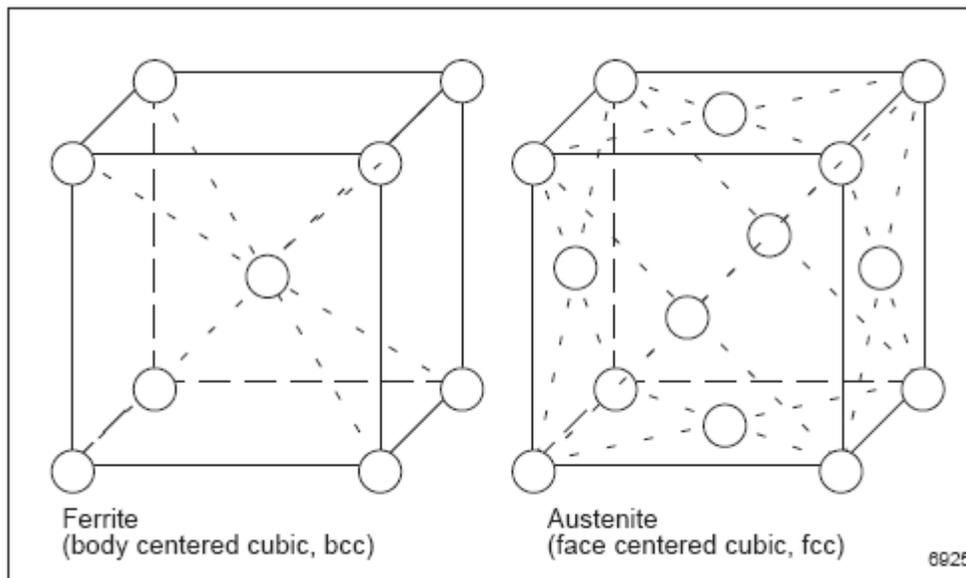


Figura 2.1. Estructura de las fases que componen al acero dúplex.

Fuente: Dúplex Stainless Steel, guide.

La formación de esta microestructura ocurre a partir de la solidificación de hierro delta en el metal líquido, en un rango de temperatura comprendido entre $1440\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1490\text{ }^{\circ}\text{C}$, seguida de la precipitación por nucleación y crecimiento a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ de austenita en estado sólido. Cuando hay un enfriamiento rápido, entre $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, la precipitación de austenita es suprimida y se forman nitruros de cromo en matriz ferrítica.

Si un acero es trabajado en caliente bajo los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, su microestructura no es estable y puede ocurrir precipitación de la fase sigma o nitruros de cromo con pequeñas alteraciones en su microestructura. La aparición de estas fases puede

perjudicar el desempeño de los aceros inoxidables Dúplex en cuanto a las propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y soldabilidad [6]

En la figura 2.2 se observa un diagrama del proceso de solidificación del acero dúplex.

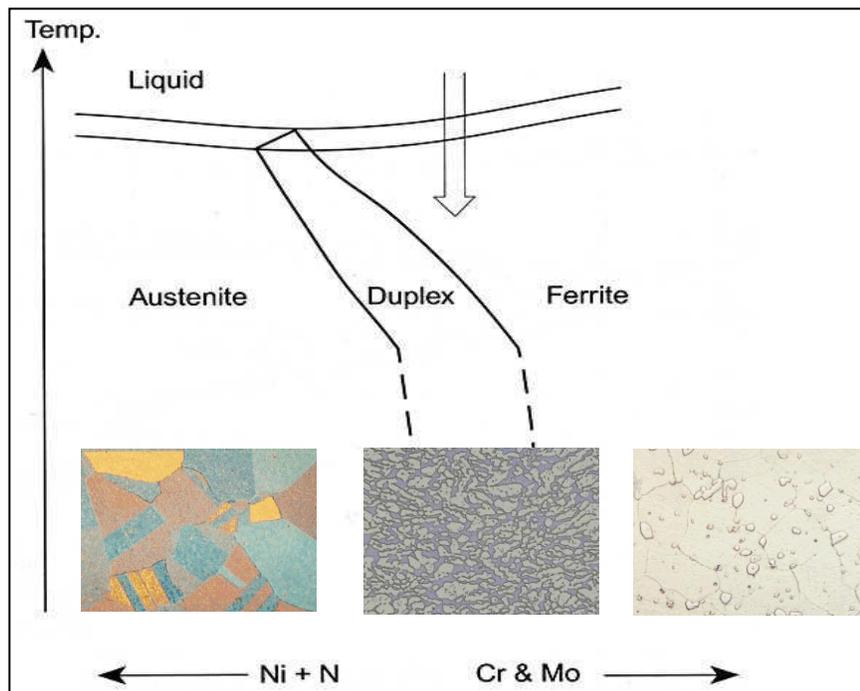


Figura 2.2. Solidificación de acero dúplex.
Fuente: Dúplex Stainless Steel, guide.

Debido a su estructura de grano fino, estos valores son obtenidos debido a la resistencia a la fluencia dos veces mayor que los granos austeníticos, en el material en estado de recocido sin pérdida sustancial en la tenacidad. Es importante señalar, que los Dúplex son menos convenientes que los aceros austeníticos sobre los 250°C y por debajo de -50°C, debido al comportamiento frágil de la ferrita a estas temperaturas. Un factor de importancia económica es el bajo contenido de níquel (bastante costoso), usualmente 7% de níquel comparado con 10% o más de níquel que los granos austeníticos da como resultado un ciclo de vida de costo mas bajo en muchas aplicaciones [7].

Resistencia a la corrosión

Los aceros inoxidable dúplex tienen una buena resistencia a la corrosión en muchos medios donde los aceros austeníticos convencionales son útiles. Sin embargo, hay algunas importantes excepciones donde son decididamente superiores. Esto se debe a su contenido en cromo, el cual es beneficioso en los ácidos oxidantes, junto con bastante molibdeno y níquel para suministrar una resistencia en los medios ácidos suavemente reductores.

El contenido de cromo, de molibdeno y de nitrógeno también da a los aceros inoxidable Dúplex una muy buena resistencia a la corrosión por picaduras y en rendijas en ambientes contaminados por cloruros. Si la microestructura contiene por lo menos 25% o 30% de ferrita, los aceros dúplex son mucho más resistentes a la corrosión en medios contaminados por cloruros. La ferrita es en cambio susceptible a la fragilización por hidrógeno. Debido a esto, los dúplex no tienen una buena resistencia en los ambientes o aplicaciones donde el hidrógeno puede ser incorporado al metal.

Resistencia a la tracción

La tensión a rotura de los aceros inoxidable dúplex se sitúa entre dos y tres veces la de un acero austenítico. La ferrita generalmente es más resistente que la austenita pero menos dúctil, esto es verdad para el mismo contenido intersticial. No es necesariamente el caso en todos los aceros dúplex, por ejemplo en los Dúplex con nitrógeno, este último se dispersa en la austenita de manera tal que, al final la austenita resulta más resistente que la ferrita. Ya que el acero Dúplex contiene ferrita y austenita se podría esperar que las propiedades sigan una ley lineal de mezcla. Es aproximadamente el caso para la elongación pero cuando se trata de resistencia a la tracción, la ley de Hook es mucho más complicada ya que depende fuertemente del tamaño del grano, el cual es más pequeño en los Dúplex.

Una serie de aleaciones de 100% ferrita a 100% austenita han sido producidos e investigados mecánicamente. Cuando el efecto del tamaño del grano fue compensado, se podía concluir que la resistencia de la aleación (60% ferrita) entre (40 % austenita) era controlada esencialmente por la ferrita, el componente generalmente más fuerte.

Tenacidad

Se debe destacar que la transición dúctil-frágil para los Dúplex ocurre a (-60) °C o menos, lo que es satisfactorio para la mayor parte de las aplicaciones. Cuando han sufrido deformación en frío, los aceros Dúplex suelen presentar anisotropía de propiedades mecánicas.

Resistencia a la fatiga

Los aceros dúplex tienen mayor resistencia a la fatiga que los aceros austeníticos. Por otra parte, sin tener en consideración los mecanismos de corrosión, los Dúplex muestran un límite de fatiga bien definido cuando son sometidos a ensayos de corrosión bajo tensión. Hay que destacar que el valor de resistencia a la fatiga depende directamente del límite elástico. Eso se explica de la siguiente manera: en muchos casos la tensión máxima en cada ciclo de fatiga será aproximadamente igual al límite elástico.

A este nivel de tensión, la deformación plástica es suficiente para causar la iniciación de pequeñas fisuras por fatiga en inclusiones, bandas de deslizamiento persistentes, o bordes de granos. Las propiedades de fatiga también suelen ser fuertemente dependientes de la orientación del eje de tensión.

En la actualidad este tipo de aceros está siendo utilizado con más frecuencia en la industria química, petrolera y petroquímica particularmente en refinerías debido a su alta resistencia al fenómeno de corrosión por picaduras en equipos de intercambiadores de calor, tuberías de petróleo, plataformas de ultramar, pozos de gas, tuberías en línea, cuerpos de válvulas para manejar agua de mar y bombas de fundición.

2.1.1 Acero Dúplex SAF 2507

El acero SAF 2507 patentado por Sandvik, es una de alta aleación de acero inoxidable súper dúplex diseñado para condiciones extremadamente corrosivas. Es desarrollado principalmente para resistir el cloruro que contiene ambientes marinos, por tanto, contiene altas cantidades de cromo, molibdeno y nitrógeno. [8]

En las tablas 2.1 y 2.2 se puede apreciar la composición química y las propiedades mecánicas del acero dúplex Saf 2507.

Tabla 2.1 Composición química del acero Dúplex 2507. Fuente: Sandvik.

Cr	Mo	Si	Mn	P	S	Ni	N	C	Cu
25,15	3,91	0,33	0,77	0,017	0,0006	6,96	0,282	0,014	0,11

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del acero Dúplex 2507. Fuente: Sandvik

Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	% de elongación	% de reducción de área	Dureza (HRC)
958	979	13,6	68,5	30,0

En la figura 2.3 se puede apreciar la composición de las fases de austenita y ferrita en una proporción volumétrica de aproximadamente 50/50.

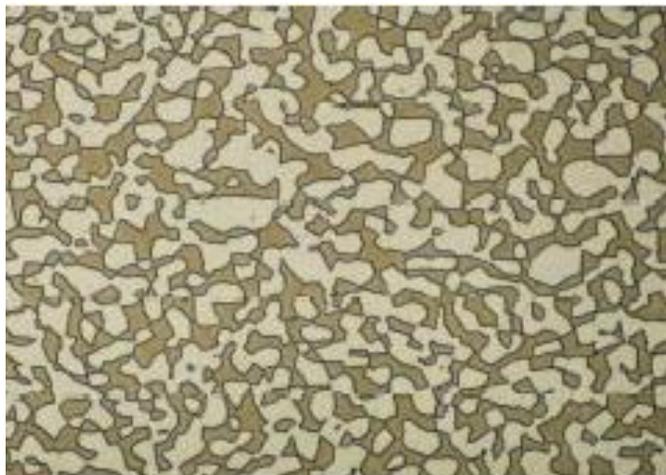


Figura 2.3. Acero dúplex Saf 2507.
Fuente: Dúplex Stainless Steel, guide.

Resistencia a la corrosión del acero SAF 2507

El acero dúplex SAF 2507 tiene resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes, debido a su alto contenido de elementos de aleación. En los ácidos orgánicos, por ejemplo, ácido fórmico y acético, el acero SAF 2507 es una alternativa competitiva a los austeníticos altamente aleados y en aleaciones de base níquel.

Los diagramas que se muestran a continuación expresan la resistencia a la corrosión de los aceros dúplex en comparación con los aceros austeníticos. La Figura 5 se muestra la velocidad de corrosión (mm/año) en una mezcla de ácido acético y ácido fórmico. Figuras 6-10 diagramas muestran isocorrosión para diferentes ácidos. Las curvas de estos diagramas representan una velocidad de corrosión de 0,1 mm/año. Esto significa que por encima de la curva de la velocidad de corrosión es superior y debajo de ella es menor de 0,1 mm/año. [8]

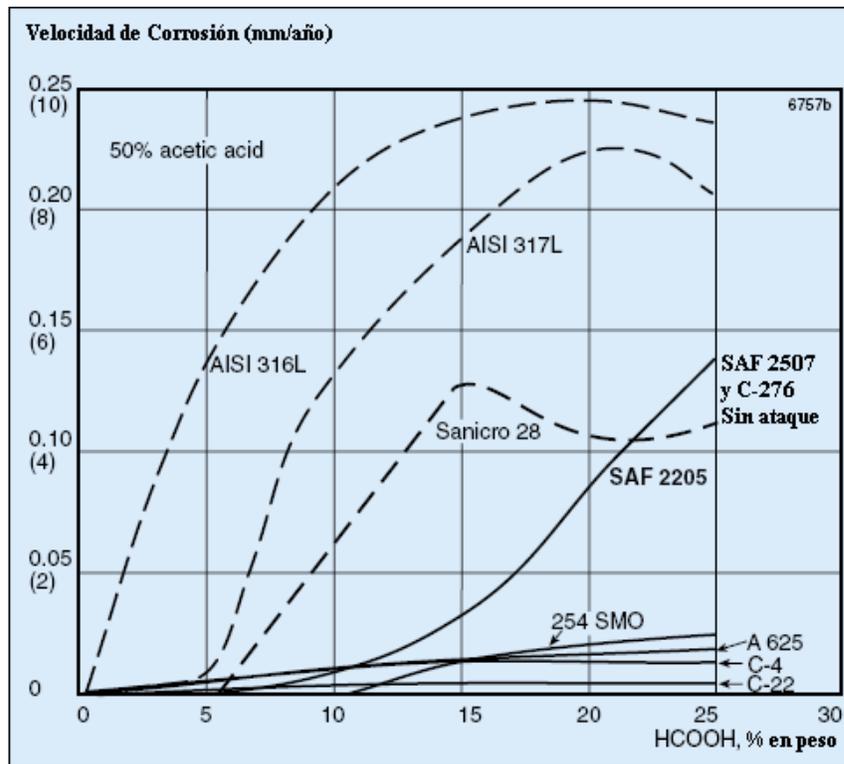


Figura 2.4. Velocidad de corrosión en ebullición de mezclas de 50% de ácido acético y proporciones variables de ácido fórmico. Pruebas de 24, 48 y 72 horas. Fuente: S-120-ENG 021126. Sandvik.

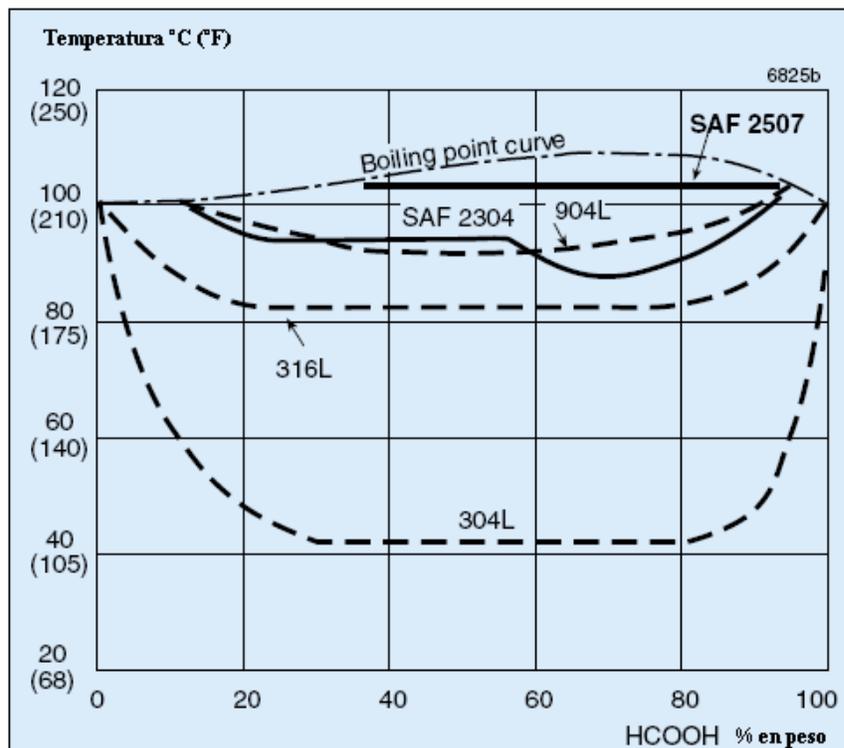


Figura 2.5. Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido fórmico aireado. Fuente: S-120-ENG 021126. Sandvik.

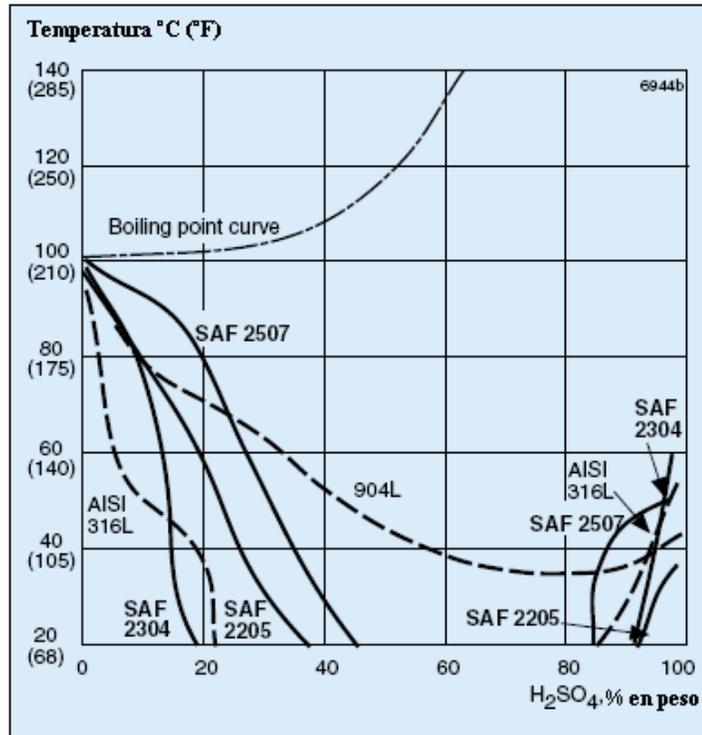


Figura 2.6. Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido sulfúrico aireado. (0,1 mm/año, 4 mpy)
Fuente: S-120-ENG 021126. Sandvik.

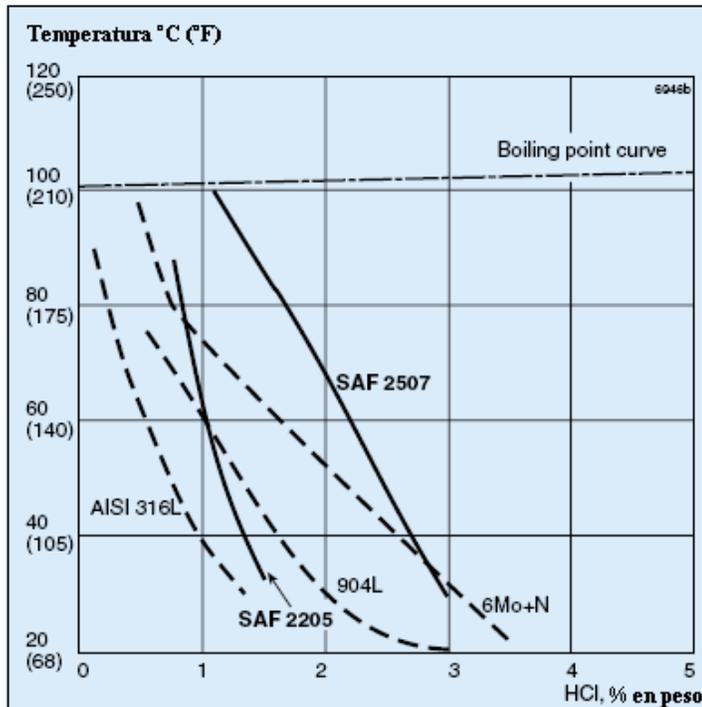


Figura 2.7. Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido clorhídrico aireado. (0,1 mm/año, 4 mpy)
Fuente: S-120-ENG 021126. Sandvik.

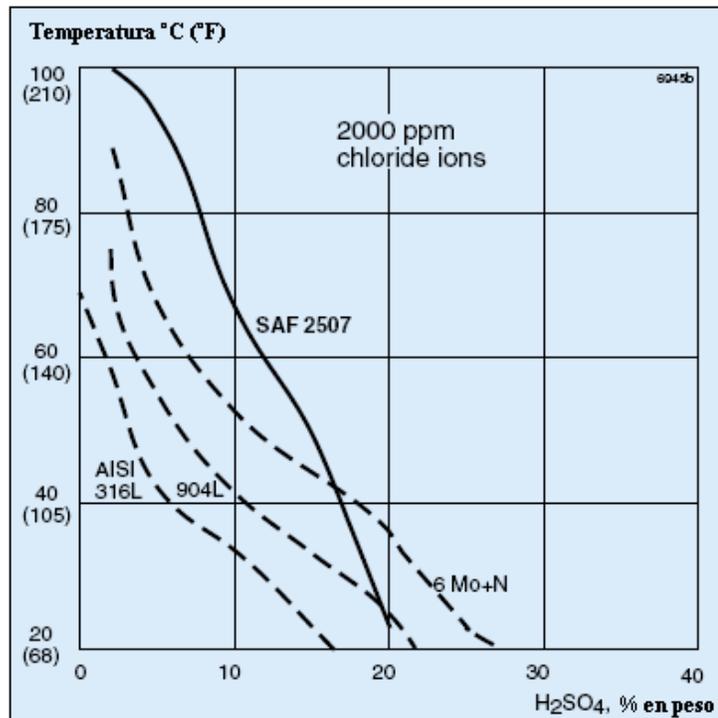


Figura 2.8. Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2507 en ácido sulfúrico aireado con 2000 ppm Cl⁻ (0,1 mm/año, 4 mpy). **Fuente:** S-120-ENG 021126.

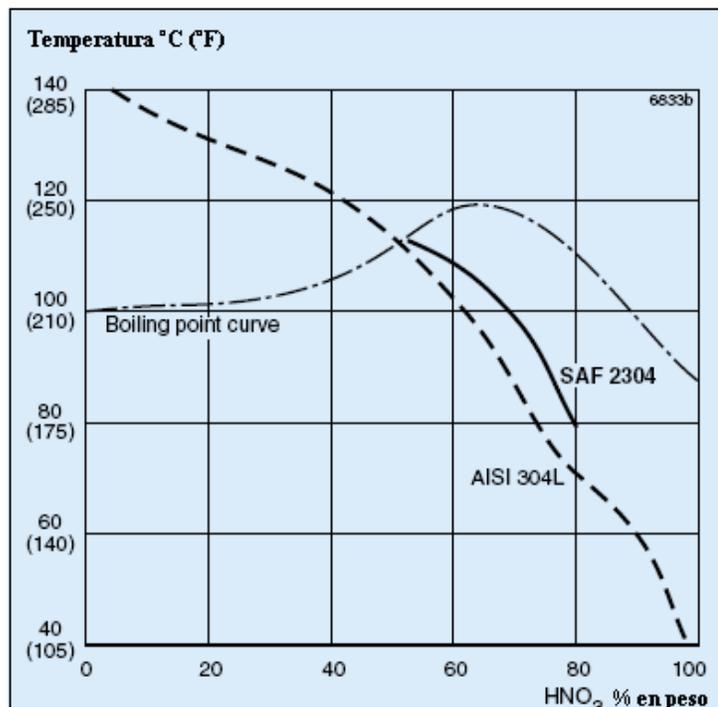


Figura 2.8. Diagrama de isocorrosión para el acero Saf 2304 en ácido nítrico. (0,1 mm/año, 4 mpy). **Fuente:** S-120-ENG 021126. Sandvik.

Dureza del acero dúplex Saf 2507

En la figura 2.9 se puede observar una gráfica comparativa de la dureza en los aceros austeníticos y dúplex. Resalta el alto valor de dureza del acero Saf 2507 de aproximadamente 290 HV.

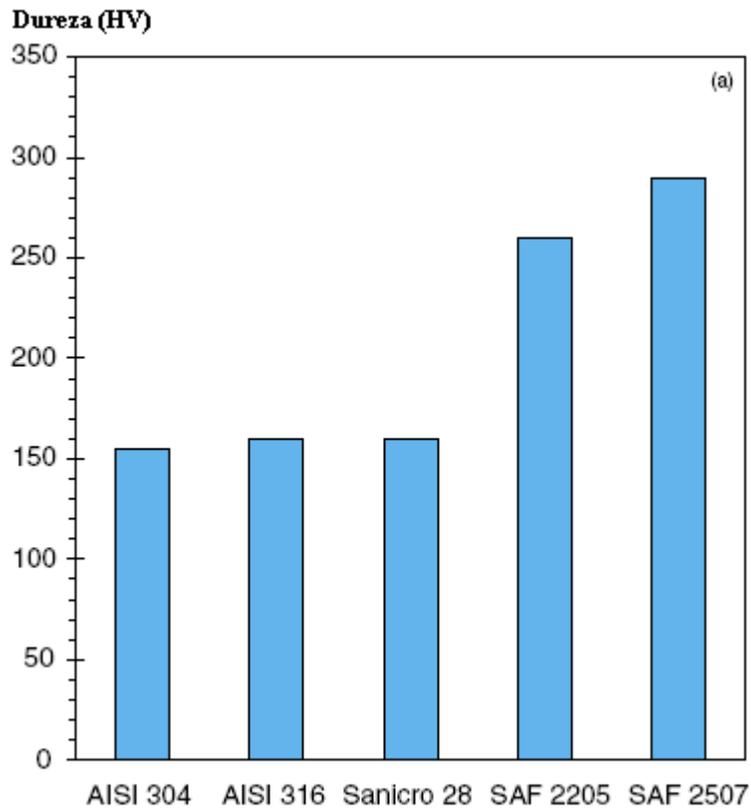


Figura 2.9. Valores de dureza para el acero Saf 2507.
Fuente: S-32-31-ENG 040816. Meechanical Properties of SAF 2507. Sandvik.

Aplicaciones del acero dúplex SAF 2507

El acero inoxidable dúplex SAF 2507 está especialmente diseñado para el servicio en agresivos ambientes que contienen cloruros. Se utiliza en las siguientes aplicaciones:

- Industria petrolera y de gas. Ambientes que contienen cloruro de tales como el manejo de agua de mar.

- Tubos para intercambiadores de calor en refinerías, industria química, industria de procesos, y otras industrias.
- Industrias productoras de sales. Tuberías para el evaporador de la producción de sales corrosivas, por ejemplo, cloruros, sulfatos y carbonatos.
- Plantas de desalinización. Recipientes a presión para osmosis inversa, unidades de tubería para el transporte de agua de mar, tuberías para intercambiadores de calor.
- Tuberías de pozos geotérmicos. Intercambiadores de calor en la explotación geotérmica unidades, los sistemas expuestos a la alta salinidad de las salmueras geotérmicas, tubería y cubierta para la producción.
- Las refinerías y plantas petroquímicas. Tubos y tuberías en el entorno del proceso contiene una elevada cantidad de cloruros, o está contaminada con ácido clorhídrico.
- Hélices, ejes y otros productos sometidos a elevada carga mecánica en agua de mar y en ambientes que contienen cloruros.

2.2 Corrosión

Se puede definir como el deterioro de un material por reacción química o electroquímica con su medio ambiente. También podemos decir que es la destrucción progresiva de un material debido a factores que no están relacionados con fenómenos directamente mecánicos. [9].

Cuando los Aceros Inoxidables sufren corrosión, generalmente no es uniforme como en el caso de los aceros al carbono, sino localizada. Debido a ello no puede prevenirse con espesores adicionales, sino que debe evitarse la corrosión misma por medio de un conocimiento profundo del medio corrosivo y del acero utilizado. Los aceros inoxidables no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, que facilitan la formación de la película protectora. Por otra parte, en general, estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores

como el ácido clorhídrico o fluorhídrico, y son atacados por las sales de ellos (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros). [5].

2.2.1 Tipos de corrosión

Corrosión húmeda: la cual ocurre cuando un líquido está presente, es decir, soluciones acuosas o electrolitos, un ejemplo muy común es el acero corroído por el agua de mar. En la figura 2.10 se observa la corrosión húmeda en el casco de un buque



Figura 2.10. Corrosión húmeda
Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.

Corrosión en seco: Ocurre en la ausencia de la fase líquida, por encima del punto de rocío del medio ambiente, los corrosivos más usuales son gases y vapores, un ejemplo es el ataque que sufre el acero por los gases en un horno de Tratamientos térmicos. [9]

La presencia de pequeñas cantidades de humedad pueden cambiar completamente el cuadro corrosivo, por ejemplo, el cloro seco no es considerado un agente corrosivo cuando esta presente en el acero ordinario, sin embargo, el cloro húmedo o disuelto en agua, es extremadamente corrosivo y ataca a la mayoría de los metales y aleaciones.

Corrosión galvánica:

Es un fenómeno electroquímico que ocurre generalmente cuando existe una diferencia de potencial entre dos metales distintos entre si, cuando están sumergidos en una solución conductora ó corrosiva. Cuando se establece un contacto entre los metales, mediante un conductor, ocurre un flujo de electrones entre ellos producto de la diferencia de potencial. [9]

El metal menos resistente se corroe, actuando como ánodo y el más resistente hará de cátodo, corroyéndose muy poco.

En este tipo de corrosión predomina generalmente la polarización catódica, el potencial generado por la celda cambia con el tiempo tendiendo a cero.

Para minimizar la corrosión galvánica se recomienda lo siguiente:

- Seleccionar pares de metales lo más cerca posible en la serie galvánica (menor diferencia de potencial)
- Evitar los efectos de áreas desfavorables.
- Aislar completamente si es posible los metales diferentes puestos en contacto.
- Aplicar recubrimientos protectores y mantener a estos en buen estado, particularmente el anódico.
- Instalar un tercer metal que sea anódico a ambos metales en contacto galvánico.

Corrosión filiforme:

Es un tipo especial de corrosión asociado a condiciones de estancamientos, grietas, hendiduras, entre otros. Generalmente no es inmediatamente visible. En la mayoría de los casos ocurre debajo de las capas protectoras y por esta razón se les conoce también como corrosión bajo-capas.

Es uno de los tipos de corrosión más comunes y se encuentra frecuentemente en superficies esmalteadas o laqueadas de los envases de bebidas y alimentos que han sido expuestos a la atmósfera.

No debilita ni destruye a los componentes metálicos así como tampoco contamina a los productos enlatados, ya que solo afecta a la apariencia superficial.

El medio más importante y variable en este tipo de corrosión es la humedad relativa de la atmósfera. Por debajo de 65% de humedad relativa el material permanece inalterable, para condiciones de humedad entre 65% y 90% ocurre generalmente la corrosión filiforme. Para condiciones por encima del 90% de humedad la corrosión aparece pero en forma de burbujas.

Para prevenir su aparición se recomienda mantener las superficies metálicas recubiertas, en medios de baja humedad. Otra medida es la de aplicar recubrimientos de películas débiles ó frágiles. En la figura 2.11 se observa la corrosión filiforme en el metal



Figura 2.11. Corrosión filiforme.

Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.

Corrosión uniforme:

Se caracteriza generalmente por una reacción química o electroquímica que procede uniformemente sobre la superficie total expuesta. El ataque uniforme sobre todas las formas de corrosión, representa la forma más destructiva para los metales, en cuanto a consumo de material se refiere. [9]

Este ataque puede ser prevenido o reducido con el uso de protección catódica y la utilización de materiales apropiados, incluyendo recubrimientos especiales.

Corrosión por picadura:

Es una forma de ataque localizada que provoca huecos o cráteres en el metal. Estos huecos son relativamente pequeños y algunas veces aislados en la mayoría de los casos, semejando a una superficie rugosa.

Las picaduras crecen generalmente en la dirección de la gravedad. La mayor parte de ellas se desarrollan y crecen hacia abajo en dirección perpendicular de las superficies horizontales.

Requieren de un período de inicio extenso antes de hacerse visibles. Las picaduras pueden ser consideradas como el estado intermedio entre la corrosión total y completa resistencia a la corrosión.

La mayoría de las fallas por picaduras son causadas por el cloro y los iones que contiene cloro. Los cloruros están presentes en grados variables en la mayor parte de las aguas y soluciones acuosas. Los hipocloritos son difíciles de manejar por su alta tendencia a formar picaduras. También las picaduras están asociadas a los iones halógenos en la cual prevalecen los cloruros, bromuros e hipocloritos.

Las picaduras pueden prevenirse o reducirse en muchos casos por la presencia de hidróxidos, cromatos ó sales silícicas, sin embargo, estas sustancias tienden a acelerar la velocidad de las picaduras cuando se presentan en pequeñas concentraciones.

Como generalmente están asociadas a las condiciones de estancamiento, tales como un líquido en un tanque o un líquido atrapado en las partes bajas de un sistema de tuberías inactivas, luego la velocidad ó el incremento de velocidad hacen decrecer el ataque por picadura. [9].

Los aceros inoxidable son más susceptibles al desgaste por picaduras que muchos otros grupos de metales o aleaciones. Los inoxidable como el 304 y 316 en el rango de temperaturas de sensitización disminuyen su resistencia a la picadura. Los aceros austeníticos presenta la mayor resistencia a la corrosión cuando la solución es mantenida por encima de 980°C. Los trabajos en frío incrementan el ataque por picaduras de los aceros inoxidable en cloruro férrico.

Al añadir inhibidores se protege contra las picaduras, pero esto puede ser un procedimiento peligroso a no ser que el ataque sea detenido completamente, ya que de lo contrario la intensidad de la picadura se aumenta. En la figura 2.12 y 2.13 se puede observar la picadura en una región selectiva del metal

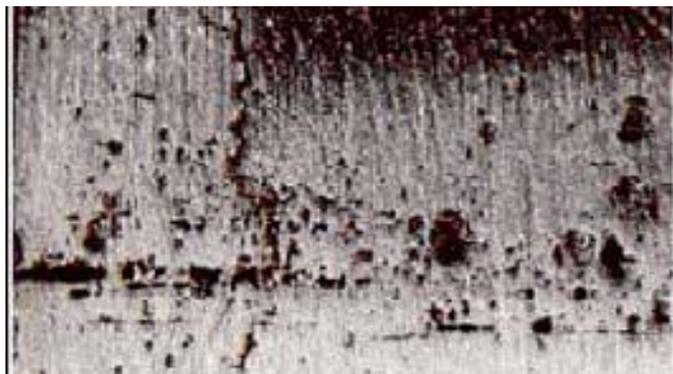


Figura 2.12. Corrosión intergranular.

Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.



Figura 2.13. Corrosión intergranular.

Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.

Corrosión en grietas y en condiciones estancadas:

Es un tipo de corrosión intensamente localizado y frecuentemente ocurre dentro de grietas y otras áreas en superficies metálicas expuestas a corrosivos. Este tipo de ataque generalmente está asociado con pequeños volúmenes de soluciones estancadas causadas por grietas, huecos, depósitos superficiales, entre otros. [9]

Los pequeños depósitos de arena, lodo, productos de corrosión y otros sólidos pueden actuar iniciando a este tipo de corrosión, ya que crean por debajo condiciones de estancamiento que dan lugar a este tipo de fenómeno.

Para funcionar como una zona de corrosión, una grieta debe ser lo suficientemente ancha como para permitir que el líquido entre, pero lo suficientemente angosta como para mantener una zona de estancamiento.

Aquellos metales o aleaciones que dependen de películas de óxido o capas pasivas para su resistencia a este tipo de ataque, son particularmente susceptibles al mismo.

Se recomienda lo siguiente para evitar su aparición:

- Usar uniones embestidas de soldadura en lugar de remaches ó pernos.
- Diseñar canales de drenaje completo, evitando esquinas agudas y áreas de estancamiento
- Usar sólidos de relleno no absorbente, tales como teflón, siempre que sea posible.

En la figura 2.14 se observa la corrosión en grietas de una plancha de metal



Figura 2.14. Corrosión en grietas.
Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.

Corrosión por frotamiento:

Es el tipo de corrosión que ocurre en áreas de materiales en contacto bajo carga sometidos a vibraciones y deslizamientos. Aparece el ataque como picaduras o surcos en el metal, rodeados por los productos de corrosión. Este ataque es llamado también oxidación por fricción, oxidación aparente, escoriación y falso Brinell. Se observa en componentes de maquinarias, partes de automóviles y otros equipos. [9]

El frotamiento causa fractura por fatiga, ya que el desprendimiento de los componentes del material permite la acumulación de excesivos esfuerzos, y las picaduras formadas por forzamiento actúan como un creador ó aumentadores de esfuerzos. La corrosión por frotamiento puede ser minimizada o eliminada en muchos casos por la aplicación de una ó más de las siguientes medidas preventivas:

- Lubricación con aceites y grasas de baja viscosidad y alta tenacidad.

- Usar rellenos para absorber las vibraciones y para excluir el oxígeno de las superficies en contacto.
- Si es posible aumentar el movimiento relativo de las partes para reducir el ataque.

Corrosión bajo tensiones (Stress corrosión cracking, SCC):

La corrosión bajo tensiones corresponde a una falla de material, la cual es originada por la presencia simultánea de un ambiente adecuado, un material susceptible, y la presencia de tensiones. La temperatura es un factor ambiental significativo que afecta el agrietamiento. La tensión umbral está frecuentemente por debajo del punto de fluencia del material. Una falla catastrófica puede ocurrir sin deformación significativa o el deterioro visible del componente. La soldadura genera gradientes de temperatura y así puede inducir tensiones residuales, lo cual en ciertos ambientes puede resultar en rotura por corrosión bajo tensiones.

Este tipo de corrosión es el menos frecuente, se trata de un tipo de corrosión transgranular, el cual es producido por tensiones generadas en el material, tales como tracción, deformación en frío, soldaduras, etc., ante la presencia de agentes químicos, principalmente compuestos clorados. Este tipo de corrosión se manifiesta por pequeñas fisuras en las zonas expuestas a tensión, como se observa en la figura 2.14.

Algunos métodos para prevenir la corrosión bajo tensiones son: selección apropiada del material, remover la especie química que promueve el agrietamiento, cambiar el proceso de fabricación o diseñar adecuadamente para reducir las tensiones. [5].

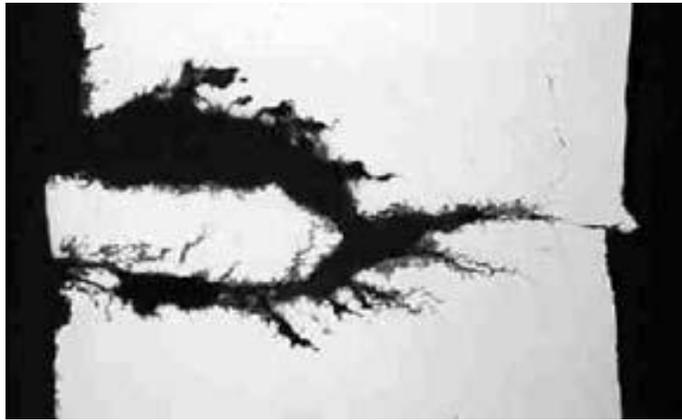


Figura 2.14. Corrosión en grietas.

Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.

Corrosión intergranular:

Los efectos de los límites de grano son de poca ó ninguna consecuencia en muchas aplicaciones de los metales. Si un metal se corroe resulta un ataque uniforme, ya que los límites de grano son generalmente mucho más reactivos que la matriz. Sin embargo bajo ciertas condiciones, las interfaces de los granos son muy reactivos y resulta una corrosión intergranular. Este tipo de corrosión puede ser causada por impurezas en los límites de granos, enriquecimiento de uno de los elementos de la aleación o cuando existe la escasez de uno de los elementos en las áreas de los límites de grano. [9]

Este tipo de corrosión ocurre mayormente en los acero inoxidable austeníticos y se debe a la escasez de cromo en los límites de grano.

Cuando los aceros inoxidable austeníticos son expuestos a temperaturas de un rango de 500 a 850°C y los ferríticos a un rango de 500 a 650°C, el cromo en la aleación tiende a combinarse con el carbono formando carburos de cromo. Los carburos formados se precipitan principalmente en los bordes de grano, reduciendo el cromo de las áreas adyacentes. Esto reduce la resistencia a la corrosión de las áreas con menor cantidad de cromo sensibilizando el material. La corrosión intergranular se caracteriza por la desintegración del material debida a la pérdida de los granos microscópicos.

Existen varios métodos para minimizar la corrosión en los aceros inoxidable los cuales se mencionan a continuación:

- Emplear tratamientos térmicos (temple-recocido).
- Añadir elementos que sean fuertes formadores de carburos.
- Bajar el contenido de carbono.

En la figura 2.15 se puede observar la corrosión intergranular en la conexión de una válvula de paso

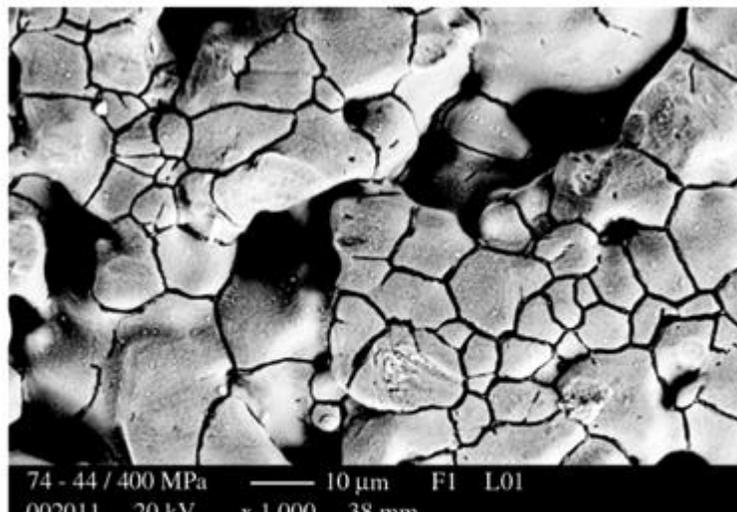


Figura 2.15. Corrosión intergranular
Fuente: <http://frfotos.eu/image/507b22fb/>

Corrosión selectiva:

Este tipo de corrosión consiste en la remoción de uno de los elementos de una aleación sólida por procesos de corrosión. El caso más común es la remoción selectiva del zinc en las aleaciones de latón.

Existen varios fenómenos designados bajo este tipo de ataque:

- Decincificación: En las aleaciones 70% Cu – 30% Zn comúnmente llamadas 'latones amarillos', la decincificación asume una coloración rojiza característica del cobre. Debido a que la adición de zinc al cobre baja la resistencia a la corrosión de éste, la porción decincificada es débil,

permeable y porosa. Las dimensiones totales no cambian cuando ocurre este tipo de ataque.

- **Grafitización:** las fundiciones grises muestran algunas veces el efecto de la corrosión selectiva particularmente en medios relativamente suaves. Las fundiciones aparentan ser grafitizadas a causa de que la capa superficial tiene el aspecto de grafito y puede ser fácilmente desprendido, basado en este aspecto y su comportamiento se le dio el nombre de corrosión grafitica. El grafito es catódico al hierro existiendo entonces en una fundición gris una excelente celda galvánica. El hierro es disuelto, desprendiendo una masa porosa consistente de grafito y óxidos, la fundición pierde resistencia y sus propiedades mecánicas.

La corrosión selectiva en medios acuosos puede ocurrir en otras aleaciones bajo condiciones apropiadas, especialmente en ácidos, por ejemplo, se ha observado en presencia de ácido clorhídrico la remoción selectiva del aluminio en los bronce al aluminio. También ha sido observada la remoción del silicio en los bronce al silicio, entre otros.

En los aceros inoxidable también se encontró una corrosión selectiva del cromo cuando estos fueron expuestos en atmósferas bajas en oxígeno a temperaturas superiores a los 900°C. En la figura 2.16 se puede observar como la corrosión selectiva ataca en las zonas con bajo contenido austenita resistente a la corrosión

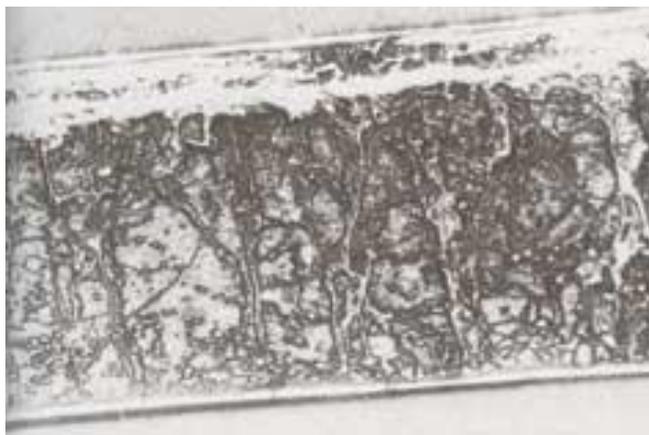


Figura 2.16. Corrosión selectiva.

Fuente: Manual de aceros inoxidable. Indura.

Corrosión por erosión:

Es el incremento en la velocidad del ataque de un metal debido al movimiento relativo entre el fluido corrosivo y la superficie del metal. En la mayoría de los casos el movimiento es muy rápido envolviendo efectos de aspecto mecánico ó de abrasión. El metal es removido de la superficie en forma de iones disueltos, ó en forma de productos de corrosión sólidos, los cuales son mecánicamente arrastrados de la superficie del metal. Esta caracterizada por la aparición de muecas, formas de canal, huecos, entre otros.

La mayoría de los metales y aleaciones son susceptibles al desgaste por erosión, pero también para su resistencia, muchos dependen de la evolución de una capa superficial. Muchos tipos de medios corrosivos pueden causar la corrosión por erosión, estos incluyen gases, soluciones acuosas, sistemas orgánicos y metales líquidos. Todos los equipos usados para el movimiento de fluidos están sujetos a sufrir este tipo de corrosión, algunos de estos equipos son: sistemas de tuberías, válvulas, bombas, alabes de turbinas, entre otros.

Existen varios métodos para prevenir la corrosión por erosión, entre los cuales podemos mencionar:

- El uso de materiales más resistentes a este tipo de ataque.
- Alteración de los medios, es decir, añadir inhibidores de detengan o disminuyan este fenómeno.
- Usar recubrimientos para producir una barrera elástica entre el metal y su medio.
- Protección catódica.

En la figura 2.17 se puede observar la corrosión por erosión en una tubería de agua



Figura 2.17. Corrosión selectiva.

Fuente: Manual de aceros inoxidables. Indura.

2.2.2 Aireación:

La aireación ó presencia de oxígeno disuelto en un medio líquido puede tener una profunda influencia en la velocidad de corrosión. Algunos metales y aleaciones son atacados rápidamente en la presencia de oxígeno, mientras que otros pueden mostrar mayor resistencia a la corrosión.

Los materiales que pueden ser afectados por la aireación son: Aceros al carbono, fundiciones, cobre, latón, bronce y otras aleaciones. Mientras que el aluminio, los aceros inoxidables y duplex entre otros, no son muy afectados por esta condición. [9]

2.2.3 Sensibilización:

La Sensibilización o sensitización, es un fenómeno que ocurre en el intervalo de temperatura de 400 a 850°C, debido a la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano y la creación de una pequeña zona empobrecida de cromo en las regiones adyacentes, con lo cual se generan, por un lado micro celdas de corrosión y por el otro regiones en las cuales la capa de óxido pierde sus características protectoras por la deficiencia de cromo.

2.2.4 Efecto de la temperatura en la velocidad de corrosión:

Cuando la corrosión es controlada por la difusión del oxígeno, la velocidad de corrosión a una concentración dada de O_2 es aproximadamente el doble para un aumento de 30 °C en la temperatura. En un recipiente abierto que permita el

escape del O₂ disuelto, la velocidad se incrementa en función de la temperatura en forma lineal hasta los 80 °C aproximadamente y luego desciende. Mientras que en un recipiente cerrado, el O₂ no puede escapar y la velocidad de corrosión continua incrementándose hasta que el oxígeno es totalmente consumido.

Cuando la corrosión es acompañada por la evolución de hidrógeno, el incremento en la velocidad es más del doble para los 30°C de aumento de temperatura. Por ejemplo, en el caso del hierro en presencia de ácido clorhídrico la velocidad de corrosión aumenta el doble para cada aumento de 10°C en la temperatura. [9]

2.2.5 Ácido Clorhídrico como agente corrosivo:

Este es el ácido que presenta mayor dificultad para su manejo desde el punto de vista de corrosión y materiales de construcción. Es muy corrosivo a la mayoría de los metales y aleaciones. Las condiciones corrosivas aumentan cuando están presentes la aireación y los agentes oxidantes. Muchas veces los materiales que presentan bajas velocidades de corrosión en este ácido, no son factibles económicamente, pero se la contaminación es uno de los problemas a sortear hay que utilizar los materiales más apropiados, es por esto que los metales y aleaciones han sido agrupados en tres clases:

Clase 1: Aquellos que generalmente son adecuados y usados para muchas aplicaciones y entre estos tenemos a:

- Chlorimet 2 y Hastelloy B, que muestran buena resistencia a la corrosión en todas las concentraciones y a temperaturas que alcanzan la ebullición, sin embargo estas aleaciones son rápidamente atacadas si están presentes la aireación y los iones oxidantes.
- Los aceros Chlorimet 3 y Hastelloy C se comportan favorablemente en ácido diluido a moderadas temperaturas y presentan mejor resistencia a los medios oxidantes debido a su alto contenido de cromo.

- El Durichlor es un hierro de alto silicio que contiene molibdeno y es mucho más resistente a la corrosión en este ácido que todas las demás aleaciones. No resiste mucho el ácido en altas concentraciones a elevadas temperaturas, sin embargo no es afectado por la aireación.
- El Tántalo muestra excelente resistencia a la corrosión y se usa para aquellas partes de equipos que bajo ningún concepto deban presentar corrosión.

Clase 2: Pertenecen aquellos materiales que son usados con cuidado y bajo condiciones específicas, a esta clase pertenecen los siguientes materiales:

- Cobre, bronce, cupro-niqueles, monel, Niquel, pero estos son susceptibles a la aireación.
- Inconel, Ni-Resistente, Hastelloy D, Duraron, aceros inoxidable del tipo 316, 316L, aceros Duplex y altas aleaciones inoxidables como el Durimet 20.
- El titanio es resistente al ácido en concentraciones de 10% y a temperatura ambiente.

Clase 3: Estos materiales son inadecuados bajo cualquier condición y solamente recomendados para determinadas concentraciones de ácido clorhídrico.

- Los aceros al carbono ordinarios, fundiciones, son muy sensibles a la corrosión y las condiciones de aireación y oxidación provocan ataques destructivos en soluciones muy diluidas. Cuando los equipos de hierro ó acero son decapados con este ácido es necesario el uso de inhibidores.
- El zinc y el magnesio son rápidamente atacados por este ácido. El estaño y sus recubrimientos son usados para aquellas soluciones que contienen pequeñas cantidades de ácido tales como productos alimenticios, aunque la aireación es destructiva en presencia del ácido.

2.2.6 Velocidad de Corrosión.

La determinación experimental de la velocidad de corrosión por el método de pérdida de peso se expresa en la norma G 31. Esta técnica consiste en exponer la pieza en un ambiente de prueba por cierto período de tiempo y después evaluar la cantidad de material que se pierde por la corrosión. El tiempo que se expone la pieza, la pérdida de peso, el área de la pieza y la densidad del material, son los parámetros que se consideran para realizar el cálculo de la velocidad de corrosión.

La pérdida de peso se calcula a través de la ecuación (1).

$$W = W_i - W_f \quad (1)$$

Donde:

W: Pérdida de peso en gramos (g).

W_i: Peso inicial en gramos (g).

W_f: Peso final en gramos (g).

La velocidad de corrosión se determina utilizando la ecuación (2)

$$V_c = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (2)$$

Donde:

V_c: Velocidad de corrosión (mm/año)

D: Densidad del material (g/cm³).

A: Es el área de la muestra (cm²).

W: Pérdida de peso (g)

T: Tiempo de exposición (h).

La tabla 2.3 muestra la clasificación de la velocidad de corrosión.

Tabla 2.3. Clasificación de la velocidad de corrosión

Clasificación de la velocidad de corrosión	
Velocidad de Corrosión (mm/año)	Ejemplos
< 0,05	Industria de alimentos, medicina, que requieran alto grado de pureza(mínima formación de óxidos formados)
0,05 – 0,12	Productos de alto control
0,12 -0,25	Baja velocidad de corrosión
0,25 – 1,27	Especificaciones de ingeniería en relación al costo
> 1,27	Elevada velocidad de corrosión.

Fuente: V.J. Guanipa, 2007

2.2.7 Desviación Estándar

El cálculo de la desviación estándar permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a la media. La desviación estándar nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza, por lo tanto su ecuación sería:

$$(\sigma)^2 = \sum_{i=1}^n Xi^2 - nX^{-2} \quad (3)$$

En donde:

δ : Desviación estándar (g)

X_i : Pérdida de peso de la muestra (g)

n: Cantidad de muestras.

X: Promedio de la pérdida de peso.

2.3 Corrosión en la industria petrolera.

Los procesos de refinación del petróleo representan un entorno donde existe una gran variedad de operaciones con elevadas exigencias en los materiales de construcción.

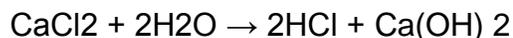
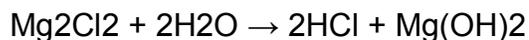
Entre las operaciones críticas en esta industria se destacan: la recuperación de calor de los procesos que se pueden utilizar como fuente de energía en otras partes de las operaciones. Esto involucra el uso de intercambiadores de calor.

Las severas condiciones dentro de intercambiadores de calor requiere el uso de materiales resistentes a la corrosión para reducir la necesidad de mantenimiento, prevenir la contaminación de los productos refinados y minimizar la pérdida de calor causada por la contaminación del equipo. [1]

La corrosión los sistemas de condensación de tope en unidades de destilación del crudo es un problema común en las refinerías de todo el mundo. Las causas de la corrosión en los sistemas son por ejemplo cloruros (inorgánicos y orgánicos), sulfuro de hidrógeno, sales y ácidos.

2.3.1 Agentes corrosivos

Existen condiciones ácidas a partir de sales de cloruro presentes en el aceite crudo, incluso después de la desalinización, hay algunos residuos de sales dejados en el crudo que se hidroliza con HCl. Las reacciones típicas que ocurren para la formación de HCl en las unidades de crudo son:



El HCl generado no es corrosivo en forma de vapor, pero se activa cuando la temperatura cae por debajo del punto de rocío del ácido. En este punto de condensación inicial, donde el pH más bajo se manifiesta, las condiciones para los materiales se agravan.

El amoníaco se puede agregar para la neutralización de HCl. La desventaja de esto es la potencial formación de sales de amonio, como cloruro de amonio. La sal sólida precipitada puede causar daños en los condensadores, y dan lugar a la corrosión y otros negativos efectos sobre el rendimiento operativo. Las incrustaciones pueden ser tan graves que provoca el bloqueo del equipo. [2]

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1 Nivel de la investigación.

El estudio que se describe a continuación es de tipo experimental, y comprende la evaluación del fenómeno de corrosión en muestras de acero dúplex SAF 2507. Se estudia la influencia de la temperatura, la concentración de ácido clorhídrico y el tiempo de exposición al medio corrosivo. Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, la investigación se apoya en la revisión bibliográfica de libros, tesis, artículos científicos, entre otros.

3.2 Diseño de la investigación.

La investigación se fundamenta en una adaptación de los ensayos que plantea la Norma ASTM 262 práctica c. Las técnicas de medición y procesamiento de información van en mutuo acuerdo con los estándares exigidos por las normas ASTM.

3.3 Etapas de la metodología.

La figura 3.1 describe la secuencia que se aplicó en la realización del estudio experimental. Cada paso cumple con los requisitos mínimos exigidos por las normas científicas internacionales citadas anteriormente, así como con las normas ambientales y de manipulación de sustancias peligrosas vigentes en la República Bolivariana de Venezuela.

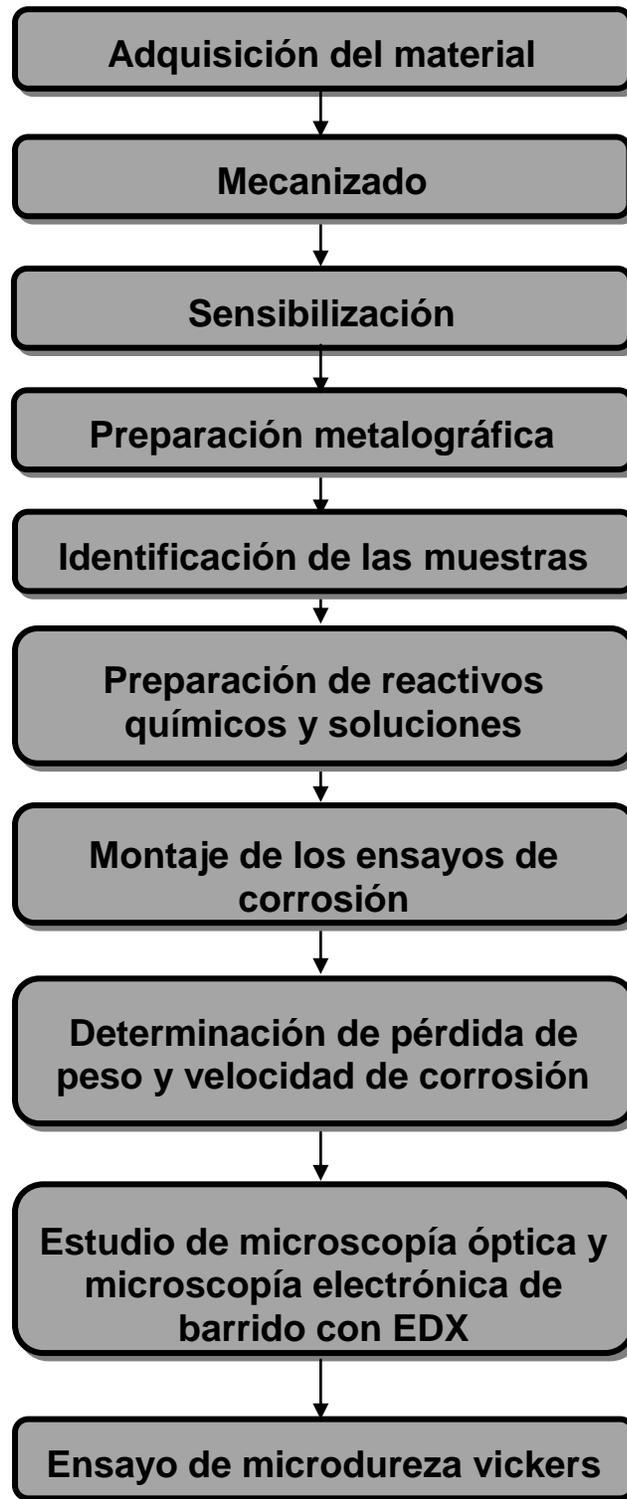


Figura 3.1 Metodología utilizada en el estudio.

3.3.1 Adquisición del material

Para la ejecución de esta investigación se utilizó un acero Dúplex grado SAF 2507 este fue suministrado por la empresa Sandvik Venezuela el cual se entregó una barra de 90 cm de longitud por 30 mm de diámetro, quien suministró la hoja de certificado de composición química que se detalla en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química del acero dúplex 2507

Cr	Mo	Si	Mn	P	S	Ni	N	C	Cu
25,15	3,91	0,33	0,77	0,017	0,0006	6,96	0,282	0,014	0,11

Fuente: Certificado No. A/06-060956. SANDVIK

3.3.2 Mecanizado de las probetas.

La mecanización de las probetas se realizó con una máquina de electroerosión por hilo, el número total de probetas que se cortaron fue de 60 y basado en la norma ASTM G04-01.

Las probetas tienen las dimensiones que se muestran en la figura 3.2

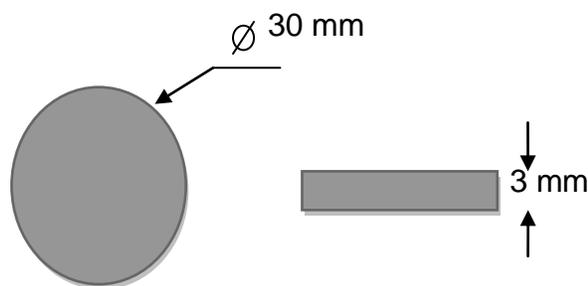


Figura 3.2 Forma geométrica de las probetas del ensayo.

En la tabla 3.2 se muestra las especificaciones de la máquina de electroerosión por hilo.

Tabla 3.2 Datos técnicos Máquina de electroerosión

Dimensiones externas máquina	1800 x 1600 x 2180 mm
Peso máquina	2190 Kg
Recorridos	X400 Y250 Z200 U400 V250 mm
Dimensiones máxima pieza	850 x 500 x200 mm
Peso máxima pieza	500 Kg
Tipo de C.N.C	CSL2 (PC integrado)

Fuente: Promecor 2, C.A.

3.3.3 Sensibilización de las muestras.

Según la norma ASTM A262-02 las muestras deben someterse a un tratamiento térmico de calor a temperaturas de 675°C (1250°F) aproximadamente. El tiempo utilizado para este tratamiento de sensibilización, determina la tasa máxima de corrosión permisible en el examen de ácido clorhídrico. El tratamiento consistió en exponer durante 1 hora a una temperatura de 675°C (1250°F).

Este se realizó en un horno eléctrico de marca termolyne modelo 48000 ubicado en el laboratorio de materiales y procesos de la facultad de ingeniería mecánica

3.3.4 Preparación metalográfica.

Se realizó un desbaste con lijas de carburo de silicio de grado 240, 320,400, 600 y 1200 con una pulidora metalográfica lubricada con agua ubicada en el laboratorio de materiales y procesos de la Universidad de Carabobo.

La lijadora de muestra en la figura 3.3.

Las figura 3.3 muestra la foto del equipo de lijado y la tabla 3.3 especifica los datos de placa.



Figura 3.3 Banco de desbaste grueso

Tabla 3.3 Datos de placa de la debastadora

Marca	Modelo
Buehler	ECOMET II

Fuente: Laboratorio de materiales. Universidad de Carabobo.

Seguidamente se realizó un proceso de pulido en un banco de pulido ubicado en el laboratorio antes mencionado sometiendo a las muestras por dos paños de pulido grueso y con la ayuda de un compuesto químico denominado alúmina. Luego del lijado se lavaron con etanol y se procedió a secar las muestras con aire seco y calor. Se realizó el pesaje de las probetas y se almacenaron en un desecador de vidrio mientras se completaba el montaje del ensayo.

3.3.5 Identificación de las muestras.

Para la identificación de las muestras se estableció un código que permite visualizar las condiciones de ensayo de las probetas.

En la figura 3.4 se puede observar el significado de cada dígito del código de las muestras.

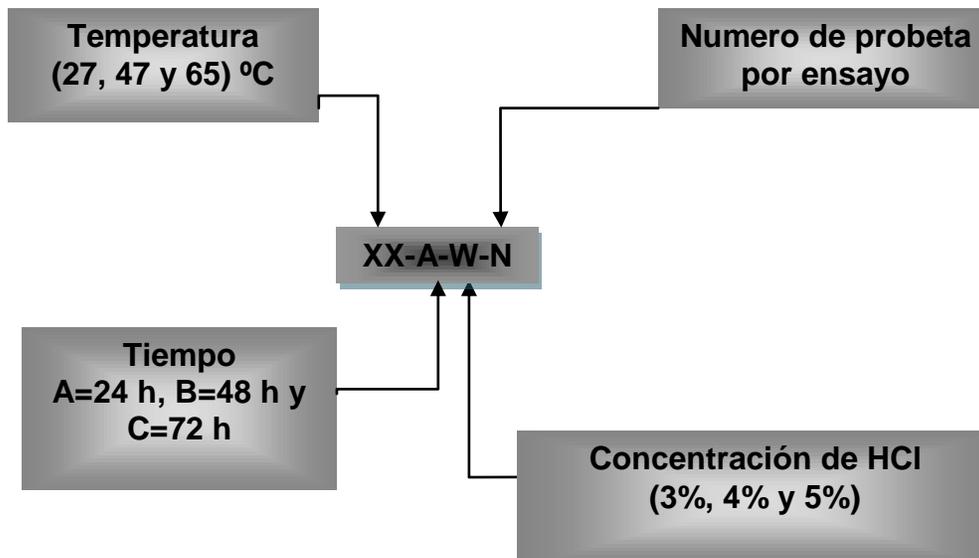
Código de identificación de las probetas:

Figura 3.4 Código utilizado en la identificación de las muestras.

3.3.6 Preparación de reactivos químicos y soluciones.**Solución de ataque para microscopía:**

- Para revelar la microestructura del acero dúplex se preparó una solución de ácido clorhídrico y bisulfito de sodio en las siguientes proporciones: 50ml de H₂O destilada + 15ml de HCL + 1g Na₂S₂O₅. El tiempo de duración del ataque fue de 8 segundos.

Preparación del medio corrosivo para los ensayos

- Para la preparación de las soluciones acuosas de ácido clorhídrico a concentraciones de 3%, 4% y 5% v/v. llevó a cabo un procedimiento químico basado en la combinación de agua destilada y ácido clorhídrico al 37% (presentación comercial).
- La mezcla se llevó a cabo en un balón aforado de 2 l, utilizando una pipeta de precipitación y un vicker de 500 ml.

Reactivo para la limpieza química de los productos de corrosión

- El reactivo que se utilizó para eliminar la capa de óxido formada en las probetas se elaboró con las siguientes proporciones: 100 ml de ácido nítrico (HNO_3) y 20 ml de ácido fluorhídrico (HF) diluido en agua destilada hasta alcanzar un volumen de 1000 ml.
- El proceso de limpieza química y preparación del reactivo se basó en la norma ASTM G1. Tabla A1. Designación C.7.5.
- La duración de este proceso de limpieza fue de 15 minutos.

3.3.7 Montaje de los ensayos de corrosión.

Los ensayos se realizaron en un baño termostático que consiste en un encofrado metálico de acero inoxidable austenítico con una resistencia eléctrica en el fondo y una serie de aberturas en la tapa superior que permite introducir hasta 8 vickers de 600 ml de capacidad

Se realizó una adaptación al instalar un regulador de temperatura para los ensayos y un regulador de nivel de agua para restituir la pérdida por evaporación del agua.

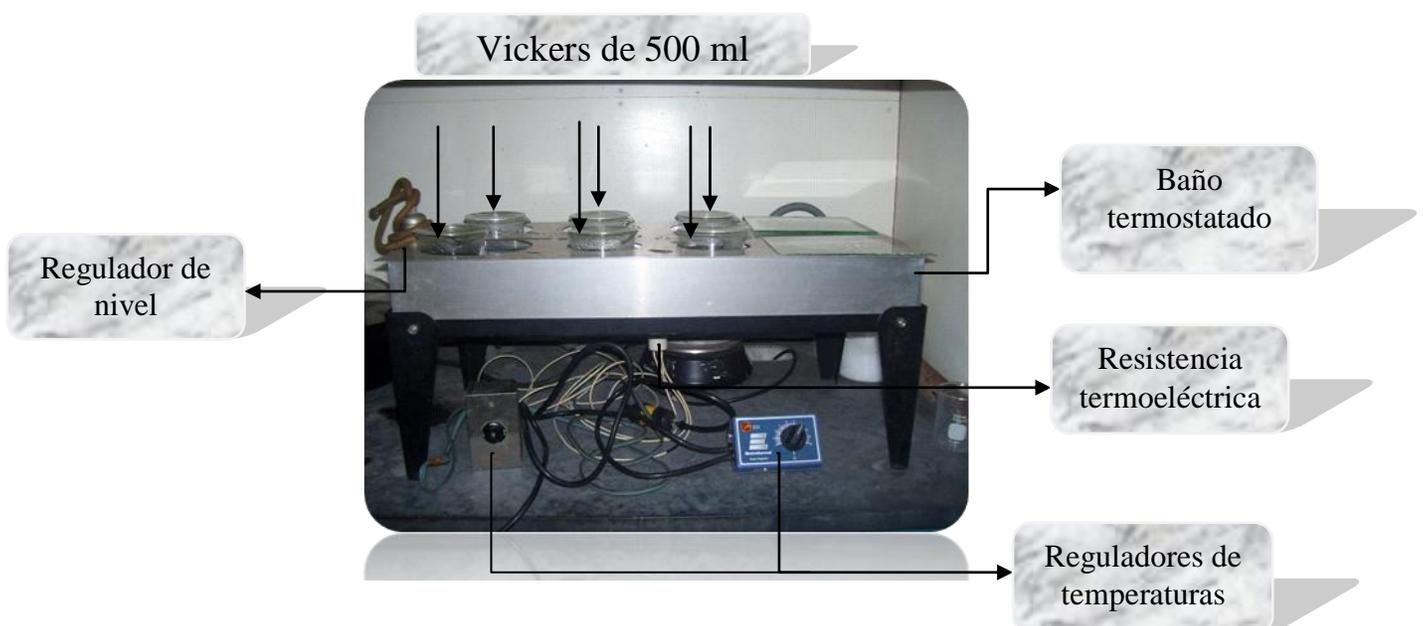


Figura 3.5 Montaje de los ensayos

- El equipo termostático fue calibrado a las temperaturas de realización de los ensayos, es decir, a 27 °C, 47°C y 65 °C.

Condiciones de los ensayos

En la tabla 3.4 se presenta un cuadro resumen de los ensayos de corrosión.

Tabla 3.4 Condición de los ensayos de corrosión

Condición	Nº Probetas	Temperatura (°C)	% HCl	Duración (h)
1	6	27	3	24, 48 y 72
2	6	27	4	24, 48 y 72
3	6	27	5	24, 48 y 72
4	6	47	3	24, 48 y 72
5	6	47	4	24, 48 y 72
6	6	47	5	24, 48 y 72
7	6	65	3	24, 48 y 72
8	6	65	4	24, 48 y 72
9	6	65	5	24, 48 y 72

Las probetas fueron sujetadas por los bordes con una pinza y luego sumergidas en un vickers de 600 ml, posicionándola sobre un cilindro de vidrio previamente colocado en el fondo del vickers, posteriormente se procedió a verter la solución de ácido clorhídrico preparado en un balón aforado de 2000 ml implementando un embudo de vidrio.

Finalmente se realizó una medición de temperatura en la solución de ácido clorhídrico para verificar su valor y se procedió a tapar los vickers con tapas de vidrio reloj.

La exactitud de la medición de temperatura fue de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para las condiciones de los ensayos.

3.3.8 Determinación de la pérdida de peso y velocidad de corrosión.

Análisis de la pérdida de peso

- Concluido el tiempo de duración del ensayo, las muestras fueron retiradas del vickers y se procedió a limpiar químicamente los productos de corrosión que se formaron en la superficie.
- Luego se aplicó agua destilada y acetona para eliminar las partículas de agua, y a continuación las muestras fueron secadas con aire seco y calor.
- Finalmente cada probeta identificada se introdujo en la balanza electrónica y se realizó el pesaje final.
- Con los valores de peso inicial y peso final se calculó la pérdida de peso.

$$\% PP = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} \times 100(1)$$

Cálculo de la velocidad de corrosión

- Para el cálculo de la velocidad de corrosión se utilizó la data obtenida de pérdida de peso.
- La ecuación (2) que aparece en la norma ASTM G31. cuyas unidades viene expresada en milímetros por año (mm/año) donde: K es una constante de conversión de unidades igual a $8,76 \times 10^4$, W: pérdida de peso en gramos, A: área en pulgadas cuadradas, D: densidad de la muestra en gramos por centímetro cuadrado y T: tiempo de exposición en horas.

$$VC = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (2)$$

- El área de las probetas de acero dúplex SAF 2507 es de 16,96 cm². Debido a la gran exactitud en el corte que proporciona la máquina de electroerosión por hilo, no se considera las variaciones de área en las probetas.
- El valor de densidad que proporciona el fabricante del acero dúplex Saf 2507 es de 7,8 g/cm².

3.3.9 Estudio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido con EDX.

La evaluación de las muestras a través del microscopio óptico se realizó en el laboratorio de materiales de la escuela de mecánica en la Universidad de Carabobo. En la tabla 3.5 se detalla las especificaciones del equipo.

Tabla 3.5 Datos de placa microscopio óptico.

Marca	Modelo	Capacidad	Año	Fecha de verificación
Unión	MC 86267	50-1000x	1994	Mayo 2010

Fuente: Laboratorio de materiales. Universidad de Carabobo.

El estudio de microscopía electrónica de barrido con espectrometría difractoria de rayos X. se realizó con un equipo ubicado en el instituto Tecnológico de la Región Capital en los Teques donde se realizó análisis de espectrometría difractoria de rayos X (EDX) a las muestras ensayadas, con el propósito de revelar contenidos de cromo, níquel, molibdeno, silicio, entre otros, y visualizar la microestructura con mayor detalle de las probetas. En la tabla 3.6 se muestra las especificaciones del microscopio de barrido

Tabla 3.6 Datos de placa del microscopio electrónico de barrido.

Marca	Modelo	Resolución	Voltaje
Philips	<i>XL30 S FEG Scanning Electron Microscope</i>	<i>1.5nm</i>	<i>200 V – 30 kV</i>
Rango de Amplitud		<i>Distancia de trabajo</i>	<i>Tilt range</i>
<i>X 80 - X 800,000</i>		<i>1-50mm</i>	<i>-10° to + 45°, EDX</i>

Fuente: Instituto Universitario de Tecnología (I.U.T)

3.3.10 Ensayo de microdureza vickers.

Para el estudio de microdureza se utilizó el microdureómetro mencionado anteriormente. El ensayo consistió en colocar una probeta preparada metalográficamente sobre la base del microdureómetro, luego se penetra la superficie del material con un indentador de punta de diamante a través de la aplicación de una carga de 25 gramos durante cinco (5) segundos.

Una vez realizada la huella que posee forma de rombo se procede a visualizar y a medir la diagonal vertical de la misma por medio de un ocular micrométrico con índices móviles que posee el equipo.

Mediante la ecuación (3) se obtiene el valor de la microdureza del material.

$$HV = \frac{1,72 \cdot P}{d} \quad (3)$$

Donde:

P: Carga aplicada

d: Promedio de la diagonal principal.

HV: Microdureza Vickers.

El número de indentaciones fue de cinco (5) para cada fase del acero dúplex Saf 2507 y se tomo una muestra por cada condición de estudio.

Las características del microdurometro digital se muestran a continuación en la tabla 3.7

Tabla 3.7 Datos de placa microdurometro digital.

Marca	Modelo	Capacidad	Año	Fecha de verificación
Buehler	Indentamet 110	(25-1000)g	2003	Julio 2010

Fuente: Laboratorio de materiales. Universidad de Carabobo.

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de corrosión del acero dúplex SAF 2507 durante 24h, 48h y 72h expuestos a soluciones de ácido clorhídrico de 3%, 4% y 5% de concentración v/v, a temperaturas de 27°C, 47°C y 65°C. Se analizan y discuten los valores alcanzados de velocidad de corrosión para cada condición, imágenes de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con EDX y microdureza.

4.1 Evaluación de pérdida de peso y velocidad de corrosión del acero Dúplex SAF 2507

Con el fin de medir el daño causado por la interacción del ácido clorhídrico de las muestras ensayadas, se estudia la pérdida de peso y se calcula la velocidad de corrosión de conformidad con las normas ASTM G31-72 y A262-02 práctica c.

Las tablas 4.1 a 4.6 muestran los pesos iniciales y finales de cada probeta, el porcentaje de pérdida de peso, la velocidad de corrosión promedio y la desviación estándar para cada condición de temperatura y concentración de ácido clorhídrico objeto de estudio.

Las tablas 4.7 y 4.8 muestran un resumen de los resultados obtenidos en cuanto a las velocidades de corrosión y se presentan en función de la temperatura y de la concentración de ácido clorhídrico.

4.1.1 Ensayos a temperatura de 27°C

La tabla 4.1 muestra el tiempo de exposición (T.e), las condiciones de peso inicial (P.i) y peso final (P.f) de las probetas, pérdida de peso (P.p) y

pérdida de peso promedio (P.prom) luego de realizados los ensayos y la desviación estándar (Desv.).

Tabla 4.1. Pérdida de peso para el acero dúplex 2507 a temperatura de 27°C.

Código	% HCl	T.e (h)	P.i (g)	P.f (g)	P.p (g)	P.p (%)	P.prom (%)	Desv. (%)
27A31	3	24	16.1717	16.1474	0.0243	0,15	0,15	0,00
27A32			16.0943	16.0697	0.0246	0,15		
27B31	3	48	16.1620	16.1147	0.0473	0,29	0,30	0,00
27B32			16.2231	16.1743	0.0488	0,30		
27C31	3	72	16.0651	15.9916	0.0735	0,46	0,46	0,00
27C32			16.0483	15.9756	0.0727	0,45		
27A41	4	24	16.0390	15.9745	0.0645	0,40	0,42	0,02
27A42			16.1195	16.0498	0.0697	0,43		
27B41	4	48	16.0358	15.9025	0.1333	0,83	0,86	0,03
27B42			15.9601	15.8198	0.1403	0,88		
27C41	4	72	16.0843	15.8611	0.2232	1,39	1,34	0,07
27C42			16.1427	15.9344	0.2083	1,29		
27A51	5	24	16.0291	15.8961	0.1330	0,83	0,82	0,00
27A52			16.2421	16.1093	0.1328	0,82		
27B51	5	48	16.0481	15.7668	0.2813	1,75	1,75	0,00
27B52			16.0012	15.7210	0.2802	1,75		
27C51	5	72	16.0385	15.6397	0.3988	2,49	2,51	0,02
27C52			16.0291	15.6244	0.4047	2,52		

Se puede apreciar en la tabla 4.1 que para una concentración de 4% de HCl ocurre un aumento en la pérdida de peso promedio respecto a la condición de 3% de HCl de 185,76% y para una concentración de 5% de HCl el aumento es de 458,51% de pérdida de peso promedio respecto a la condición de 3% de HCl.

En la figura 4.1 se presenta la pérdida de peso porcentual en función del tiempo para cada concentración de ácido clorhídrico. Se puede notar el aumento lineal de la pérdida de peso de las muestras de acero dúplex SAF

2507 a medida transcurren las horas de exposición al ácido clorhídrico. La influencia de la concentración de ácido clorhídrico en la solución de ataque provoca una pérdida de peso aproximado de 0,15% cada 24 horas para una concentración de 3% HCl, para una concentración de 4% HCl la pérdida de peso promedio es de aproximadamente de 0,46% y para 5% HCl de concentración la pérdida de peso promedio es de aproximadamente 0,84% por cada 24 horas de exposición.

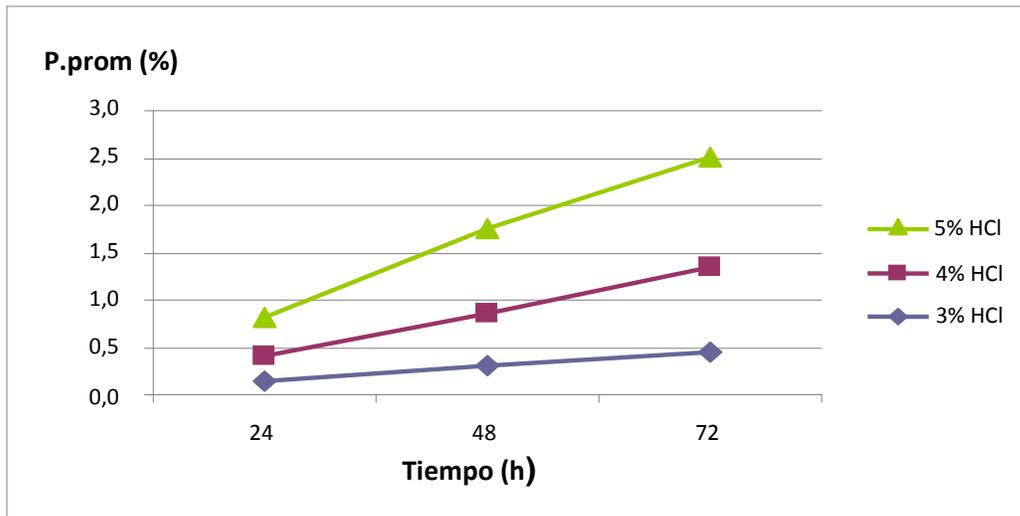


Figura 4.1 Gráfica de pérdida de peso promedio en función del tiempo a temperatura de 27°C.

En la tabla 4.2 se muestra un resumen del cálculo de la velocidad de corrosión (V_c) utilizando la ecuación (2) para cada muestra, la velocidad de corrosión promedio ($V_{c.prom}$) para cada condición de estudio y la desviación estándar ($desv$).

Tabla 4.2. Velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 a temperatura de 27°C.

Código	% HCl	T.e (h)	P.p (g)	Vc (mm/año)	Vc.prom (mm/año)	Des.
27A31		24	0.0243	0,6703		
27A32			0.0246	0,6786		
27B31	3	48	0.0473	0,6524	0,67	0,01
27B32			0.0488	0,6730		
27C31		72	0.0735	0,6758		
27C32			0.0727	0,6684		
27A41		24	0.0645	1,7792		
27A42			0.0697	1,9226		
27B41	4	48	0.1333	1,8385	1,91	0,09
27B42			0.1403	1,9350		
27C41		72	0.2232	2,0522		
27C42			0.2083	1,9152		
27A51		24	0.1330	3,6686		
27A52			0.1328	3,6631		
27B51	5	48	0.2813	3,8797	3,74	0,10
27B52			0.2802	3,8645		
27C51		72	0.3988	3,6668		
27C52			0.4047	3,7211		

La tabla 4.2 muestra la velocidad de corrosión promedio para cada concentración de HCl a temperatura de 27°C. Para la condición de 3% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 0,67 mm/año, para una concentración de 4% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 1,91 mm/año y para la condición de 5% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 3,74 mm/año.

El comportamiento de la velocidad de corrosión en función del tiempo para cada concentración de ácido clorhídrico a temperatura de 27°C se muestra en la figura 4.2. Se puede apreciar que el comportamiento de la velocidad de corrosión en función del tiempo tiende a un valor constante.

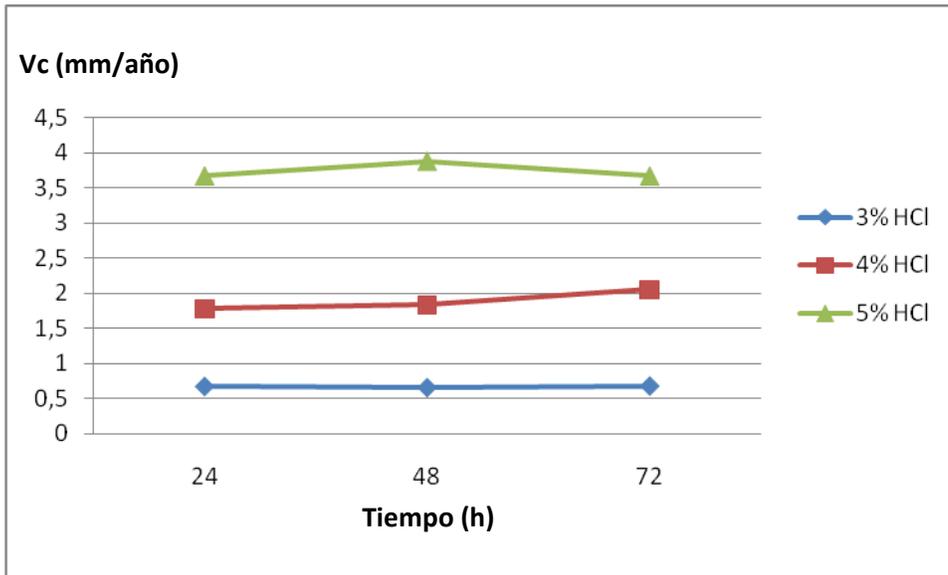


Figura 4.2 Gráfica de la velocidad de corrosión en función del tiempo a temperatura de 27°C.

La figura 4.3 muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión promedio en función de la concentración de ácido clorhídrico. Para una concentración de 3% HCl la velocidad de corrosión es de 0,67 mm/año y ocurre un incremento de 2,85 veces para concentraciones de 4% HCl y de 1,95 veces para concentraciones de 5% HCl.

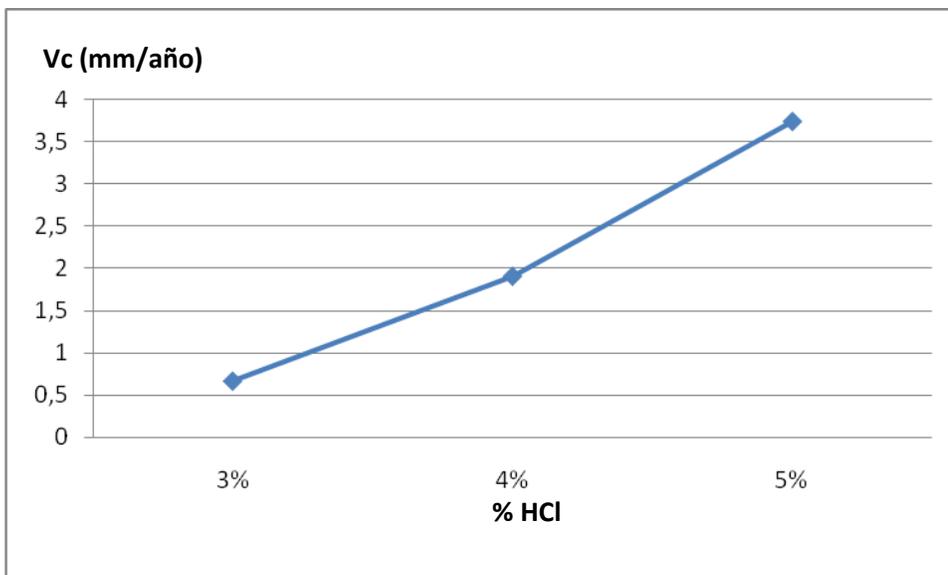


Figura 4.3 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl a temperatura de 27°C.

4.1.2 Ensayos a temperatura de 47°C

En la tabla 4.3 se muestra la data obtenida de los ensayos de corrosión a temperatura de 47°C. Un aumento de la concentración del HCl ocasiona una variación significativa de pérdida de peso promedio. Para una concentración de 4% de HCl ocurre un aumento en la pérdida de peso promedio respecto a la condición de 3% de HCl de 103,96%. Para una concentración de 5% de HCl el aumento es de 248,93% en la pérdida de peso promedio respecto a la condición de 3% de HCl.

Tabla 4.3 Pérdida de peso para el acero Dúplex 2507 a temperatura de 47°C.

Código	% HCl	T.e (h)	P.i (g)	P.f (g)	P.p (g)	P.p (%)	P.prom (%)	Desv. (%)
47A31	3	24	16,1858	15,9560	0,2298	1,42	1,36	0,09
47A32			16,0956	15,8877	0,2079	1,29		
47B31		48	16,2048	15,8191	0,3857	2,38	2,40	0,02
47B32			16,0211	15,6330	0,3881	2,42		
47C31		72	16,0226	15,4169	0,6057	3,78	3,82	0,05
47C32			16,1563	15,5319	0,6244	3,86		
47A41	4	24	14,7990	14,3506	0,4484	3,03	2,85	0,24
47A42			16,1328	15,7009	0,4319	2,68		
47B41		48	16,2450	15,4490	0,7960	4,90	4,78	0,16
47B42			16,0563	15,3071	0,7492	4,67		
47C41		72	16,2003	14,9674	1,2329	7,61	7,73	0,17
47C42			16,0730	14,8101	1,2629	7,86		
47A51	5	24	16,1976	15,4598	0,7378	4,55	4,51	0,06
47A52			16,2105	15,4871	0,7234	4,46		
47B51		48	16,2923	14,8897	1,4026	8,61	8,67	0,08
47B52			16,1322	14,7241	1,4081	8,73		
47C51		72	16,0677	13,9196	2,1481	13,37	13,66	0,41
47C52			16,0852	13,8420	2,2432	13,95		

La figura 4.4 muestra el comportamiento de la pérdida de peso porcentual en función del tiempo para las muestras de acero dúplex SAF 2507 a las concentraciones de ácido clorhídrico de 3%, 4% y 5% a temperatura de 47°C. El fenómeno de pérdida de peso porcentual en las muestras es directamente proporcional al tiempo de exposición a la solución de ácido clorhídrico y presenta una tendencia lineal con pendiente positiva.

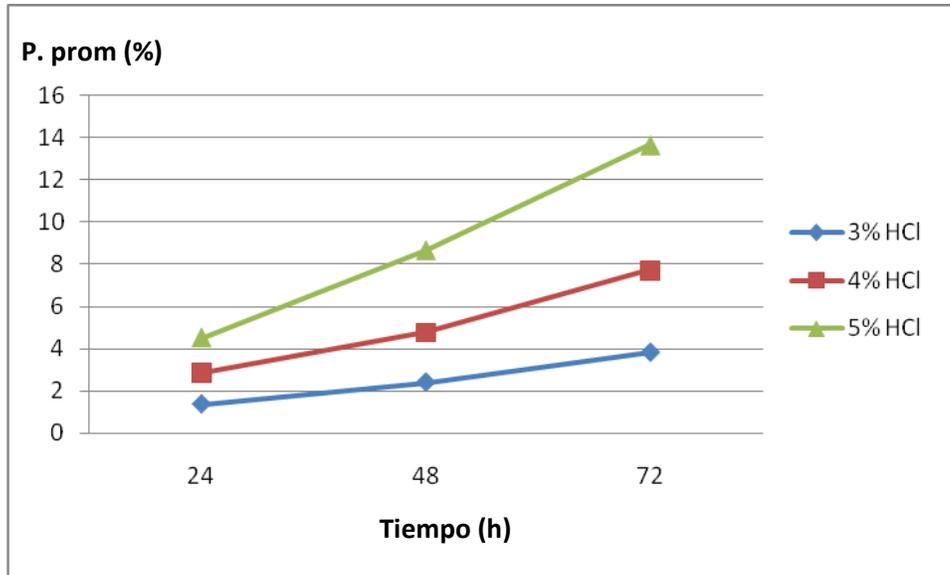


Figura 4.4 Gráfica de la pérdida de peso promedio función del tiempo a temperatura de 47°C.

La tabla 4.4 presenta un resumen del resultado de la velocidad de corrosión de cada muestra, la velocidad de corrosión promedio para cada condición de estudio y la desviación estándar a temperatura de 47°C. Para la condición de 3% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 5,68mm/año, para una concentración de 4% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 11,75 mm/año y para la condición de 5% de HCl la velocidad de corrosión es de 19,91 mm/año.

Tabla 4.4 Velocidad de corrosión del acero dúplex 2507 a temperatura de 47°C.

Código	% HCl	T.e (h)	P.p (g)	Vc (mm/año)	Vc.prom (mm/año)	Des.
47A31		24	0,2298	6,3388		
47A32		24	0,2079	5,7347		
47B31	3	48	0,3857	5,3195	5,68	0,37
47B32	3	48	0,3881	5,3526		
47C31		72	0,6057	5,5692		
47C32		72	0,6244	5,7411		
47A41		24	0,4484	12,3686		
47A42		24	0,4319	11,9135		
47B41	4	48	0,7960	10,9784	11,75	0,72
47B42	4	48	0,7492	10,3329		
47C41		72	1,2329	11,3360		
47C42		72	1,2629	11,6119		
47A51		24	0,7378	20,3514		
47A52		24	0,7234	19,9541		
47B51	5	48	1,4026	19,3445	19,91	0,51
47B52	5	48	1,4081	19,4204		
47C51		72	2,1481	19,7509		
47C52		72	2,2432	20,6254		

La figura 4.5 muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión en función del tiempo para cada concentración de ácido clorhídrico a temperatura de 47°C.

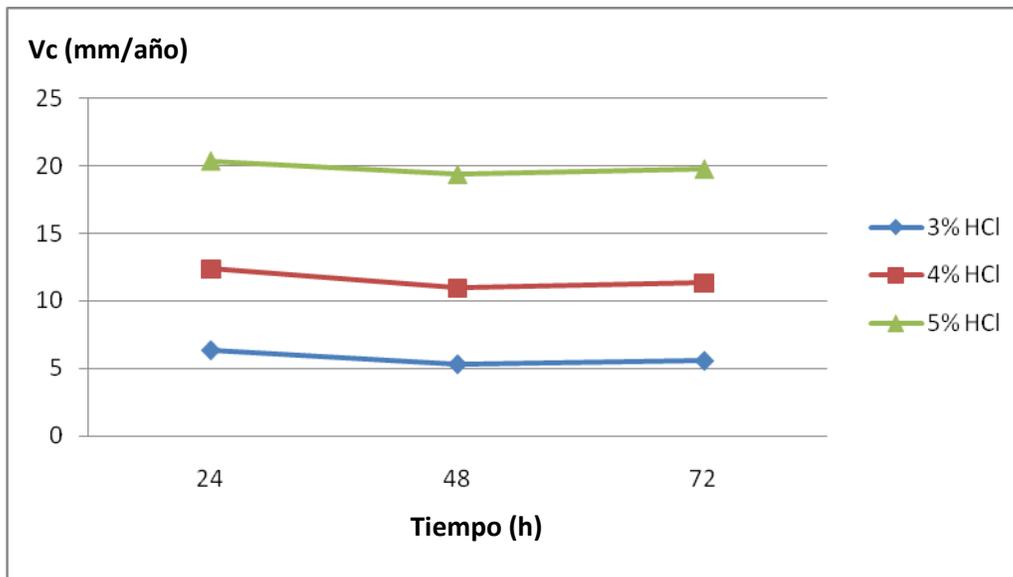


Figura 4.5 Gráfica de la velocidad de corrosión en función del tiempo a temperatura de 47°C.

La figura 4.6 muestra la velocidad de corrosión promedio en función de la concentración de ácido clorhídrico a temperatura de 47°C.

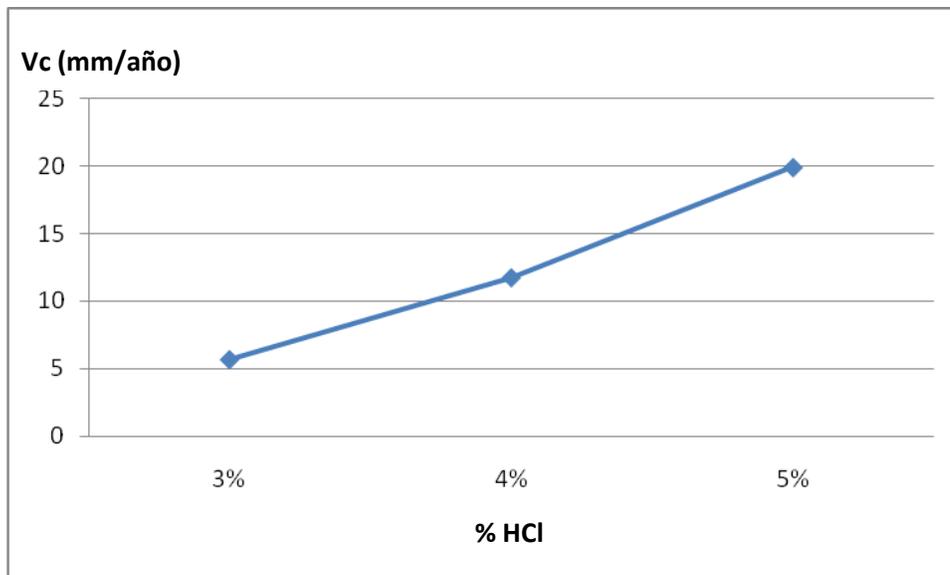


Figura 4.6 Gráfica de velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl a temperatura de 47°C.

La influencia de la concentración de ácido clorhídrico es tal, que un incremento de 3% HCl a 4% HCl genera un aumento en la velocidad de

corrosión de 106,86% y un incremento en la concentración de 3% HCl a 5% HCl ocasiona un aumento en 250,52%.

4.1.3 Ensayos a temperatura de 65°C

La tabla 4.5 muestra la data obtenida de los ensayos de corrosión en un ambiente a temperatura de 65°C. Para una concentración de 4% de HCl ocurre un aumento en la pérdida de peso promedio respecto a la condición de 3% de HCl de 91,96% y para una concentración de 5% de HCl el aumento es de 185,54% la pérdida de peso promedio respecto a la condición de 3% de HCl.

Tabla 4.5 Pérdida de peso para el acero Dúplex 2507 a temperatura de 65°C.

Código	% HCl	T.e (h)	P.i (g)	P.f (g)	P.p (g)	P.p (%)	P.prom (%)	Desv. (%)
65A31	3	24	16,0844	15,4919	0,5925	3,68	3,84	0,21
65A32			15,2357	14,6280	0,6077	3,99		
65B31		48	16,0597	14,7724	1,2873	8,02	7,78	0,33
65B32			16,2262	15,0020	1,2242	7,54		
65C31		72	16,0832	14,1938	1,8894	11,75	11,83	0,12
65C32			16,1838	14,2551	1,9287	11,92		
65A41	4	24	16,2716	15,0900	1,1816	7,26	7,21	0,07
65A42			16,9394	15,7265	1,2129	7,16		
65B41		48	16,1072	13,7205	2,3867	14,82	15,17	0,50
65B42			16,1583	13,6493	2,5090	15,53		
65C41		72	15,7762	12,1670	3,6092	22,88	22,85	0,04
65C42			16,0795	12,4096	3,6699	22,82		
65A51	5	24	16,0093	14,1864	1,8229	11,39	11,42	0,04
65A52			16,0480	14,2093	1,8387	11,46		
65B51		48	16,1972	12,6503	3,5469	21,90	22,03	0,18
65B52			16,0463	12,4900	3,5563	22,16		
65C51		72	16,0383	10,8455	5,1928	32,38	32,66	0,39
65C52			15,9590	10,7020	5,2570	32,94		

La figura 4.7 muestra el comportamiento de la pérdida de peso porcentual en función del tiempo para cada concentración de ácido clorhídrico a temperatura de 65°C. Se puede apreciar que la velocidad de corrosión es directamente proporcional al tiempo de exposición a la solución de ácido clorhídrico para las condiciones de temperatura de 27°C, 47°C y 65°C.

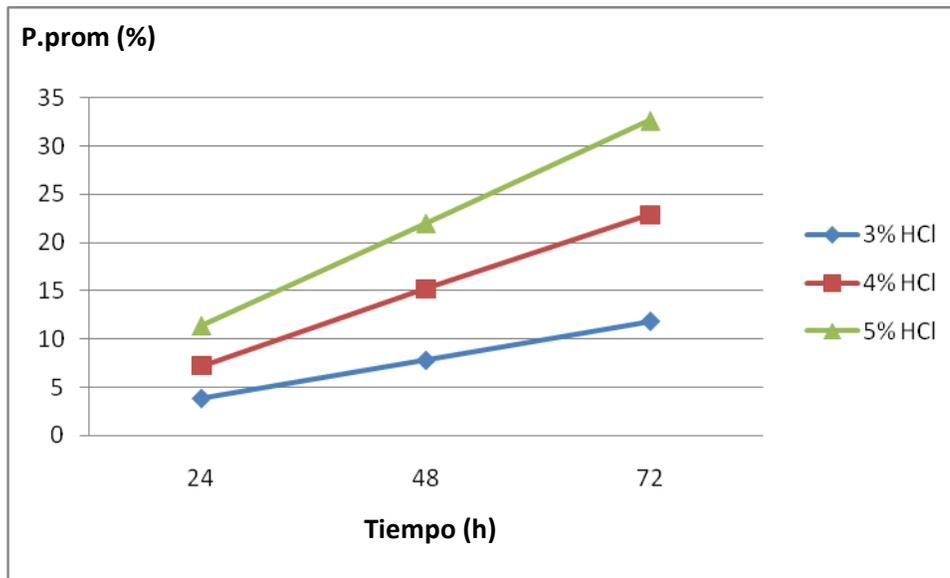


Figura 4.7 Gráfica de la pérdida de peso porcentual en función del tiempo a temperatura de 65°C.

La tabla 4.6 muestra el resultado de la velocidad de corrosión promedio para cada concentración de HCl a temperatura de 65°C. Para la condición de 3% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 17,14 mm/año, para una concentración de 4% de HCl la velocidad de corrosión promedio es de 33,35 mm/año y para la condición de 5% de HCl la velocidad de corrosión es de 49,17 mm/año.

Tabla 4.6 Velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 a temperatura de 65°C.

Código	% HCl	Tiempo de exposición (h)	Pérdida de Peso (g)	Velocidad de corrosión (mm/año)	Velocidad de corrosión promedio (mm/año)	Desviación estándar
65A31		24	0,5925	16,3434		
65A32		24	0,6077	16,7627		
65B31	3	48	1,2873	17,7543	17,14	0,57
65B32	3	48	1,2242	16,8841		
65C31		72	1,8894	17,3723		
65C32		72	1,9287	17,7336		
65A41		24	1,1816	32,5931		
65A42		24	1,2129	33,4564		
65B41	4	48	2,3867	32,9172	33,35	0,71
65B42	4	48	2,5090	34,6039		
65C41		72	3,6092	33,1852		
65C42		72	3,6699	33,7433		
65A51		24	1,8229	50,2826		
65A52		24	1,8387	50,7184		
65B51	5	48	3,5469	48,9186	49,17	1,13
65B52	5	48	3,5563	49,0482		
65C51		72	5,1928	47,7458		
65C52		72	5,2570	48,3361		

La figura 4.8 muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión en función del tiempo para cada concentración de ácido clorhídrico a temperatura de 65°C. La velocidad de corrosión tiende a un valor constante a medida que transcurren las horas de exposición al ácido clorhídrico.

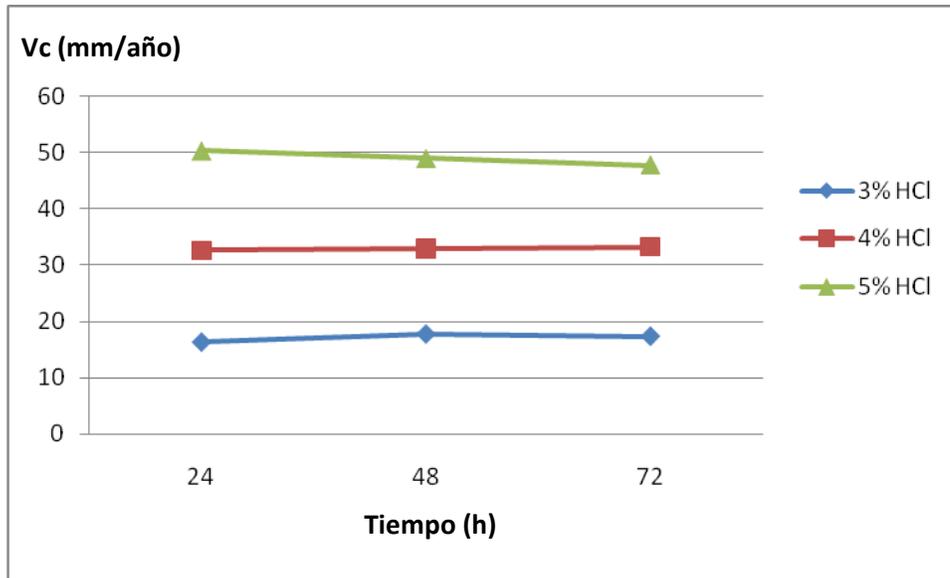


Figura 4.8 Gráfica de la velocidad de corrosión en función del tiempo a temperatura de 65°C.

La figura 4.9 representa la velocidad de corrosión promedio en función de la concentración de ácido clorhídrico. Para un incremento a 4% de HCl la velocidad de corrosión aumenta a 1,94 veces con respecto a una concentración de 3% de HCl. Un incremento a 5% de HCl ocasiona que velocidad de corrosión aumente a 1,47 veces respecto a concentraciones de 4% de HCl.

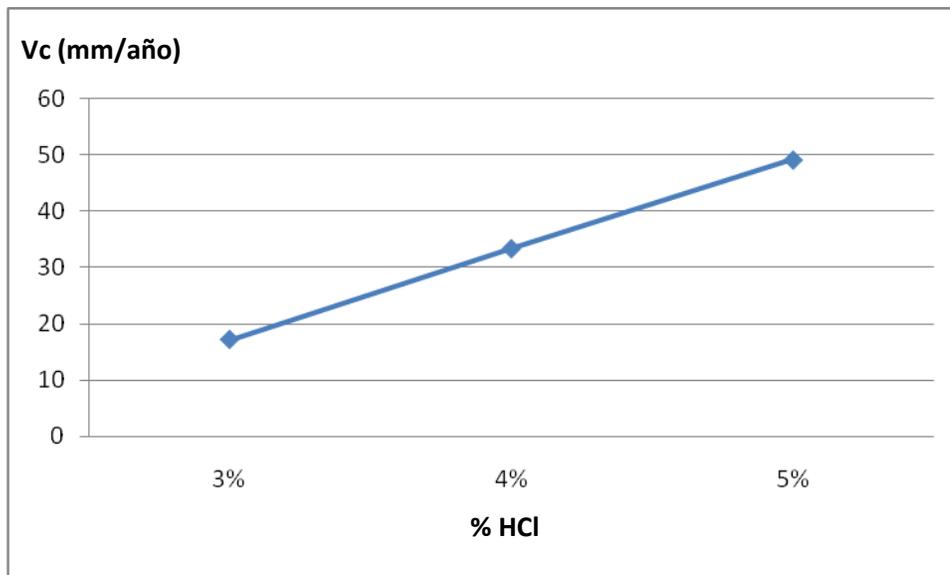


Figura 4.9 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl a temperatura de 65°C.

4.1.4 Evaluación de la influencia de la temperatura en la velocidad de corrosión

La tabla 4.7 muestra un resumen de las velocidades de corrosión en función de la temperatura a concentraciones de 3%, 4% y 5% de ácido clorhídrico. La influencia del aumento de 27°C a 47°C en la temperatura provoca un incremento en la velocidad de corrosión de 747,76% para un 3% de HCl, 322,35% para un 4% de HCl y de 432,35% para un 5% de HCl. Este aumento en la temperatura afecta con mayor intensidad a las muestras que se encuentra a una concentración de 3% de HCl.

Cuando se considera el aumento de 47°C a 65°C en la temperatura de los ensayos, podemos apreciar un incremento en la velocidad de corrosión de 201,76% para un 3% de HCl, 183,82% para un 4% de HCl y de 146,96% para un 5% de HCl. El incremento en la temperatura afecta más drásticamente a las muestras que se encuentran a una concentración de 3% de ácido clorhídrico.

Tabla 4.7 Resultados de velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	HCl (%)	Vc.prom (mm/año)
27	3	0,67
	4	1,91
	5	3,74
47	3	5,68
	4	11,75
	5	19,91
65	3	17,14
	4	33,35
	5	49,17

La figura 4.10 muestra las graficas de la velocidad de corrosión en función de la temperatura para cada condición de concentración de ácido clorhídrico.

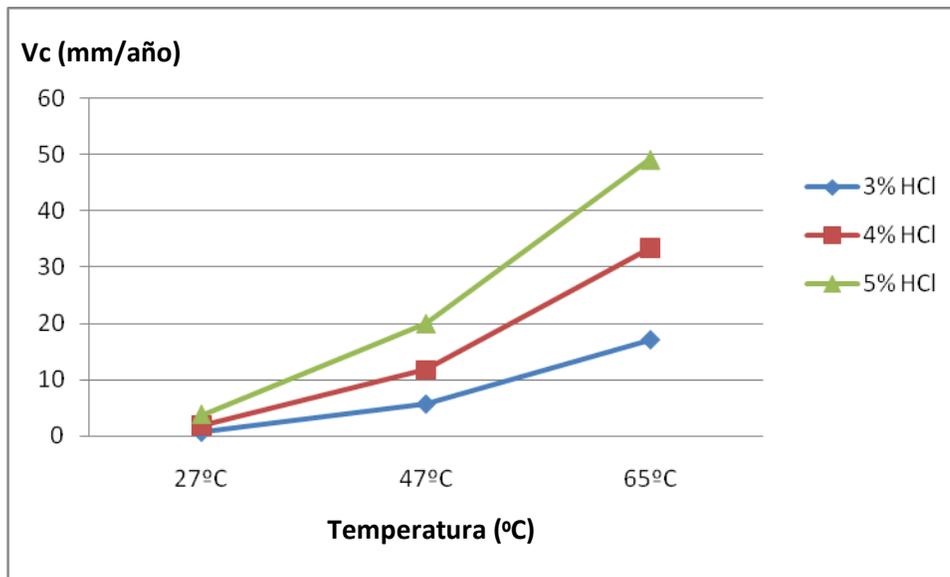


Figura 4.10 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la temperatura.

4.1.5 Evaluación de la influencia de la concentración de ácido clorhídrico en la velocidad de corrosión.

La tabla 4.8 muestra los resultados de las velocidades de corrosión en función de la concentración de ácido clorhídrico para temperaturas de 27°C, 47°C y 65°C.

Cuando analizamos la velocidad de corrosión en función de la concentración, se corrobora que es la temperatura la que rige el comportamiento de la velocidad de corrosión, debido a que solo sufre incrementos de 2 y 3 veces la velocidad de corrosión en función de la concentración, mientras que, cuando se analiza la corrosión en función de la temperatura los incrementos llegan a ser hasta 15 veces en los intervalos de 3% a 5% de HCl.

Tabla 4.8 Velocidad de corrosión del acero Dúplex 2507 en función de la concentración de ácido clorhídrico.

% HCl	Temperatura (°C)	Vc.prom (mm/año)
3	27	0,67
	47	5,68
	65	17,14
4	27	1,91
	47	11,75
	65	33,35
5	27	3,74
	47	19,91
	65	49,17

La figura 4.11 muestra en comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la concentración de ácido clorhídrico a las temperaturas de realización de los ensayos.

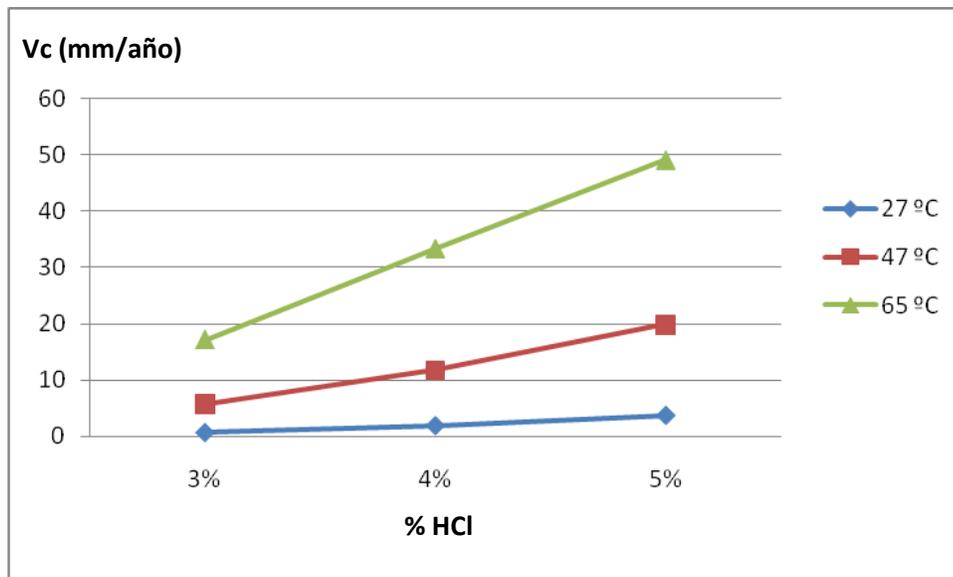


Figura 4.11 Gráfica de la velocidad de corrosión en función de la concentración de HCl.

Se puede evidenciar que la variación de la temperatura de los ensayos influye con mayor intensidad en la velocidad de corrosión que la variación de la concentración de ácido clorhídrico.

4.2. Evaluación de microestructura del acero dúplex SAF 2507 a través de imágenes de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido con EDX.

El estudio de la microestructura del acero dúplex SAF 2507 se fundamenta en las imágenes obtenidas mediante la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido con EDX. Se puede observar las características de los límites de granos, la diferenciación de las fases de austenita y ferrita, y la degradación microestructural que sufre el material luego de los ensayos de corrosión.

4.2.1 Muestras del material Original.

En la condición original se puede observar la composición de las fases de austenita (γ) y ferrita (α) en fracciones distribuidas aproximadamente igual para cada fase. Presenta una morfología equilibrada, límites de grano bien definidos.

La fase de austenita tiene una mayor densidad que la ferrita, y se destaca microscópicamente por su relieve superficial. En las figuras 4.12 y 4.13 se pueden apreciar las fases del acero dúplex Saf 2507.

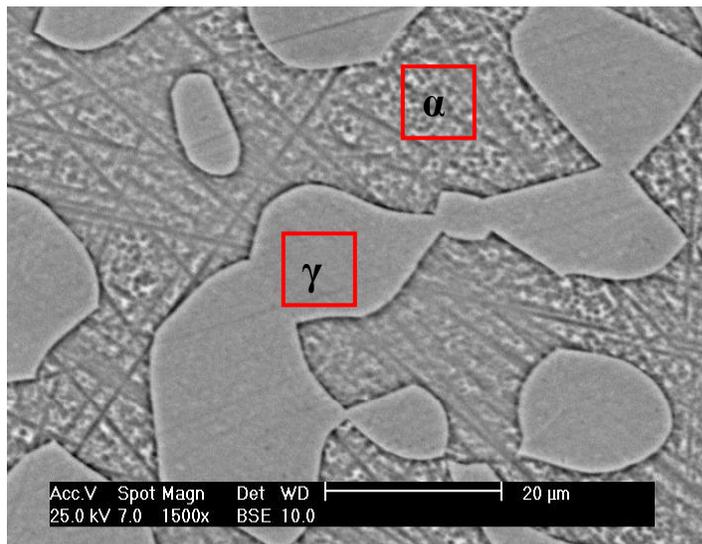


Figura 4.12 Acero dúplex SAF 2507, Condición original, MEB 1500X

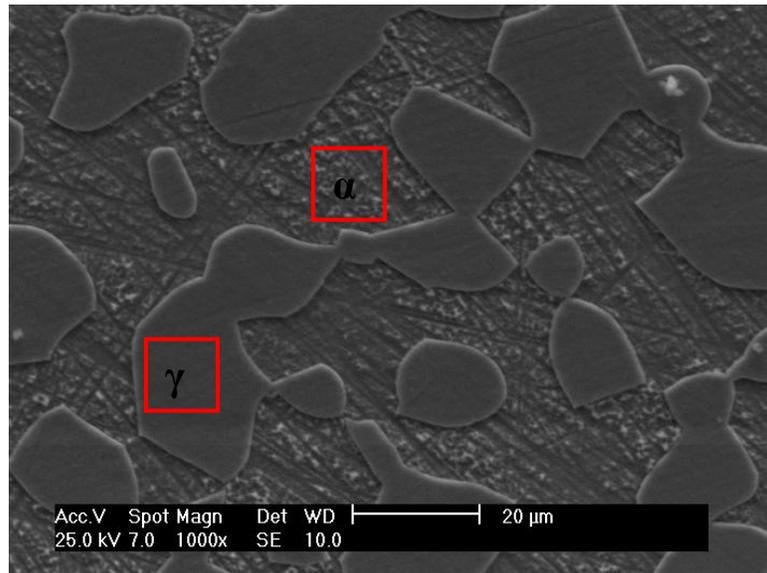


Figura 4.13 Acero dúplex SAF 2507, Condición original, MEB 100X.

Las figuras 4.14 y 4.15 muestran los análisis de EDX en las fases del acero dúplex Saf 2507 en condición original

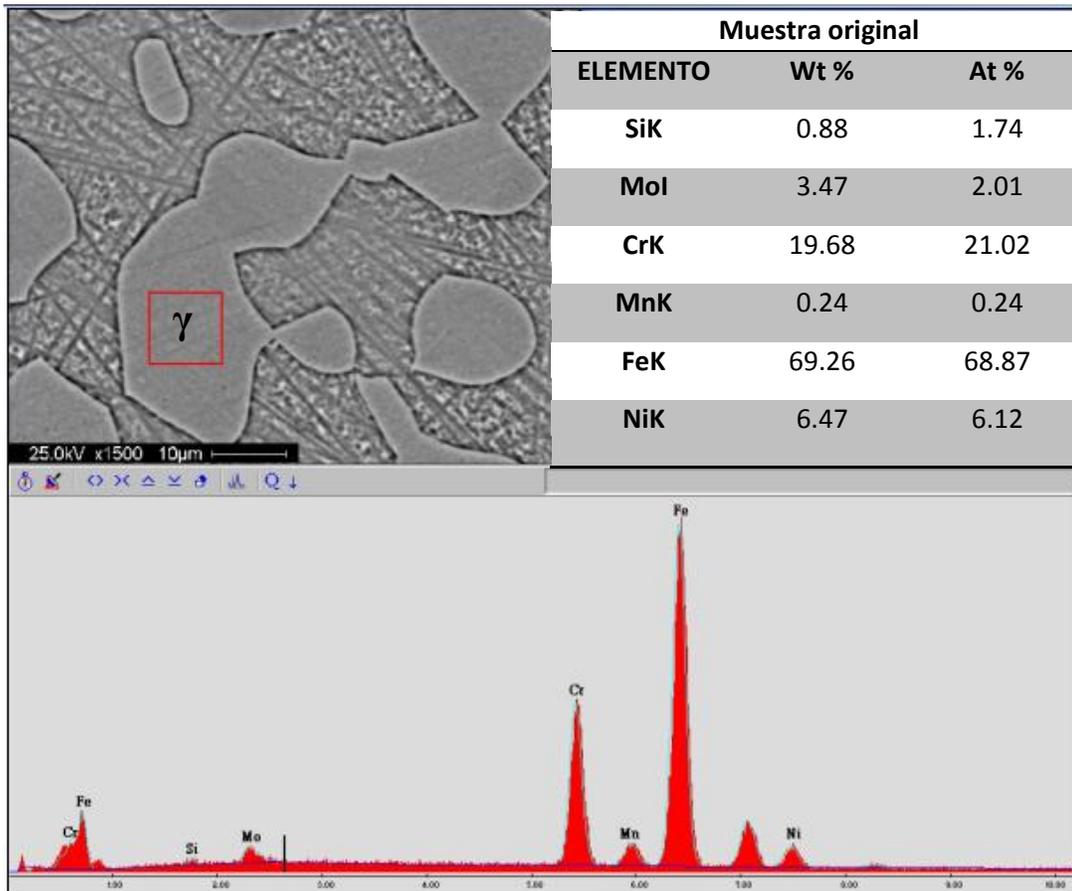


Figura 4.14 Condición original del acero dúplex SAF 2507, fase austenita

Con la ayuda del análisis de EDX se puede caracterizar la composición química de la muestra de austenita, la cual está básicamente constituida por 19,68 % de Cromo y 6,47% de Níquel.

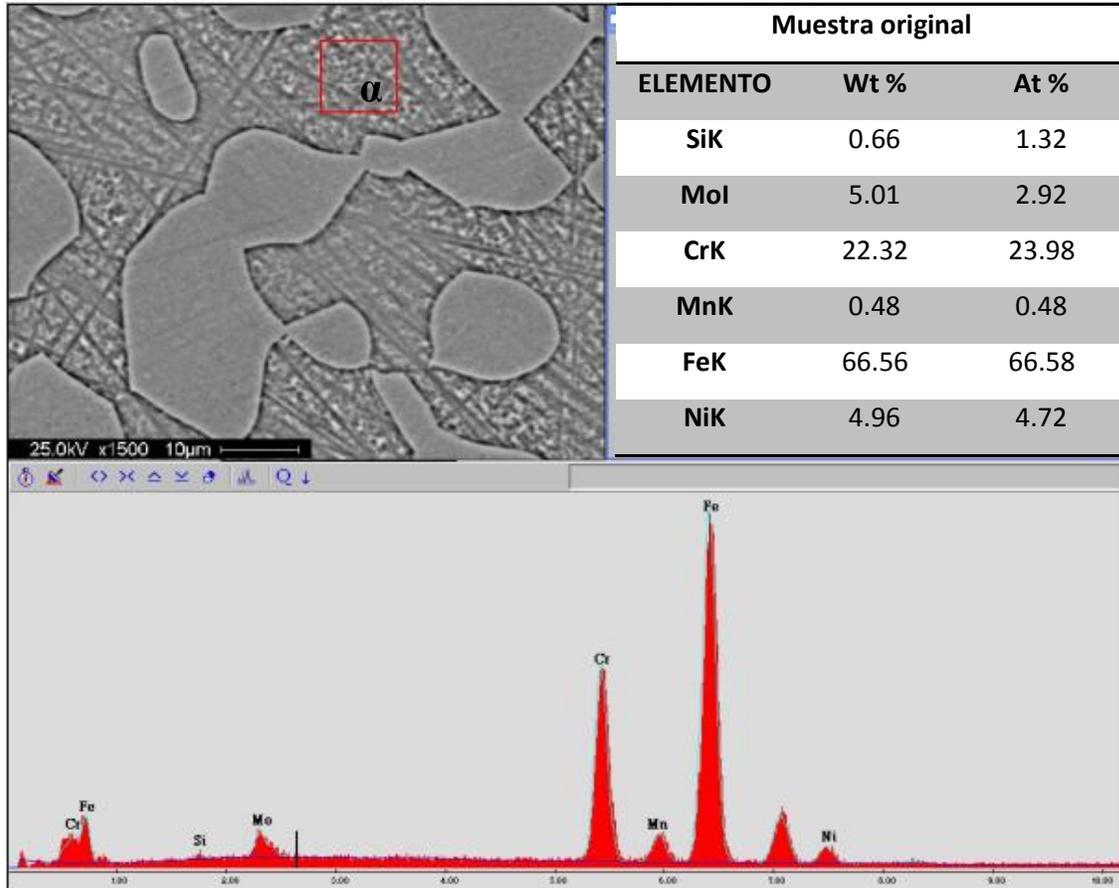


Figura 4.15 Análisis de EDX, Condición original del acero dúplex SAF 2507, fase ferrita

Se puede observar la fase de ferrita que posee un mayor contenido de cromo respecto a la austenita. Sin embargo, el porcentaje en peso de níquel en la fase de austenita es mayor al de la fase ferrítica.

4.2.2. Muestras sensibilizadas.

A continuación se muestran las imágenes de la microestructura de las muestras de acero dúplex SAF 2507 luego del tratamiento térmico de sensibilización. En la figura 4.16 se puede observar límites de grano con posibles precipitados de carburos de cromo debido al tratamiento térmico.

Las figuras 4.17 y 4.18 muestran resultados de EDX en las fases de austenita y ferrita

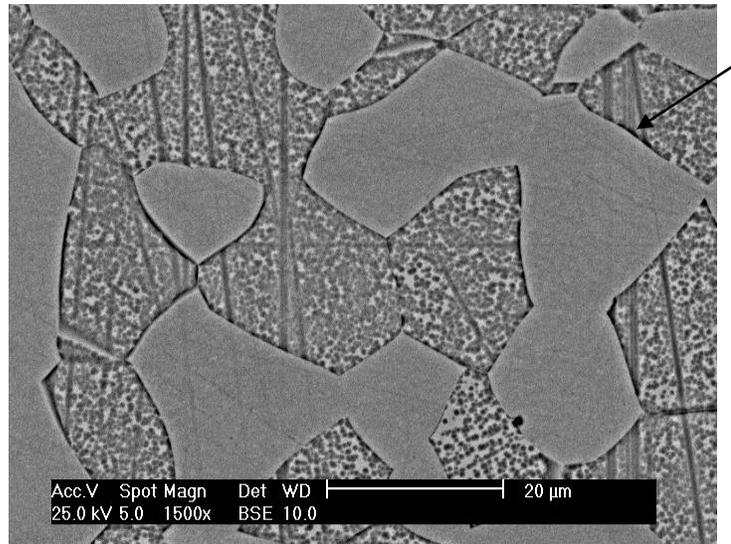


Figura 4.16 Acero duplex SAF 2507, Condición sensibilizada, MEB 1500X

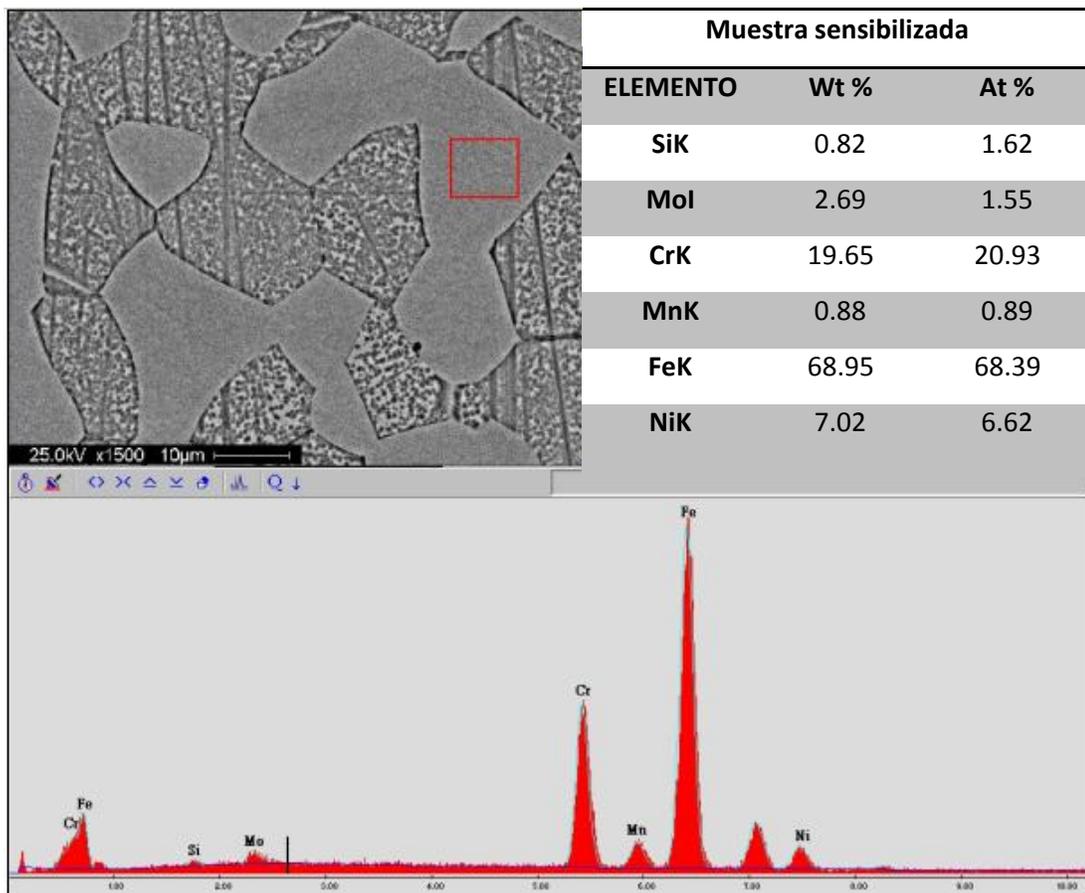


Figura 4.17 Análisis de EDX, Condición sensibilizada del acero dúplex SAF 2507, fase austenita

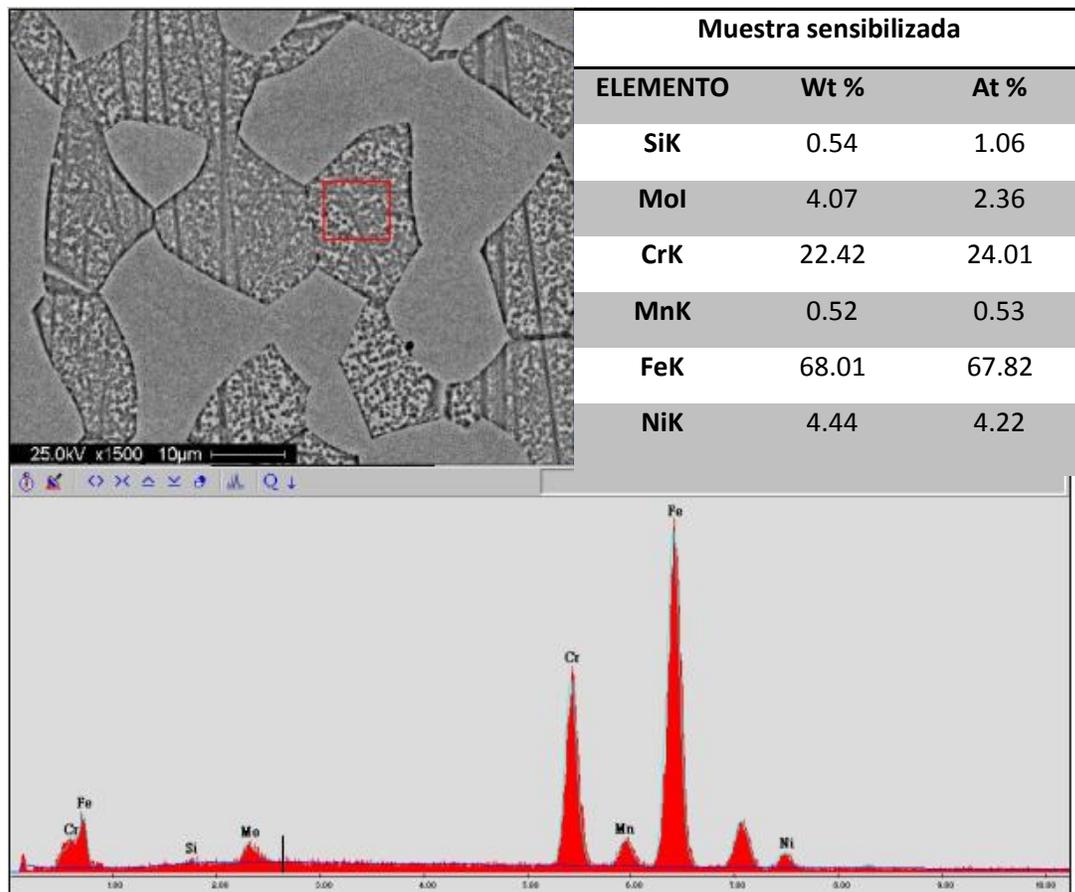


Figura 4.18 Análisis de EDX, Condición sensibilizada del acero dúplex SAF 2507, fase ferrita

4.2.3. Muestras de acero duplex a temperatura de 27°C.

En la figura 4.19 se observa granos completos y bien definidos de austenita y ferrita, en los límites de grano se muestran señales de un ataque de corrosión intergranular: Este es el ensayo sometido a condiciones menos agresivas de temperatura y concentración de ácido clorhídrico, sin embargo registró una velocidad de corrosión promedio de 0,67 mm/año.

En la figura 4.20 se observa una estructura morfológica completamente definida, los límites de granos se ven afectados por el ataque químico en bajas proporciones, se puede observar ligeras manchas producto de una posible corrosión por picadura.

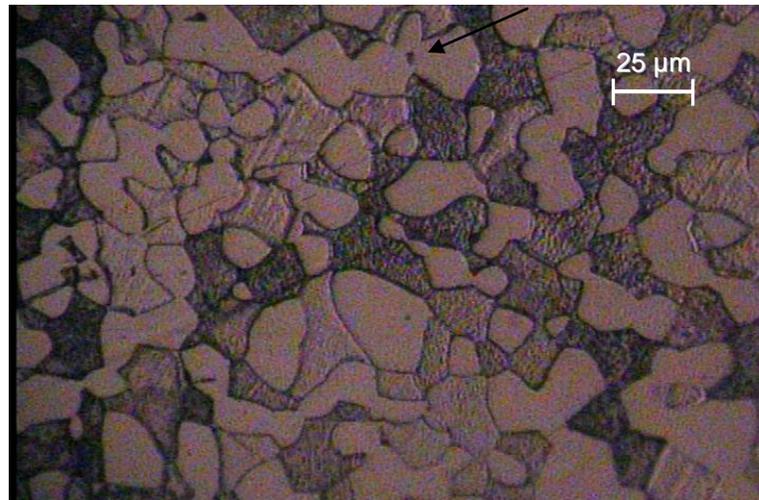


Figura 4.19 Acero duplex SAF 2507, Condición 27°C a 3% HCl. 400X

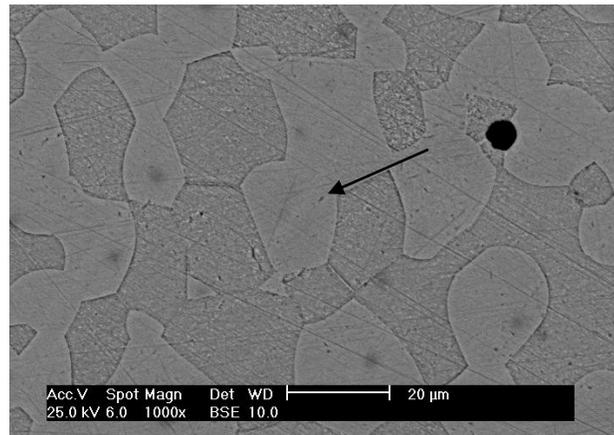


Figura 4.20 Acero duplex SAF 2507, Condición 27°C a 4% HCl. 1500X

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestran los resultados de EDX en las fases de austenita y ferrita. No presentaron cambios significativos en la composición química, podemos comparar con el análisis anterior a 3% donde los valores de cromo aumentaron en un 1% y los valores de níquel disminuyeron en un 3% para la austenita. La ferrita conservó constante su composición química.

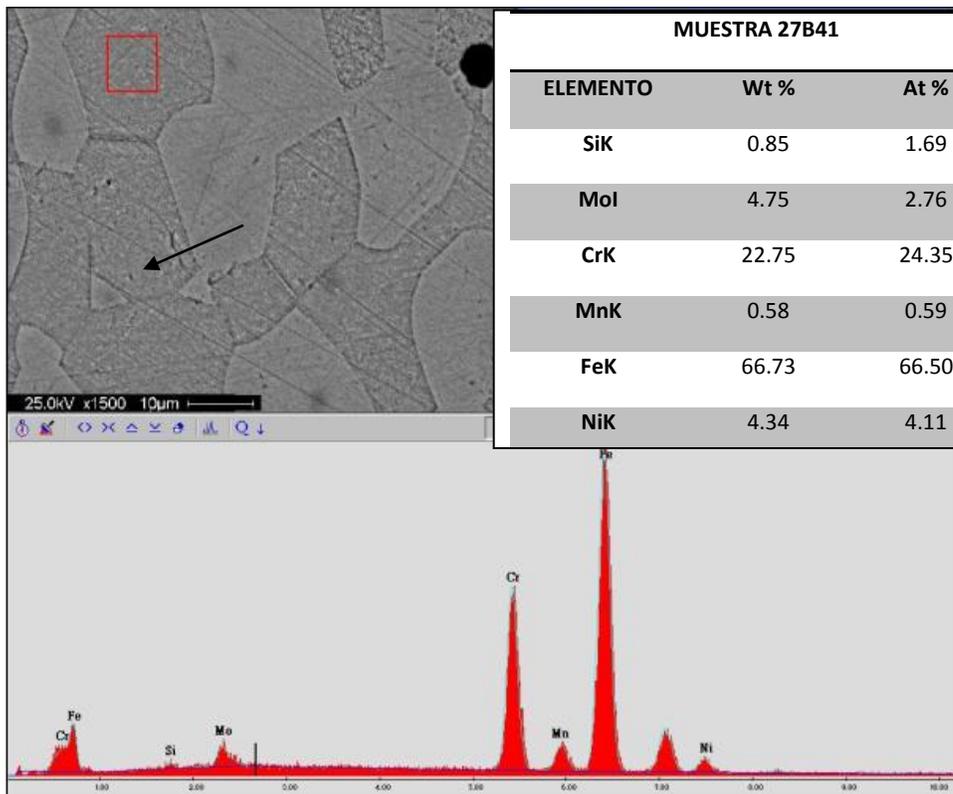


Figura 4.21 Análisis de EDX, Condición 27°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507 fase ferrita

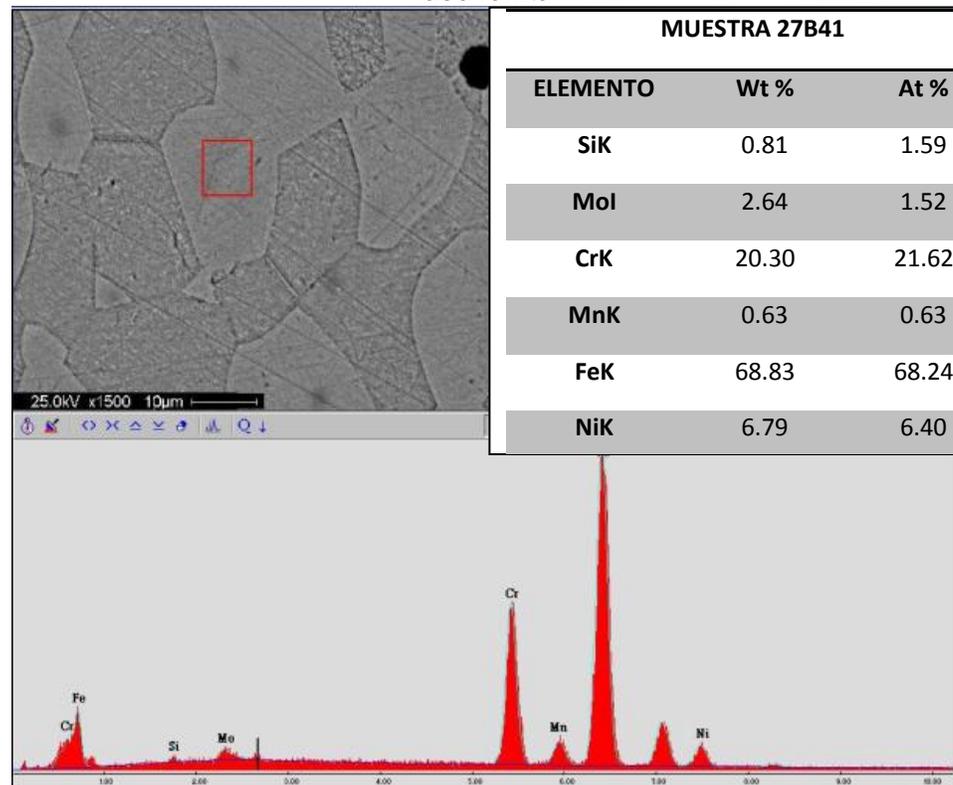


Figura 4.22 Análisis de EDX. Condición 27°C y 4% HCl, acero dúplex SAF 2507 fase austenita

En la figura 4.23 se puede observar como el ataque químico comienza a ocasionar cierto deterioro en los granos de ferrita, mientras que la austenita aparentemente no se ve deteriorada en comparación con la ferrita.

La figura 4.24 indica los analisis de EDX para la fase ferrítica.

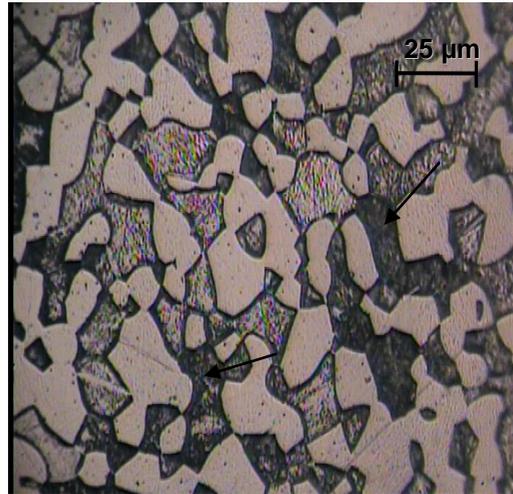


Figura 4.23 Acero dúplex SAF 2507. Condición 27°C y 5% HCl.

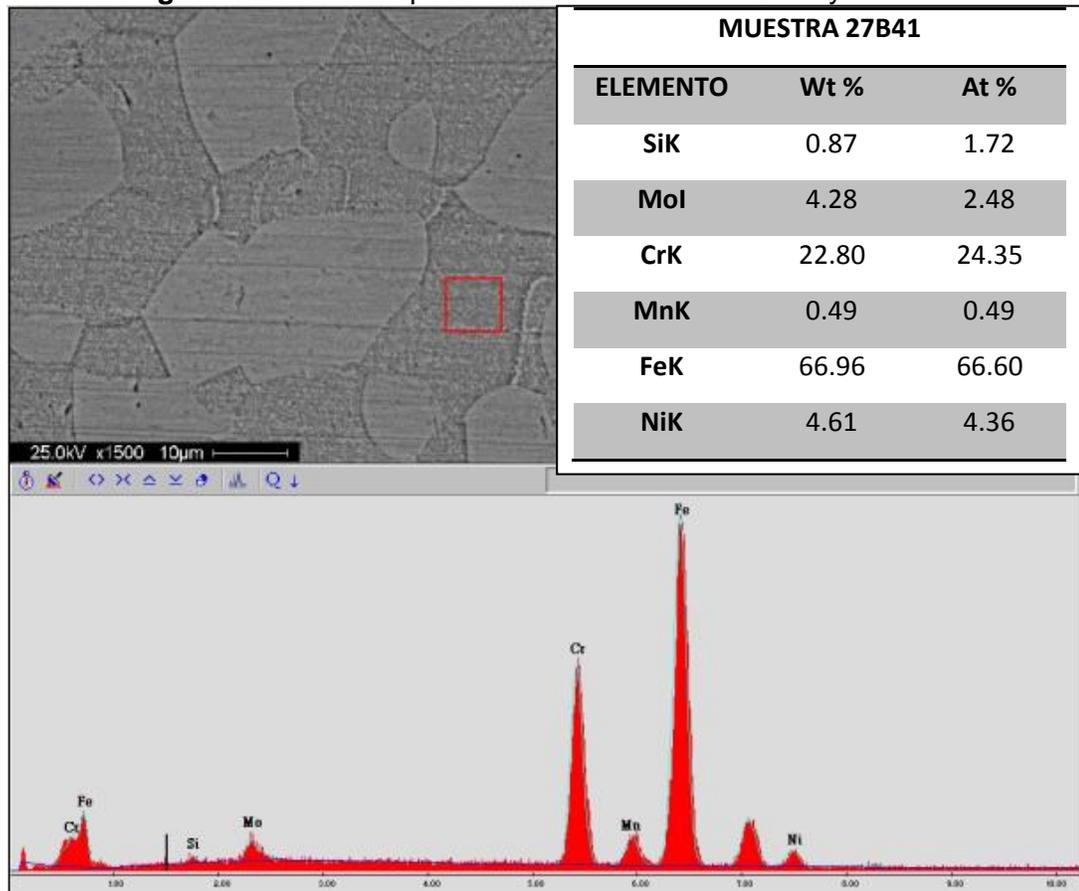


Figura 4.24 Análisis de EDX. Condición 27°C y 5% HCl, acero dúplex SAF 2507. fase ferrita.

En la figura 4.25 se observa los análisis de EDX a la fase ferrítica y microestructura de una muestra ensayada a una condición de temperatura de 27°C y 5% de HCl. Se puede apreciar la presencia de picaduras en los granos de ferrita y austenita.

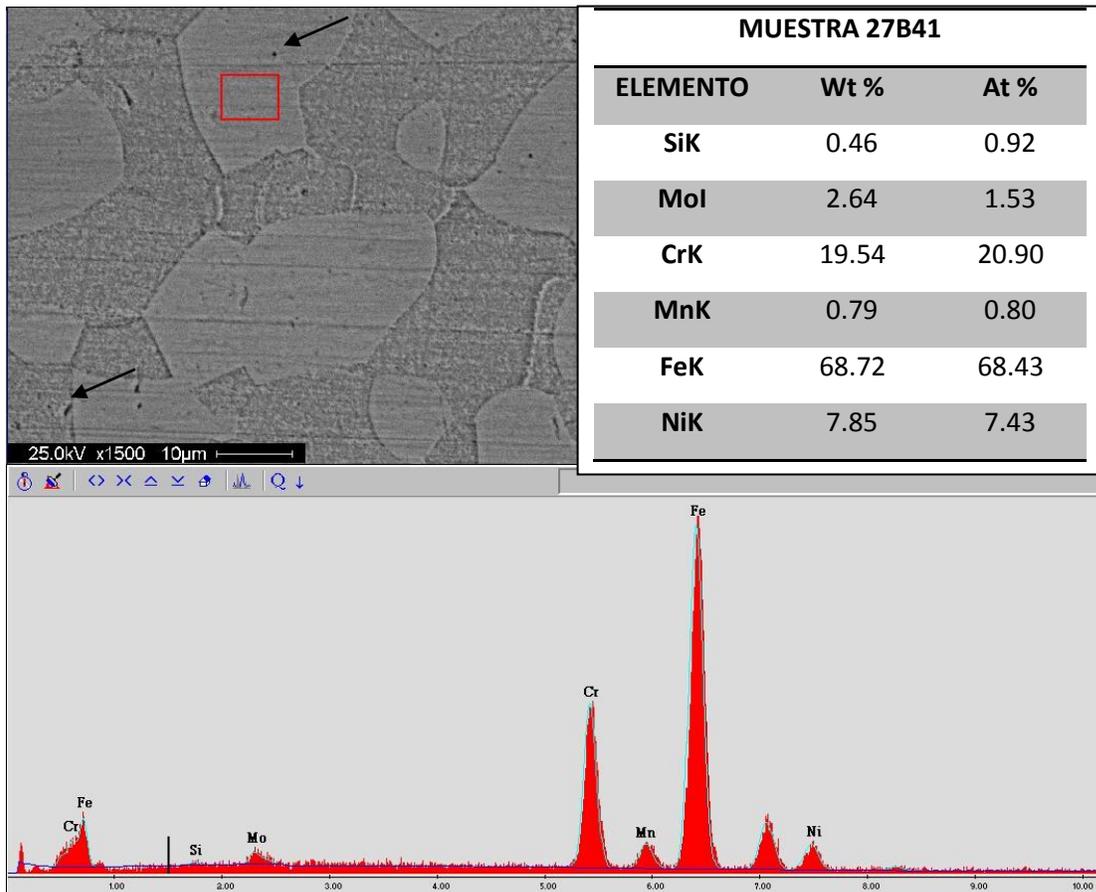


Figura 4.25 Análisis de EDX. Condición 27°C y 5% HCl. Acero dúplex SAF 2507 fase austenita.

4.2.4. Muestras de acero dúplex a temperatura de 47°C.

En la figura 4.26 se observa como el ácido clorhídrico comienza a destruir la fase ferrítica.

La microscopía óptica revela una morfología de granos de austenita y ferrita con presencia de cráteres entre ambas fases, que se puede observar en las zonas oscuras de la imagen, estos cráteres se forman debido al ataque de corrosión selectiva que degrada a la ferrita. También se aprecian porosidades y picaduras en los granos debido al efecto de la corrosión por picaduras.

En la figura 4.27 se puede observar como la fase ferrita se ha degradado significativamente. Solo queda la fase austenítica visible en la superficie, los granos ferríticos fueron destruidos en su mayoría por el ataque químico dejando crateres entre los granos austeníticos, esto debido a la corrosión selectiva que sufrió el material.

En los análisis de EDX de la figura 4.28 en la zona del borde de grano se obtiene que la fase presente es austenita.

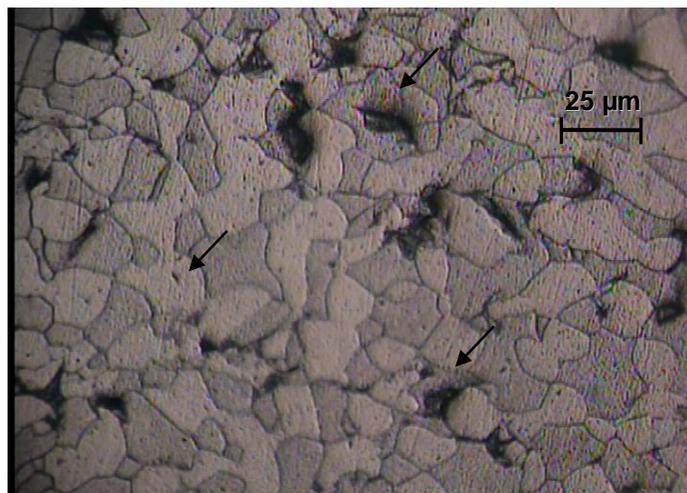


Figura 4.26 Acero duplex SAF 2507, Condición 47°C, 3% HCl, fase ferrita

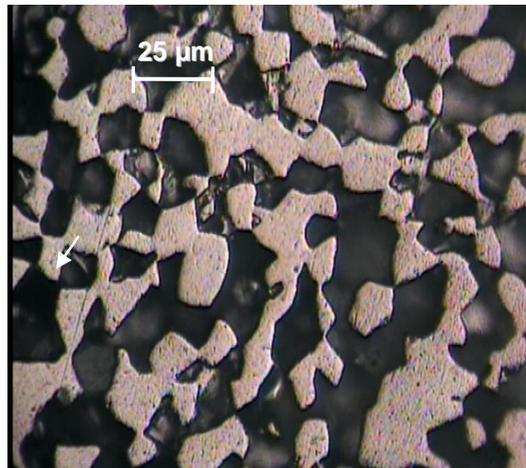


Figura 4.27 acero dúplex SAF 2507, Condición 47°C, 4% HCl.

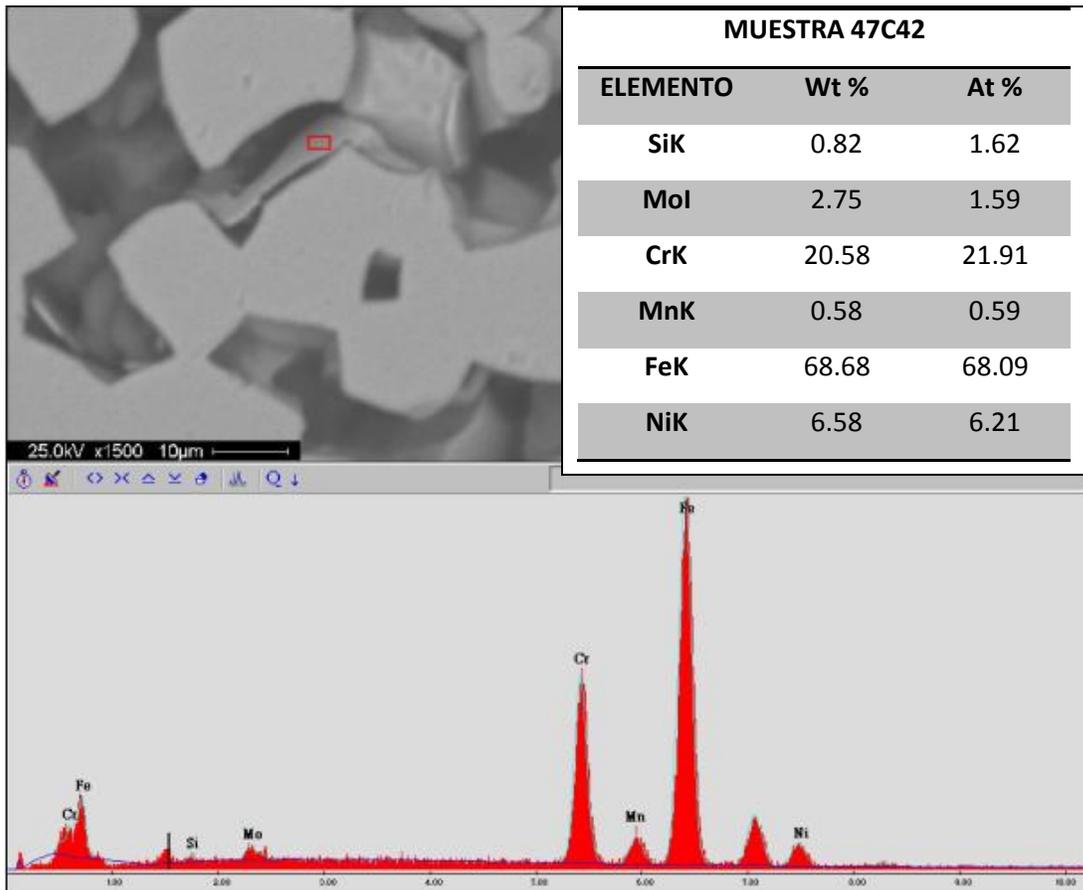


Figura 4.28 a) Análisis de EDX, Condición 47°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, borde de grano.

La imagen 4.29 muestra la microestructura y la composición química de una probeta a condiciones de 47°C a 4% de HCl. Se observa el nivel de

deterioro en el material, esto se evidencia en una elevada velocidad de corrosión de 11,75 mm/año.

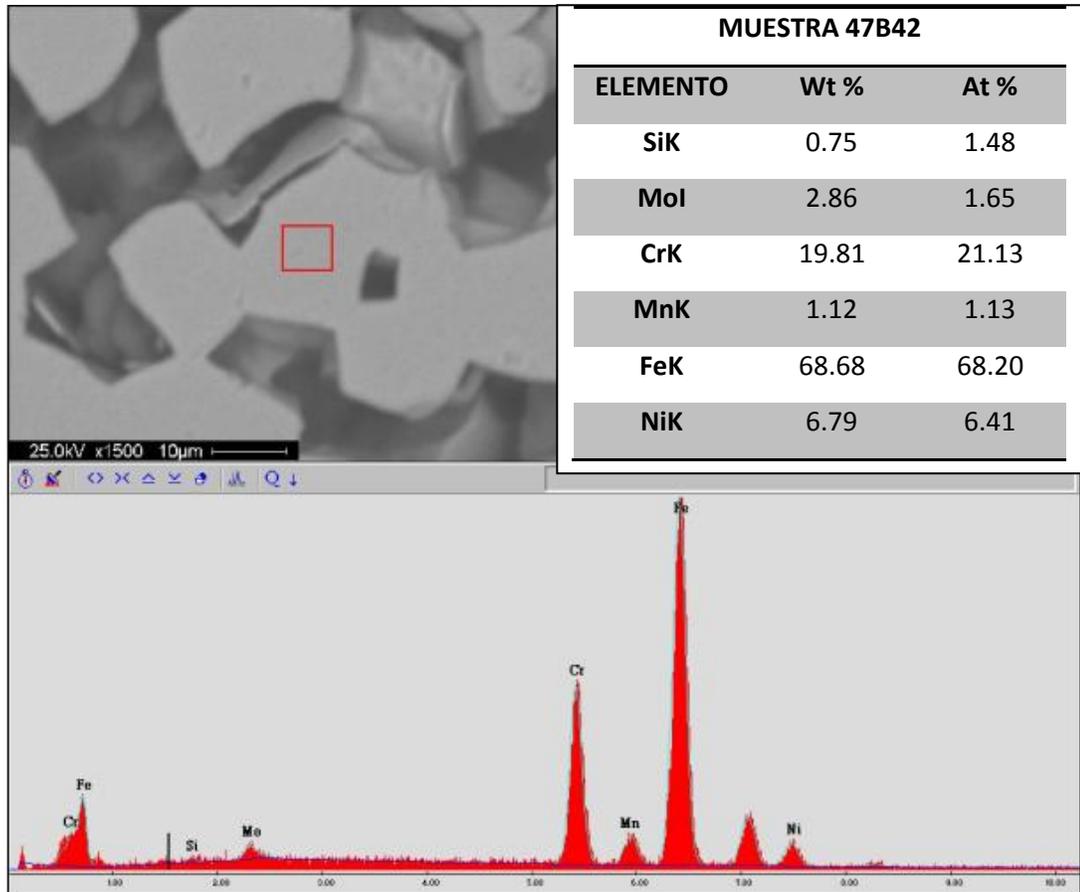


Figura 4.29 a) Análisis de EDX, Condición 47°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita

Las figuras 4.30, 4.31 y 4.32 muestran los efectos de la exposición al ácido clorhídrico en condiciones de 47°C y 5% de HCl. Se evidencia que la fase ferrítica no está presente en la superficie ni en los bordes de grano.

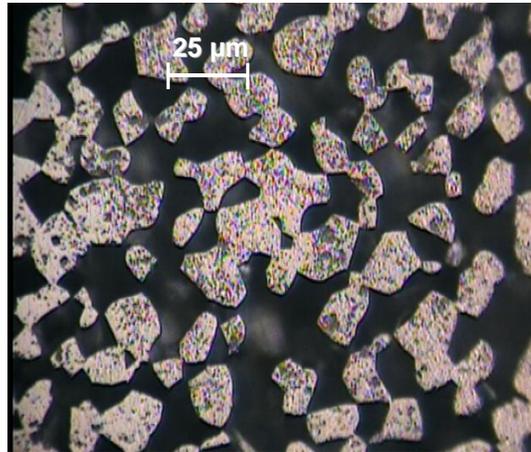


Figura 4.30 Acero duplex SAF 2507, Condición 47°C y 5% de HCl.

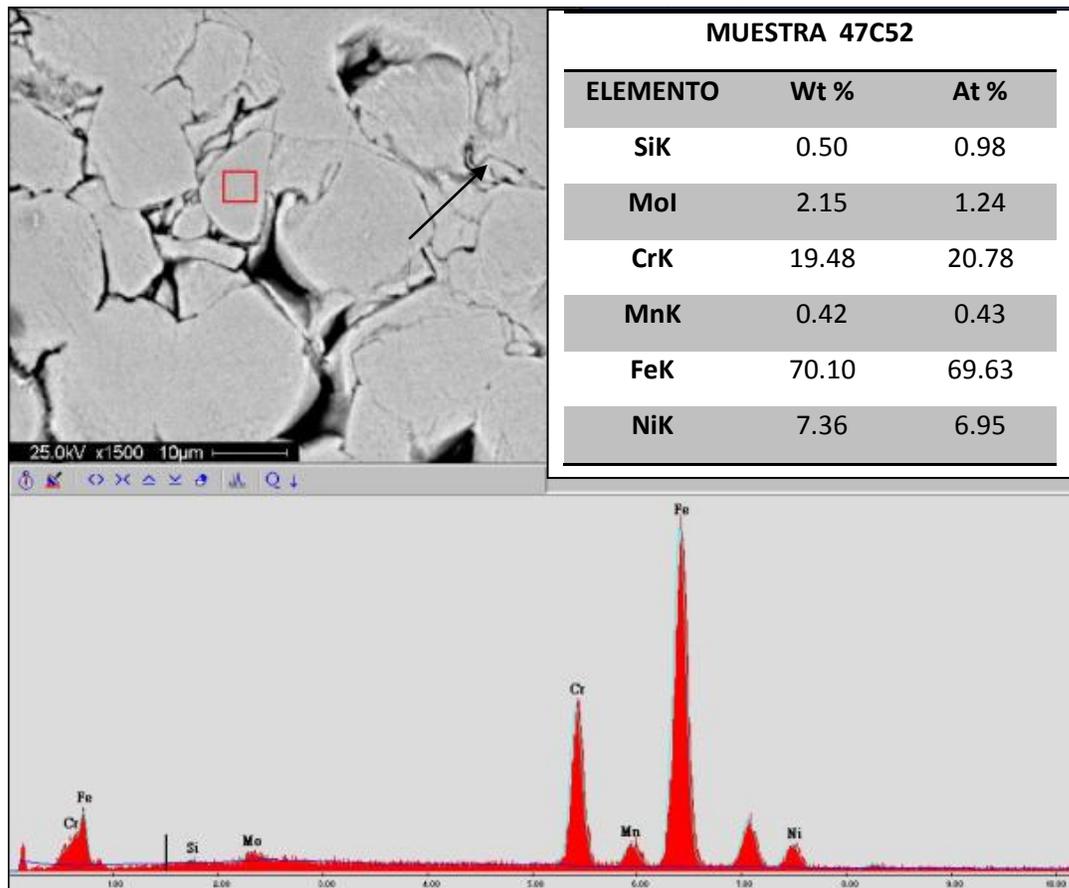


Figura 4.31 Análisis de EDX, Condición 47°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita

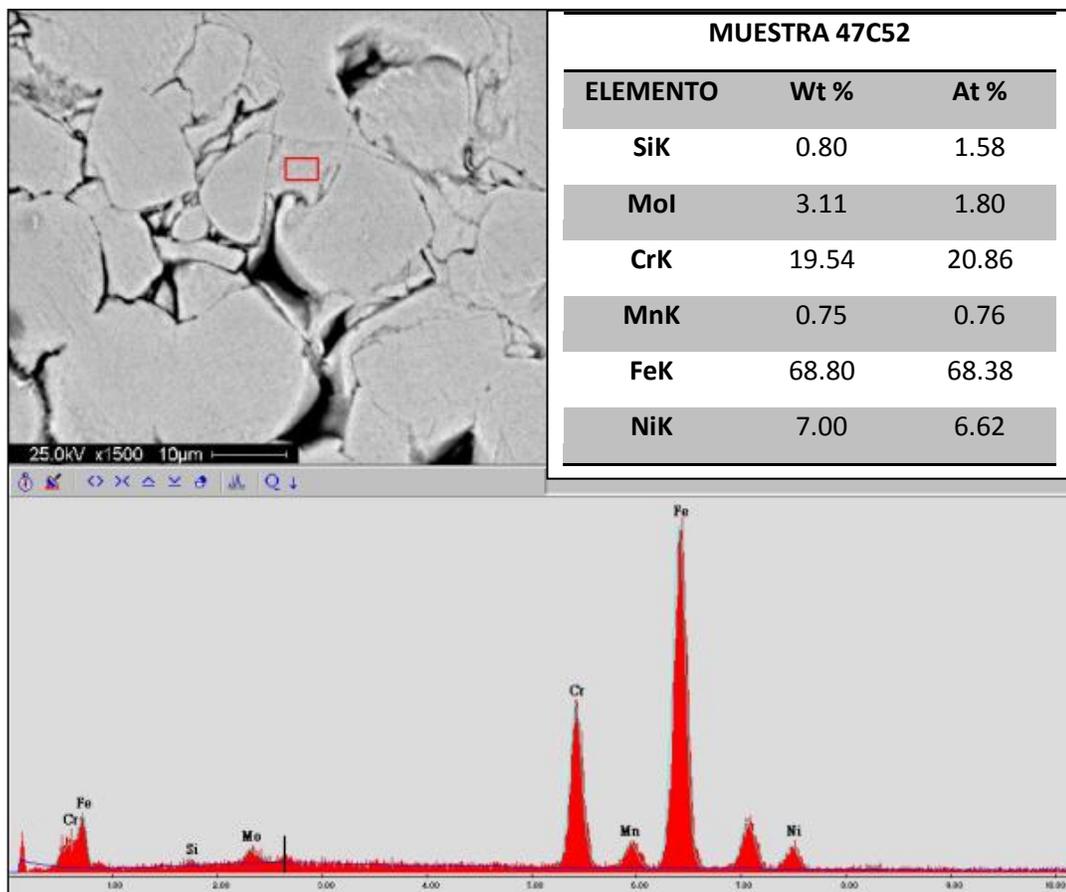


Figura 4.32 Análisis de EDX, Condición 47°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.

4.2.5. Muestras de acero dúplex a temperatura de 65°C.

Para esta condición, en la figura 4.33 se puede observar un comportamiento similar a la condición de temperatura de 47°C y 4% de HCl. Se aprecia la degradación de la fase ferrítica y un notable deterioro de la fase austenítica debido al ataque del ácido clorhídrico a la máxima temperatura de los ensayos.

En figuras 4.34 y 4.35 se aprecia como una única fase austenítica se encuentra presente en la superficie de las muestras.

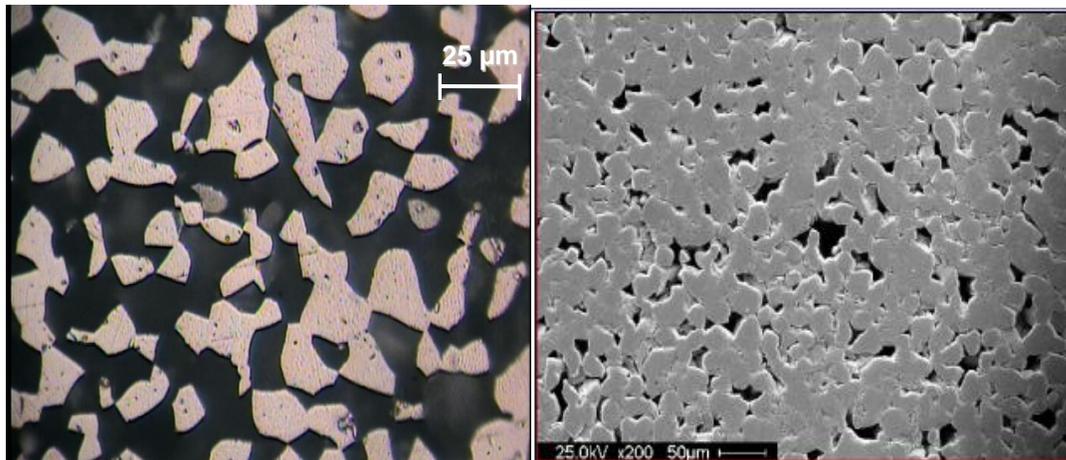


Figura 4.33 a) Acero dúplex SAF 2507, Condición 65°C, 3% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X.

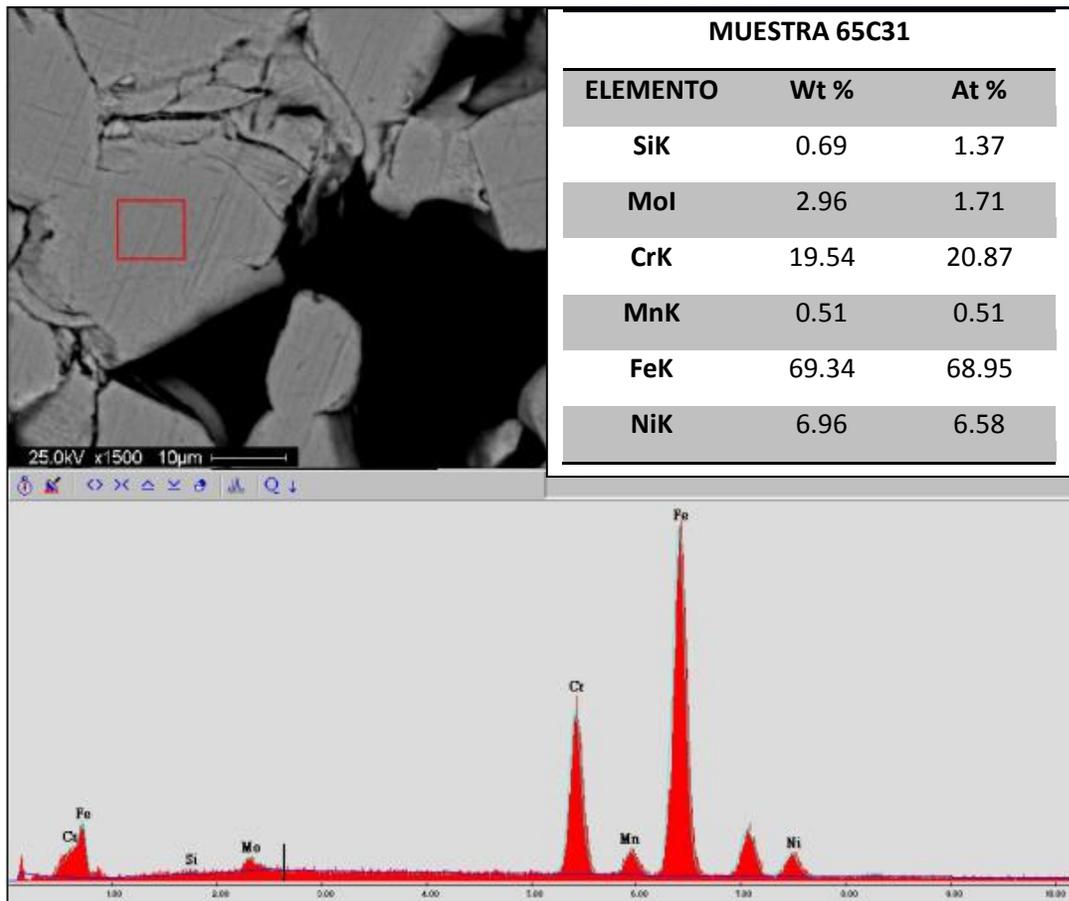


Figura 4.34 Análisis de EDX, Condición 65°C, 3% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita

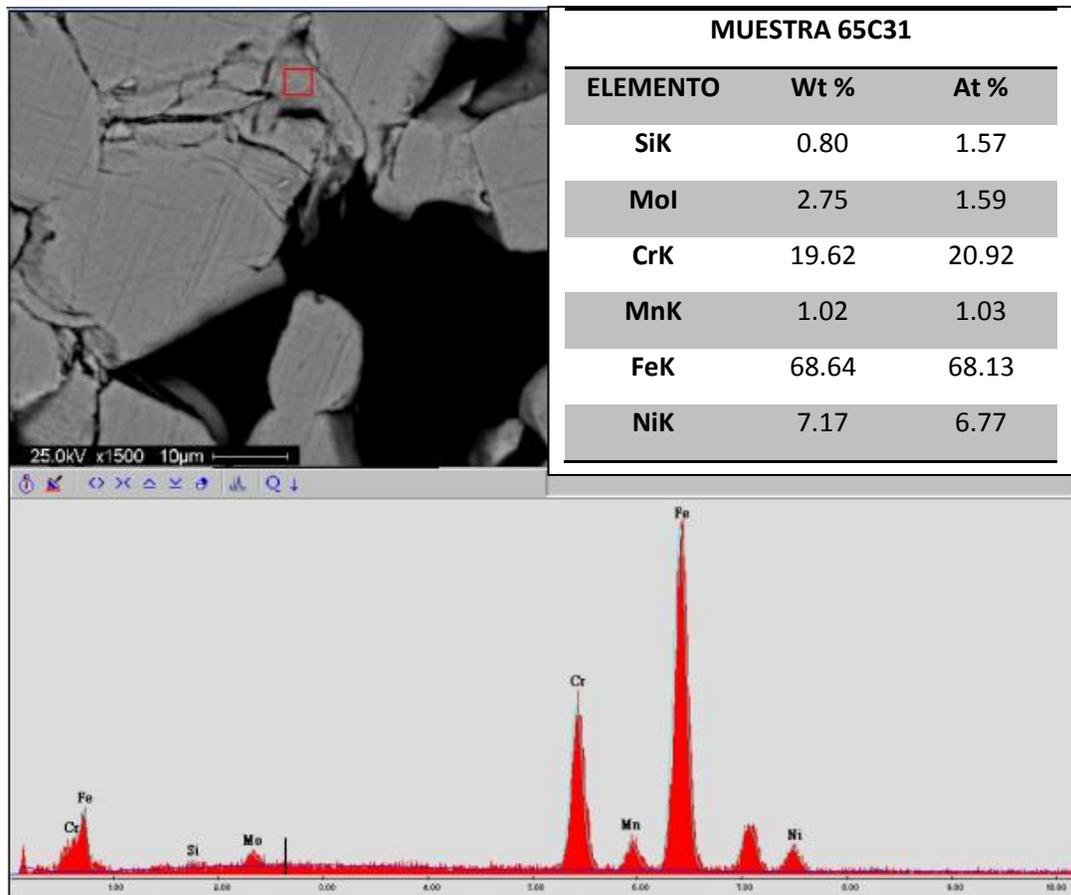


Figura 4.35 Análisis de EDX, Condición 65°C, 3% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita

En la figura 4.36 se puede observar como el ataque del ácido clorhídrico comienza a intensificarse en la fase austenítica, mostrando un deterioro en los límites de grano y porosidades y/o picaduras en los granos austeníticos. En las figuras 4.37 y 4.38 se demuestra con EDX la ausencia de ferrita.

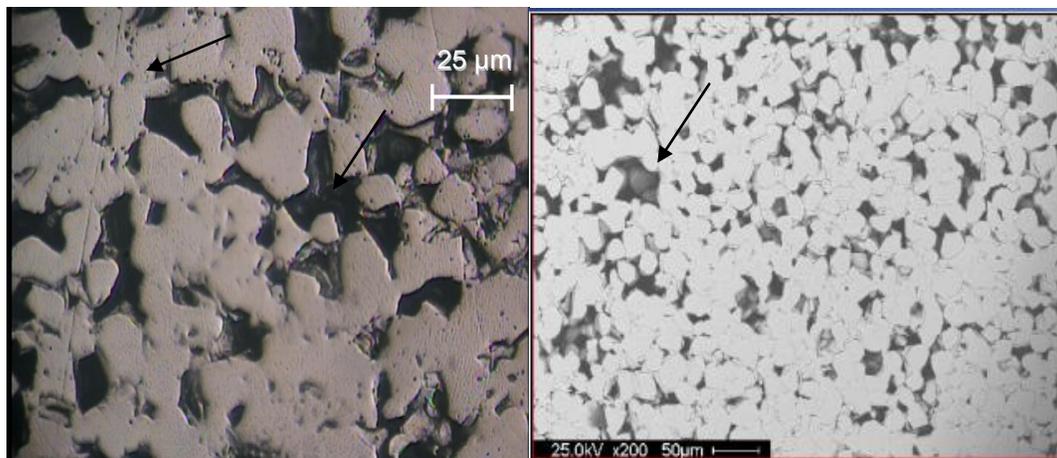


Figura 4.36 Acero dúplex SAF 2507, Condición 65°C, 4% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X.

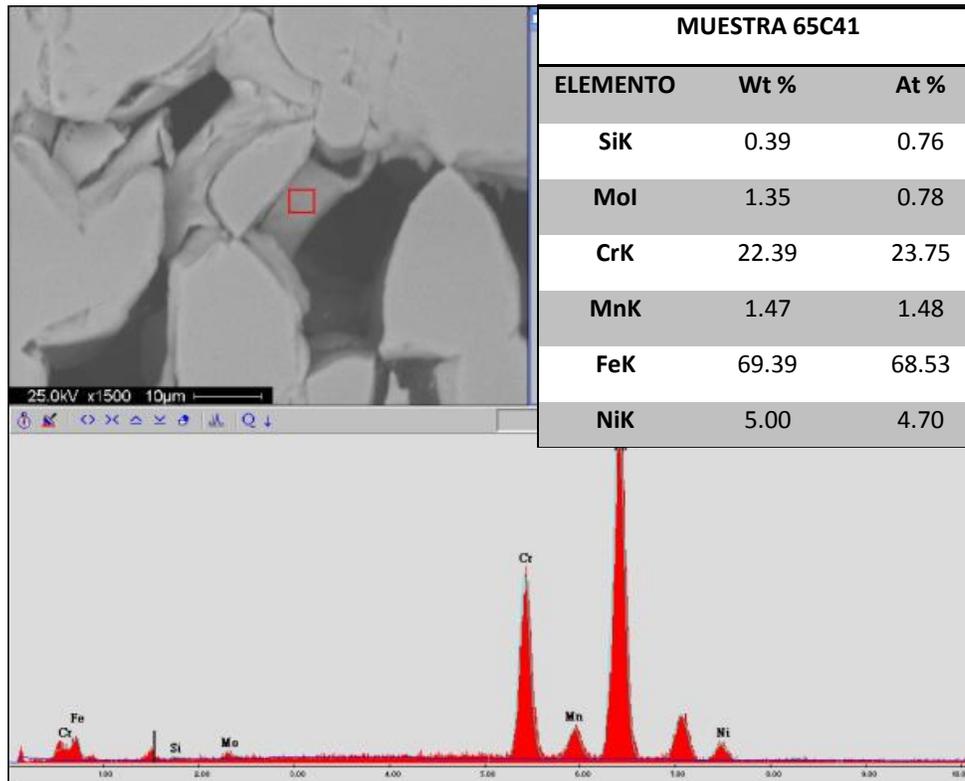


Figura 4.37 Análisis de EDX, Condición 65°C, 4% HCl, acero dúplex 2507

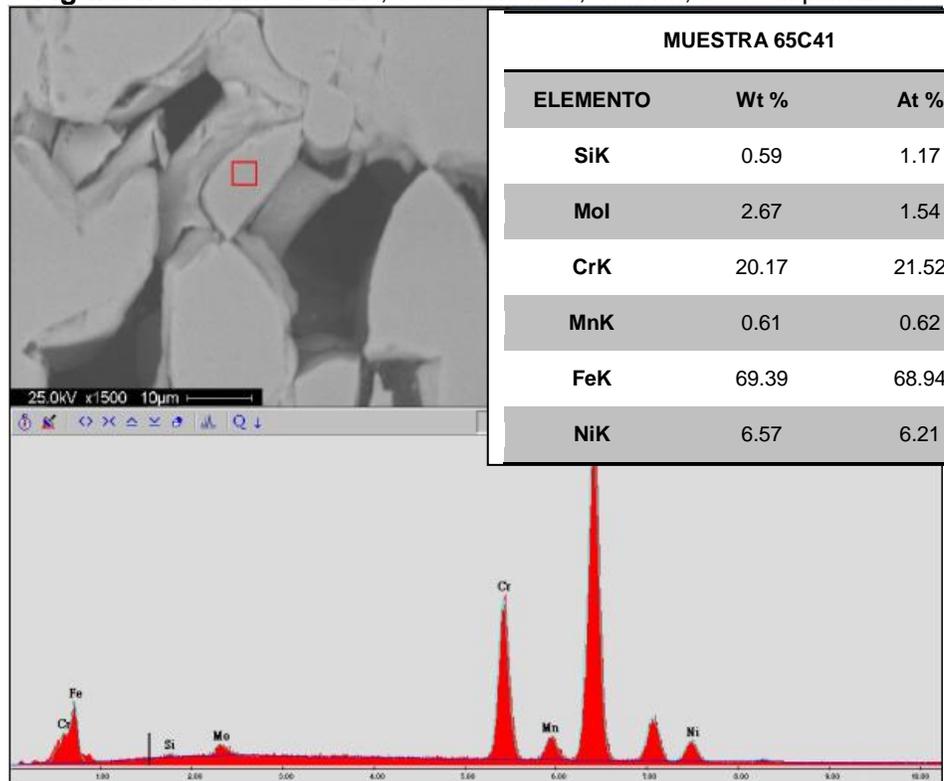


Figura 4.38 Análisis de EDX, Condición 65°C, 4% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita

En la figura 4.39 se puede observar como el ataque del ácido ha dejado notables alteraciones en la fase austenítica, mostrando un deterioro en los límites de grano y granos austeníticos de mayores proporciones. Esta es la condición más crítica ensayada, donde se puede observar los espacios vacíos que pertenecieron a la ferrita. El ataque produjo una devastación de la ferrita, evidenciándose gran profundidad en las cavidades.

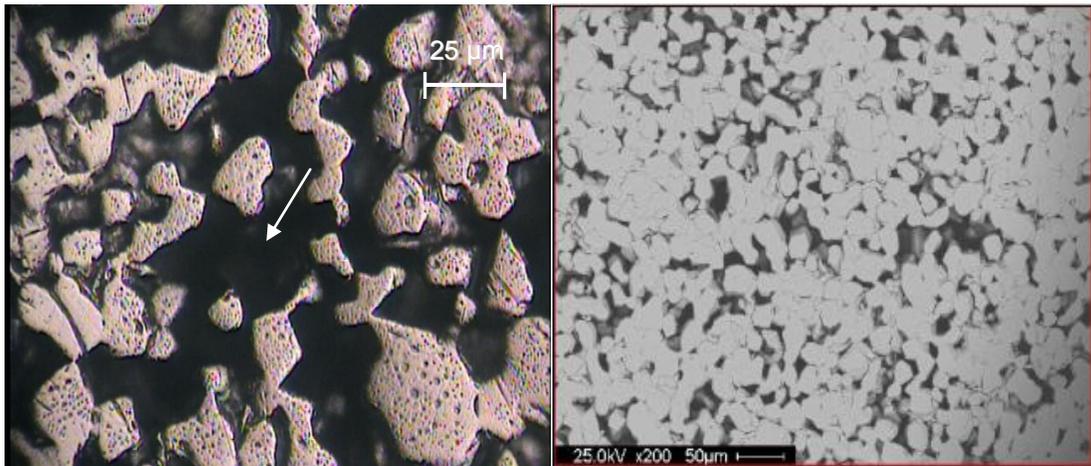


Figura 4.39 a) Acero dúplex SAF 2507, Condición 65°C, 5% HCl, a) MO 400X y b) MEB 200X,

Las figuras 4.40 y 4.41 muestran el grave deterioro de la microestructura del acero dúplex Saf 2507. Se observan límites de grano con posibles restos de la fase de ferrita. La socavación de la superficie es mucho mayor a la que se aprecia en las imágenes a condiciones de temperatura de 47°C.

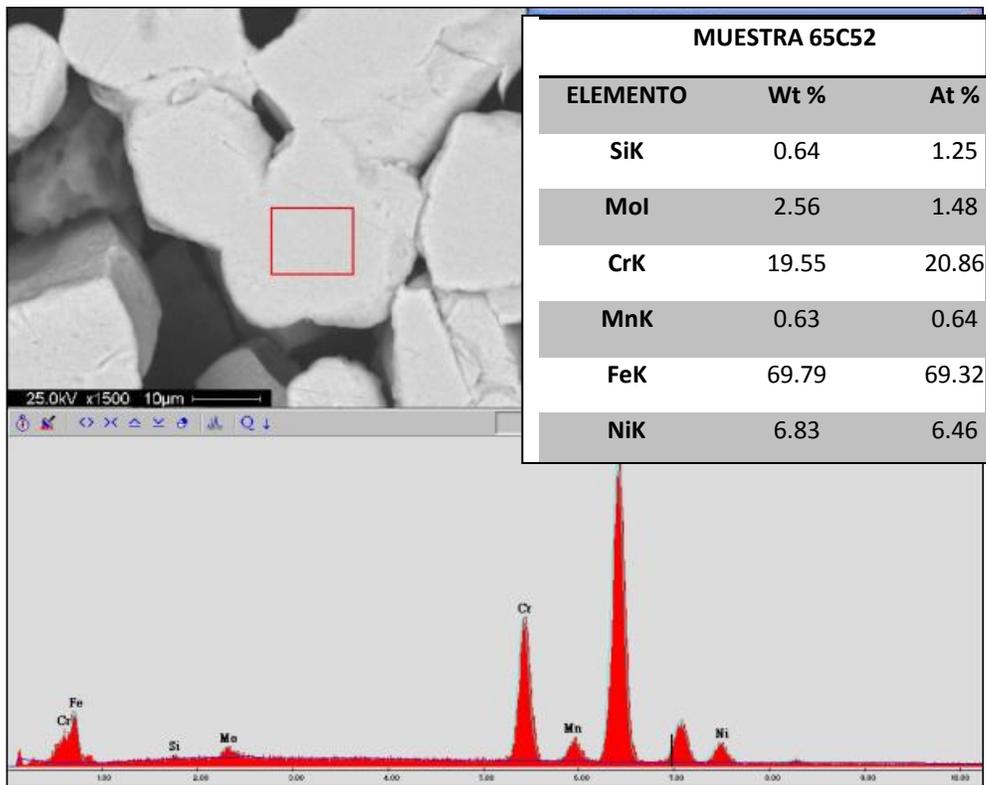


Figura 4.40 Análisis de EDX, Condición 65°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.

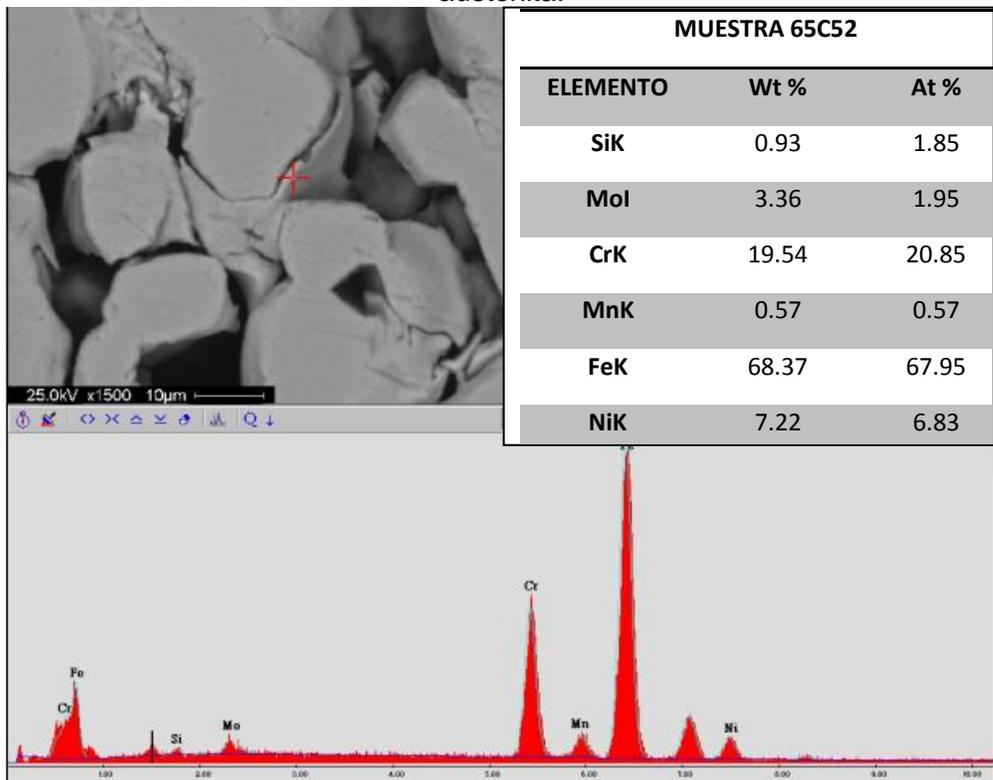


Figura 4.41 Análisis de EDX, Condición 65°C, 5% HCl, acero dúplex SAF 2507, fase austenita.

El análisis de EDX arrojó un comportamiento similar a las muestras anteriores a concentraciones de 3% y 4% de HCl. El ataque químico del ácido clorhídrico a temperatura de 65°C deterioró la microestructura austenítica superficial y se refleja en la pronunciación de los espacios entre granos austeníticos y una disminución poco significativa de los valores de cromo y níquel.

4.3 Análisis del contenido de cromo y níquel presentes en las muestras ensayadas

En la figura 4.42 se muestra el porcentaje promedio de Cromo y Níquel en la fase de austenita. No se aprecian cambios significativos en la composición química de la fase. Esto indica que no existe migración aparente de cromo durante el proceso de sensibilización ni durante la realización de los ensayos de corrosión.

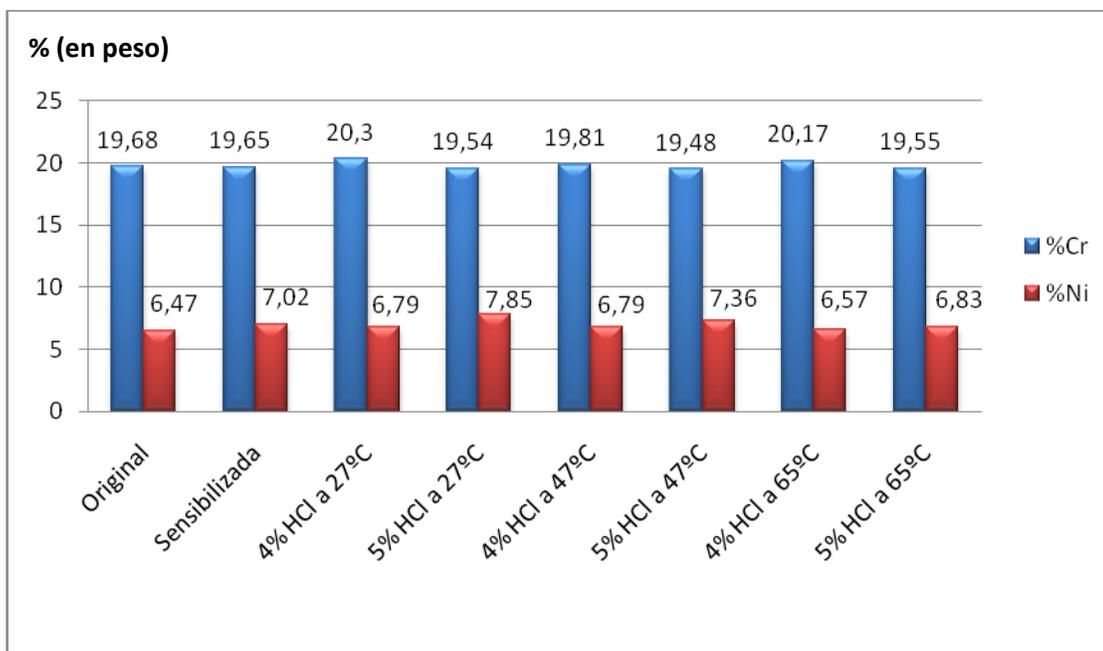


Figura 4.42 Comparación de concentraciones de cromo y níquel del acero duplex SAF 2507 en la fase austenita

La figura 4.43 refleja los análisis de EDX en la fase de ferrita. El proceso de sensibilización ocasiona una pérdida de níquel del 10%. Durante la realización de los ensayos de corrosión también se observa una disminución en el contenido porcentual del níquel.

El porcentaje en peso del cromo registra un ligero aumento de hasta un 2% para la condición de temperatura de 27°C a 5% de HCl.

Los estudios de EDX demuestran la ausencia de ferrita en la superficie de las muestras a partir de las condiciones de 47°C a 4% de HCl.

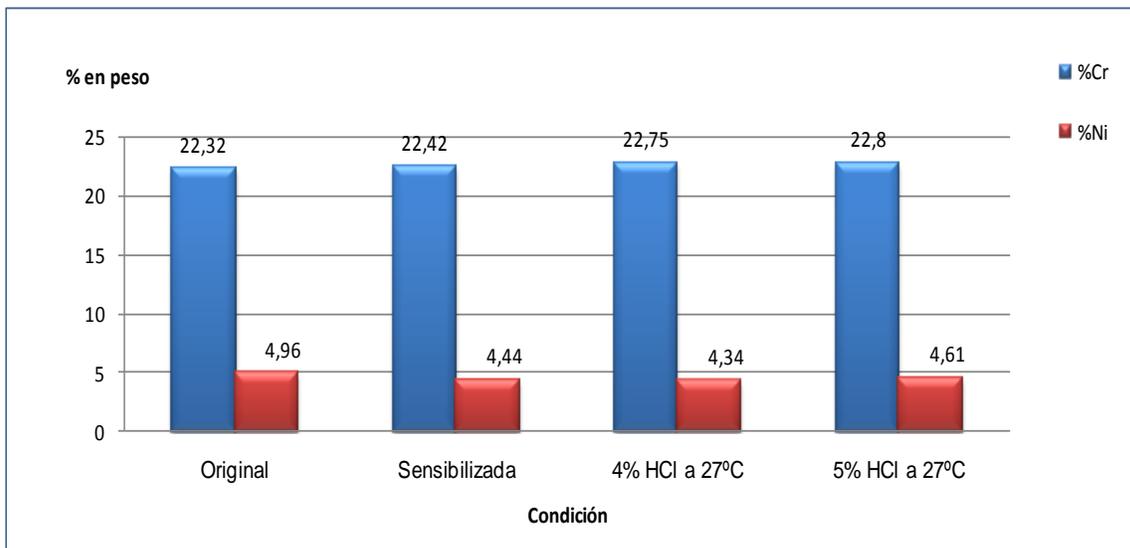


Figura 4.43 Comparación de concentraciones de cromo y níquel del acero duplex SAF 2507 en la fase ferrita

4.4. Resultado de los ensayos de microdureza Vickers (HV)

4.4.1 Muestras a condiciones de temperatura de 27°C

La tabla 4.9 muestra la data obtenida del ensayo de microdureza vickers a temperatura de 27°C. Para la fase austenítica las probetas sometidas a concentraciones de 3% y 4% de HCl mantiene constante la dureza en los periodos de tiempo de 24, 48 y 72 horas y no se registraron cambios significativos en la microdureza.

A partir de una concentración de 5% de HCl y para el periodo de tiempo de 48 a 72 horas, hubo un incremento poco significativo en la microdureza.

En la figura 4.44 se puede observar el comportamiento de la microdureza promedio en función del tiempo. El proceso de sensibilización y la exposición al medio corrosivo ocasiona una pérdida en la dureza de la austenita, sin embargo, la tendencia de la gráfica revela que la microdureza aumenta a partir de 48 horas de exposición al ácido clorhídrico a concentraciones del 5%.

Tabla 4.9 Resultados de microdureza en austenita a temperatura de 27°C.

Código	AUSTENITA					Desv. Estándar
	HV (Kg/mm ²)					
Original	251	251	253	252	251	0,89
Sensibilizada	220	254	216	218	223	15,75
27A31	192	213	193	187	190	10,31
27B32	190	209	193	195	198	7,31
27C31	198	201	199	200	202	1,58
27A42	206	224	215	210	220	7,28
27B42	216	217	215	218	216	1,14
27C42	199	209	205	203	207	3,84
27A51	206	198	207	205	201	3,78
27B51	193	213	200	205	210	7,98
27C52	236	243	240	238	242	2,86

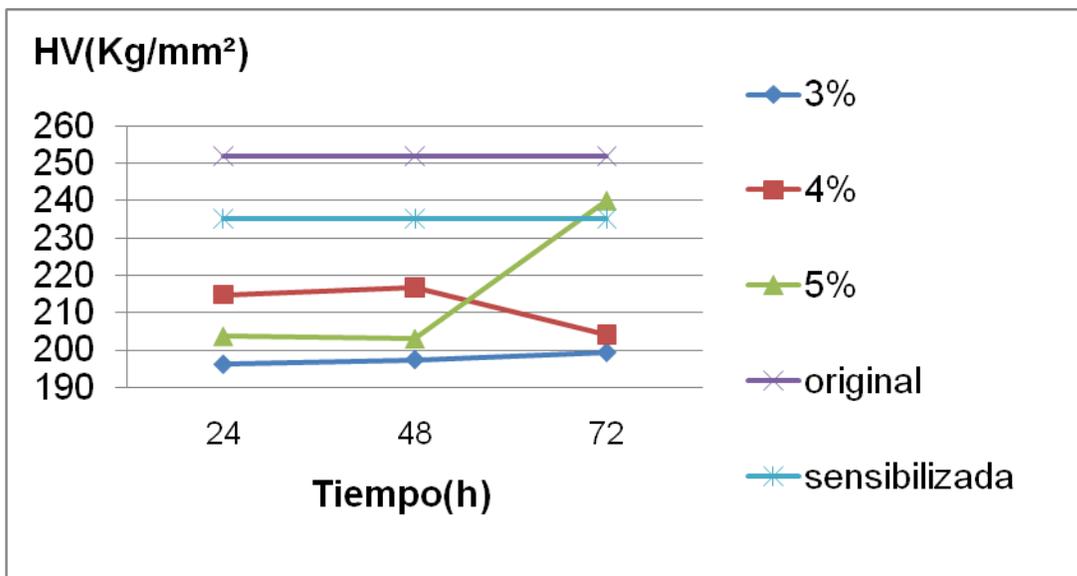


Figura 4.44 Microdureza vickers en función del tiempo para cada condición de ensayo. Fase austenítica.

La tabla 4.10 recopila la data del ensayo de microdureza vickers realizado en los granos de ferrita del acero dúplex Saf 2507.

La microdureza se mantuvo constante en los periodos de tiempo de 24 a 72 horas para una concentración de 3% de HCl, mientras que para las concentraciones de 4% de HCl presenta un incremento en el periodo de 24 a 48 horas y un descenso en el intervalo de 48 a 72 horas.

Las probetas sometidas a 5% de HCl presentaron un incremento constante en la dureza durante los periodos de exposición.

La figura 4.45 demuestra el comportamiento de la microdureza vickers en función del tiempo de exposición al ácido clorhídrico.

Tabla 4.10 Resultados de microdureza en ferrita a temperatura de 27°C.

CODIGO	FERRITA					Desv. Estándar
	MICRODUREZA VICKERS (Kg/mm2)					
Original	251	251	253	252	251	0,89
Sensibilizada	220	254	216	218	223	15,75
27A31	175	173	188	177	179	5,81
27B31	216	110,9	180	128,4	219	49,58
27C31	177	157	203	180	183	16,40
27A41	198	194,2	195	190	197	3,10
27B41	243	252	250	248	249	3,36
27C42	203	177	185	194	200	10,75
27A52	193	181	190	191	188	4,61
27B52	214	198	202	210	205	6,34
27C51	236	220,5	225	230	232	6,05

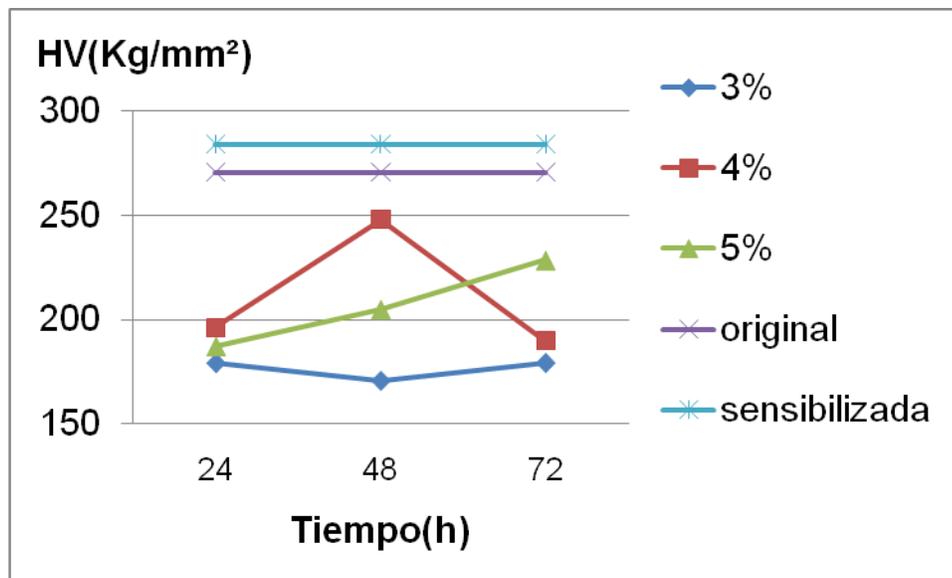


Figura 4.45 Microdureza vickers en función del tiempo para cada condición de ensayo. Fase ferrítica.

4.4.2 Muestras a condiciones de temperatura de 47°C

La tabla 4.11 muestra los resultados del ensayo de microdureza vickers para la fase de austenita en el acero dúplex Saf 2507. Se puede observar para la concentración de 5% de HCl en el periodo de tiempo de 24 a 48 horas, no presenta variación en la dureza. A partir de 48 horas la dureza se incrementa en luego comienza a incrementar la dureza.

Para la concentración de 4% en el periodo de 24 a 48 horas, no presenta variación en la dureza, luego para el siguiente periodo tiempo comienza a incrementar la dureza.

Para la concentración de 3%, en el periodo de 24 a 48 horas, presenta disminución en la dureza y luego la tendencia cambia y comienza a endurecerse para el periodo siguiente.

La tabla 4.12 muestra la microdureza en la fase ferrítica solo a la concentración de 3% y en el periodo de tiempo de 24 a 48 horas. Debido al ataque del ácido, a partir de estas condiciones la ferrita se degrada. La figura 4.46 muestra la gráfica de la microdureza promedio vickers para las fases de ferrita y austenita en función del tiempo de exposición al medio corrosivo.

Tabla 4.11 Resultados de microdureza en austenita a temperatura de 47°C.

Código	AUSTENITA					Desv. Estándar
	HV (Kg/mm2)					
Original	251	251	253	252	251	0,89
Sensibilizada	220	254	216	218	223	15,75
47A32	309	330	312	320	315	8,22
47B31	182	199	212	188	205	12,23
47C31	195	260	233	225	240	23,75
47A42	193	216	205	210	208	8,50
47B41	242	158	180	227	200	34,08
47C41	107	180	138	166	170	29,68
47A52	199	202	215	200	205	6,45
47B52	201	219	225	166	200	23,01
47C51	258	231	247	219	230	15,41

Tabla 4.12 Resultados de microdureza en ferrita a temperatura de 47°C.

Código	FERRITA					Desv. Estándar
	HV (Kg/mm2)					
Original	251	251	253	252	251	0,89
Sensibilizada	220	254	216	218	223	15,75
47A31	262	299	299	280	275	16,01

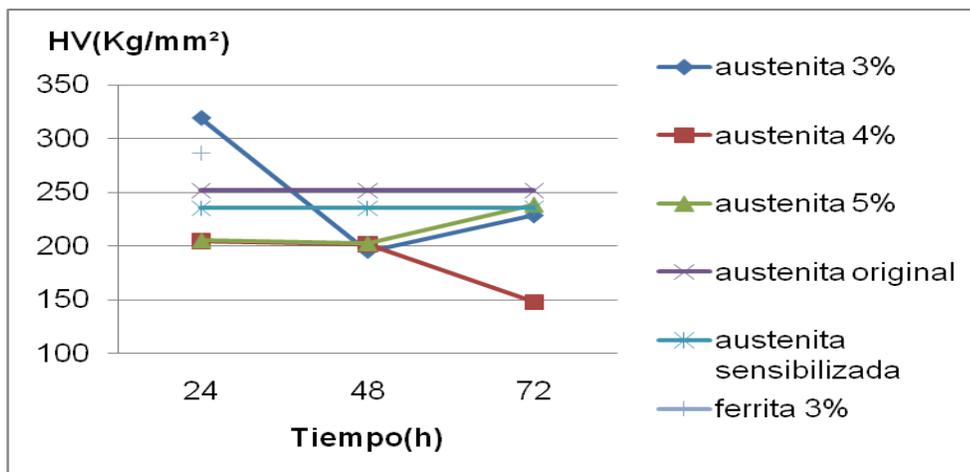


Figura 4.46 Gráfica de microdureza vickers para ferrita y austenita a temperatura de 47°C.

4.4.3 Muestras a condiciones de temperatura de 65°C

En la tabla 4.13 se puede apreciar los resultados de microdureza a temperatura de 65°C.

Para la única fase presente en la superficie de la muestras, la austenita, se registro un incremento en la dureza durante el periodo de 24 a 48 horas para concentraciones de 3% de HCl.

La condición de ensayo con 4 % de concentración de HCl presentó una disminución en la dureza durante el periodo de 24 a 48 horas y luego sufrieron un cambio en la pendiente que indica que el material empezó a endurecerse para el siguiente periodo de tiempo.

Las probetas sometidas a 5% de HCl durante todo el periodo el material presento un descenso en la microdureza. En la figura 4.47 se puede apreciar el comportamiento de la microdureza en función del tiempo de duración de los ensayos de corrosión.

Tabla 4.13 Resultados de microdureza en austenita a temperatura de 65°C.

Código	AUSTENITA					Desv. Estándar
	HV (Kg/mm ²)					
Original	251	251	253	252	251	0,89
Sensibilizada	220	254	216	218	223	15,75
65A32	195	178	197	179	190	8,87
65B31	217	195	183	231	215	19,05
65C32	210	202	198	209	205	4,96
65A42	219	222	170	192	200	21,25
65B42	170	210	166	172	180	17,74
65C41	214	220	180	207	200	15,46
65A52	210	224	199	188	210	13,49
65B52	165	189	131	207	185	28,96
65C52	141	202	213	129	160	37,04

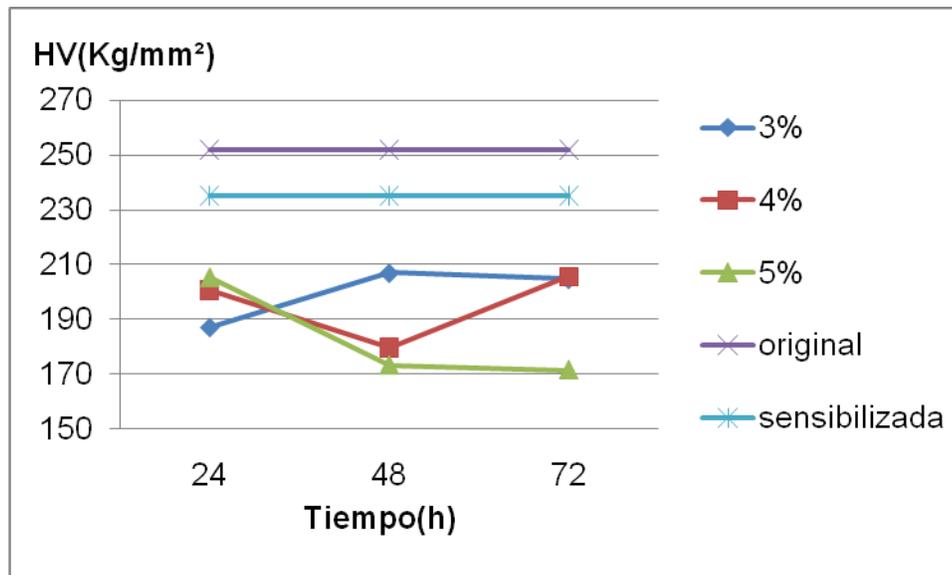


Figura 4.47 Gráfica de microdureza vickers para las fases de ferrita y austenita a temperatura de 65°C.

ANÁLISIS GENERAL

La naturaleza de los ensayos según la norma ASTM A262-02 práctica C propone la susceptibilidad a la corrosión intergranular y la corrosión por picaduras. En las muestras se observa corrosión selectiva en la fase de ferrita del acero dúplex SAF 2507.

A continuación se presenta una secuencia de imágenes de microscopía electrónica de barrido donde se puede apreciar los cambios microestructurales que ocurren en las muestras de acero dúplex SAF 2507 expuesto a las soluciones de ácido clorhídrico a las condiciones de temperaturas ensayadas.

La figura 4.48 (a) revela el acero dúplex SAF 2507 en condiciones originales, se puede apreciar la diferenciación entre las fases de ferrita y austenita. Los granos de austenita muestran uniformidad y los límites de grano son continuos.

La figura 4.48 (b) refleja las características de las muestras de acero dúplex Saf 2507 luego del tratamiento térmico de sensibilización. Se observa

un cambio de tonalidad en los límites de grano de la fase austenítica, presentando zonas ligeramente oscuras debido a la posible formación de carburos de cromo como consecuencia de la sensibilización.

La figura 4.48 (c) corresponde a una probeta expuesta durante 48 horas a una solución de ácido clorhídrico de 4% de concentración a 27°C de temperatura. Se puede apreciar la formación de puntos localizados de corrosión por picadura en la fase de ferrita.

La figura 4.48 (d) muestra los efectos de la corrosión sobre una probeta expuesta durante 72 horas a una solución de 5% de ácido clorhídrico a 27°C de temperatura. Se puede observar la degradación de los límites de grano de ferrita debido a una susceptibilidad a la corrosión intergranular.

La figura 4.48 (e) corresponde a una probeta expuesta durante 48 horas a una solución de ácido clorhídrico de 4% de concentración a una temperatura de 47°C. En la imagen se puede apreciar el ataque selectivo de corrosión a la fase ferrítica. Esto evidencia que la fase austenita presenta una mayor resistencia a los cloruros como ácido clorhídrico.

La figura 4.48 (f) corresponde a la condición más crítica ensayada, esto es una probeta expuesta durante 72 horas a una solución de ácido clorhídrico a 65°C de temperatura. Se puede evidenciar únicamente la presencia de la fase de austenita en la muestra. La fase de ferrita fue degradada en su totalidad. El proceso de corrosión ataca selectivamente a la ferrita por ser la fase menos resistente debido a los bajos contenidos de níquel respecto a la fase austenítica.

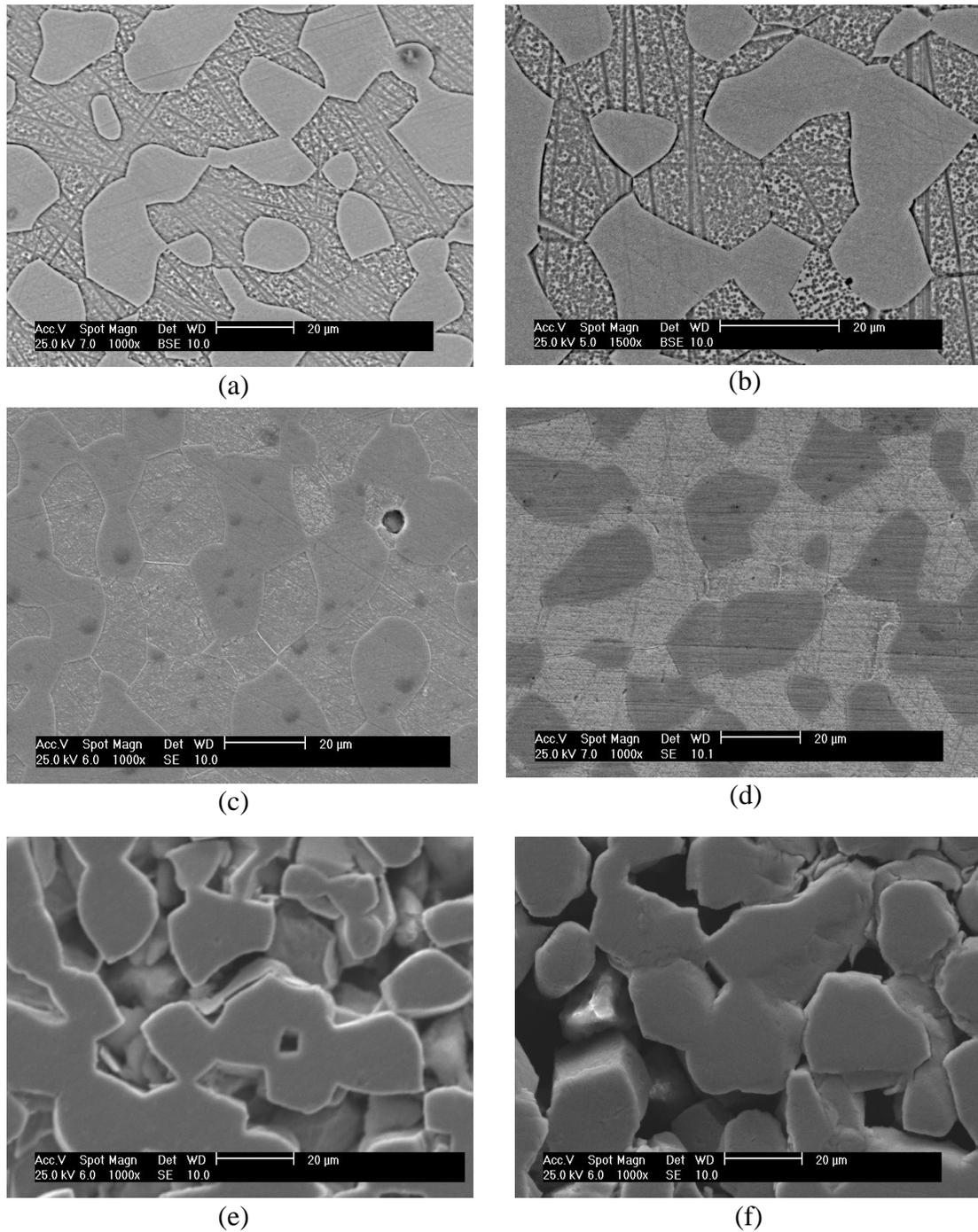


Figura 4.48 Microscopía óptica de barrido acero dúplex SAF 2507 para las condiciones (a) original; (b) sensibilizada; (c) temperatura de 27°C a 4% HCl; (d) temperatura de 27°C a 5% HCl; (e) temperatura de 47°C a 4% HCl. (f) temperatura de 65°C a 5% HCl.

En resumen, la degradación que sufren las muestras ensayadas se produce debido a la corrosión por picaduras y a un ataque de corrosión selectiva en la fase ferrítica del acero dúplex SAF 2507. La elevada velocidad de corrosión de las probetas en las condiciones ensayadas es causada principalmente por la concentración de ácido clorhídrico en la solución de más de 4% y por temperaturas superiores a las condiciones ambientales.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Los análisis de EDX para las muestras de acero en condiciones originales mostraron una composición química en porcentaje de peso para la ferrita de 22,32 % de cromo y 4,96 % níquel. Para la fase austenítica los resultados fueron de 19,68 % cromo y 6,47 % níquel.
- El proceso de sensibilización no afectó aparentemente la microestructura del acero dúplex Saf 2507 y la composición química de las fases de ferrita y austenita no registraron cambios apreciables.
- El comportamiento de la pérdida de peso en el acero dúplex Saf 2507 fue directamente proporcional al tiempo de exposición al medio corrosivo.
- La velocidad de corrosión para todas las condiciones de estudio ensayadas fue constante dentro de un intervalo de tiempo de 24 a 72 horas.
- La velocidad de corrosión fue baja para las condiciones de temperatura de 27 °C. Moderadamente alta para una concentración de 3% de HCl a temperatura de 47 °C. A partir de una concentración de 4% de HCl a una temperatura de 47 °C hasta la condición más crítica de 65 °C a 5% de HCl la velocidad de corrosión registrada fue muy alta e inaceptable para usos industriales.

- La influencia del aumento de la temperatura resultó ser una variable mucho más influyente que la variación de concentración de ácido clorhídrico.
- Los ensayos de microdureza registraron un ligero incremento en la dureza del acero dúplex para las exposiciones de 24 a 72 horas.
- Se observó que la microestructura de las muestras luego de realizar los ensayos de corrosión presentaron una composición de ambas fases hasta la condición de 47 °C a 3% de HCl. Se evidenció ausencia de la fase ferrítica en la superficie del acero dúplex 2507 .
- El proceso de corrosión fue del tipo: corrosión uniforme hasta la condición de 47 °C a concentración de 3% de HCl. Y a partir de la condición de 47 °C a 4% de HCl hasta la temperatura de 65 °C a 5% de HCl se presentó corrosión selectiva en la fase ferrítica.
- La ferrita fue la fase más afectada en la exposición a medios corrosivos con altos contenidos de cloruros. Esto debido a su bajo contenido de níquel respecto a la fase austenítica.

Recomendaciones

- Estudiar el uso de inhibidores de corrosión y su efecto en la disminución de la velocidad de corrosión para las condiciones de temperaturas y concentraciones de ácido clorhídrico evaluadas en los ensayos realizados.
- Un estudio más profundo por microscopía electrónica de transmisión y/o difracción de rayos X, permitiría visualizar la formación de la fase sigma no visible en esta investigación.
- Realizar ensayos de tracción y fatiga para conocer el comportamiento mecánico del Dúplex SAF 2507 sometidos a soluciones de ácido clorhídrico a concentraciones de 3%, 4% y 5%.
- Someter otros aceros a las mismas condiciones de trabajo y realizar un estudio comparativo con la finalidad de obtener información correspondiente al comportamiento de cada acero y seleccionar cual sería el más calificado para uso industrial.
- Realizar estudios con condiciones de temperatura y concentración de ácido clorhídrico superiores.

Símbolos y abreviaturas

Variables	Descripción
α	Fase de ferrita en acero dúplex
γ	Fase de austenita en acero dúplex
ASTM	Sociedad Americana de ensayos y materiales
C	Carbono
cm	Centímetros
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Desv	Desviación estándar
h	Horas
HV	Microdureza Vickers
g	Gramos
MEB	Microscopía electrónica de barrido
mm	Milímetros
mm/año	Milímetros por año
Mo	Molibdeno
Mn	Manganeso
Ni	Níquel
P	Fósforo
P.f	Peso final
P.i	Peso inicial
P.p	Pérdida de peso
P.prom	Pérdida de peso promedio
S	Azufre
SAF	Acero austenítico-ferrítico
Si	Silicio
T.e	Tiempo de exposición
Vc	Velocidad de corrosión
Vc.prom	Velocidad de corrosión promedio

Referencias

- [1] S-1541-ENG 97 *The role of duplex stainless steels in oil refinery heat exchanger applications*. AB Sandvik Steel.1997,
- [2] Giuseppe Sala. *Super Dúplex stainless steel saf 2507 for corrosion control in refinery overhead condensers*. Sandvik Italia. Genova, 2004.
- [3] Rodríguez M., Almagro J., Botella J. y Valerga P. *Cinéticas de Transformación de Fases a 850 ° C de Aceros Inoxidables Dúplex Clásicos (2205 y 2507) y de uno Nuevo de Bajo Contenido en Níquel y Alto en Manganeso (DBNi)*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, (2004) Volumen 43.
- [4] Charles J. *Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties*, Duplex Stainless Steel '91 Conference Proceedings, Beaune, Francia, (1991). Volumen 1.
- [5] Echeverria M. *Manual de Aceros Inoxidables*. Indura s.a. 2010.
- [6] Nochon, A. Y Aguen, G. Embrittlement of Ferritic Stainless Steel. *Metal. Trans.* Vol. 11A, p.p. 573-585. 1980.
- [7] Oropeza, A.. *Calificación de un recubrimiento de acero inoxidable dúplex ER 2209 aplicado por el proceso de soldadura GMAW-P con pulsaciones térmicas*. Trabajo de Grado. (UCV, Caracas). 2004
- [8] S-120-ENG 021126. Duplex Stainless Steel. Sandvik.
- [9] Uzcategui, Jose I. *Corrosión*. Universidad de Carabobo. 2000

[10]. ASTM A 262-02a. Practica C: prueba de acido nítrico para detección de sensibilidad en ataque intergranular de austeníticos en aceros inoxidable, Estándares Nacionales Americanos.

[11] ASTM G4, 2001, Standard Guide for Conducting Corrosion Tests in Field Applications.

[12] ASTM G1-03, 2003, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.

ANEXOS

Página 1 de 2



CERTIFICATE No. A/06-060956 Rev 00

Page 1/2

INSPECTION CERTIFICATE acc to
EN 46757/53

SANVEN STEEL, C.A.
AVENIDA FRANCISCO DE MIRANDA
TORRE LA PRIMERA.PISO 4 OFC 4A
CAMPO ALEGRE/CARACAS 1060
VENEZUELA

Customer References		Sandvik References							
SMT-2006	Customer order 2006-06-03	Order No. ABSMT No.	Subs No. C.Code	ABSMT Dispatch note 757/5					
610-32003	SANVEN	84-72430	72						
Material description		Steel/material Designations							
HOT WORKED STAINLESS BAR STEEL		Sandvik SS							
ANNEALED & STRAIGHTENED		SAF 2507 2328							
PEEL TURNED AND POLISHED		UNS EN no S32750 1.4410							
Steel making process Electric furnace									
Technical requirements EN 10088-3:-2005									
EXTENT OF DELIVERY									
It	Product designation	Heat	Lot	Pieces	Kg				
01	MBR-SAF2507-20 MA-3200-	5073	32003	14	154.0				
				Total	14 154.0				
TEST RESULTS									
Chemical composition (weight%)									
Heat	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	
5073	0.014	0.33	0.77	0.017	0.0006	25.15	6.96	3.91	
	Cu	N							
5073	0.11	0.282							
Tensile test at room temperature									
Yield strength		Tensile strength		Elongation	Red.of Area				
MPa MPa		MPa		%	%				
Lot	Rp0.2 Rp1.0	Rm		A	Z				
32003	629 707	867		36	67				
Hardness test									
Min		Max							
Lot	HRC	HRC							
32003	22.0	23.0							
Quality assurance - Ulf Svensson/QA-manager Primary Products									
MTC Service / Certificates									



Following controls/tests have been satisfactorily performed:

- Material Identification.
- Visual inspection and dimensional control.

Heat Treatment:
1100 degrees C/30 min. Quenched in water.

The delivered products comply with the specifications and requirements of the order.

The material is manufactured according to a Quality system, approved and registered to ISO 9001.

The certificate is produced with EDP and valid without signature.

SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TITULO DEL TRABAJO

“EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO DÚPLEX SAF 2507 EXPUESTO A UNA SOLUCIÓN DE ACIDO CLORHÍDRICO A BAJAS TEMPERATURAS.”

FECHA DE APROBACIÓN DEL TG-II:

FECHA DE EX. FINAL:

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCIÓN DE ESCUELA:

El propósito de la siguiente investigación consistió en evaluar la susceptibilidad al ataque intergranular en el acero Dúplex SAF 2507 sometido a soluciones de ácido clorhídrico a 3%, 4% y 5% de concentración y temperaturas de 27°C, 47°C y 65°C, aplicando estrategias de investigación documental y experimental. Para la realización del estudio se utilizaron 60 probetas de acero Dúplex SAF 2507. Se realizaron ensayos de velocidad de corrosión por el método de pérdida de peso, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con EDX y ensayos de microdureza Vickers. El estudio arrojó resultados en la velocidad de corrosión de 0,67 mm/año para la concentración de 3% de ácido clorhídrico y temperatura de 27°C y de 49,17 mm/año para la concentración de 5% y temperatura de 65°C A nivel microscópico el deterioro se evidenció en picaduras, pérdida de la fase ferrita, pérdida de límite de grano y separación intergranular, la velocidad de corrosión resulto ser constante para una misma condición de ensayo. Mediante el análisis de espectroscopia de energía dispersa de rayos X se demostró la perdida de la fase de ferrita a partir de condiciones de temperatura de 47°C y concentraciones de 4% de ácido clorhídrico.

CEDULA DE IDENTIDAD

NOMBRES

FIRMA

17.066.044

Loaiza, Tomás

18.928.905

Rodríguez, Fabricio

PROFESOR GUÍA: Ing. Laura Sáenz.

JURADO: _____

JURADO: _____
