

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACION DEL ACERO SAF 2507 PARA LA SUSTITUCION DEL
MATERIAL UTILIZADO EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.**

**PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES:
URBINA, EDHIÑO
VARGAS, JOHANN
PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

Caracas 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACION DEL ACERO SAF 2507 PARA LA SUSTITUCION DEL
MATERIAL UTILIZADO EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Crisanto Villalobos

**PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES:
URBINA, EDHIÑO
VARGAS, JOHANN
PARA OPTAR POR EL TITULO
DE INGENIERO MECANICO**

Caracas 2010



Caracas, 10 de noviembre de 2.010

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

EDHIÑO URBINA y JOHANN VARGAS

Titulado:

**“EVALUACIÓN DEL ACERO SAF 2507 PARA LA
SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO EN
LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico


Prof. José Chitty
Jurado


Prof. Crisanto Villalobos
Tutor


Prof. Pedro Álvarez
Jurado



DEDICATORIA

A Dios por sobre todas las cosas, por darme la oportunidad de ser ingeniero y demostrarme a mí mismo que puedo lograr cosas grandes en la vida.

A mi padre fuente de inspiración por su gran ejemplo de constancia y responsabilidad.

A la UCV, mi segunda casa, fuente de luz.

Johann Vargas

RESUMEN

Urbina A. Edhiño I. y Vargas C. Johann M.

“EVALUACION DEL ACERO SAF 2507 PARA LA SUSTITUCION DEL MATERIAL UTILIZADO EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR”

Tutor Académico: Prof. Crisanto Villalobos

**Tesis. Caracas. U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica.2010,
82 páginas.**

**Palabras claves: Acero SAF 2507, Ensayo, Microestructura, Esfuerzo,
Tracción, Fatiga, Corrosión.**

Este trabajo de investigación consiste en el estudio experimental del acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a condiciones de fatiga-corrosión. Para realizar el estudio se elaboraron probetas bajo los parámetros establecidos por las normas ASTM E606 y ASTM A-370, para ensayos de tracción y ensayos de fatiga-corrosión respectivamente, generado por una solución salina NaCl al 3%. Adicionalmente, se elaboraron pruebas metalográficas para revelar la microestructura, y ensayos de dureza Vickers. El ensayo principal de este trabajo de investigación fue el de fatiga-corrosión, cuyos resultados fueron tratados a través del análisis estadístico de Weibull, el cual se empleó para establecer los valores de vida promedio de cada serie de probetas ensayadas, a distintos niveles de esfuerzos, planteados a partir del ensayo de tracción que reveló el esfuerzo de fluencia. Los resultados se presentan en la curva S-N, donde se incorpora la curva de resistencia a la fatiga de una aleación de titanio, el cual es un material de alta resistencia a la corrosión. Comparando ambas curvas se puede apreciar de que el SAF 2507 posee una mejor resistencia a la fatiga, pero no una aceptable expectativa de vida en comparación con la que demuestra la aleación Ti-6Al-4V cuando es sometido a similares condiciones de trabajo (fatiga-corrosión). Finalmente, se procedió a realizar un estudio de microscopia electrónica de barrido para determinar los mecanismos operantes en el proceso de falla.

INDICE GENERAL

Contenido

INTRODUCCION	1
<i>Capítulo I</i>	
Fundamento Teórico.....	3
1. Definición de Acero inoxidable.....	3
1.2 Clasificación de los Aceros Inoxidables	3
1.2.1 Aceros Inoxidables Ferríticos:	4
1.2.4 Aceros Inoxidables Endurecidos por Precipitación (PH).....	6
1.2.5 Acero Inoxidable Dúplex:	6
1.3 Microestructura de los Aceros Inoxidables Dúplex	8
1.3.1 Precipitación de Fases secundarias de los Aceros Inoxidables Dúplex	9
1.4 Descripción general del acero Inoxidable dúplex SAF 2507.....	12
1.4.1 Composición química del acero SAF 2507.....	12
1.4.2 Propiedades Mecánicas del acero SAF 2507	13
1.4.3 Temperatura	14
1.4.4 Resistencia al Impacto	15
1.4.5 Expansión Térmica.....	16
1.4.6 Resistencia a la corrosión.....	18
1.4.7 Corrosión Intergranular	28
1.4.8 Corrosión Erosión	29
1.5 Aplicaciones de acero SAF 2507	30
<i>Capítulo II</i>	
Procedimiento Experimental	32
2.1 Preparación de la muestra	32
2.2 Microscopía Óptica	34
2.3 Ensayo de Dureza.....	35
2.3.1 Ensayo Macro dureza Vickers	35
2.4 Elaboración de las Probetas de Tracción y de Fatiga-corrosión	38
2.5 Ensayo de Tracción	40
2.5.1 Obtención de la curva Esfuerzo-Deformación Real.....	42
2.6 Ensayo de Fatiga-Corrosión.....	43
2.6.1 Proceso de Rotura por Fatiga	45
2.6.2 Calculo del momento flector	47
2.6.3 Calculo de la Curva S-N o de wohler	49
2.6.4 Resistencia a la fatiga a través del modelo de Basquin.....	50
2.7 Microscopia Electrónica de Barrido.....	51
2.7.1 Preparación de la muestra:	52
2.7.2 Limpieza de las muestras.	52
2.7.3 Observación de las muestras.....	53

Capítulo III

Resultados Experimentales	56
3.1 Ensayo de Macro dureza	56
3.2 Ensayo de Micro dureza Vickers	58
3.3 Microscopia Óptica del material SAF 2507	60
3.4 Ensayo de Tracción	62
3.5 Ensayo de Fatiga-corrosión.....	65
3.6 Estudio Fractografico (Microscopia Electrónica de Barrido)	70

Capítulo IV

Conclusiones	78
Recomendaciones.....	79
Referencias Bibliográficas	80
Anexo 1.Certificado de Calidad del Acero SAF 2507	83

INDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1.1. Diagrama Binario: Hierro-Níquel (Fe-Ni) e Hierro-Cromo (Fe-Cr) 3

Figura 1.2. Microestructura de la aleación 2507, laminada en frío y templada.
Ferrita (Fase Oscura) y Austenita (Fase Clara)..... 7

Figura 1.3. Microestructura del SAF 2507 envejecido por 10 min a 850°C,
mostrando la fase σ en el límite de fase Ferrita / Ferrita y
Austenita / Ferrita..... 10

Figura 1.4. Imagen TEM de una soldadura 22Cr-8Ni-3Mo envejecida por 24
horas a 600°C, mostrando los precipitados de fase R, en contraste
desigual en el grano de ferrita 11

Figura 1.5. Intergranular formado en SAF 2507 envejecido por 10 min a
850°C 12

Figura 1.6. Comparación de la elasticidad mínima, 0.2 % de compensación,
entre un SAF 2507 y un acero Austenítico de alto grado.
Condición: Recocido 14

Figura 1.7. Curva de resistencia al impacto de un tubo de 260x12 mm extruido
y recocido a una Temperatura de 1075°C, hecho de acero SAF
2507..... 16

Figura 1.8. Coeficientes de expansión térmica de aceros al SAF 2507, aceros
al carbono y AISI 316L para un rango de 30 – 100 °C de
Temperatura. 17

Figura 1.9. Velocidad de Corrosión de diferentes aleaciones, atacada por una
mezcla de 50% de ácido acético y proporciones variables de ácido
fórmico. Duración de la prueba 1+3+3 días..... 19

Figura 1.10. Diagrama de Isocorrosión provocada por ácido fórmico en forma
gaseosa. La curva representa la velocidad de corrosión de 0,1
mm/año (4 mpy) en un ensayo de estancamiento 19

Figura 1.11. Velocidad de Corrosión de diferentes aleaciones atacadas por una
solución gaseosa de 80% ácido acético con 2000 ppm de cloruro
a 90°C..... 20

Figura 1.12. Velocidad de Corrosión de diferentes aleaciones atacadas por una solución de ácido acético concentrado con 200ppm de cloruro.....	20
Figura 1.13. Diagrama Isocorrosión en forma natural del ácido sulfúrico aireado. La curva representa una velocidad de corrosión de 0,1 mm/ año (4mpy) en solución de ensayo estancada.	22
Figura 1.14. Diagrama Isocorrosión, Velocidad de corrosión 0,1 mm/ año (4 mpy) de una solución que contiene ácido sulfúrico en su forma natural, con 2000 ppm de iones de cloruro.	22
Figura 1.15. Diagrama Isocorrosión del ácido clorhídrico en forma gaseosa. La curva representa una velocidad de corrosión de 0,1 mm/ año (4 mpy), en solución de ensayo estancada.....	23
Figura 1.16. Grafica donde se muestran los resultados de un ensayo ASTM G48, bajo las condiciones de 6% FeCl ₃ y 24 horas de duración.	24
Figura 1.17. Formación de picaduras críticas bajo concentraciones de cloruro de sodio variables, de 3 a 25%. Potencioestática a 600 mV y superficie base, tratada con papel de lija de 600.....	25
Figura 1.18. Formación de picaduras críticas bajo concentraciones de 3% de cloruro de sodio y distintos PH. Potencioestática a 600 mV y superficie base, tratada con papel de lija de 600.....	25
Figura 1.19. SCC Resistencia a la oxidación (abt 8 ppm) en solución neutra de cloruro. Ensayo realizado en 1000 horas con tensiones equivalentes a las pruebas de temperatura.	27
Figura 1.20. Resultados de las pruebas de SCC con carga constante en 40% de CaCl ₂ , pH= 1,5, a 100°C, ensayado con gas.....	27
Figura 1.21. SCC pruebas a carga constante en solución NACE y temperatura ambiente.	28
Figura 1.22. Tasa de pérdida de masa relativa después de las pruebas de resistencia contra a la corrosión erosión	29

Capítulo II

Figura 2.1. Cortadora Buehler.....	33
Figura 2.2. Desbastadora Marca Lunn Major.	33
Figura 2.3. Equipo de pulido Mecánico Marca Buehler.	34
Figura 2.4. Vickers Hardness Tester, Marca Buehler, Modelo FV-700	36
Figura 2.5. Forma Del Barrido En El Ensayo De Macro dureza	36
Figura 2.6. Microdurometro Vickers Marca Buehler, Modelo 1105	37
Figura 2.7. Distribución De Las Indentaciones En El Ensayo De Microdureza... 38	
Figura 2.8. Dimensiones De Las Probetas De Tracción	39
Figura 2.9. Dimensiones de las probetas de fatiga.....	40
Figura 2.10. Equipo Universal de Ensayo de Tracción.....	42
Figura 2.11. a) Máquina de Flexión Rotativa, con cámara de Corrosión; b) Vista Superior.	47
Figura 2.12. Curva Wohler O Curva S-N	50
Figura 2.13. Equipo Ultra sónico.	53
Figura 2.14. Microscopio Electrónico de Barrido Marca HITACHI Modelo S-2400.....	53

Capítulo III

Figura 3.1 Dureza Vickers Vs. Profundidad Radial para el barrido #1 y barrido #2, al DSS-SAF 2507.....	57
Figura 3.2. Grafica Dureza Vickers Vs. Carga Aplicada.....	59
Figura 3.3. Indentacion de Microdureza	60
Figura 3.4. Fotomicrografía de la sección transversal del Acero inoxidable SAF 2507.	61
Figura 3.5. Fotomicrografía de la sección transversal del Acero inoxidable SAF 2507.	62
Figura 3.6. Curva Esfuerzo ingenieril Vs. Deformación Ingenieril para las probetas 1, 2 y 3.	64
Figura 3.7. Grafica de Esfuerzo vs. Valor promedio	66
Figura 3.8. Grafica de log Esfuerzo vs. Log Vida Promedio.....	67
Figura 3.9. Curvas de resistencia a la fatiga corrosión del SAF 2507 y la aleación Ti-6Al-4V con recubrimiento de WC-Co.	68
Figura 3.10. Superficie de fractura del Material a 385,7 MPa.....	71
Figura 3.11. Superficie de fractura del Material Ampliada, ZIG.....	72
Figura 3.12. Superficie de fractura del Material, Zona de Final de Fractura (ZFF).....	73
Figura 3.13. Probeta ensayada al más alto nivel de esfuerzo, 418.5 MPa	73
Figura 3.14 Superficie de probeta con mas alto ciclaje, Ensayada a Tracción	74
Figura 3.15. Ampliación de la figura 3.14 de la probeta ensayada a tracción.....	75
Figura 3. 16. Ampliación de un microhoyuelo de la figura 3.15	76

INDICE DE TABLAS

Capítulo I

Tabla 1.1. Composición Química del Acero Inoxidable Dúplex SAF 2507.....	12
Tabla 1.2. Propiedades Mecánicas en sistema internacional de unidades.	13
Tabla 1.3. Comportamiento de las propiedades mecánicas según temperatura, en unidades de sistema internacional.....	15
Tabla 1.4 Coeficientes de expansión térmica de aceros al SAF 2507, aceros al carbono y AISI 316L.....	17
Tabla 1.5. Modulo de Elasticidad de un Sandvik SAF 2507 a diferentes temperaturas	18
Tabla 1.6. CPT a diferente soluciones oxidantes	26

Capítulo III

Tabla 3.1. Dureza Vickers para el barrido #1, realizado a la probeta de un DSS-SAF 2507.	56
Tabla 3.2. Dureza Vickers para el barrido #2, realizado a la probeta de un DSS-SAF 2507.....	57
Tabla 3.3. Dureza Vickers para los ensayos realizados sobre los cupones de prueba.....	58
Tabla 3. 4. Longitudes iniciales y finales de las probetas ensayadas.....	63
Tabla 3. 5. Elongación promedio, desviación estándar y porcentaje de elongación nominal.....	63
Tabla 3. 6. Resultados de ensayo de tracción	64
Tabla 3. 7. Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para la determinación del límite de fatiga del acero SAF 2507.....	65
Tabla 3. 8 Resultados generales del ensayo de fatiga-corrosión para los diferentes niveles de esfuerzo usando el programa Weibull.....	66
Tabla 3. 9. Obtención de la ecuación de Basquin	67

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ASTM	American Society of Testing Material
PRE	Resistencia Equivalente a las picaduras
°C	Grados centígrados
ppm	Partes por millón
CPT	Temperatura critica de picadura
CCT	Temperatura critica de grietas
d	Diámetro
R	Radio
S _i	Esfuerzo Ingenieril
e _i	Deformación Ingenieril
Se	Limite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico
S_u	Resistencia a la tracción
S _{ut}	Esfuerzo último a la tracción
S _y	Esfuerzo de fluencia
σ_u	Esfuerzo real.
S	Amplitud real de esfuerzo
ZIG	Zona Inicial de Fractura
ZFF	Zona final de Fractura.

INTRODUCCION

Los intercambiadores de calor que son empleados en ciertas refinéras de Venezuela son construidos con aleaciones de titanio y operan con agua de mar como agente refrigerante. El empleo de este tipo de material en dichos equipos genera problemas como, la disponibilidad dentro del mercado, por lo cual se busca nuevas alternativas dentro de la ciencia de los materiales.

Un problema esencial de los intercambiadores de calor es que no son afectados únicamente por la corrosión como problemática primordial, sino también por las distintas fluctuaciones de cargas que experimentan durante su funcionamiento, las cuales al transcurrir el tiempo van generando deterioro hasta ocasionar el colapso del equipo, lo que se conoce como fatiga. De allí surge la inquietud de buscar un material distinto del titanio que soporte las exigencias antes planteadas. Aunque es importante acotar, que las exigencias de las propiedades en materiales son tan complejas que difícilmente pueda hallarse el material ideal que satisfaga todas ellas de manera óptima.

Por lo tanto, este trabajo especial de grado tiene como objetivo estudiar un acero dúplex SAF 2507, con la finalidad de ser utilizado en los intercambiadores de calor, y determinar si las propiedades del mismo cumplen con las exigencias a las que va estar sometido, sin riesgo a fallas.

Capítulo I
Fundamento teórico

Fundamento Teórico

1. Definición de Acero inoxidable

Son aleaciones de tipo pasivante a base de hierro, carbono, cromo y otros elementos, especialmente níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio, entre otros, que otorgan una resistencia particular a algunos tipos de corrosión y en determinadas aplicaciones industriales. Todos los aceros inoxidables verdaderos contienen un mínimo de aproximadamente 11% Cromo, lo que hace que se forme una capa delgada de óxido de cromo en la superficie, cuando el acero queda expuesto al oxígeno. Este elemento, es el que hace posible que el acero sea inoxidable y posee la característica de ser el elemento estabilizador de la ferrita.

1.2 Clasificación de los Aceros Inoxidables

Los Aceros Inoxidable pueden ser clasificados de acuerdo a la particularidad de su estructura cristalográfica predominante a temperatura ambiente, consecuencia de la influencia de elementos como el cromo y el níquel.

La figura 1.1, *Peckner (1977)* y *Gómez (1988)*, exponen el comportamiento de las fases y de las microestructuras de estos aceros en los diagramas binarios (Fe-Cr) y (Fe-Ni).

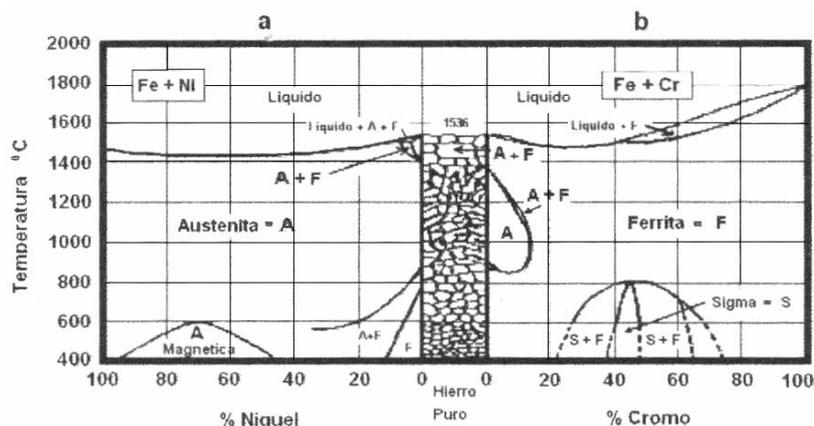


Figura 1. 1. Diagrama Binario: Hierro-Níquel (Fe-Ni) e Hierro-Cromo (Fe-Cr)

Gómez acota que indistintamente de cualquier elemento de aleación que sea incorporado, se obtendrán propiedades semejantes a las que ejerce el Cromo o el Níquel en su influencia metalúrgica sobre la microestructura y el tipo de acero inoxidable. *Rivera (2007)*, menciona que una forma de cuantificarlo consiste en referirlos al Cromo Equivalente $Cr_{(eq)}$ como elementos formadores de Ferrita (ferritizantes o alfégenos) y al Níquel Equivalente $Ni_{(eq)}$ como elementos formadores de Austenita (austenizantes o gammágenos). El grupo de los aleantes ferritizantes está constituido por los elementos tales como: Cromo, Molibdeno, Silicio, Aluminio, Niobio, Titanio y Vanadio, mientras que el grupo de elementos austenizantes está formado por los elementos: Níquel, Manganeso, Carbono, Cobalto, Cobre y Nitrógeno. *Askeland (2004)* establece la siguiente clasificación de los aceros inoxidables de acuerdo a la microestructura presente a temperatura ambiente:

1.2.1 Aceros Inoxidables Ferríticos: Tienen la particularidad de poseer hasta un 30 % de Cr y menos de 0,12 % de C. A veces se denominan también aceros de alto contenido en cromo. Las características que acompañan a este material son: buena resistencia y ductilidad moderada, producto del endurecimiento por solución sólida y del endurecimiento por deformación. También se puede mencionar que tienen la propiedad de ser magnéticos, excelente resistencia a la corrosión, capacidad de conformado moderada y además son relativamente económicos. Haciendo referencia al comportamiento de oxidación bajo el parámetro de temperatura se puede señalar que los que poseen de 25 a 30 % de Cr tienen una alta resistencia a la oxidación, mientras que los conformados por 17% de Cr resisten sin oxidarse temperaturas hasta de 850°C y los de 27% de cromo resisten temperaturas hasta de 1050°C.

1.2.2 Aceros Inoxidables Martensíticos: Son aceros al Cr que suelen recibir el nombre de aceros martensíticos por quedar con esa estructura después del temple y aun también después del enfriamiento al aire. Resisten sin oxidarse temperaturas hasta 750° y su estructura fundamental permite que puedan ser tratados térmicamente de forma análoga a los aceros ordinarios. Adicionalmente destaca la característica de alta resistencia y dureza. El contenido de Cr de los martensíticos es por lo general menor a 17%. Es aplicado en la fabricación de cuchillos de alta calidad, balines, discos de freno y válvulas.

1.2.3 Aceros Inoxidable Austeníticos: Se fabrican fundamentalmente con cromo-níquel y en comparación con los aceros Ferríticos y Martensíticos, estos tienen mayor resistencia a la corrosión atmosférica y a la ocasionada por ciertos ácidos. Tienen la propiedad que no pueden ser templados y revenidos ni recocidos en la forma ordinaria, tiene gran estabilidad y no se transforma por el enfriamiento rápido en otros constituyentes. Por lo general, se puede mencionar que estos aceros a altas temperaturas tienen un comportamiento de alta resistencia mecánica en comparación con los antes especificados. Adicionalmente tienen la particularidad de tener buena ductilidad. Esta última atribución es generada por un extenso endurecimiento por solución sólida. Una ventaja que presentan estos aceros en relación con los ferríticos es el hecho de adquirir una mayor resistencia al ser trabajados en frío, sumándose a esto el no ser magnéticos, característica ideal dependiendo de la aplicación del mismo. Por ejemplo, en el uso de los stent cardiovasculares (es un pequeño tubo de malla de acero autoexpandible que se coloca dentro de la arteria coronaria para mantener el vaso dilatado) son apropiados. En contra, se presenta la desventaja de ser costosos, debido a los elevados niveles de Níquel y Cromo presentes en esta aleación. La aleación SAE 304 con 18% de Cromo y 8% de Níquel, también llamada inoxidable 18-8, es la aleación de uso más común. Esta combinación a pesar de ser inoxidable, puede sufrir sensitización. Este término hace referencia a cuando se calienta el SAE 304, a temperaturas que están aproximadamente en el intervalo de 480-860°C, los carburos de cromo se precipitan a lo largo de los bordes de grano en vez de en el

interior de los mismos. Lo que da nacimiento a un empobrecimiento en el contenido de cromo en el interior de los granos y hará que el acero inoxidable se corroa con mucha facilidad.

Hablando de su composición, el acero típico de este renglón es el inoxidable 18-8 que ya se ha mencionado, pero también existen otros que pertenecen a este grupo, ellos son los aceros con 12% de Cr y 12% de Ni, otros con proporción de 25% de Cr y 20% de Ni. Asimismo, están unos aceros que contienen pequeñas cantidades de tungsteno, molibdeno y otros elementos. En cuanto a su resistencia a las temperaturas, se especifica que el acero SAE 304 resiste sin oxidarse hasta 800 °C y otros aceros del mismo grupo con 3% de silicio resisten de forma óptima 950 °C. El acero 25-20 resiste hasta 1150° sin mostrar indicios de oxidación.

1.2.4 Aceros Inoxidables Endurecidos por Precipitación (PH): Son aceros en cuya composición se presentan los elementos Al, Nb, o Ta. Las propiedades de este grupo de acero son gracias al endurecimiento por solución sólida, deformación, envejecimiento y a la reacción martensítica. El acero se calienta primero y se temple para inducir la transformación de Austenita en martensita. Al recalentar, se permite que se formen precipitados como el Ni_3Al a partir de la martensita. Las principales propiedades de este renglón de aceros son: Alta resistencia a la tracción en caliente, dureza, resistencia mecánica y elevado límite de elasticidad a la temperatura ambiente.

1.2.5 Acero Inoxidable Dúplex: Es un tipo de acero en donde se presenta aproximadamente 50% de ferrita y 50% de Austenita. Para llegar a un dúplex se debe tener un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico cuando el acero sufre incorporaciones deliberadas de mezclas de fase en su estructura. La relación Ferrita / Austenita se consigue gracias a aleaciones forjadas por ajustes en la composición más trabajo en caliente y práctica de

templado. Este tipo de acero puede ser llamado acero inoxidable Ferrítico–Austeníticos, pero el nombre común es “Dúplex”. Los llamados “Súper Dúplex” son solo los que poseen la característica de poseer una óptima resistencia a la corrosión con un valor de resistencia a la corrosión por picadura (PRE) por encima de 40, que es considerado un valor alto. Mientras mayor sea PRE, mejor resistencia a la corrosión posee el material, lo cual es beneficioso al momento de aplicaciones bajo ambientes altamente corrosivos. En la descripción del material, se profundiza en esta terminología orientada al SAF 2507. En la figura 1.2 se ilustra la microestructura de un súper dúplex. Se puede observar en ella la fase Ferrita (zona oscura) y la fase de Austenita (zona clara).



Figura 1. 2. Microestructura de la aleación 2507, laminada en frío y templada. Ferrita (Fase Oscura) y Austenita (Fase Clara)

Los aceros inoxidables dúplex o DSS (Dúplex Stainless Steel), poseen una composición química cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta, donde sus fracciones volumétricas están constituidas aproximadamente iguales (50% – 50%) de fases Ferrita y Austenita como ya se mencionó anteriormente. La primera con una estructura cristalina BCC (Body cubica Central) y la segunda con una estructura cristalina FCC (Face Cubica central) respectivamente. La obtención de la estructura mixta o dúplex, se logra

por medio de la adición de níquel en una proporción de 4,5 a 8%. Así mismo también se puede agregar nitrógeno para lograr la formación de ambas fases y con esto disminuir la concentración de cromo; el cual se puede encontrar en proporciones de 18 a 28% en ambas fases. Mientras las concentraciones de molibdeno van de 1 a 4 % máximo.

En este material se da la formación de fases intermetálicas perjudiciales cuando son trabajados a temperaturas elevadas. La fase sigma (σ) y la fase chi (χ) son ejemplos de fases intermetálicas que precipitan preferencialmente en la Ferrita, en aceros inoxidable con altas cantidades de cromo y molibdeno. La adición de nitrógeno retrasa la formación de estas fases.

1.3 Microestructura de los Aceros Inoxidables Dúplex

Los DSS luego que solidifican son laminados en caliente a una temperatura que se maneja en el intervalo de 1100 – 1200 °C, lo que genera que los granos experimenten un estiramiento en dirección de la deformación, ocasionándose así anisotropía en las propiedades mecánicas.

Microestructuralmente, las fases que presenta un Acero Inoxidable Dúplex laminado en caliente (sin fases secundarias precipitadas), son austenita y ferrita delta, ambas estables termodinámicamente. La Austenita se presenta de forma brillante y mientras que la ferrita de forma oscura. Sin embargo los diferentes elementos aleantes en los Dúplex influyen que en la microestructura precipiten diferentes fases que son indeseables, ya que desmejoran las propiedades del acero. Estas fases se forman en el intervalo de temperatura de 300 °C y 1000°C, son conocidas como σ , χ , π , R , τ , nitruros de cromo (Cr_2N , CrN) y carburos de cromo (M_7Cr_3 , $\text{M}_{23}\text{C}_{26}$), siendo las más importantes durante la fabricación las dos primeras. Una característica común que tienen estas fases secundarias, es que se forman fundamentalmente en la ferrita.

1.3.1 Precipitación de Fases secundarias de los Aceros Inoxidables Dúplex

Fase σ

Este precipitado secundario, es el más crítico, tiene las características de no ser magnético y poseer una estructura tetragonal. Adicionalmente, influye en las propiedades de tenacidad y comportamiento ante la corrosión. Su composición se basa en Fe-Cr-Mo y se desarrolla entre 600 °C y 1100 °C donde su comportamiento es termodinámicamente estable producto de que el molibdeno aumenta la estabilidad a altas temperaturas. *Musauel* (2003), apunta que luego de practicar un análisis químico cuantitativo en esta fase, se reveló que el Cr, Mo se enriquecen, aumentando la velocidad de precipitación para el Cr y el Mo, y por ende la fracción volumétrica.

La aparición de la fase sigma depende de la temperatura del tratamiento térmico, ya que la cantidad formada es proporcional a la dilatación en el intervalo de temperatura. En dicho intervalo de temperatura la nucleación ocurre en los límites del hierro δ y el hierro γ . Un aspecto a considerar es la velocidad de enfriamiento, pues estudios han demostrado que a bajas temperaturas de tratamiento térmico, con la más baja velocidad de enfriamiento aumenta considerablemente la precipitación de la fase σ , presentándose con un color oscuro y con forma semejante a la de un coral, alojándose principalmente en la interfase δ/γ y en el interior de la matriz de la ferrita delta, por la riqueza de cromo y molibdeno y a la baja densidad que experimentan los cristales de ferrita, facilitándose así la difusión de los átomos de soluto para la instauración de esta fase. Es importante acotar que durante temperaturas por el orden de 950°C, la apariencia de la fase sigma es una estructura compacta.

La forma de evitar esta fase no deseada, es a través de un proceso de enfriamiento a una velocidad rápida, es decir, aproximadamente 0,25 °C/seg. con el objetivo de disuadir su nucleación y crecimiento. La figura 1.3 muestra la presencia de la fase σ , en un SAF 2507.

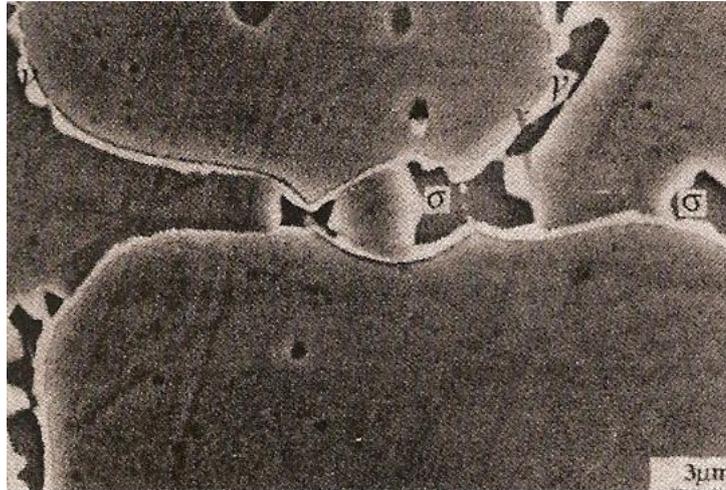


Figura 1. 3. Microestructura del SAF 2507 envejecido por 10 min a 850°C, mostrando la fase σ en el límite de fase Ferrita / Ferrita y Austenita / Ferrita

Fase χ

Es una fase secundaria que se desarrolla en el intervalo de temperatura de 700-900°C, Sus efectos son perjudiciales en la tenacidad y las propiedades anticorrosivas. La fase χ , y la fase σ coexisten, lo que genera dificultad al momento de diferenciar los efectos que causan ambas fases. Para la identificación de la fase χ puede lograrse, mediante un microscopio electrónico de transmisión y microscopio electrónico de barrido, empleándose para ello, electrones primarios.

Fase π

Es una fase con una composición de 28 %Fe - 35% Cr - 34% Mo - 3% Ni, su estructura es cúbica y se aloja dentro de los granos. Sus efectos favorecen la fragilidad y la corrosión por picadura en el material envejecido isotérmicamente.

Fase R

Es otra de las fases intermetálicas, su estructura se caracteriza por ser tetragonal, desarrollándose en un rango de temperatura de 550 a 800 °C. Su composición química viene dada por 16-30 %Cr, 3-5 %Ni y 25-40 %Mo. Dentro de sus efectos se encuentran, reducción de la tenacidad y la temperatura crítica de picadura. La figura 1.4 muestra la presencia de la fase R, en un 22 Cr-8Ni-3Mo.

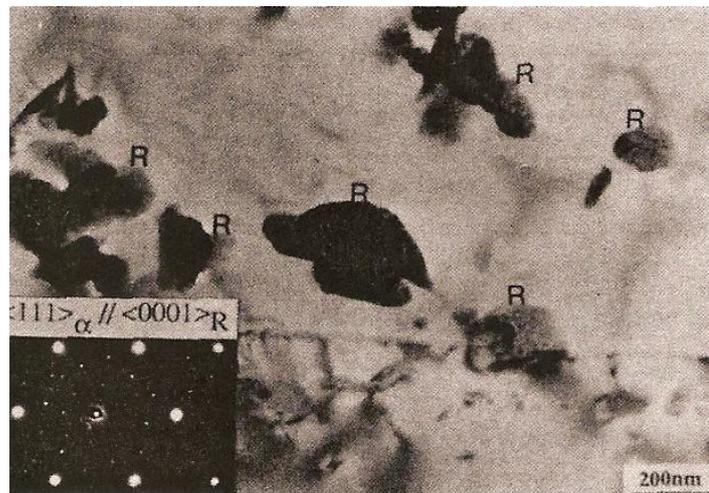


Figura 1. 4. Imagen TEM de una soldadura 22Cr-8Ni-3Mo envejecida por 24 horas a 600°C, mostrando los precipitados de fase R, en contraste desigual en el grano de ferrita

Fase τ

Según fuente ya citada, se dice que es una fase que ha sido recientemente hallada y se desconocen sus efectos. Solo se sabe que es un compuesto intermetálico ortorrómbico.

Nitruros de Cromo

La precipitación del nitruro hexagonal de cromo Cr_2N puede generarse en aceros inoxidable dúplex en un intervalo de 700-900°C. Puede precipitar debido a la sobresaturación de N en la ferrita y a un enfriamiento rápido desde altas temperaturas, afectando adversamente la resistencia a la corrosión así como la tenacidad de impacto. A continuación en la figura 1.5 se aprecia el precipitado de Nitruro de Cromo, formado en un SAF 2507.

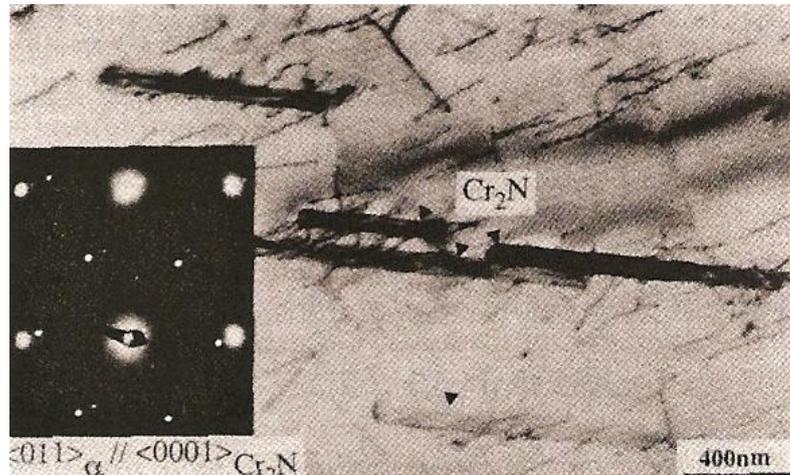


Figura 1. 5. Intergranular formado en SAF 2507 envejecido por 10 min a 850°C

1.4 Descripción general del acero Inoxidable dúplex SAF 2507.

El acero inoxidable dúplex SAF 2507 es un acero de alta aleación (Auténtico-Ferrítico) ideado para trabajar bajo un ambiente altamente corrosivo. Se caracteriza por tener una excelente resistencia a la picadura y corrosión por hendidura, resistencia mecánica muy alta, buenas propiedades físicas que ofrecen ventajas de diseño y además, posee buena soldabilidad.

1.4.1 Composición Química del acero SAF 2507.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (NOMINAL) %

Tabla 1. 1. Composición Química del Acero Inoxidable Dúplex SAF 2507

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Otros
Max.	Max.	Max.	Max.	Max.				
0.030	0.8	1.2	0.035	0.015	25	7	4	N=0.3

Este acero se comercializa a través de la compañía Sandvik en las siguientes presentaciones: tubos con y sin costura con dimensiones de hasta 260 mm. de diámetro exterior, bridas, accesorios, cable de electrodos y alambre de relleno, varilla, cubierta de electrodos, chapas, láminas y tiras de ancho, barras de

acero y artículos forjados. Todos estos productos son recocidos y decapados en blanco, o son presentados con un recocido brillante.

1.4.2 Propiedades Mecánicas del acero SAF 2507.

Las propiedades mecánicas que se presentan a continuación aplican bajo la condición de recocido y es de destacar que para tubos por encima de 20 mm de espesor de pared pueden presentarse valores ligeramente inferiores a los que se presentan aquí, aunque caso contrario ocurre para tuberías con espesores inferiores a los 4 mm, donde se garantizan las pruebas de de fuerza, Rp 0.2%.

A 20° C (68 °F) Tuberías con Máximo espesor de 20 mm (0,79 pulgadas)

Tabla 1. 2. Propiedades Mecánicas en sistema internacional de unidades.

Prueba de resistencia a la compresión Rp0.2^{a)}[MPa] mín.	Rp1.0^{a)} [MPa] mín.	Resistencia a la Tracción Rm [MPa]	Elong. A^{b)} [%] mín.	A2'' [%] mín.	Dureza HRC max.
550	640	800 – 1000	25	15	32

- a) Rp0.2 y Rp1.0 corresponden al 0.2% y 1.0% corresponden a las fuerza de compensación.
- b) Basado en $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ donde L_0 es la longitud inicial y S_0 la sección transversal inicial.

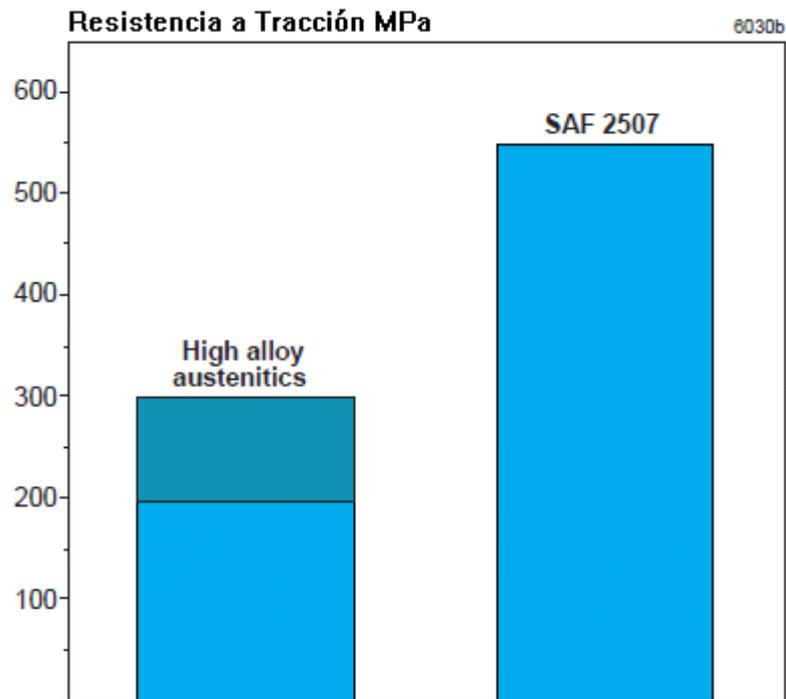


Figura 1. 6. Comparación de la elasticidad mínima, 0.2 % de compensación, entre un SAF 2507 y un acero Austenítico de alto grado. Condición: Recocido. Tomado de Material Datasheet del SAF 2507.

1.4.3 Temperatura

El comportamiento del SAF 2507 a altas temperaturas (superiores a 250 °C) por periodos prolongados de tiempo, se refleja en la disminución de la resistencia al impacto. Es notorio destacar que esto no afecta necesariamente el comportamiento del material durante su funcionamiento. Un ejemplo es el dado en los tubos usados en los intercambiadores de calor, donde las temperaturas son muy altas y no se presentan problemas.

A 20° C (68 °F) Tuberías con Máximo espesor de 20 mm (0,79 pulgadas)

Tabla 1. 3. Comportamiento de las propiedades mecánicas según temperatura, en unidades de sistema internacional.

Temperatura [°C]	Prueba de Resistencia Rp0.2 [MPa] min.	Rp1.0 [MPa] min.	Resistencia a la Tracción Rm [MPa] min.
100	480	530	710
150	445	530	710
200	420	450	665
250	405	435	650
300	395	425	645
350	395	425	645
400	395	425	645

1.4.4 Resistencia al Impacto

El acero SAF 2507 posee una alta resistencia al impacto .La temperatura de transición de dúctil a frágil se encuentra por debajo de los -50 °C, y cuando el acero esta soldado también presenta las misma características positivas de resistencia aunque los valores inferiores a los que presenta el material base. Si la soldadura es realizada con una soldadura de arco protegida por gas, se presenta que el material soporta energías de impacto del orden de 27J (20 pies libras) a una temperatura del orden de los -50°C (-58 °F)

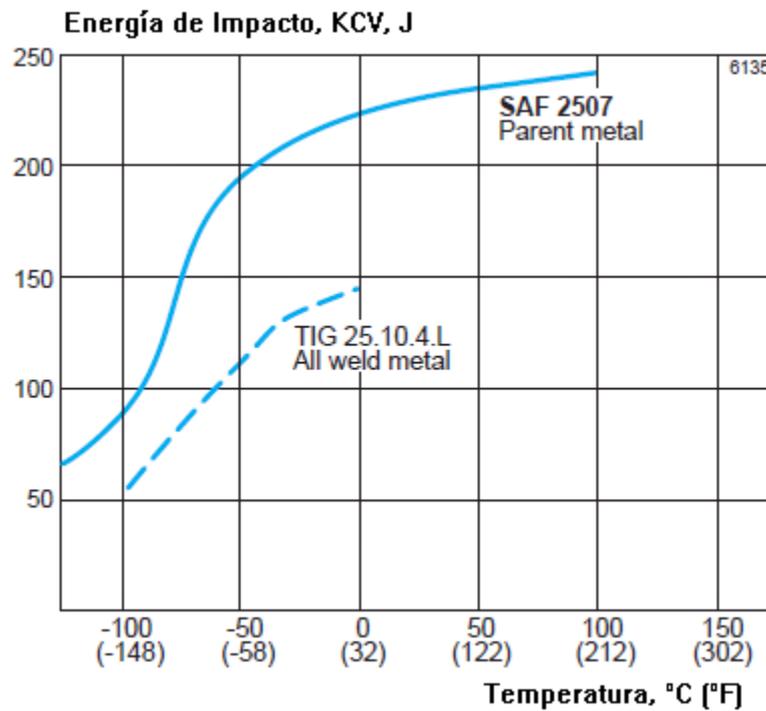


Figura 1. 7. Curva de resistencia al impacto de un tubo de 260x12 mm extruido y recocido a una Temperatura de 1075°C, hecho de acero SAF 2507. Tomado de Material Datasheet del SAF 2507.

1.4.5 Expansión Térmica

El acero SAF 2507 tiene un coeficiente de expansión térmica cercano a la de un acero al carbono. Esto otorga a SAF 2507 ventajas de diseño para los aceros inoxidable Auténticos sobre equipos que se encuentren compuestos por aceros inoxidables comunes y aceros al carbono. El coeficiente de expansión térmica se relaciona con la resistencia de los enlaces atómicos, cuando aumenta su energía térmica y comienzan a vibrar, obteniendo un comportamiento de aumento del radio atómico. Esto ocasiona un aumento de la distancia promedio entre átomos y en general incremento en las dimensiones del material.

Tabla 1. 4. Coeficientes de expansión térmica de aceros al SAF 2507, aceros al carbono y AISI 316L

Unidades métricas $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Temperatura, $^\circ\text{C}$	30-100	30-200	30-300	30-400
SAF 2507	13.5	14.0	14.0	14.5
Carbon steel	12.5	13.0	13.5	14.0
AISI 316L	16.5	17.0	17.5	18.0

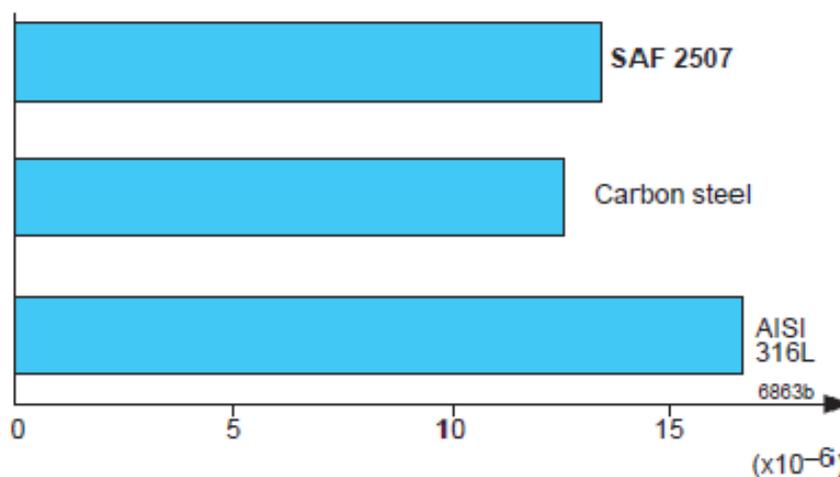


Figura 1. 8. Coeficientes de expansión térmica de aceros al SAF 2507, aceros al carbono y AISI 316L para un rango de 30 – 100 $^\circ\text{C}$ de Temperatura.

MODULO DE ELASTISIDAD (10^3)

En la tabla 1.5. Se presenta para cada valor de temperatura el modulo de elasticidad que posee el SAF 2507. Se puede observar que para un intervalo de temperatura que oscila 20 y 300 $^\circ\text{C}$, el módulo de elasticidad varía sólo en 20GPa lo cual es de gran relevancia en los intercambiadores de calor por los cambios de temperatura que experimenta.

Tabla 1. 5. Modulo de Elasticidad de un Sandvik SAF 2507 a diferentes temperaturas.

Temperatura, °C	MPa
20	200
100	194
200	186
300	180

1.4.6 Resistencia a la corrosión

El SAF 2507 es altamente resistente a la corrosión provocada por ácidos orgánicos y ácidos contaminados. Por ejemplo: Acido fórmico y acético (Ver figuras 1.9 y 1.10). Los resultados de los ensayos de corrosión aplicados al SAF 2507 y a diferentes aceros inoxidable, atacados por un ácido acético contaminado con cloruros, que con frecuencia se presenta en los procesos prácticos. En las figuras 1.11 y 1.12 se muestran los resultados de ensayos bajo estas condiciones a diferentes materiales.

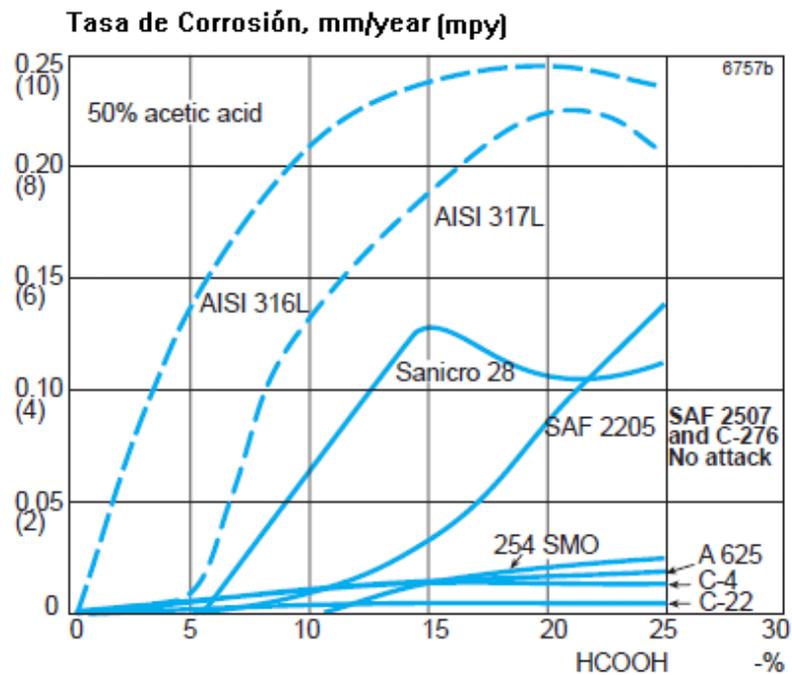


Figura 1. 9. Velocidad de Corrosión de diferentes aleaciones, atacada por una mezcla de 50% de ácido acético y proporciones variables de ácido fórmico. Duración de la prueba 1+3+3 días.

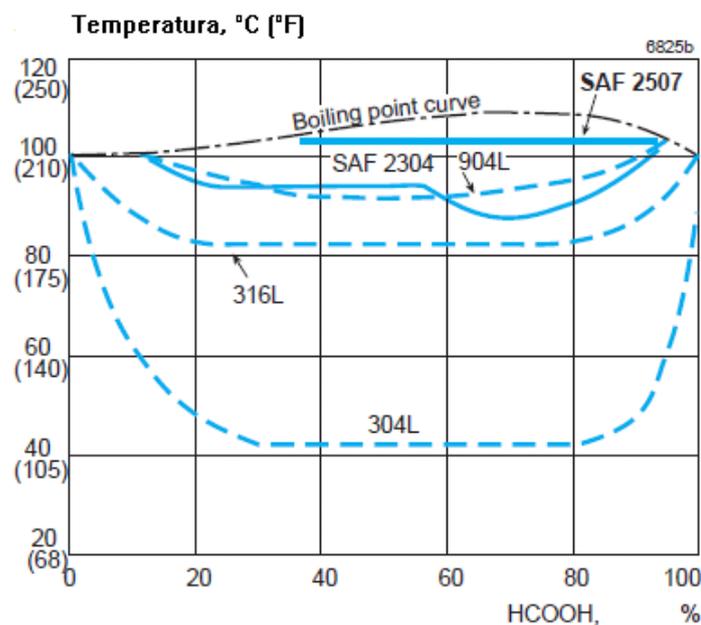


Figura 1. 10. Diagrama de Isocorrosión provocada por ácido fórmico en forma gaseosa. La curva representa la velocidad de corrosión de 0,1 mm/año (4 mpy) en un ensayo de estancamiento.

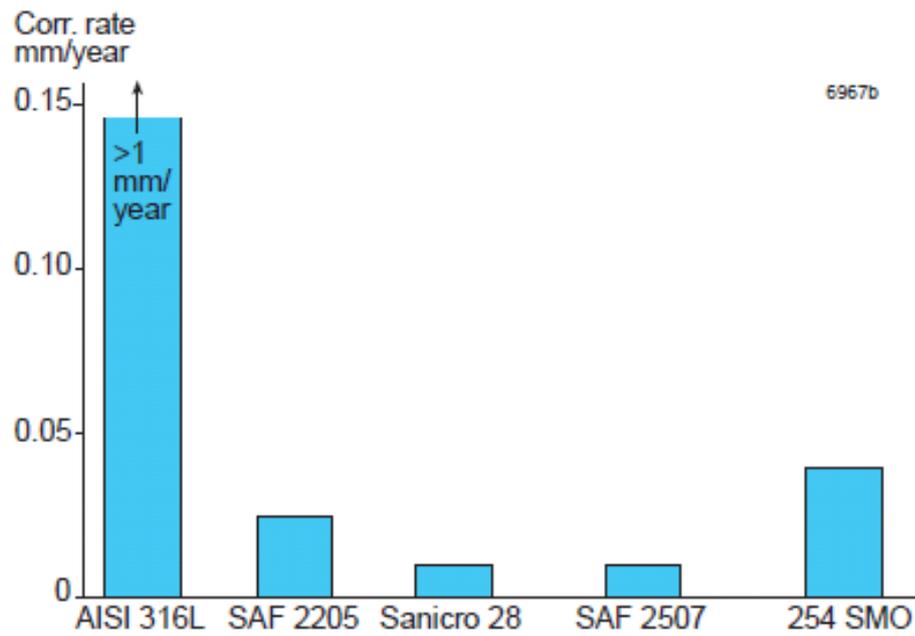


Figura 1. 11. Velocidad de Corrosión de diferentes aleaciones atacadas por una solución gaseosa de 80% ácido acético con 2000 ppm de cloruro a 90°C

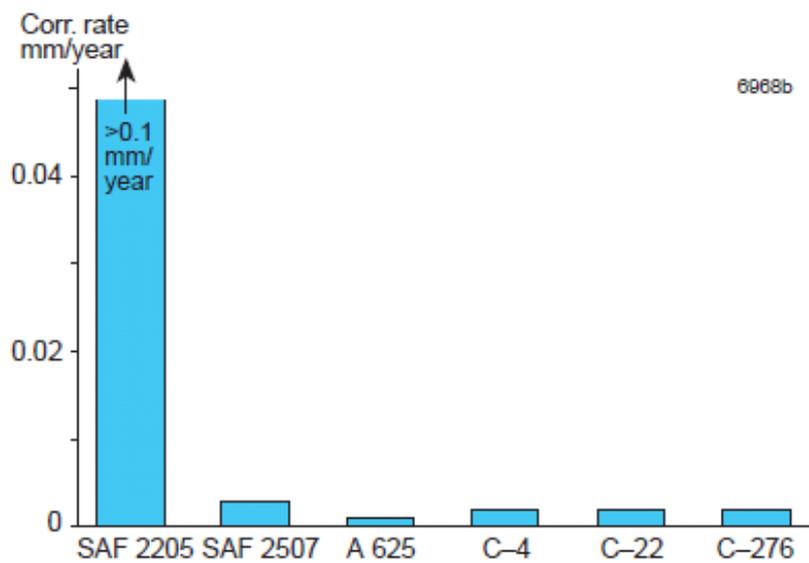


Figura 1. 12. Velocidad de Corrosión de diferentes aleaciones atacadas por una solución de ácido acético concentrado con 200ppm de cloruro

Experiencias prácticas han revelado que el SAF 2507 cuando es atacado corrosivamente por ácidos orgánicos, como los que se presentan por ejemplo en plantas de ácido tereftálico, que esta aleación es muy resistente a este tipo de ambiente, lo que conlleva a considerar a este material como alternativa competitiva con aceros inoxidable Austeníticos y base níquel. Por otro lado se puede comentar que esta misma resistencia se da cuando el SAF 2507 es corroído por ácidos inorgánicos, incluso se han dado casos en donde el comportamiento es mejor que el que puede demostrar un acero inoxidable Austenítico de alta aleación. Las figuras 1.13 a la 1.15, muestran diagramas de isocorrosión para el ácido sulfúrico, ácido sulfúrico contaminado con 2000 ppm de iones de cloruro y ácido clorhídrico, respectivamente.

La resistencia a las picaduras de un acero inoxidable está determinada principalmente por el contenido de cromo, molibdeno y nitrógeno. Un índice para comparar la resistencia a la picadura en entornos de cloruro es el número PRE (Picaduras Resistencia Equivalente). El PRE se define como, en porcentaje de peso:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N}$$

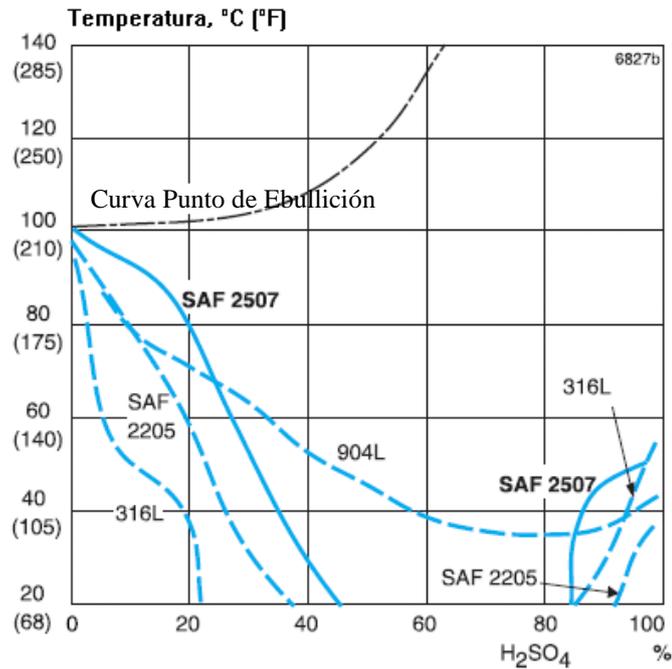


Figura 1. 13. Diagrama Isocorrosión en forma natural del ácido sulfúrico aireado. La curva representa una velocidad de corrosión de 0,1 mm/ año (4mpy) en solución de ensayo estancada.

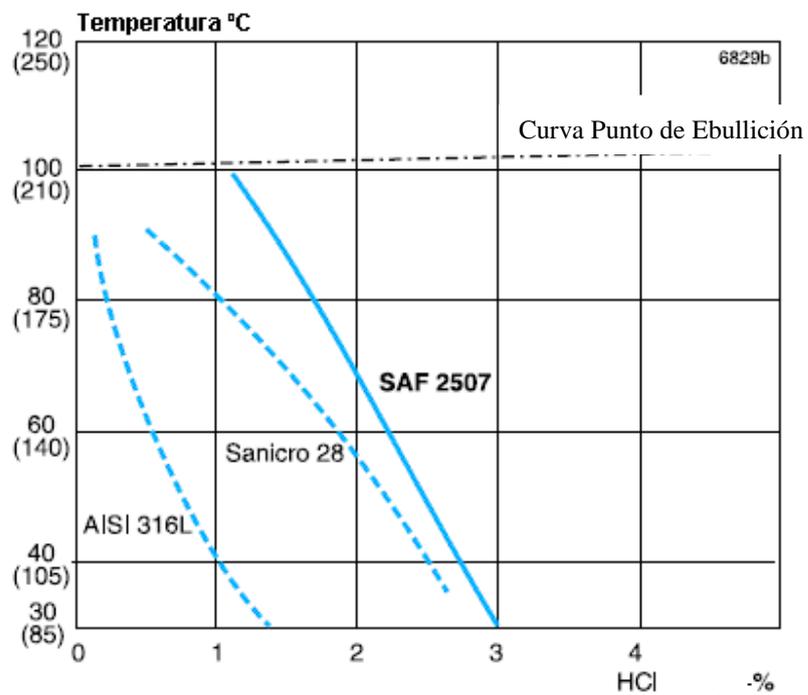


Figura 1. 14. Diagrama Isocorrosión, Velocidad de corrosión 0,1 mm/ año (4 mpy) de una solución que contiene ácido sulfúrico en su forma natural, con 2000 ppm de iones de cloruro.

Para los aceros inoxidables Dúplex resistentes a las picaduras por corrosión, dependen del valor de PRE tanto en la fase Ferrítica como en la fase Autenítica, por lo que la fase con el menor valor de PRE será el valor de resistencia a picaduras por corrosión que tendrá el material. El SAF 2507 tiene un valor PRE igual en ambas fases, gracias a un cuidadoso equilibrio en los elementos que componen a este acero. El valor mínimo de PRE que posee el SAF 2507 es de 41, siendo este un valor significativamente alto en comparación a los que presentan otros aceros inoxidables dúplex, como por ejemplo los del tipo 25 Cr, que no son “Súper Dúplex. Un ejemplo de estos aceros son los UNS S31260 25 Cr 3 Mo 0.2N, los cuales tienen un valor mínimo de PRE igual a 33.

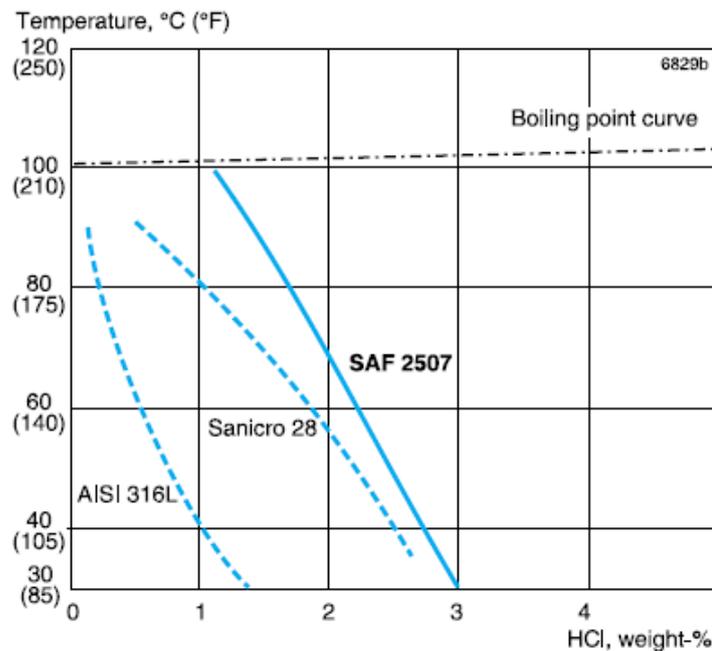


Figura 1. 15. Diagrama Isocorrosión del ácido clorhídrico en forma gaseosa. La curva representa una velocidad de corrosión de 0,1 mm/ año (4 mpy), en solución de ensayo estancada.

Uno de los ensayos donde se muestran las picaduras y grietas más graves que genera la corrosión a los aceros inoxidables es el que se realiza bajo la norma ASTM G48, donde el material se expone a un ambiente corrosivo, donde el agente atacante es 6% de FeCl₃. Una prueba similar es la ASTM G48 PrA, que

consiste en someter la muestra al químico por un periodo de 24 horas hasta que se detectan hoyos en el material y pérdida de peso de mismo (>5mg), de lo contrario se aumenta la temperatura en 5°C (9°F) hasta que se presenten las características antes mencionadas. La figura 1.16, muestra los resultados de esta prueba cuando al material se le generaron picaduras críticas (CPT) y formación crítica de grietas (CCT) ambas fallas bajo controles de temperatura.

Otra prueba o ensayo que se le aplican a los aceros inoxidable para estudiar la corrosión es la potencioestática con soluciones que poseen diferentes grados de concentración de cloro. La figura 1.17 expone resultados de pruebas aplicando este método, mientras que la figura 1.18 revela el efecto del aumento de acidez en este tipo de ensayos. En ambos casos el potencial aplicado es de 600mV, un valor muy elevado en comparación con los se podrían presentar en aguas de mar natural no cloradas.

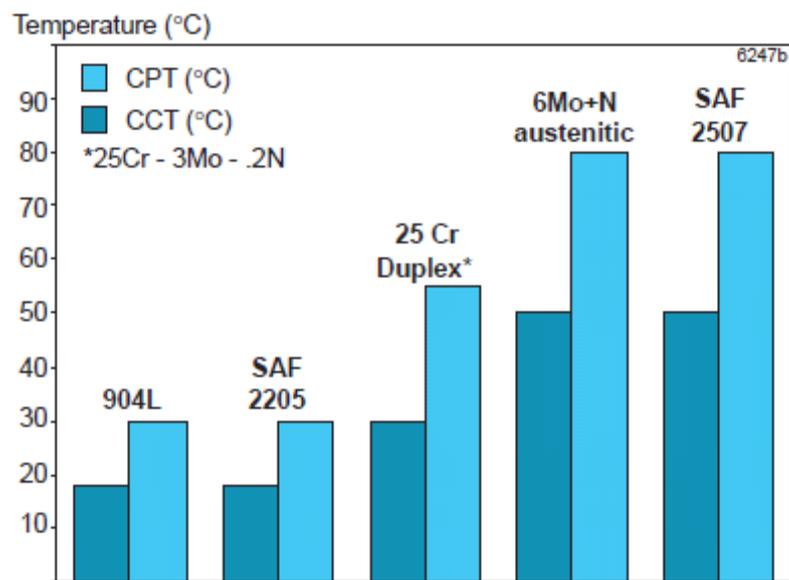


Figura 1. 16. Grafica donde se muestran los resultados de un ensayo ASTM G48, bajo las condiciones de 6% FeCl3 y 24 horas de duración.

Analizando la figura anterior se destaca que la dispersión para el SAF 2507 y el 6Mo+N muestra que ambos materiales poseen una resistencia a la picaduras similar. Sumado a esto se aprecian los valores de CPT.

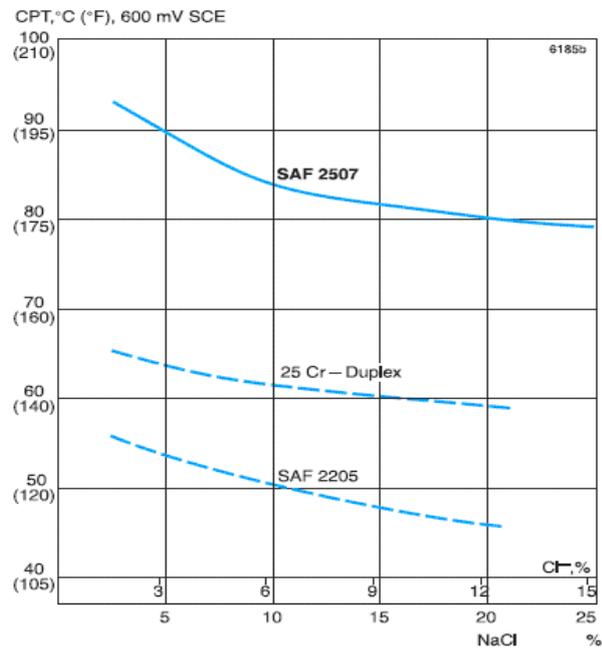


Figura 1. 17. Formación de picaduras críticas bajo concentraciones de cloruro de sodio variables, de 3 a 25%. Potencioestática a 600 mV y superficie base, tratada con papel de lija de 600.

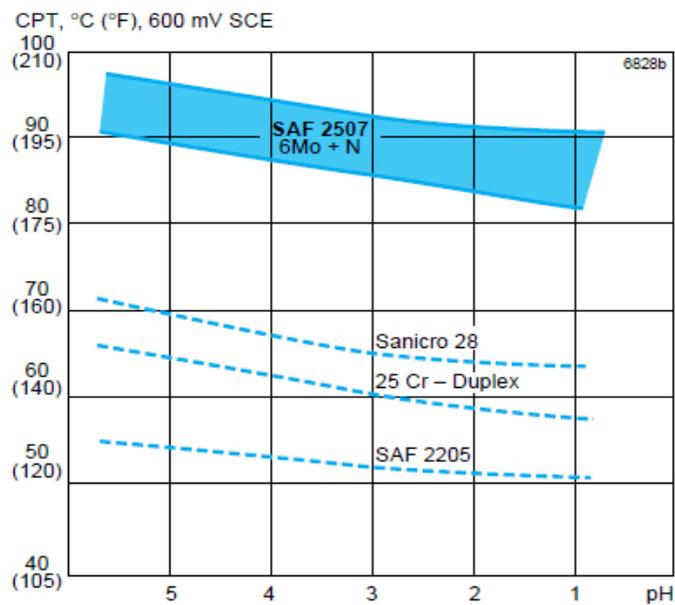


Figura 1. 18. Formación de picaduras críticas bajo concentraciones de 3% de cloruro de sodio y distintos PH. Potencioestática a 600 mV y superficie base, tratada con papel de lija de 600.

La resistencia a la corrosión del SAF 2507 en soluciones oxidantes de cloruro, tales como las llamadas “Green Death” (1% FeCl₃ + 1% CuCl₂ + 11% H₂SO₄ + 1.2% HCl) y “Yellow Death” (0.1% Fe₂ (SO₄)₃ + 4% NaCl + 0.01 M HCl), se reflejan en la formación de picaduras critica bajo influencia de la temperaturas (CPT). La tabla que a continuación se presenta muestra los valores de CPT para diferentes aleaciones. Las pruebas han permitido establecer una clasificación de las aleaciones para su implementación en la elaboración de tubos de recalentadores en los sistemas de gas de combustión de desulfuración.

Tabla 1. 6. CPT a diferente soluciones oxidantes.

Aleación	CPT [°C]	
	Green Death	Yellow Death
Sandvik SAF 2507	72.5	>90
6Mo+N	70	>90
UNS N06625	67.5	>90
AISI 316	<25	20

El SAF 2507 tiene una excelente resistencia a la corrosión cuando se somete a bajos esfuerzos y a soluciones de cloruro. En la figura 1.19 se ilustra el comportamiento de este acero inoxidable, a altas temperaturas bajo las condiciones mencionadas. Se puede apreciar que antes de 1000 ppm de Cl⁻/300°C y 1000 ppm Cl⁻/250°, no se presentan agrietamientos. Una probeta tipo sifón, elaborada de SAF 2507, expuesta por 1000 horas en salmuera caliente (108°, 25 % de NaCl) no presentó fisuras en su superficie.

La tensión umbral del SAF 2507 a 40% en solución CaCl₂ ,100°C y acidificada a pH= 6,5, es de 90% superior a la de la fuerza de tracción del metal, tanto cuando el metal es base y cuando esta soldado. La figura 1.20 que a continuación se presenta, muestra la superioridad de la fuerza de tracción, haciendo una comparación con otro acero de tipo SAF 2205, en el cual sucede lo contrario.

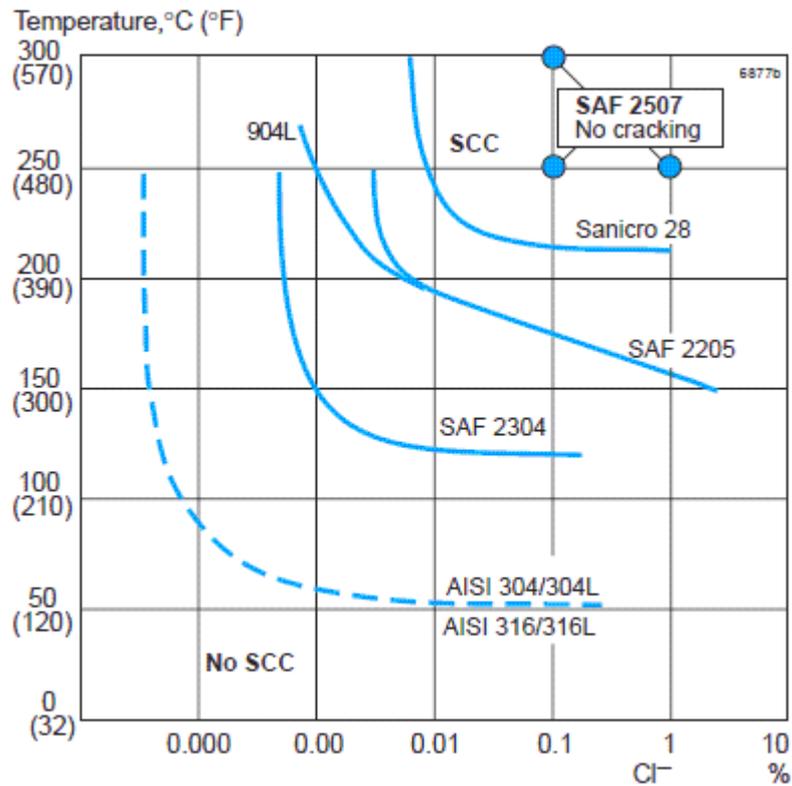


Figura 1. 19. SCC Resistencia a la oxidación (abt 8 ppm) en solución neutra de cloruro. Ensayo realizado en 1000 horas con tensiones equivalentes a las pruebas de temperatura.

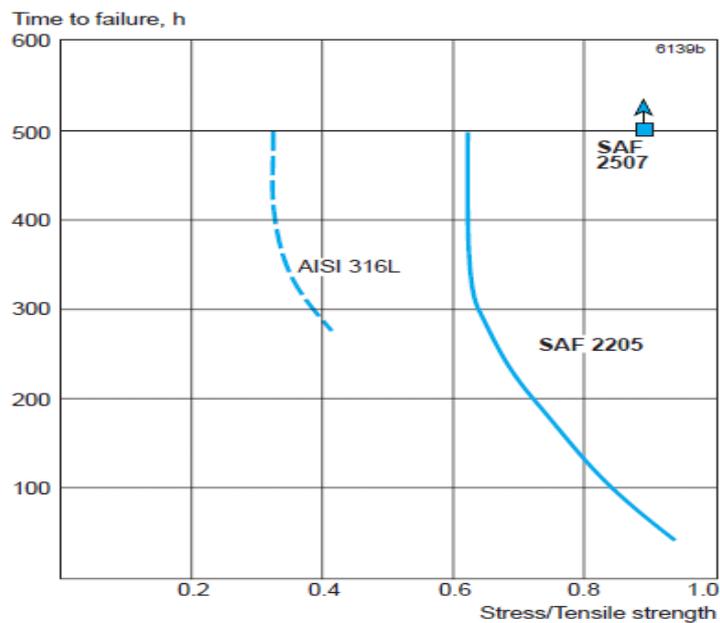


Figura 1. 20. Resultados de las pruebas de SCC con carga constante en 40% de CaCl₂, pH= 1,5, a 100°C, ensayado con gas.

La tensión umbral para el metal base como para las juntas soldadas de SAF 2507 en la ebullición del 45% de $MgCl_2$, $155^\circ C$ (ASTM G36) es aproximadamente el 50% del límite de elasticidad. La figura 1.21 ilustra los resultados de las pruebas de SCC a temperatura ambiente en soluciones NACE (5% de cloruro de sodio y 0,5% de ácido acético saturada de sulfuro de hidrógeno). No se evidenció agrietamiento independientemente de la tensión aplicada en el SAF 2507.

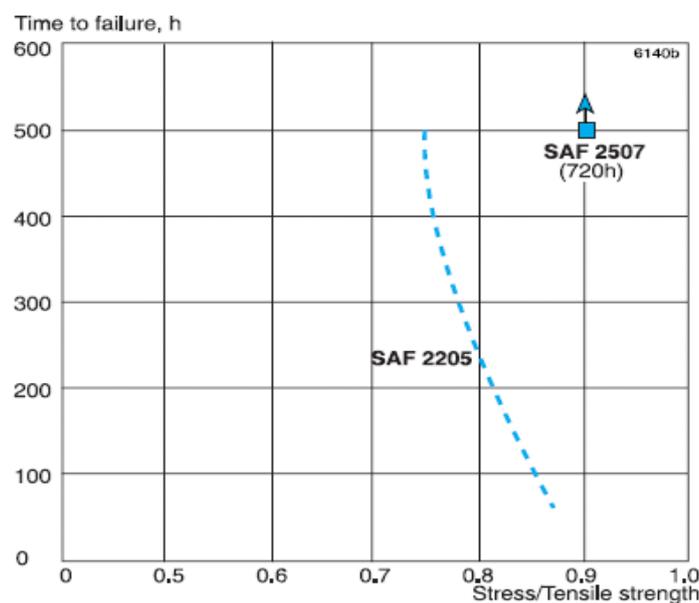


Figura 1. 21. SCC pruebas a carga constante en solución NACE y temperatura ambiente.

1.4.7 Corrosión Intergranular

SAF 2507 es miembro de la familia de aceros inoxidable dúplex modernos, cuya composición química es balanceada, donde se da la reforma rápida de la Austenita a altas temperaturas. Esto da lugar a una microestructura que confiere el material una buena resistencia a la corrosión intergranular, de acuerdo con la norma ASTM A262 práctica E (Strauss Test).

1.4.8 Corrosión Erosión

Las propiedades mecánicas combinadas con la resistencia a la corrosión dan al SAF 2507 una buena resistencia a la corrosión erosión. Las pruebas han demostrado que SAF 2507 tiene una resistencia a la corrosión erosión mejor que la correspondiente a los aceros inoxidable austeníticos. La figura 1.22 a continuación muestra la tasa de pérdida de masa relativa de los dúplex. SAF 2507, SAF 2205 y un tipo Austenítico 6Mo + N expuestos a agua de mar sintética (ASTM D-1141) que contiene arena de sílice 0.025-0.25% a una velocidad de 8.9-29.3 m / s (promedio de todas las pruebas se muestra).

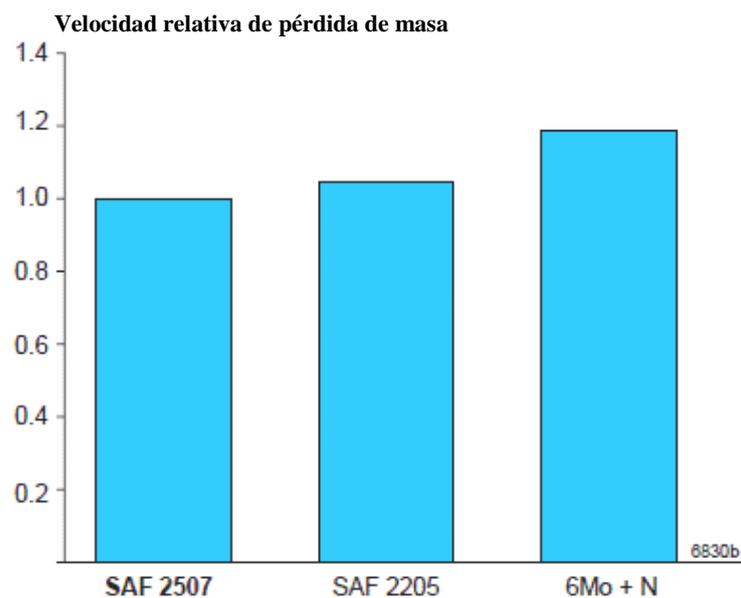


Figura 1. 22. Tasa de pérdida de masa relativa después de las pruebas de resistencia contra a la corrosión erosión

1.5 Aplicaciones de acero SAF 2507

SAF 2507 es un dúplex de acero inoxidable especialmente diseñado para el servicio en agresivos ambientes que contienen cloruros. Las aplicaciones típicas son:

- En la industria petrolera y de gas, en entornos que contienen cloruro como son por ejemplo los ambientes en presencia de agua de mar.
- En tubos para intercambiadores de calor en refinerías, industrias químicas, industrias de proceso, y otros, que emplean el agua de mar como refrigerante
- En plantas Desalinización. Recipientes a presión para unidades de ósmosis inversa
- En los pozos geotérmicos. Intercambiadores de calor en la explotación geotérmica, los sistemas expuestos a salmueras geotérmicas o de alta salinidad, tubos y carcasas.

Capítulo II
Procedimiento Experimental

Procedimiento Experimental

Con el fin de evaluar el comportamiento a la fatiga-corrosión de un acero SAF 2507 y determinar el verdadero daño causado por la corrosión como agente externo que eleva la posibilidad de falla por fatiga, se analizaron los resultados de diferentes ensayos, realizados con diversidad de probetas, con el objetivo de verificar la aptitud de este material durante su empleo.

2.1 Preparación de la muestra

La preparación de las muestras consistió en fabricar probetas extraídas de una barra de acero inoxidable dúplex SAF 2507, suministrada por la empresa Sandvik con su respectiva certificación (Anexo 1), cuyas dimensiones eran de 1000 mm de longitud y 30 mm de diámetro. El primer paso para la extracción de las probetas, se llevo a cabo a través de un corte de la barra con una sierra “vaivén” que se encuentra en los galpones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela. Se obtuvo en ese momento un trozo de barra de 60 mm de longitud, que posteriormente sería sometido a una cortadora marca Buehler, modelo D-32457 (ver figura 2.1), para hacer 2 probetas con dimensiones de 15 mm de longitud cuyas dimensiones son las establecidas para realizar los ensayos de dureza y metalografía según la norma, para realizar el corte se utilizo lubricante, ya que durante el proceso de corte se alcanzan temperaturas considerables que pueden generar cambios en las propiedades microestructurales del material producto de la actividad térmica.



Figura 2. 1. Cortadora Buehler. Modelo D-32457.

Una vez elaboradas las probetas, se procedió a desbastar una cara de cada una de las probetas, lo que se conoce como pulido metalografico, abarcando las etapas iniciales e intermedias, mediante papel abrasivo de Carburo de Silicio, desde el que tiene granos más gruesos hasta el papel que tiene granos más finos de la serie 80, 120, 240, 320, 400, 600, 1200 y 1500, colocados sobre una devastadora manual, marca students (ver Figura 2.2)



Figura 2. 2. Desbastadora Marca students.

Posterior al devastado con el papel de 1500, se procedió a pulir las probetas con paños colocados en platos giratorios humedecidos con alúmina $0,03\mu$, este pulido se realizo con un equipo Marca Buehler, modelo Meta3000. (Ver Figura 2.3) hasta obtener un acabado superficial tipo espejo.



Figura 2. 3. Equipo de pulido Mecánico Marca Buehler.

2.2 Microscopía Óptica

La finalidad de este ensayo es proporcionar información de las características estructurales del material, especialmente la estructura de grano.

Luego de que las probetas fueron pulidas hasta un acabo tipo espejo se procedió a realizarle a una de las probetas un ataque con el reactivo Kalling's N° 2, cuya composición es 100 ml de HCl, 100 ml de etanol y 5 g de CuCl. El ataque se produjo por inmersión de la cara pulida en el reactivo, que se encontraba en una capsula de laboratorio, por un periodo de 2 segundos, para luego ser enjuagada con abundante agua y posteriormente rociada con alcohol isopropilico. El secado de la muestra se realizo con aire caliente.

Por último se realizó el estudio microscópico donde se pudo observar la estructura del material. La microscopia óptica se llevó a cado en un microscopio óptico marca Buehler, modelo Viewmet. Se tomaron varias fotomicrografías para garantizar un correcto análisis microestructural, de las cuales reportamos dos imágenes, por ser las que revelan de forma más clara las fases.

2.3 Ensayo de Dureza

Para las mediciones y carga fue utilizado el cálculo de la dureza, el cual se realizó a través de la aplicación de la ecuación:

$$HF = \frac{2 \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2} F}{dp^2}$$

En donde el término $\frac{2 \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2}}{dp^2}$ se corresponde a la geometría de la huella.

2.3.1 Ensayo Macro dureza Vickers

El ensayo de macro indentación estática se desarrolló en un equipo marca Buehler, Modelo FV-700, el cual se puede visualizar en la Figura 2.4. El mismo utiliza un penetrador de diamante en forma de pirámide, con base cuadrada, con ángulo de 136° entre caras. El ensayo se desarrolló en una probeta cuyas características son similares a las empleadas en el revelado de la microestructura. La carga aplicada fue de 10 Kg por un periodo de 15 segundos en cada indentación. La forma del barrido se realizó en forma de “L” como se ilustra en la Figura 2.5 dejándose una separación entre cada huella de aproximadamente 2,5 milímetros.



Figura 2. 4. Vickers Hardness Tester, Marca Buehler, Modelo FV-700

Con esta forma de barrido se verifica la existencia o no de heterogeneidad mecánica, las cuales pueden estar asociadas tanto al proceso de obtención del espécimen como de gradiente de concentración en algún elemento aleante.

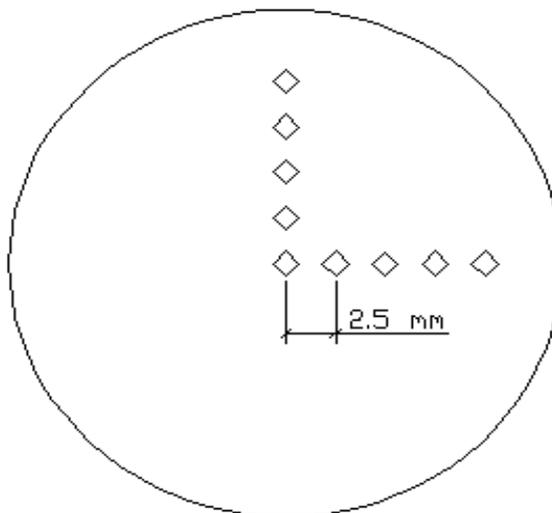


Figura 2. 5. Forma del Barrido en el ensayo de Macro dureza.

2.3.2 Ensayo Microdureza Vickers

Una vez verificado el comportamiento macroscópico, se procedió a verificar a nivel micro la posible influencia de los microcontituyentes, en la distribución de las propiedades del sólido. El ensayo de microdureza vickers se realizo en un equipo marca Buehler Modelo 1105, ilustrado en la figura 2.6.



Figura 2. 6. Microdurometro Vickers Marca Buehler, Modelo 1105

Se realizaron 24 mediciones, cuya carga aplicada fue de 10 gr hasta 1 Kg. Pasando por 50, 100, 300 y 500 gramos. Realizando un barrido de cuatro mediciones para cada nivel de carga. Tal como se ilustra en la figura 2.7.

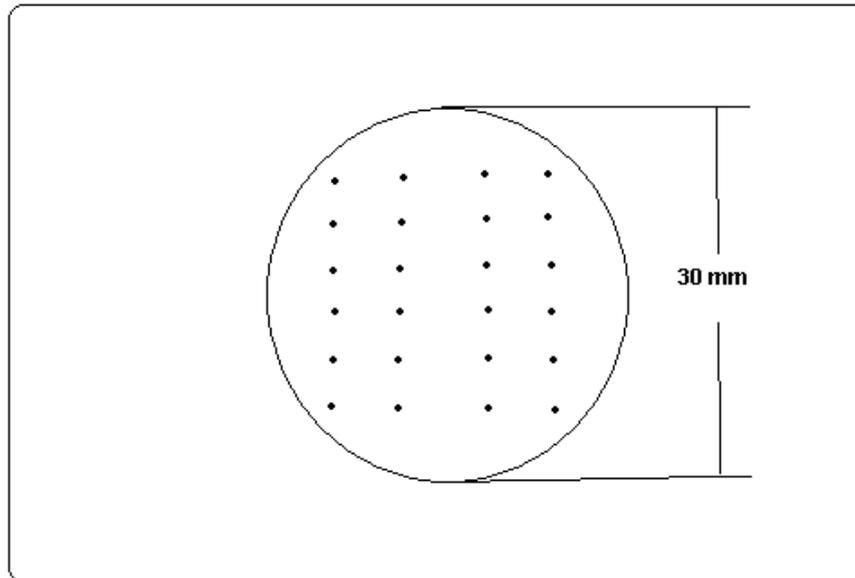


Figura 2. 7. Distribución De Las Indentaciones En El Ensayo De Microdureza.

Las indentaciones se realizaron con esta forma de barrido para así analizar toda la superficie del material, cada indentación se realizó a una separación de 5 veces el tamaño de la huella, según lo recomendado por la norma, y de esta forma garantizar que no haya endurecimiento por deformación y el ensayo sea exitoso.

2.4 Elaboración de las Probetas de Tracción y de Fatiga-Corrosión

El mecanizado de las probetas de tracción y de fatiga-corrosión se realizó en tornos de control numérico, de acuerdo a las normas ASTM E606 y ASTM A-370 respectivamente, tal como se ilustra en las Figura 2.8 y Figura 2.9.

El diámetro de los hombros de las probetas de tracción, es de 12,7 mm, estas probetas se elaboraron de las mismas barras de acero utilizadas para la fabricación de las probetas de fatiga. Además, la longitud de las probetas de tracción es de 120 mm, dimensión condicionada por el equipo de ensayos mecánicos en el cual es posible ensayar probetas con esta dimensión como mínimo, sin necesidad de utilizar extensores en las mordazas.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de tracción, estas deben cumplir con las recomendaciones sugeridas por la norma ASTM A-370. Dichas dimensiones son: diámetro de la sección de ensayo (d) igual a $6,25 \pm 0,12$ mm, longitud de la sección de ensayo de 32 mm y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta R igual a 5 mm. Por otra parte, de acuerdo a lo sugerido en la misma norma, para reportar confiablemente las propiedades estáticas, se requiere ensayar como mínimo 3 probetas de tracción.

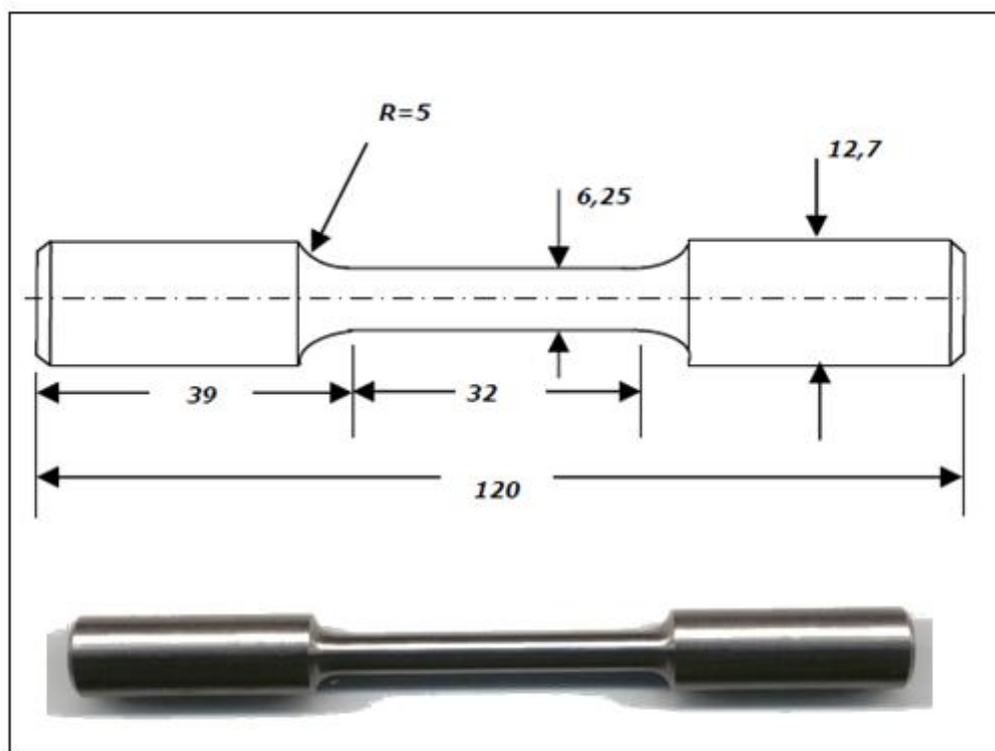


Figura 2. 8. Dimensiones De Las Probetas De Tracción

Una vez fabricadas las probetas se procedió a dar el acabado superficial, para ello se procedió al lijado y pulido de la sección de ensayo de las probetas el cual fue realizado en un torno a baja velocidad en dirección longitudinal en relación al eje de la probeta, con el fin de producir un lijado diagonal. De esta manera, se evita la presencia de entallas circunferenciales las cuales podrían ser la fuente de inicio de la grietas de fatiga.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga de radio continuo, estas son las siguientes: diámetro menor de la sección de ensayo (d_o) aproximadamente igual a 6,35 mm, radio continuo de la sección de ensayo de la probeta (R) igual a 58,74 mm.

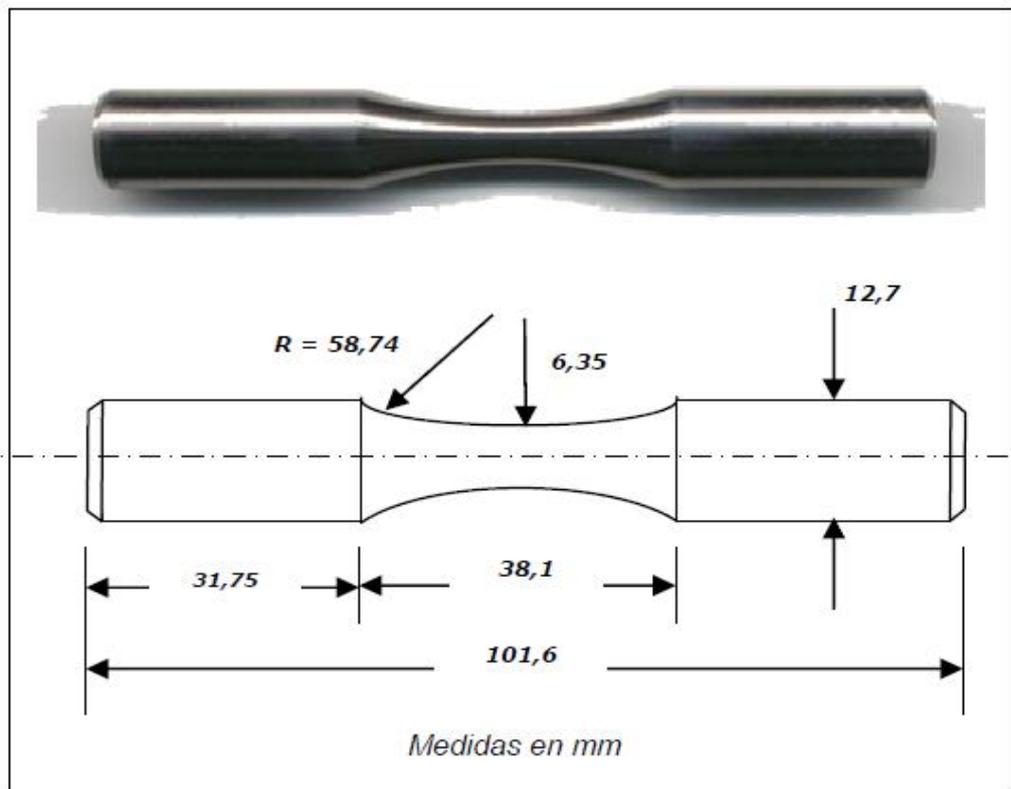


Figura 2. 9. Dimensiones de las probetas de fatiga.

2.5 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas, claro esta no tan pequeña como para ser consideradas un ensayo de creep.

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos-plásticos:

- **Módulo de elasticidad o Módulo de Young**, que cuantifica la proporcionalidad elástico-plástico.
- **Límite de fluencia o límite elástico aparente**, valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- **Resistencia a la tracción**, carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- **Alargamiento de rotura**: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- **Estricción**: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

El ensayo de tracción uniaxial se realizó en el equipo de Ensayo Universal de tracción marca LOSENHAUSEN modelo Steuerpult Z – UPH figura 2.10.

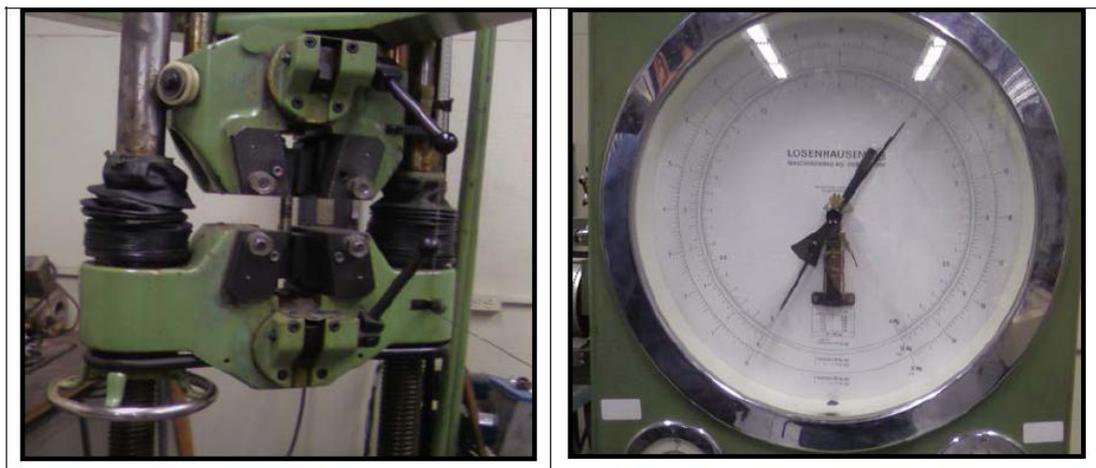


Figura 2. 10. Equipo Universal de Ensayo de Tracción, Marca LOSENHAUSEN.

El sistema aplica cargas a las probetas mediante un actuador hidráulico en el transcurso del ensayo. Previo al montaje en la máquina de ensayo, a las probetas se les midió el diámetro con un vernier digital. Los valores obtenidos para cada uno de los ensayos corresponden al alargamiento de la probeta (Δl_i) y la carga aplicada (F_i). Se hicieron las mediciones del diámetro final de las probetas para calcular entonces el área final e inicial de la sección transversal, a fin de estimar el porcentaje de elongación.

2.5.1 Obtención de la curva Esfuerzo-Deformación Real.

Con los valores obtenidos de (Δl_i) para cada estado de carga correspondiente (F_i), se generó la curva esfuerzo- deformación real (σ vs ϵ) a partir de la curva esfuerzo- deformación ingenieril (S vs e).

Donde:

$$S = F / A_0 \text{ Esfuerzo ingenieril.}$$

$$e = (\Delta l_i) / l_0 \text{ Deformación Ingenieril.}$$

$$\sigma = S (1 + e) \text{ Esfuerzo real.}$$

$$\epsilon = \text{Ln} (1 + e) \text{ Deformación real.}$$

Para cada probeta se obtuvo entonces los valores de:

- Esfuerzo de fluencia σ_y a 0.2 % de la deformación total.
- Resistencia a la tracción (S_u).
- Esfuerzo real a carga máxima (σ_u).

Con la finalidad de eliminar el efecto de la deformación elástica de los componentes de la máquina involucrados en el sistema de carga, se procesaron los datos obtenidos en cada ensayo aplicando una ecuación que corrige el alargamiento de la probeta, cuya fórmula es:

$$(\Delta L_i)_{\text{corregido}} = (\Delta L_i) - F_i \left[\frac{K_{\text{Teorico}} - K_{\text{Experimental}}}{K_{\text{Teorico}} * K_{\text{Experimental}}} \right]$$

Donde:

$(\Delta L_i)_{\text{Corregido}}$: Alargamiento de la probeta corregido por elemento de máquina [mm].

ΔL_i : Alargamiento de la probeta [mm].

F_i : Carga aplicada por el equipo [kN].

$K_{\text{Teórico}}$: Rigidez Teórica del Material de Ensayo [N/mm].

$K_{\text{Experimental}}$: Rigidez Experimental [N/mm]. Calculo a partir de los valores de carga y desplazamiento de la zona elástica.

A su vez:

$$K_{\text{Teorico}} = \left[\frac{A_o * E}{L_o} \right] \qquad K_{\text{Experimental}} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i}$$

Donde:

A_o : Área transversal inicial de la probeta.

E : Módulo de elasticidad (se empleo 110 GPa).

L_o : Longitud calibrada de la probeta.

Con los valores de deformación corregidos $(\Delta L_i)_{\text{Corregido}}$, se procedió a la construcción de las curvas de esfuerzo real-deformación real como ya se hizo mención. Por medio del manejo de datos y de la construcción de las curvas, se pudieron obtener las propiedades estáticas del material, entre las cuales se incluyen: esfuerzo de fluencia al 0.2%, esfuerzo real a carga máxima

2.6 Ensayo de Fatiga-Corrosión

A continuación se presenta los aspectos más relevantes en la fatiga de materiales y sus principales características, a manera de introducción para poder comprender lo desarrollado durante la presente investigación.

La fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual se produce la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas (fuerzas repetidas aplicadas sobre el material) ocurre y se produce ante cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la fractura. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad, pero la fuerza que hay que hacer para romperlo en una sola flexión es muy grande. La fatiga es una forma de rotura que sucede en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes (puentes, automóviles, aviones, etc.). Su principal peligro es que puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática, y aparecer sin previo aviso, causando roturas catastróficas. Es un fenómeno muy importante, ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también está presente en polímeros (plásticos, entre otros), y en cerámicas.

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aún en metales dúctiles, puesto que apenas hay deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo.

La falla por fatiga es un fenómeno complejo en el cual están involucrados muchos factores, tales como:

-El tipo de esfuerzo, los cuales son cíclicos o alternantes y que pueden ocurrir como resultado de rotación, flexión y vibraciones.

-Concentraciones de esfuerzos.

-Tensiones residuales.

-Estados de la superficie (lisa o rugosa)

-Cambios bruscos de temperatura.

-Microestructura.

-Presencia de grietas, poros, inclusiones internas o en la superficie del material.

-Condiciones ambientales.

2.6.1 Proceso de Rotura por Fatiga.

El proceso de rotura por fatiga se desarrolla a partir del inicio de la grieta y se continúa con su propagación y la rotura final.

1. **Inicio:** Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre nuclean sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión, dichas concentraciones son originadas por diseño o acabados en la superficie del material.
2. **Propagación:**

La propagación de la grieta se produce en varias etapas:

- **Etapa I:** una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y, en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.
- **Etapa II:** La velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera acelerada y en este punto la grieta deja de crecer en el eje del esfuerzo cizallante máximo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado.

3. Rotura: Al mismo tiempo que la grieta aumenta a través de la sección transversal, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura. Se alcanza una dimensión crítica de la grieta y se produce la rotura.

La región de una superficie de fractura que se formó durante la etapa II de propagación puede caracterizarse por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estriaciones de fatiga. Ambas indican la posición del extremo de la grieta en diferentes instantes y tienen el aspecto de crestas concéntricas que se expanden desde los puntos de iniciación. Las marcas de playa son macroscópicas y pueden verse a simple vista. Las marcas de playa y estriaciones no aparecen en roturas rápidas.

Los ensayos de fatiga-corrosión consiste en la agrietamiento de un metal como resultado de la acción combinada del medio corrosivo y carga repetida o alternante, el daño ocasionado es por lo general mayor que la suma de los daños que causa la corrosión o la fatiga si actúan por separado.

Los ensayos de fatiga-corrosión se realizaron en una máquina de flexión rotativa, diseñada para aplicar ciclos de carga de inversión completa, de flexión en voladizo en probetas de forma cilíndrica; el equipo incluye un contador de velocidad (RPM) para la determinación de los ciclos a falla y una barra calibrada con un contrapeso la cual se utiliza para aplicar el momento flector responsable de generar el esfuerzo al cual están sometidas las probetas durante el ensayo.

En la figura 2.11 se muestra la máquina de flexión rotativa la cual consta de las siguientes partes:

- Un contador de ciclos, que puede registrar desde 100 hasta 9.999.9900 ciclos.
- Un regulador de velocidad, que puede variar de 500 a 10.000 RPM.
- Una barra calibrada, con un contra peso que permite aplicar el momento flector desde 0 hasta 200 lbf-pulg (14 Kg-cm).

- Mordazas de un diámetro de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulg.
- Un interruptor de apagado automático.
- Una Bomba eléctrica, contenido de fluido corrosivo y una cámara de ensayo en la cual se genera la atmósfera agresiva.

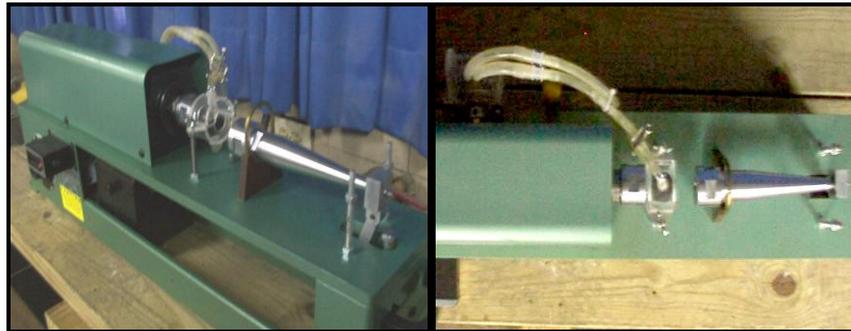


Figura 2. 11.. a) Máquina de Flexión Rotativa, con cámara de Corrosión; b) Vista Superior.

Para crear la atmósfera corrosiva durante el ensayo, la máquina está provista de una cámara independiente; el medio corrosivo es una solución salina preparada con un 3% de Cloruro de Sodio (NaCl). El rociado de dicha solución sobre la superficie de la probeta se realiza por medio de una boquilla de distribución fijada en la parte superior de dicha cámara de corrosión; la ubicación de la boquilla coincide aproximadamente con el diámetro mínimo de la probeta a ensayar, obteniendo de esta forma una humedad uniforme en la misma. Se trató de realizar todos los ensayos con un intervalo de una gota de solución por segundo; el flujo continuo de la solución se garantizó mediante el uso de una bomba eléctrica de desplazamiento positivo inmersa en un depósito para la succión del líquido y luego descarga, a pesar que el equipo dispone de una bomba centrífuga.

2.6.2 Cálculo del momento flector

El nivel de esfuerzo necesario para cada ensayo se aplica a través de una barra calibrada en función del momento flector. Esta barra calibrada va unida a un eje cónico que a su vez sostiene a la probeta en cada extremo.

Para calcular el momento flector aplicado a las probetas en cada nivel de esfuerzo se utiliza la ecuación que relaciona el momento flector con el esfuerzo aplicado:

$$S = \frac{(M * C)}{I} \quad \text{donde } M = \frac{(S * I)}{C}$$

M= Momento Flector.

S= Esfuerzo Aplicado.

C= Distancia desde el eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta.

C= D/2 donde D= diámetro de la probeta.

I= Momento de Inercia.

Para el caso de una barra de sección circular, se tiene que:

$$I = \frac{\pi * (D_o)^4}{64}$$

Sustituyendo se tiene que:

$$M = S * [\pi * (D_o)^4 / 64] / D/2 = S * \pi * D^3 / 32$$

$$M = 0,0982 * S * D^3 \text{ [Lbf-pulg]} \text{ Ecuación de momento de la máquina.}$$

La barra que aplica el momento esta calibrada en libras por pulgada, por lo tanto es necesario expresar el esfuerzo que está en MPa llevarlo a Lbf/pulg² y el diámetro en mm a pulgadas de tal manera que se obtenga el momento flector en las mismas unidades en que esta calibrada la barra de momento de la máquina de fatiga.

Se tiene que: $1 \text{ Pascal} = 1\text{N/m}^2 = 0,000145 \text{ Lbf/ pulg}^2$
 $1 \text{ MPa} = 145 \text{ Lbf/ pulg}^2$ y $1\text{mm} = 0,0394$

Haciendo las operaciones correspondientes se obtiene:

$$M=0.00087*S*[Lbf*pulg]$$

Donde S [MPa] y D [mm]

Introduciendo los valores de esfuerzo [MPa] correspondiente en cada nivel y el diámetro [mm] en la ecuación anterior obtenemos el valor de M, para luego proceder a montar la probeta en la máquina y realizar el ensayo de fatiga, cuidando todos los detalles en el montaje de la probeta, principalmente la vibración durante el ensayo.

2.6.3 Cálculo de la Curva S-N o de Wohler

Estas curvas se obtuvieron a través de una serie de ensayos donde las probetas del material se someten a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande (aproximadamente 2/3 de la resistencia estática a tracción). Se cuentan los ciclos hasta la rotura.

Los resultados se representan en un diagrama de tensión, S, frente al logaritmo del número N de ciclos hasta la rotura para cada una de las probetas.

El número de ciclos que dura una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión. N es el número de ciclos de tensión necesarios para producir la fractura completa de la probeta. El número de ciclos que necesita la propagación de la grieta depende de las dimensiones de la probeta. Los ensayos de fatiga a tensión a bajo ciclaje suelen realizarse a 10^7 ciclos y algunas veces, para materiales no ferrosos, se prolongan a $5 \cdot 10^8$ en algunos materiales. Por debajo del *límite de fatiga*, se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin romperse. La mayoría de los metales no férreos, como las aleaciones de aluminio, las de magnesio y las de cobre, tienen una curva de Wohler cuya pendiente disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos, aproximándose a una horizontal, pero sin llegar a serlo nunca. No tienen, por tanto, un verdadero límite de fatiga. En estos casos es práctica corriente caracterizar las propiedades

de fatiga del material expresando la resistencia a la fatiga para un número de ciclos convenido arbitrariamente, como 10^8 . El procedimiento usual para determinar una curva de Wohler consiste en ensayar la primera probeta a una tensión elevada, a la que es de esperar que se rompa después de un corto número de ciclos.

La curva inferior es representativa de materiales que no presentan límite de fatiga (caso aluminio) según corresponde el límite de resistencia a la fatiga.

A continuación se muestran dos curvas (figura 2.12) que buscan ilustrar la cantidad de ciclos que un material puede resistir sin que se produzca falla catastrófica, este número de ciclos representa la vida o resistencia a la fatiga del material sometido a ese nivel de esfuerzo.

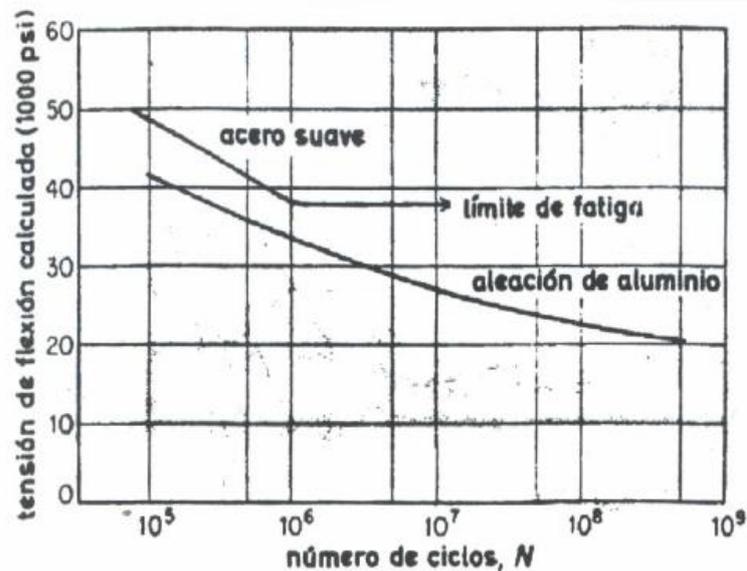


Figura 2. 12. Curva Wohler O Curva S-N.

2.6.4 Resistencia a la fatiga a través del modelo de Basquin.

Para obtener las ecuaciones de Basquin se ensayaron 4 probetas para cada nivel de esfuerzo, un total de 16 probetas. Los datos de fatiga presentados por

Wohler se hicieron en una curva log S -log N; donde S representa la amplitud del esfuerzo y N el número de ciclos a fallar. En forma resumida se puede expresar que el aporte de Basquin consistió en graficar los puntos con los que se observó la curva de Wohler en un papel log-log. Allí se dio cuenta que el resultado se ajustaba bastante bien a una recta para la región de alto ciclaje. De este modo se establece la ley potencial de la fatiga.

Usando los esfuerzos reales, la amplitud de esfuerzo puede ser descrita como la resistencia a la fatiga o vida a fatiga por la relación:

$$S = S_f (2N_f)^b$$

$\Delta S/2 = S$ (amplitud de esfuerzo totalmente invertido).

S = Amplitud real de esfuerzo o resistencia a la fatiga del material.

$2N_f$ = Reversos a falla (1 ciclo = 2 reversos).

S_f = Coeficiente de resistencia a la fatiga.

b = Exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin tanto S_f como b son propiedades del material.

La ecuación de Basquin también puede ser representada por una ecuación potencial simple como:

$$S = S_f (2N_f)^b$$

Una vez obtenidos estos resultados se procedió a realizar el ensayo correspondiente de microscopia electrónica de barrido, con la finalidad de observar de manera clara y amplificada, la estructura de la zona de fractura correspondiente a los ensayos de tracción y fatiga-corrosión.

2.7 Microscopia Electrónica de Barrido

Se seleccionaron un total de 3 probetas, las cuales fueron, la que fallo a más bajo esfuerzo (386 MPa) y a más alto esfuerzo (444 MPa), adicionalmente una probeta que durante el ensayo de fatiga alcanzo la vida infinita, la finalidad de estudiar esta ultima probeta fue observar cómo afecto la fatiga en la estructura

interna del material, así como también la disminución en la resistencia a la fluencia del material.

Este análisis se realizó con la finalidad de estudiar los mecanismos de fatiga y corrosión involucrados en la falla, así como también la nucleación y crecimiento de la grieta.

2.7.1 Preparación de la muestra:

La preparación de las muestras se realizó utilizando muestras que comprendían la superficie de fractura.

Las cuales se cortaron a unos 5 mm desde la superficie de fractura. Para realizar los cortes se utilizó una cortadora de precisión de marca Buehler, tal como se muestra en la figura 2.1.

2.7.2 Limpieza de las muestras.

Las técnicas de microscopía electrónica de barrido exige que las muestras a ser observadas estén lo más limpias posibles, para evitar distorsión en las imágenes y complicaciones en su interpretación. Para cumplir con esta exigencia todas las muestras se limpiaron con acetona, por 15 minutos en un equipo de limpieza ultrasónica marca Buehler, modelo Ultramet II Figura 2.13. Finalmente se limpiaron con alcohol y se secaron con aire caliente.



Figura 2. 13. Equipo Ultra sónico.

2.7.3 Observación de las muestras:

La sección de microscopia se realizó en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Central de Venezuela. Se utilizó un microscopio marca HITACHI, modelo S-4000, tal como se ilustra en la figura 2.14. Las muestras se pegan a un elemento conductor, al cual se le agrega grafito para mejorar la conductividad de los electrodos secundarios.



Figura 2.14. Microscopio Electrónico de Barrido Marca HITACHI Modelo S-2400.

Capítulo III
Resultados y Discusiones

Resultados Experimentales

3. Ensayo de Dureza.

3.1 Ensayo de Macro dureza.

El ensayo de macro dureza se realizó en una probeta del acero inoxidable dúplex SAF 2507, de donde se obtuvieron resultados que se reportan en las tablas 3.1 y tablas 3.2, que luego de un análisis permiten expresar que la dureza del material se hace mayor hacia los bordes del mismo, nótese en el núcleo del material que la dureza tiene un valor de 248, 5 VH que es inferior en 13.54% en promedio, al valor obtenido en la ultima indentación cercana al borde, que corresponde a 283,7 VH durante el primer barrido y 268,2 VH para el segundo.

Tabla 3. 1. Dureza Vickers para el barrido #1, realizado a la probeta de un DSS-SAF 2507.

Ensayo	Macro dureza Vickers (VHN)	d ₁ [μm] 	d ₂ [μm] 
1	248,5	264,3	282
2	234,9	281	280,9
3	265,8	269,2	258,7
4	260,3	272,7	261,1
5	283,7	251,4	259,9
Promedio	258,6	267,7	268,5

Tabla 3.2. Dureza Vickers para el barrido #2, realizado a la probeta de un DSS-SAF 2507

Ensayo	Macro dureza Vickers (VHN)	d ₁ [μm]	d ₂ [μm]
1	248,5	264,3	282
2	240,6	277,1	278,1
3	230,9	283,6	283,2
4	263,5	263	267,6
5	268,2	265	260,9
Promedio	250,3	270,6	274.4

En la figura 3.1 se grafican los resultados del barrido #1 y el barrido #2, donde se puede apreciar que la dureza presenta un comportamiento similar hacia la superficie, independientemente del conjunto de medidas tomadas, bien sea en el barrido #1 o barrido #2.

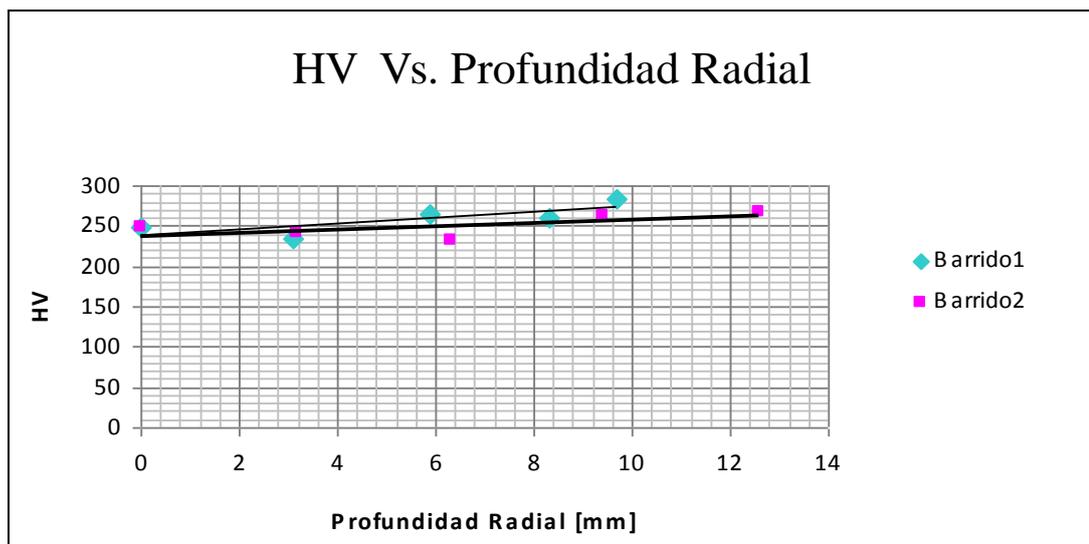


Figura 3. 1. Dureza Vickers Vs. Profundidad Radial para el barrido #1 y barrido #2, al DSS-SAF 2507

Estos resultados son respaldados por la información obtenida del estudio de microscopía óptica cuantitativa la cual nos suministro una distribución de las fases austenita y ferrita, donde la austenita se encuentra en mayor proporción. El material en su proceso de fabricación fue enfriado de manera rápida luego del laminado, pues la formación de austenita se produce cuando se dan velocidades rápidas de enfriamiento que permiten su desarrollo a partir de la ferrita. La austenita posee la característica de ser más dura que la fase ferrítica, y aumenta hacia los bordes debido a que ésta tiene mayor distribución hacia esta zona, a diferencia del núcleo.

Lo anteriormente expuesto, concuerda a la gran ductilidad del material que sugiere un posible endurecimiento local producto del mecanizado del espécimen, generando esto, un tipo de heterogeneidad mecánica, lo cual se traduce en este incremento en la dureza cercana a la superficie de los especímenes.

3.2 Ensayo de Microdureza Vickers

El ensayo de microdureza Vickers fue realizado en una probeta de 30 mm de diámetro y 15 mm de espesor. En la siguiente tabla se reflejan los valores de dureza Vickers promedio expresados en VHN (Vickers Hardness Number) de los ensayos, cuyos valores deben estar cercanos a 245 VHN según la literatura especializada.

Tabla 3. 3. Dureza Vickers para los ensayos realizados sobre los cupones de prueba.

ENSAYO	10 gr.	50 gr.	100 gr.	300 gr.	500 gr.	1000 gr.
1	253,7	272,4	264,1	255,6	249,6	257,9
2	228,9	248,9	237,4	240,5	230,3	239,5
3	239,5	241,4	242,6	239	241,2	238,4
4	242,2	258,2	247	238	235,5	233,3
Promedio	241,075	242,7	247,775	243,275	239,15	242,275

Se puede observar que los valores de dureza se encuentran dentro de lo establecido por las referencias consultadas, sin embargo, existe ciertas regiones donde se realizaron mediciones en las que se encontraron aumento de dureza, los cuales no superan el 10% en la mayoría de los casos, por lo tanto no son considerados significativos, aunque debe recordarse que estamos en presencia de un agregado bifásico, y al evaluar esta propiedad a nivel microscópico, se presenta la posibilidad de registrar un comportamiento mecánico intrínseco de cada micro constituyente por separado, en la cual se traduce en cierta dispersión de los datos de dureza al realizar el barrido. En la figura 3.2 se ubica la grafica Dureza Vickers. vs. Carga Aplicada.

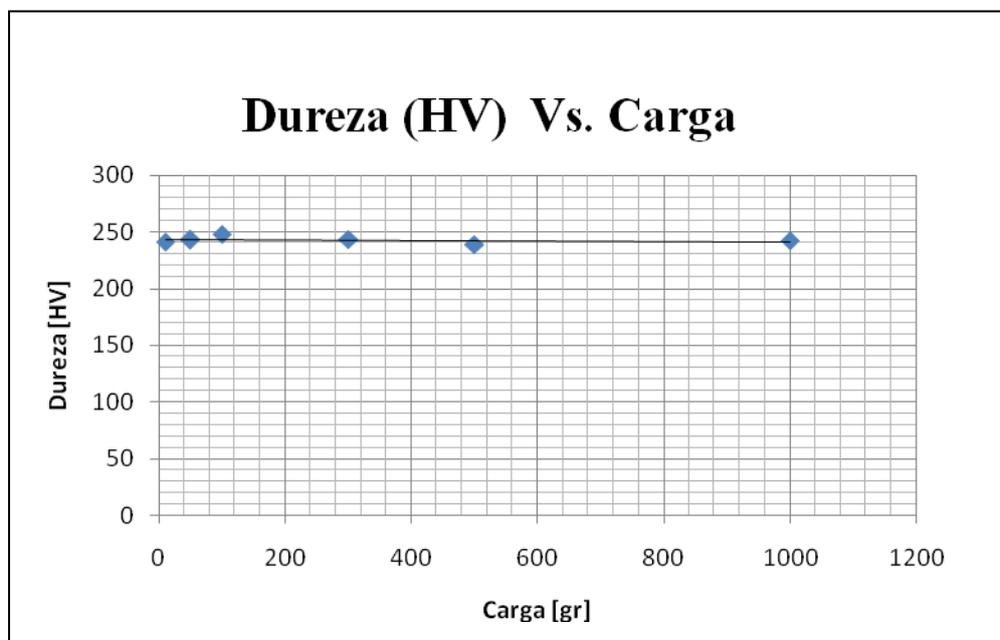


Figura 3. 2. Grafica Dureza Vickers Vs. Carga Aplicada

En la figura 3.2. Dureza Vickers vs. Carga Aplicada, se puede observar que el valor de la dureza es uniforme a lo largo de toda la superficie de la probeta, obteniendo una línea de tendencia que evidencia que al ir aumentando la carga los cambios de dureza son relativamente pequeños y por tanto se ratifica la uniformidad de dureza en el material y sobre todo que no existe una dependencia funcional marcada, que relacione el valor de la dureza con la carga aplicada

durante el ensayo, por lo que para este intervalo de dureza aplicada durante los ensayos realizados en la presente investigación, hacen decir que esta propiedad es independiente de esta variable.

En la figura 3.3. Indentación de Microdureza, se aprecia que alrededor de la huella dejada por el indentador se produce deformación, por esta razón, se deja el espacio de 5 veces la diagonal de la huella entre una medida y otra para así obtener medidas de dureza acordes y no alteradas por la deformación de la huella anterior.

Esa deformación que se aprecia por debajo de la huella es producto de la alta ductilidad del material, la cual es una propiedad clave durante los análisis de las propiedades del SAF 2507.

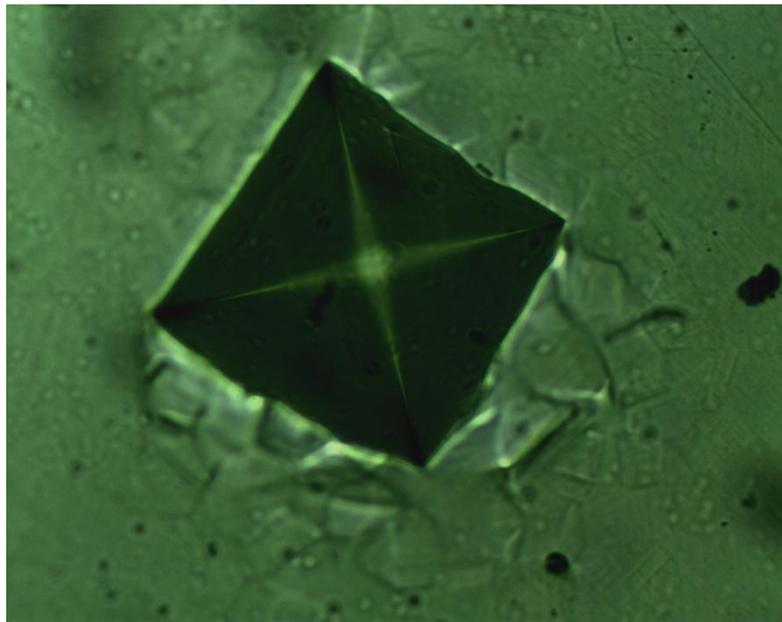


Figura 3. 3. Indentación de Microdureza.

3.3 Microscopia Óptica del material SAF 2507

En la figura 3.4 se presenta la microestructura del material SAF 2507 tomada en un microscopio óptico en modo de imagen de campo claro, la cual es

propia de un acero inoxidable dúplex, donde la fase clara representa la Austenita y la oscura representa la Ferrita.

Se observa una distribución proporcional de la fase Austenita con la fase ferrita, la cual equivale a 41% para la fase Austenita y 59% para la fase ferrita aproximadamente, obtenida por un analizador de imágenes.



Figura 3. 4. Fotomicrografía de la sección transversal del Acero inoxidable SAF 2507.

Adicionalmente en la figura 3.5, se puede observar ciertas partículas o inclusiones de geometría bien definida. Estas inclusiones son semejantes a las observadas en estudios anteriores, por lo que probablemente puedan corresponder a inclusiones del tipo de carburo o nitruros de cromo (C, N-Cr) propias del material, originadas en el proceso de fabricación. Es conveniente destacar la equiaxialidad tanto en la estructura ferrítica como Austenítica, condición que en principio nos habla de un buen grado de isotropía en las propiedades mecánicas, claro esta sin llegar a ser un material idealmente isotropico. No obstante esta condición sugiere homogeneidad estructural, lo cual se traduce en una distribución de energía interna uniforme, por lo que no se esperaría la procedencia

de pilas de acción local asociadas a texturas derivadas de los procesos de fabricación. Todo lo anterior expuesto nos habla del desempeño de la aleación durante el servicio en medio agresivos.

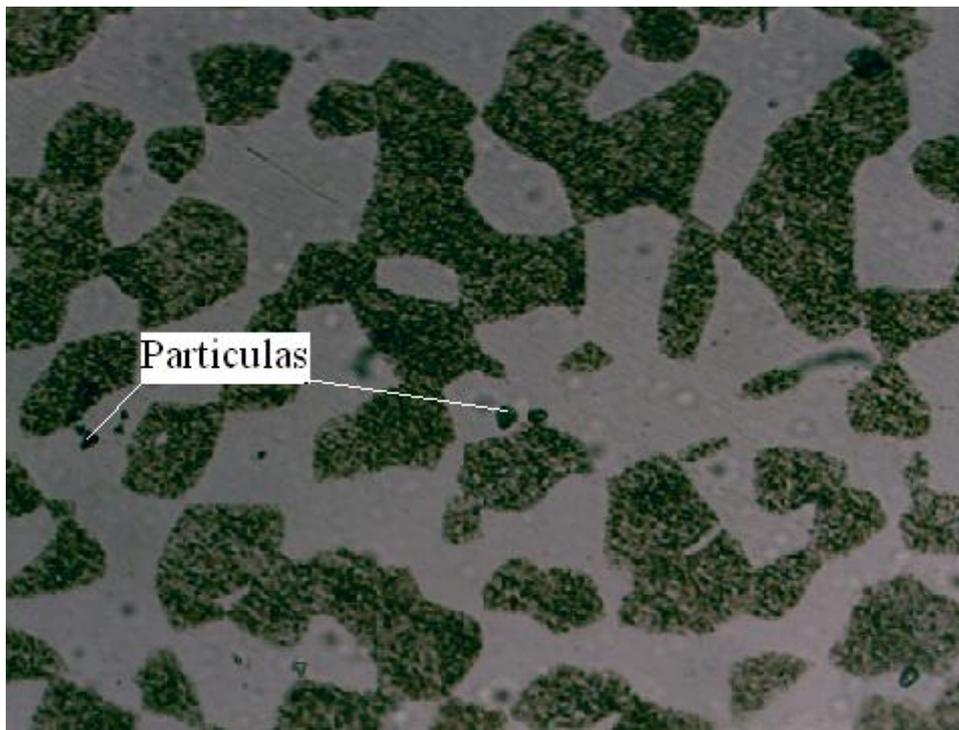


Figura 3. 5. Fotomicrografía de la sección transversal del Acero inoxidable SAF 2507.

3.4 Ensayo de Tracción

Para llevar a cabo este ensayo destructivo, se seleccionaron tres probetas. A cada uno de los especímenes se procedió a medir las dimensiones iniciales y finales (luego de la fractura) para poder calcular el porcentaje de elongación mediante la siguiente ecuación, tomada de la referencia: *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, de Askerland y Phulé:

$$\% \text{ elongación} = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} \times 100$$

para así poder compara dicha información con los valores proporcionados por el fabricante.

Tabla 3. 4. Longitudes iniciales y finales de las probetas ensayadas

Numero de Probeta	Longitud Inicial (mm)	Longitud Final (mm)	Elongación (%)
1	131	147,6	12,67
2	128,8	152,15	18,12
3	129,9	149,87	15,37

Tabla 3. 5. Elongación promedio, desviación estándar y porcentaje de elongación nominal

Elongación Promedio (%)	Desviación Estándar	Elongación Nominal (%) (Sandvik)
15,387	2.72504	15

La información que resalta de las tablas anteriores es la correspondiente con el valor de la elongación promedio. Se aprecia que se obtuvo un valor de 15,38 % y comparándolo con el valor de elongación proporcionado por la empresa Sandvik, fabricantes del SAF 2507, de 15 %, es posible mencionar que el ensayo de tracción se realizó de manera correcta, con tendencia a los resultados que proporcionan las referencias consultadas, suministradas por el proveedor ya mencionado, y se puede verificar la condición mecánica del material, por lo menos las asociadas a las solicitudes de tracción uniaxial. En el aspecto de tracción, específicamente en la deformación plástica permanente que experimenta el material antes de fallar, gracias a su gran ductilidad.

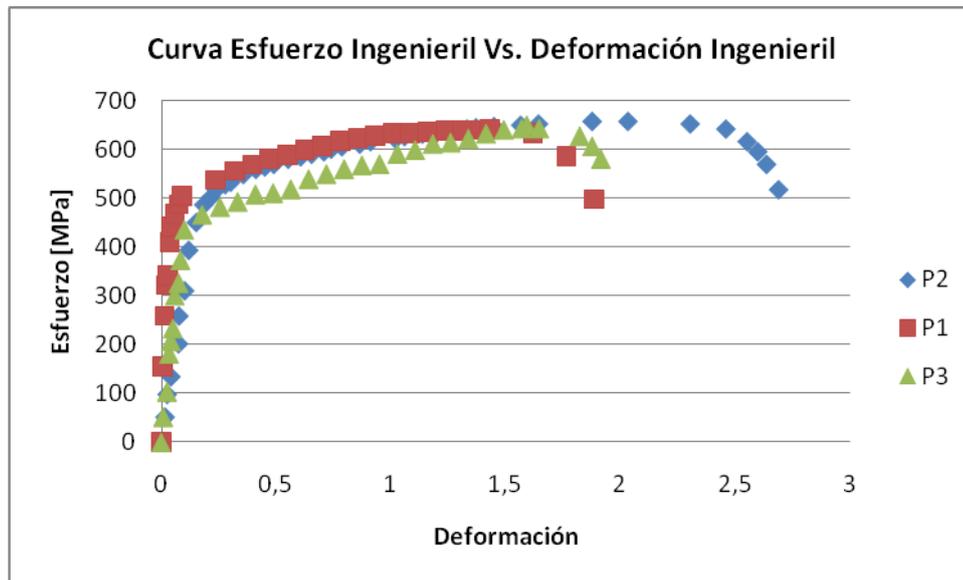


Figura 3. 6. Curva Esfuerzo ingenieril Vs. Deformación Ingenieril para las probetas 1, 2 y 3.

Las curvas de esfuerzo deformación que se obtuvieron de las tres probetas ensayadas a tracción, proporcionan los valores de resistencia a la fluencia y resistencia máxima los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. 6. Resultados de ensayo de tracción

Numero de Probetas	Resistencia a la Fluencia (MPa)	Resistencia Máxima (MPa)
1	484,88	640,05
2	426,45	658,19
3	408,05	642,26
Promedio	440,05	646,83

De las graficas de los ensayos de tracción se obtuvieron: Un valor promedio de 440,05 MPa para la resistencia a la fluencia y un valor de 646,83 MPa para la resistencia a la tracción. Estos valores fueron comparados con los proporcionados por el fabricante y se puede decir que los valores experimentales se encuentran por debajo de los valores esperados. Este comportamiento podría estar asociado a alguna condición de relajación con cierto grado de crecimiento

del grano Austenítico el cual en principio condiciona el valor de resistencia mecánica de los especímenes. Otro aspecto asociado a este comportamiento esta relacionado con los criterios efectivos de los elementos aleantes nominales, responsables del endurecimiento por solución sólida.

3.5 Ensayo de Fatiga-Corrosión

Los resultados de los ensayos de fatiga-corrosión, para cuatro niveles de esfuerzo, 85%, 87,5% ,90% y 95% se muestran en las siguientes tablas y gráficos:

Tabla 3. 7. Resultados de los ensayos de fatiga-corrosión para la determinación del límite de fatiga del acero SAF 2507.

Esfuerzo (MPa)%	374,4	385,4	396,5	418,5
Ciclos de falla (Nf)	688.000	604.800	536.700	433.200
	1.310.100	881.400	557.100	405.700
	4.338.700	428.200	611.200	503.800
	2.513.300	654.800	584.300	454.900
Promedio	2.112.267	638.133	568.333	447.567

Una vez obtenidos estos resultados, se procedió al tratamiento de los datos de acuerdo a la metodología propuesta por Weibull, estableciendo la distribución de frecuencia, de acuerdo a la morfología de la curva de densidad de probabilidad, que establece una esperanza matemática más representativa del nivel de esfuerzo evaluado, dicho tratamiento se realizó mediante el uso de Weibull ++7, el cual es un programa de análisis de datos de vida, que es aplicado en muchas empresas en todo el mundo. Weibull++ 7 analiza datos de vida usando múltiples distribuciones de vida, mediante una interfaz legible. En nuestro caso el manejo de datos que se realizó con el programa, consistió en suministrarle al software los datos de los números de ciclos que soporto cada probeta según el esfuerzo. Es decir por el esfuerzo máximo de 418,5 MPa se introdujeron 4 valores

que correspondían con el número de ciclos que experimento cada espécimen. La esperanza matemática en este caso la vida promedio se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3. 8 Resultados generales del ensayo de fatiga-corrosión para los diferentes niveles de esfuerzo usando el programa Weibull.

Esfuerzo [MPa]	Vida Promedio
374,4	2.715.500
385,4	655.670
396,5	550.950
418,5	452.460

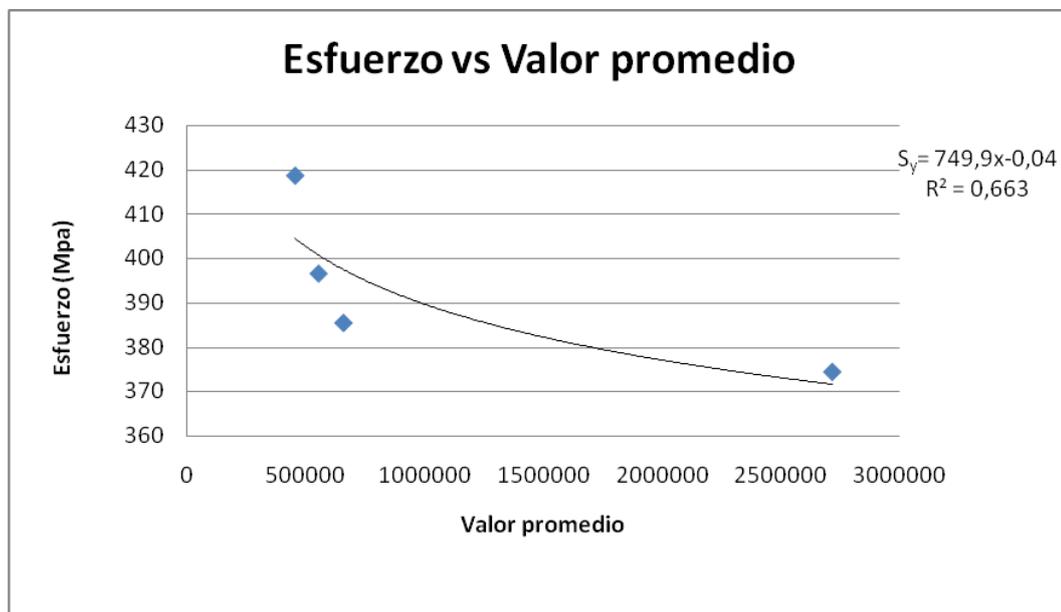


Figura 3. 7. Grafica de Esfuerzo vs. Valor promedio

Tabla 3. 9. Obtención de la ecuación de Basquin

Datos de la curva		Parámetros ecuación de Basquin	
Pendiente=	-0,047	b=	-0,047
Intersección (Eje Y)=	2,875	S _f =	17,725
R ² =	0,663	Ecuación de Basquin=	17,725*N _f ⁻⁰⁰⁴⁷

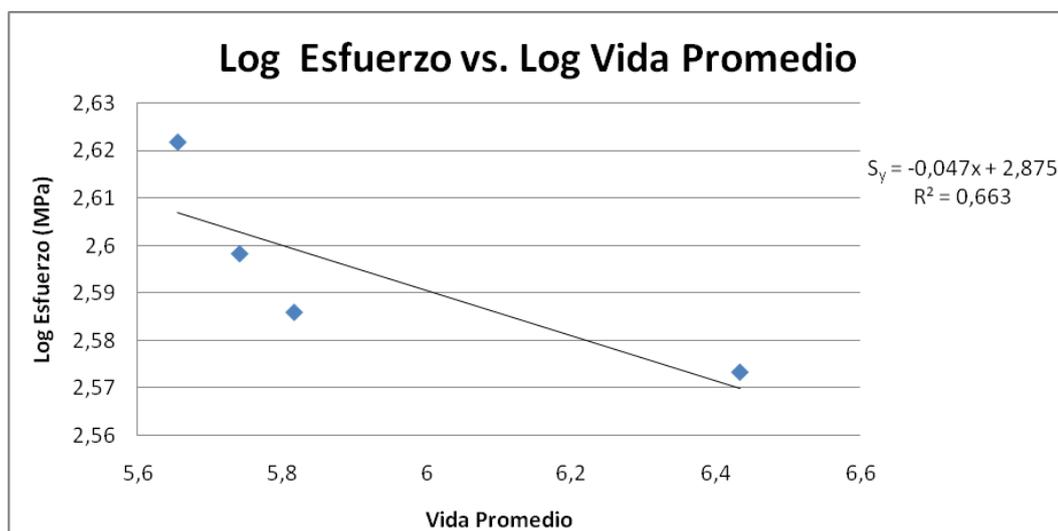


Figura 3. 8. Grafica de log Esfuerzo vs. Log Vida promedio.

En los ensayos de fatiga-corrosión se observa que el material SAF 2507, tiene una alta resistencia a la corrosión lo cual es de gran importancia para la aplicación en los intercambiadores de calor, debido a los altos niveles de corrosión a los cuales están sometidos, adicionalmente se observo que el material tiene la propiedad de ser altamente dúctil.

En la figura 3.8. Curva Log Esfuerzo vs. Log Vida del Promedio, para esta curva se señala la ecuación de Basquin, obtenida mediante un análisis de regresión. Además se incluye el cuadrado del coeficiente de correlación entre

dicha ecuación de Basquin y los datos experimentales graficados. Adicionalmente se presenta la tabla 3.9 los valores que caracterizan la Ecuación de Basquin.

La figura 3.7 Describe el comportamiento característico de los metales sometidos a ensayos de fatiga-corrosión. El valor del exponente de Basquin obtenido para este estudio es de 0,047 el cual es un valor que se puede considerar aceptable, ya que se encuentra dentro del intervalo establecido en referencias consultadas, de -0,05 y -0,12 para una gran cantidad de materiales. El valor de 749,9 (MPa), corresponde al valor del coeficiente de resistencia a la fatiga el cual se aproxima a la que será la resistencia a la tracción de nuestro material, con lo que se verifica la condición de fatiga de alto ciclaje que garantiza en los ensayos utilizados en el presente estudio.

La vida a la fatiga del material no se vio afectado por los incrementos de temperatura que experimento durante los ensayos, pues la acción de la solución salina (NaCl al 3%) producía el efecto de refrigerante, lo cual causa una menor degradación de las propiedades del material de las que ocurre por ejemplo en fatiga.

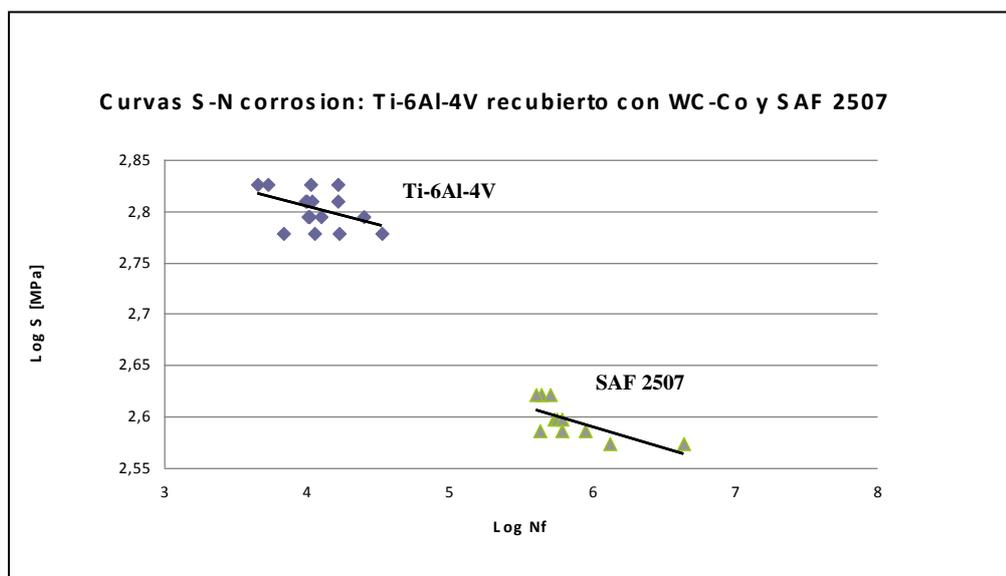


Figura 3. 9. Curvas de resistencia a la fatiga corrosión del SAF 2507 y la aleación Ti-6Al-4V con recubrimiento de WC-Co.

En la figura 3.9. Se aprecia las curvas de resistencia a la fatiga-corrosión del SAF 2507 y de la aleación Ti-6Al-4V recubierta con un depósito de WC-Co termorrociado por HVOF. Esta curva se realizó con el fin de satisfacer parte de los objetivos de este trabajo especial de grado, que se enfocan en comparar el SAF 2507 con el Titanio. En esta oportunidad se tomó el titanio en condiciones de aleación, específicamente Ti-6Al-4V, que es un material de alta resistencia, empleado en este tipo de aplicaciones, lo cual lo convirtió en un material apropiado para la comparación, ya que se busca una posible sustitución del titanio con el SAF 2507. *Perdomo* (2003) estudió el comportamiento de esta aleación, con un recubrimiento de WC-Co, bajo condiciones de fatiga corrosión. Dichos resultados fueron tomados para la construcción de la curva antes expuesta. La incorporación de WC-Co en la aleación de Titanio tenía como objetivo incrementar el desempeño tribológico, el cual es poco satisfactorio en la aleación de titanio.

Analizando la figura, se puede apreciar que el titanio fue sometido a un ensayo fatiga corrosión a mayores esfuerzos que al que fue sometido el SAF 2507, y esto es debido a que el titanio posee mayor resistencia a la fluencia que el acero inoxidable dúplex. Además, se puede apreciar que el SAF 2507 posee una mayor resistencia a la fatiga que la aleación de Titanio, lo cual lo hace mejor al momento de selección bajo un criterio de durabilidad. Otro aspecto resaltante en la figura, se vincula con las pendientes que poseen las líneas de tendencia producto de la regresión lineal. Se puede apreciar que la línea de tendencia del titanio posee menor pendiente que el DSS SAF 2507, lo que significa que a este último a pequeñas variaciones de esfuerzos, se producen pequeños cambios en las expectativas de vida del material, lo cual hace a este material mejor al momento de selección bajo criterios de diseño que el titanio.

La comparación de los resultados de fatiga corrosión a los que fueron sometidos ambos materiales, hacen ver que el SAF 2507 es excelente para trabajar en ambientes corrosivos, ya que soportó más ciclos bajo condiciones agresivas generadas por una solución salada NaCl al 3%, inclusive, sin contar con un

recubrimiento, en comparación al Ti-6Al-4V que contaba con un recubrimiento de WC-Co que se comporta como una barrera contra medios agresivos e incorpora esfuerzos radiales de naturaleza compresiva en principio deben aportar un incremento en las propiedades mecánicas del conjunto.

En conclusión se puede afirmar que según los resultados obtenidos en el análisis de fatiga corrosión al que se sometió el acero inoxidable dúplex SAF 2507, es más resistente a la fatiga en comparación con el titanio, así como también más confiable por la expectativa de vida que experimento.

3.6 Estudio Fractografico (Microscopia Electrónica de Barrido)

A continuación se presentan fractografías correspondientes a los ensayos de fatiga-corrosión realizados a las probetas sometidas a los esfuerzos más altos y más bajos. En las mismas, se deja en evidencia la zona donde se produjo la fractura. Además, se muestran imágenes que fueron tomadas con el microscopio electrónico de barrido a una probeta ensayada a tracción. Este espécimen tiene la particularidad de haber sido ensayada a fatiga corrosión y no haber presentado una fractura a un elevado número de ciclos, en comparación con las demás probetas.

Las fotomicrografías son exhibidas de manera secuencial mostrando en detalle a un mayor aumento zonas particulares, que se explicaran a continuación.

Fatiga-Corrosión ensayada al más bajo nivel de esfuerzo

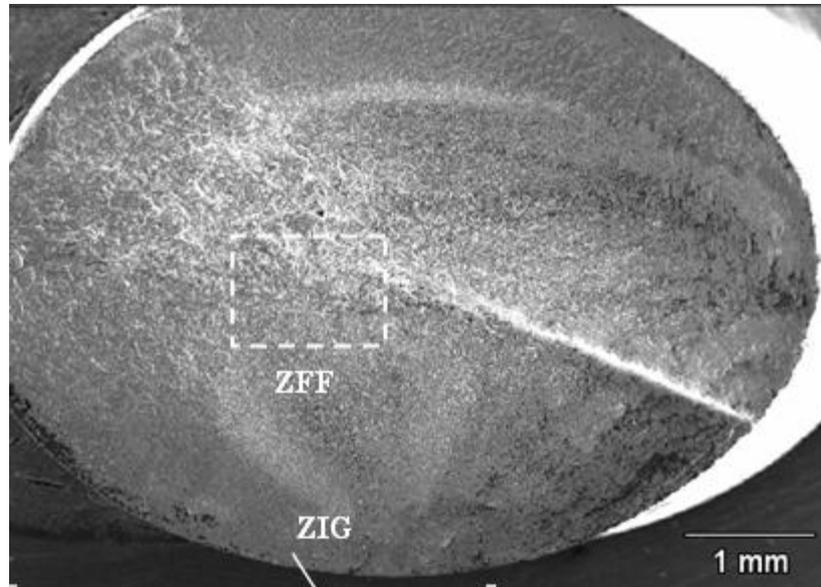


Figura 3. 10. Superficie de fractura del Material a 385,7 MPa.

En la figura 3.10. Se muestra la superficie general de la zona de fractura de la probeta ensayada a un nivel de esfuerzo de 385,7 MPa, se observaron características típicas del fenómeno de fatiga-corrosión como lo son un inicio de grieta (ZIG), zona final de fractura (ZFF) y escalones de clivaje en gran parte de la zona de fractura.

Se encontró un inicio de grieta (ZIG), el cual se ubica en la parte inferior de la fotomicrografía. En la figura 3.11, se observa una vista magnificada de la zona de inicio de grieta, la cual es claramente diferenciadas de la zona de fractura final (ZFF) que se encuentra en la zona central de la superficie en esta zona de inicio se observa aplastamiento severo producto de la fricción que se genera entre la superficie de la grieta en el periodo de compresión durante el ensayo.

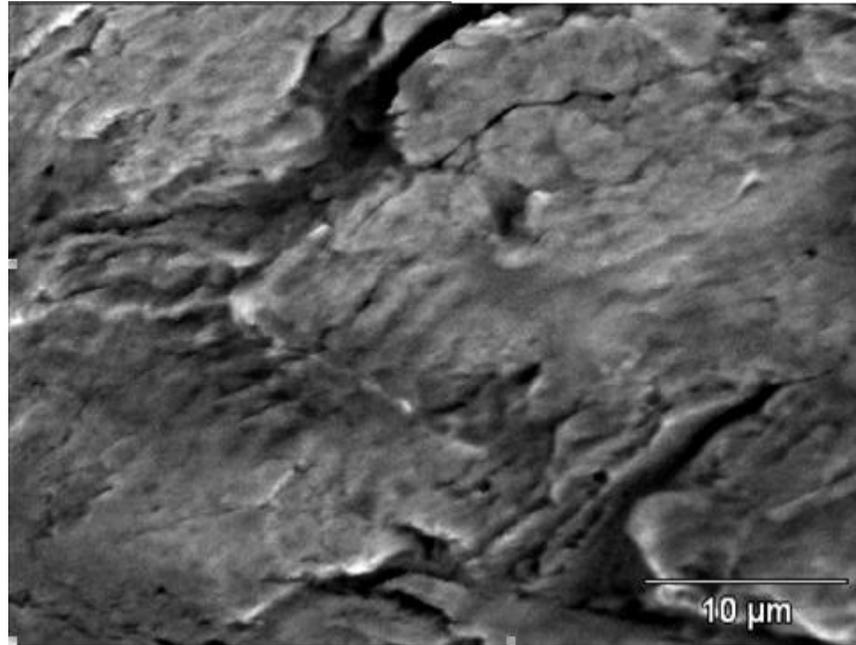


Figura 3. 11. Superficie de fractura del Material a 385,7 MPa.,(Ampliada). ZIG.

En la figura 3.12, se observa más en detalle la zona de fractura (ZFF), se puede detallar menor cantidad de marcas radiales que las observadas en el inicio de la grieta. Las mismas parten del inicio de la grieta, lo que es atribuido al mecanismo de crecimiento de grietas las cuales predominan a bajos esfuerzos.

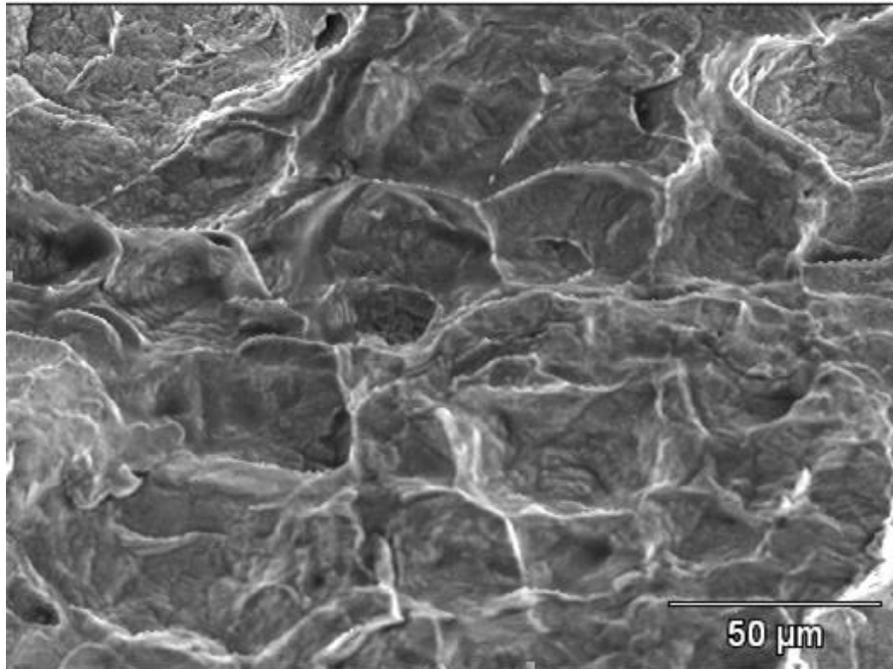


Figura 3. 12 Superficie de fractura del Material a 385,7 MPa. (Ampliada). ZFF

Fatiga-Corrosión ensayada al más alto nivel de esfuerzo

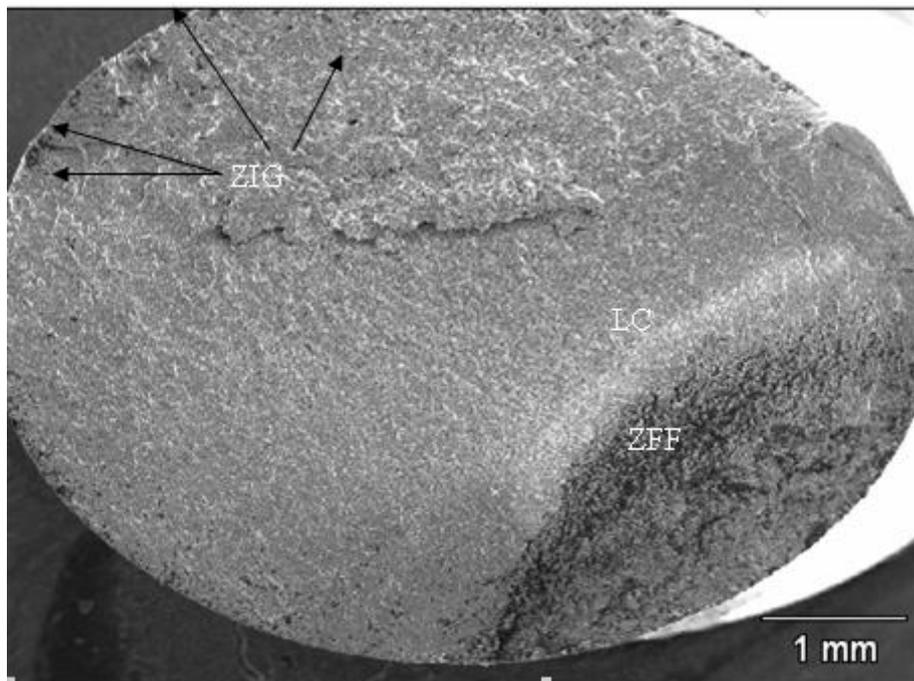


Figura 3. 13. Probeta ensayada al más alto nivel de esfuerzo, 418.5 MPa

Figura 3.13 se aprecia la superficie de fractura de la probeta ensayada a fatiga corrosión, la cual fue sometida a mayor esfuerzo alternante, específicamente 418,5 MPa, en la misma se aprecia una amplia zona de inicio de grieta (ZIG), las cuales siguen un comportamiento de propagación típico de acero. Los inicios de grietas se diferencian claramente de la zona final de fractura (ZFF), donde se visualiza junto a un labio de corte (LC). Adicionalmente, se aprecian escalones de clivaje, característica esencial de las fracturas por fatiga, las cuales se dan por la coalición de frentes de propagación de grietas en planos diferentes.

La gran cantidad de formación de grietas y su comportamiento a crecer rápidamente, es producto de la nucleación de grietas que se produce gracias a los niveles de esfuerzos alternantes a los que se sometió el material.

Fatiga-corrosión de la probeta que alcanzo vida infinita, luego ensayada en tracción

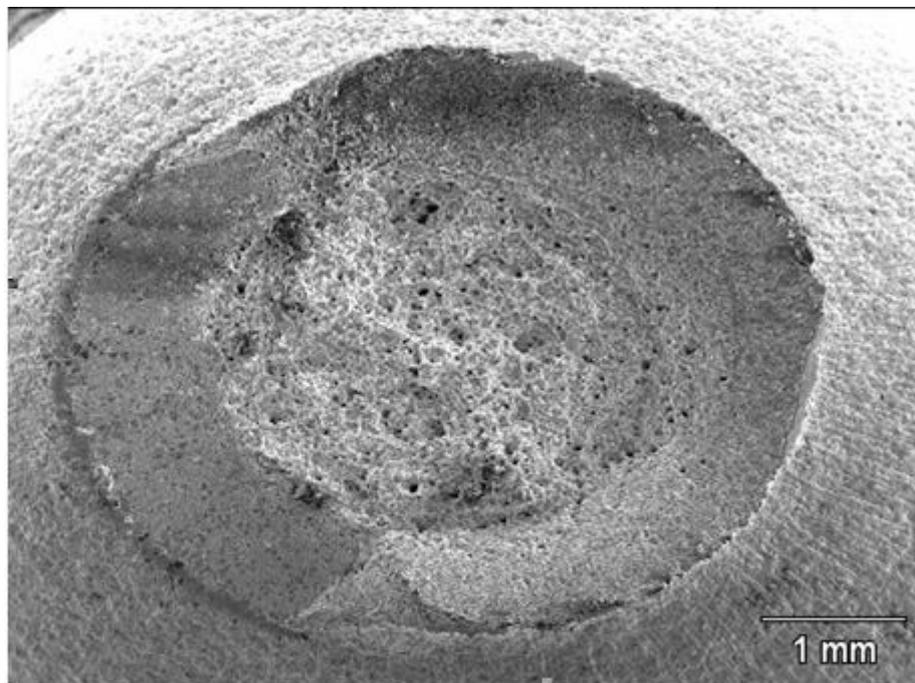


Figura 3.14 Superficie de probeta con mas alto ciclaje, Ensayada a Tracción

En la figura 3.14 y 3.15 se observa la superficie de fractura del espécimen ensayado a fatiga que no llegar a fracturar y luego es ensayado a tracción. En la macrografía se observa a grandes rasgos aspectos morfológicos asociados a un proceso de fractura altamente dúctil. Sin embargo, en la figura 3.15 se aprecia en detalle algunas superficies que están orientadas a 90° del eje de aplicación de la cargas a tracción en donde se observa una topografía mixta en la cual en su superficie se aprecian gran cantidad de microhoyuelos y pequeñas zonas que experimentan avances progresivos de grietas bajo la acción de cargas cíclicas evidenciado con la presencia de estrucciones en dicha superficie, lo cual corrobora el daño acumulado y este siempre incidirá en las propiedades mecánicas, incluso estática de los materiales.

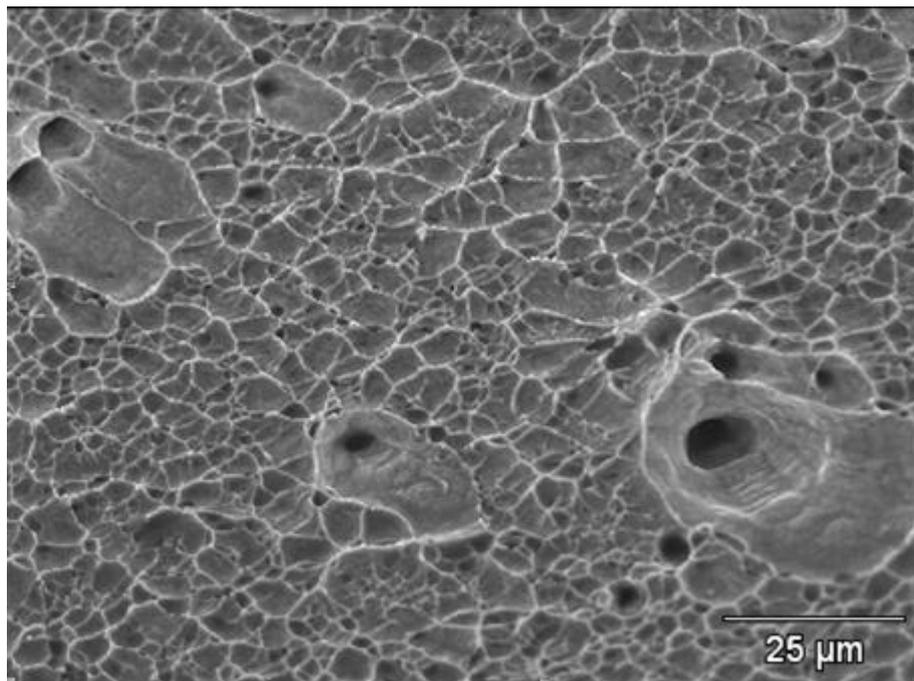


Figura 3. 15 Ampliación de la figura 3.14 de la probeta ensayada a tracción

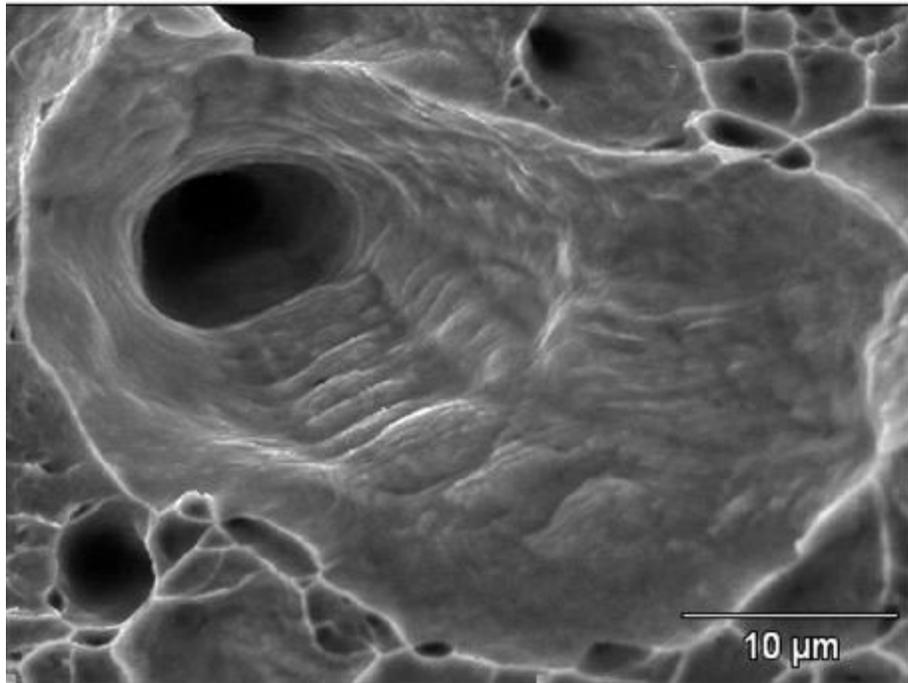


Figura 3.16 Ampliación de un microhoyuelo de la figura 3.15

Capítulo IV
Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

- El SAF 2507 a pequeñas variaciones de esfuerzos, presenta pequeños cambios en las expectativas de vida del material, lo cual hace a este material mejor que el titanio, al momento de selección bajo criterios de diseño
- SAF 2507 es excelente para trabajar en ambientes corrosivos, ya que soporta más ciclos bajo condiciones agresivas generadas por una solución salina NaCl al 3%, inclusive, sin contar con un recubrimiento, en comparación al Ti-6Al-4V que contaba, al momento de la comparación, con un recubrimiento de WC-Co que se comporta como una barrera contra medios agresivos.

RECOMENDACIONES

- Construir la curva de resistencia a la fatiga corrosión del material SAF 2507 con un número mayor de probetas ensayadas para aumentar la precisión del estudio, ya que esta evaluación del material se realizó con un número de probetas bajo debido a la cantidad de material que teníamos disponible.
- Se sugiere realizar los ensayos de dureza vickers de este tipo de aceros, en forma de L así como el realizado en el presente trabajo, ya que de esta forma, se verifica la existencia o no de heterogeneidad mecánica, las cuales pueden estar asociadas tanto al proceso de obtención del espécimen como de gradiente de concentración en algún elemento aleante.
- Contar con un banco de prueba de fatiga alternante que no tenga niveles de vibración elevados, pues este tipo de problema influye notoriamente en el tiempo de montaje de la probeta, en la resistencia a la fatiga del material, al ruido que se genera por el desbalance, entre otras desventajas.
- Realizar los ensayos de fatiga-corrosión utilizando niveles de esfuerzo que sean superiores al 90% de la resistencia a la fluencia del material, para así obtener resultados que no presenten altos niveles de dispersión.
- Llevar a cabo este estudio, tomando en cuenta la variable temperatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, F. y BAZÓ R.; (1998). Comportamiento Fatiga – Corrosión del Acero Inoxidable 316L. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- ASKELAND, D y PRADEEP P, (2004) Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ta Ed. THOMSON. México.
- CAZAUD, R. La Fatiga de los Metales. Aguilar. Madrid 1957
- FORREST, P. G. Fatiga de los Metales. Ediciones Urmo. Bilbao, 1972
- GÓMEZ M.R. Soldadura de los Aceros y Aplicaciones (2º edición) Gráficas Iormo, Madrid, 1988.
- HERRERA, I. y MARTÍNEZ F.; Estudio de Fatiga- Corrosión de un acero AISI 316L con un recubrimiento de TiN. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- KEHL, G. Fundamentos de la Practica de Metalografía. (2da edición) Aguilar S.A de Ediciones, Madrid – España. (1963).
- MUSAUEL F., Clara. (2003). Caracterización por Microscopía Óptica y Electrónica de los Aceros Inoxidables Dúplex 2205, Después del Proceso de Soldadura GMAW Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.

- ORTIZ, M. y MARIÑO, C.; (2001). Estudio de Fatiga y Corrosión – Fatiga de un Acero SAE 4143 Recubierto con un Depósito de Cromo Duro. Trabajo Especial de Grado Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- PACHECO M, José A. (2006) Comportamiento a la Fatiga y Fatiga Corrosión de un Acero Inoxidable 316L Recubierto con una Capa Delgada de Carbono Tipo Diamante (DLC). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- PERCKNER D. y BERSTEIN I.M. Handbook of Satinless Steels, MacGraw Hill. Book Company New York, 1977.
- PERDOMO R, Luís R. (2003). Estudio de Fatiga y Corrosión fatiga en la aleación Ti-6Al-4V Recubierta con un depósito de WC-Co Termorrociado por HVOF.. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- PIMENTAL P.; Dr. (2005) Estudio de Fatiga y Corrosión – Fatiga de un Acero SAE 4140 Recubierto con una Aleación de Ni-Co-B. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- PIÑERO, A.; (2005) Titulo: Estudio del comportamiento a la fatiga al aire y fatiga Corrosión de una aleación de aluminio 6063-T6 Recubierta con un deposito Autocatalitico de Ni-P. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.
- RIVERA, D. (2007) Calificación del Procedimiento de Soldadura en Tuberías de Aceros Inoxidables Súper Dúplex SAF 2507 por el Proceso

GTAW-Pulsado Semi-Automático. (2007). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.

- SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. Seamless Tube Sandvik SAF 2507. Suiza (2008).
- SILVIA, P y PACHECO J; (2006) Comportamiento a la fatiga y fatiga corrosión de un acero inoxidable 316L recubierto con una capa delgada de carbono tipo diamante (DLC). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ing. Esc. de Metalúrgica y Cs. de los materiales.