

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACION EN FATIGA AL AIRE Y FATIGA-CORROSION DEL ACERO
SANDVIK Sanicro 28 PARA LA SUSTITUCION DEL MATERIAL UTILIZADO
EN CONDENSADORES DE TOPE DE TORRES DE DESTILACION EN UN
COMPLEJO REFINADOR.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela.

Por los bachilleres:

Cardier G., Francisco L.

Marcano G., César L.

Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACION EN FATIGA AL AIRE Y FATIGA-CORROSION DEL ACERO SANDVIK Sanicro 28 PARA LA SUSTITUCION DEL MATERIAL UTILIZADO EN CONDENSADORES DE TOPE DE TORRES DE DESTILACION EN UN COMPLEJO REFINADOR

.

TUTOR ACADEMICO: Prof. Crisanto Villalobos

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela.

Por los bachilleres:

Cardier G., Francisco L.

Marcano G., César L.

Para optar por el Título de

Ingeniero Mecánico.

Caracas 2010



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Caracas, 11 de noviembre de 2.010

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

CESAR MARCANO y FRANCISCO CARDIER

Titulado:

**“EVALUACIÓN A FATIGA AL AIRE FATIGA-CORROSIÓN DEL ACERO
SANDVIK Sanicro 28 PARA LA SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO EN
CONDENSADORES DE TOPE DE TORRES DE DESTILACIÓN EN UN
COMPLEJO REFINADOR”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado




Prof. Crisanto Villalobos
Tutor


Prof. José La Riva
Jurado

“Núcleo de Ingeniería “Armando Mendoza” hacia el 30° Aniversario”

DEDICATORIA

Para todas aquellas personas que me han ayudado a lo largo del camino, en especial a mi familia, mi novia, y mi mejor amigo Cesar Marcano, y a todos los que hoy no se encuentran con nosotros en este momento.

Francisco Cardier

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y haber iluminado mi camino.

A mi familia, por haberme apoyado en todo momento, sobre todo en aquellos donde el camino fue más difícil y sin importar que para ellos también lo fuera, supieron dejar a un lado sus problemas para avocarse al mío.

A mi madre, por sobre todas las cosas, ya que de su fortaleza aprendí a conseguir la mía.

A mi novia, que fue ese punto de inflexión que me hizo dar un paso adelante cuando me encontraba estancado, y me ha motivado a lo largo del camino para que supere los obstáculos.

A mi amigo y hermano Francisco, ya que ha sido él, quien me ha acompañado durante mi carrera desde el primer día.

A todas aquellas personas especiales en mi vida, ya que cada una de ellas aportó en algo a que este día llegara, y a que sea hoy la persona soy.

César Marcano

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por permitirnos formar parte de ella y enseñarnos a vencer las sombras.

A nuestro tutor Crisanto Villalobos, por su abnegada dedicación, colaboración y gran vocación de enseñanza, por siempre creer que si podíamos, ya que gracias a eso es que este trabajo ha sido posible.

A nuestros compañeros, por acompañarnos y alentarnos durante todo este proceso, ya que sin sus ánimos el camino hubiese sido aún más difícil.

A nuestros familiares ya que sin su apoyo no hubiésemos podido lograr esta ni muchas otras metas de nuestra vida.

A nuestros profesores que gracias a sus consejos y dedicación podemos decir “SOMOS UCEVISTAS”.

A Sandvik y SanVen por creer y confiar en nosotros para llevar a cabo parte de su investigación, en especial a la Ing. Abby Sanchez por su colaboración en la realización de este trabajo.

Al personal del Laboratorio de Microscopia Electrónica, de la UCV, por el tiempo dedicado en colaborar con nuestro trabajo.

A los que por alguna razón no pueden estar presentes, Gracias por todo.

Cardier G., Francisco L.

Marcano G., César L.

**EVALUACION EN FATIGA AL AIRE Y FATIGA-CORROSION DEL
ACERO SANDVIK Sanicro 28 PARA LA SUSTITUCION DEL MATERIAL
UTULIZADO EN CONDENSADORES DE TOPE DE TORRES DE
DESTILACION EN UN COMPLEJO REFINADOR**

Tutor académico: Prof. Crisanto Villalobos.

Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería.

Escuela de Mecánica.

Palabras Clave: Sanicro 28, Acero Inoxidable, Fatiga, Fatiga-Corrosión.

Resumen.

La presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar el acero inoxidable multipropósito austenítico Sandvik Sanicro 28, como alternativa para la sustitución del material utilizado en condensadores de tope de torre de destilación de un complejo refinador. Para tal fin se evaluaron en primer lugar las propiedades mecánicas estáticas del material, mediante ensayos tracción uniaxial y de dureza tipo Vickers. Estos estudios se complementaron con la evaluación de la micro estructura del material a través de ensayo de micro ataque. Luego se determinó la curva S-N del material mediante ensayos de fatiga al aire y fatiga corrosión y se comparó esta última con la de otros materiales similares utilizados para este tipo de aplicación.

Los resultados revelaron que el Sanicro 28 se presenta como una mejor opción para la construcción de condensadores de tope, debido a que su comportamiento tanto a fatiga como a corrosión es mejor que el de los materiales habitualmente utilizados para la construcción de estos elementos. Se observó que para alto ciclaje este presenta mejores propiedades que la aleación de titanio Ti-6Al-4V recubierta con WC-Co, y en comparación con el acero inoxidable 316L aunque poseen comportamientos similares en cuanto a la fatiga en ambiente corrosivo, el Sanicro 28 es más resistente a la corrosión por lo que es una mejor opción debido a las condiciones en las cuales operan las torres de destilación.

El análisis fractográfico de la superficie de las muestras ensayadas para valores de 405MPa y 337,5MPa, valores que corresponden al máximo y mínimo esfuerzo al que fueron ensayadas las probetas, reveló la tendencia que presenta el material a una aparente nucleación preferencial en la superficie libre de la probeta propagándose hacia el interior, además se evidenció la alta ductilidad que presenta el material, debido a la presencia clara de estriaciones sobre toda la superficie de fractura.

INDICE GENERAL

<i>INDICE DE FIGURAS.....</i>	<i>1</i>
<i>INDIDCE DE TABLAS</i>	<i>5</i>
<i>INTRODUCCION</i>	<i>7</i>
<i>OBTTETIVOS.....</i>	<i>9</i>
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
<i>CAPITULO I</i>	
<i>MARCO TEORICO</i>	<i>10</i>
1.1 Acero.	10
1.1.1 Acero Sanicro 28.	11
1.2 Fatiga	20
1.2.1 Definición	20
1.2.2 Tipos de esfuerzos de fatiga.....	22
1.2.3 Etapas o zonas del proceso de fatiga	25
1.2.4 Superficie de fractura.....	27
1.2.5 Velocidad de propagación de la grieta.....	29
1.2.6 Curva S / N	31
1.2.7 Resistencia y límite de fatiga	33
1.2.8 Modelos curva S/N	34
1.2.9 Modelo probabilístico de Weibull	35
1.2.10 Factores que influyen en el comportamiento de la curva S-N	37
<i>ANTECEDENTES</i>	<i>41</i>
<i>CAPITULO II</i>	

3.5 Estudio fractográfico	88
<i>CAPITULO IV</i>	
<i>CONCLUSIONES</i>	96
<i>RECOMENDACIONES</i>	97
<i>ANEXOS</i>	98
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	100

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura de la austenita.....	11
Figura 1.2 Tasa de corrosión (mm/año) en ácido fosfórico contaminado con distintas concentraciones de cloruros (ppm) a 100°C, para Sanicro 28 y otras aleaciones. ^[1]	13
Figura 1.3 Tasa de corrosión (mm/año) en ácido fosfórico contaminado con a diferentes temperaturas (°C), para Sanicro 28 con otras aleaciones. ^[1]	14
Figura 1.4 Diagrama isocorrosión para Sanicro 38, aleación 904L y AISI 316L, en ácido sulfúrico, la curva representa una tasa de corrosión de 0.1mm/año. ^[1]	14
Figura 1.5 Diagrama isocorrosión para Sanicro 28 y otras aleaciones en ácido sulfúrico contaminado con iones de cloruro en 2000 ppm, la curva representa una tasa de corrosión de 0.1 mm/año. ^[1]	15
Figura 1.6 Diagrama isocorrosión para Sanicro 28 y otras aleaciones en ácido clorhídrico, la curva representa una tasa de corrosión de 0.1 mm/año. ^[1]	16
Figura 1.7 Tasa de corrosión en ácido fluorhídrico a 20 °C, para Sanicro 28, aleación 904L y AISI 316. ^[1]	16
Figura 1.8 Diagrama isocorrosión para Sanicro 28 y otras aleaciones, en ácido fórmico, a una tasa de corrosión de 0.1 mm/año. ^[1]	17
Figura 1.9 Temperatura crítica a la picadura (CPT) a 400mV, para diferentes aleaciones en agua salada simulada (NaCl 3%) con diferentes valores de PH. ^[1]	18
Figura 1.10 Resultado de prueba de SCC para diferentes aleaciones en una solución de cloruro de calcio (CaCl ₂) al 40% y a 100°C con un pH de 6.5. ^[1]	19
Figura 1.11 Diagrama TTC para Sanicro 28 y otras aleaciones con distintas concentraciones de carbono. La curva representa los límites de concentración normales para el contenido de carbono. ^[1]	20
Figura 1.13 Esfuerzos fluctuantes. ^[7]	23
Figura 1.14 Esfuerzo repetido en una sola dirección o pulsante. ^[7]	25
Figura 1.15 Zonas de iniciación (A), propagación (B) y fractura (C). ^[9]	26
Figura 1.16 Superficie de fractura en fatiga. ^[9]	27

Figura 1.17 Marcas de Playas y marcas radiales.....	28
Figura 1.18 Estriaciones y marcas radiales.	28
Figura 1.19 Gráfico de Velocidad de crecimiento de grieta en función del intervalo de factor de intensidad de esfuerzo. ^[11]	30
Figura 1.20 Diagrama S-N. ^[12]	32
Figura 1.21 Curvas S-N. ^[13]	34
Figura 1.22 Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga. ^[13]	39
Figura 2.1 Diagrama de Metodología.....	43
Figura 2.1 Esquema del dimensionamiento de las probetas de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E606. (Medidas en mm). ^[16]	44
Figura 2.2 Esquema del dimensionamiento de las probetas de Tracción según la norma ASTM E370. (Medidas en mm). ^[17]	45
Figura 2.3 Montaje de las probetas en resina fenólica para el ensayo de microestructura, a) y b) corte longitudinal, c) corte transversal.	46
Figura 2.4 Embutidora PRESTOPRES Struers.	46
Figura 2.7 Torno MYFORD, modelo ML7-R.....	47
Figura 2.8 Probetas ensayo de fatiga en flexión rotativa, a) Espécimen pulido, b) Espécimen sin pulir.	48
Figura 2.9 Bandeja de lijado marca Struers, modelo Lunn Major.	49
Figura 2.10 Pulidora marca BUEHLER, modelo metaserv 2000 variable “speed grinder-polisher”.....	49
Figura 2.11 Probetas ensayo de micro dureza, a) Espécimen pulido, b) Espécimen sin pulir.....	49
Figura 2.12 Montaje de ensayo de micro ataque.	50
Figura 2.13 Computador Dell, modelo OPTIPLEX 330.....	51
Figura 2.14 Software Buehler Omnimet 9.5.	51
Figura 2.15 Micro durómetro Buehler.	52
Figura 2.16 Máquina de ensayo de tracción Losenhausen, año 1969.	53
Figura 2.17 Montaje de la probeta en la máquina de ensayo de tracción.....	54

Figura 2.18 Máquina de fatiga “Fatigue Dynamics, RBF-200”.	58
Figura 2.19 Capsula de acrílico, para generar condición de ambiente corrosivo.	60
Figura 2.20 Cortadora de disco marca BUEHLER, modelo SamplMet 2 “abrasive cutter”	62
Figura 2.21 Equipo de limpieza por ultrasonido Buehler Ultramet II Sonic Cleaner.	62
Figura 2.22 Probetas para microscopía electrónica de barrido.	63
Figura 2.23 Microscopio Electrónico de Barrido Hitachi S-2400.	64
Figura 2.24 Detalle de montaje de la probeta a ser inspeccionada.	64
Figura 3.1 Grafica inverso de la diagonal promedio vs dureza Vickers.	66
Figura 3.2 Grafica carga vs dureza promedio.	67
Figura 3.3 Foto microestructura Sanicro 28 corte longitudinal, aumento 10x.	68
Figura 3.4 Foto microestructura Sanicro 28 corte longitudinal, aumento 40x.	68
Figura 3.5 Foto microestructura Sanicro 28 corte transversal, aumento 10x.	69
Figura 3.6 Foto microestructura Sanicro 28 corte transversal, aumento 40x.	69
Figura 3.7 Curva carga vs variación de longitud.	72
Figura 3.8 Esfuerzo vs deformación unitaria.	73
Figura 3.9 Esfuerzo real vs deformación real.	73
Figura 3.10 Curva S-N en escala semilogarítmica de los resultados obtenidos para los ensayos de fatiga al aire y en ambiente corrosivo del Sanicro 28.	77
Figura 3.11 Curvas comparativas log(S) vs log (N) del Sanicro 28 utilizando los resultados de la distribución de Weibull.	80
Figura 3.12 Comparación del comportamiento en fatiga corrosión del Sanicro 28 con la aleación Ti-6Al-4V recubierta con WC-Co y el acero inoxidable 316L, utilizando para todas la distribución de Weibull.	83
Figura 3.13 Comparación del Sanicro 28 con el Ti-6Al-4V recubierto con WC-Co y el Acero inoxidable A316L.	84
Figura 3.14 Diagrama de una torre de destilación de crudo.	85
Figura 3.15 Vista general del área de fractura de la probeta ensayada a 405Mpa.	89

Figura 3.16 Detalle de la superficie perimetral de la probeta ensayada a 405MPa, en la que se observa otro plano de propagación de grieta, lo que evidencia la presencia de entalla en esa zona.	90
Figura 3.17 Detalle de marcas radiales y estriaciones presentes en la superficie de la probeta.	91
Figura 3.18 Detalle de un punto de nucleación de grieta en el cual las marcas características han sido borradas por efecto de la deformación plástica producto del choque entre las dos caras de la superficie de fractura.	92
Figura 3.19 Punto de enucleación de grieta de una probeta ensayada a 337,5MPa. ..	93
Figura 3.20 Evidencia de múltiples frentes de avance de una grieta por fatiga.	94
Figura 3.21 Zona de despeje y avance de dos frentes de crecimiento de grieta.	94
Figura 3.22 Detalle de la zona de despeje, con la presencia de micro hoyuelos característicos.	95

INDIDCE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición (química nominal) del acero Sanicro 28 % en peso. ^[1]	11
Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del Sanicro 28 a 20 °C. ^[1]	12
Tabla 2.1 Composición química del acero inoxidable Sanicro 28 % en peso.	44
Tabla 2.2 Composición química del acero inoxidable Sanicro28 % en peso.	45
Tabla 3.1 Resultados ensayo de micro dureza Vickers.	65
Tabla 3.2 Dureza promedio calculada para cada nivel de carga aplicada.	66
Tabla 3.3 Datos de probetas ensayadas.	70
Tabla 3.4 Resultados Ensayo de tracción. Probeta N°1.	71
Tabla 3.5 Resultados Ensayo de tracción. Probeta N°2.	71
Tabla 3.7 Resultados del ensayo de fatiga corrosión para el Sanicro 28.	76
Tabla 3.7 Calculo de la vida promedio mediante método de Weibull para el ensayo de fatiga al aire del Sanicro 28.	78
Tabla 3.9 Calculo de la vida promedio mediante método de Weibull para el ensayo de fatiga corrosión del Sanicro 28.	79
Tabla 3.10 Cálculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo para el ensayo de fatiga corrosión del Sanicro 28.	79
Tabla 3.11 Cálculo de la vida promedio mediante método de Weibull Ti-6Al-4V recubierto con WC-Co. Corrosión.	81
Tabla 3.12 Calculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo del Ti-6Al-4V recubierto con WC-Co.	82
Tabla 3.13 Cálculo de la vida promedio mediante método de Weibull Acero inoxidable 316L corrosión.	82
Tabla 3.14 Calculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo del acero inoxidable 316L.	83
Tabla 3.15 Obtención de la ecuación de Basquin para el Sanicro 28 ensayado en ambiente corrosivo.	87
Tabla 3.16 Obtención de la ecuación de Basquin para el 316L ensayado en ambiente corrosivo.	87

Tabla 3.17 Obtención de la ecuación de Basquin para el sTi-6Al-4V ensayado en ambiente corrosivo.	87
---	----

INTRODUCCION

A lo largo de la historia un factor que ha caracterizado al hombre, por sobre todas las cosas, ha sido su constante evolución en el desarrollo de tecnologías y herramientas que le faciliten la realización de sus actividades diarias.

Estas tecnologías nos han llevado desde el descubrimiento de la rueda hasta la exploración espacial, lo que ha sido posible gracias a la capacidad de las sociedades de producir y conformar materiales cada vez más resistentes y duraderos, con la finalidad de satisfacer las exigencias a las que serán sometidos.

Siendo el área de diseño de componentes y elementos de maquina una de las más importantes en la ingeniería mecánica, no extraña que esta haya impulsado el desarrollo de la ciencia de los materiales, a investigar las propiedades y características de estos, para poder crear equipos cada vez más compactos, livianos y eficientes, capaces de operar en condiciones y ambientes severos.

En este sentido, empresas como Sandvik Materials Technology (SMT), con su filial en Venezuela SanVen, se han dado a la tarea de desarrollar materiales y elementos capaces de satisfacer exigencias específicas del mercado, como aleaciones de aceros altamente resistentes a la corrosión, varillas para soldar, tuberías de acero inoxidable sin costuras y tuberías para intercambiadores de calor, entre otros.

Entre los materiales producidos por SMT se encuentra la aleación austenítica multipropósito Sanicro28, originalmente desarrollada para su uso en evaporadores metálicos de Acido Fosfórico, que luego mediante diversos ensayos y pruebas de corrosión, se noto que presenta una excelente resistencia a la corrosión en diversos servicios corrosivos como H_2S , Ácido Sulfúrico, agua de mar, etc. por lo cual ha sido ampliamente usada en diversas aplicaciones.

Esta aleación se caracteriza principalmente por su alto contenido de níquel lo cual le proporciona alta resistencia a la corrosión de ácidos fuertes y a la fatiga en

varios ambientes. Adicionalmente presenta buena soldabilidad debido a su bajo contenido de carbono, sin embargo estas son solo algunas de sus propiedades, a lo largo de este trabajo se detallará la totalidad de las mismas. Debido a lo mencionado anteriormente es que se someterá al Sanicro 28 a ensayos de fatiga al aire y en ambiente corrosivo, para analizar si el mismo es capaz de soportar las exigencias de trabajo a las cuales será sometido. Se espera que esta aleación sea una alternativa para la sustitución del material utilizado en la construcción de condensadores de tope de torre de destilación.

Con estos ensayos bajo sollicitación de cargas cíclicas, se espera determinar el comportamiento de la aleación mediante la construcción de la curva S-N, utilizando el análisis estadístico de Weibull y el modelo de Basquin.

Como complemento a lo anteriormente mencionado se evaluarán las propiedades mecánicas del material, mediante ensayos de micro dureza vickers, así como el análisis de la microestructura a través de micro ataque e inspección fractográfica con microscopia electrónica de barrido, para determinar los mecanismos de falla presentes en este tipo de aleaciones.

OBTETIVOS

Objetivo General.

Evaluación en fatiga al aire y fatiga corrosión del acero inoxidable multipropósito austenítico Sandvik Sanicro 28, para la sustitución del material utilizado en los condensadores de tope de torre de destilación de un complejo refinador.

Objetivos Específicos.

- Evaluar las propiedades mecánicas del material base, a través de ensayos de micro dureza Vickers.
- Evaluar la microestructura del material mediante micro ataque.
- Evaluar el material mediante ensayo de fatiga al aire y bajo ambiente corrosivo variando el nivel de esfuerzo.
- Construir la curva S-N utilizando el análisis estadístico de Weibull y modelo de Basquin.
- Realizar el análisis fractográfico para determinar los mecanismos de falla presente para este tipo de aleaciones bajo estados dinámicos de cargas.

MARCO TEORICO

1.1 Acero.

En un principio se dijo que el acero es una aleación compuesta principalmente de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación. Esta aleación conserva las características metálicas del hierro, pero con propiedades notablemente mejoradas gracias a la adición del carbono.

La definición anterior describe a los aceros al carbono, debido a la posterior adición de otros elementos metálicos y no metálicos, como el cromo, el silicio, el molibdeno, etc. y con esto a la aparición de una nueva gama de aleaciones. El ingeniero alemán Carl Wilhelm Siemens definió al acero como: “un compuesto de hierro y otra sustancia que incrementa su resistencia”.

Entre estas nuevas aleaciones tenemos a los aceros inoxidable compuestos principalmente por hierro, carbono y cromo. Este último con una concentración superior al 10% en peso. El acero inoxidable es resistente a la corrosión, dado que el cromo, y otros elementos aleantes que contiene, poseen gran afinidad por el oxígeno y reaccionan con él, formando una capa exterior protectora, evitando así la corrosión del hierro. Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado.

Existen algunos tipos de acero inoxidable que contienen otros elementos aleantes como lo son el níquel y el molibdeno, la presencia de estos hace a la aleación capaz de resistir la exposición a los químicos corrosivos. Dentro de los aceros inoxidables se encuentran los aceros inoxidables austeníticos, estos se caracterizan por mantener la estructura de la austenita a temperatura ambiente figura 1.1.

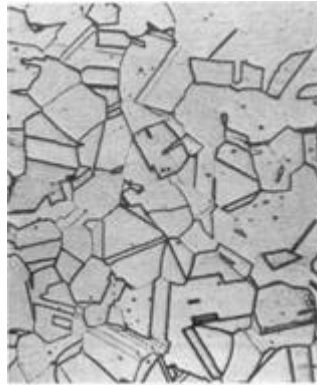


Figura 1.1 Estructura de la austenita.

1.1.1 Acero Sanicro 28.

El acero inoxidable Sanicro 28, desarrollado por la compañía sueca Sandvik, es una aleación austenítica multipropósito para servicio en ambientes altamente corrosivos. Este acero se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión de ácidos fuertes, alta resistencia a las picaduras y grietas producidas por la corrosión y buena soldabilidad. Compuesto en su mayoría por cromo y níquel en una cantidad mayor al 26% en peso, también posee otros elementos aleantes como el molibdeno, manganeso, cobre y silicio, estos en un menor porcentaje. Todos estos elementos agregados a la aleación hierro-carbono incrementan su dureza, ductibilidad y resistencia a la corrosión, debido a la alta presencia de grano austenítico a temperatura ambiente, en comparación con aleaciones convencionales de hierro-carbono cuya estructura principal es la ferrita.

Tabla 1.1 Composición (química nominal) del acero Sanicro 28 % en peso. ^[1]

Composición química del acero Sanicro 28 % en peso								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
max.	max.	max.	max.	max.				
0.020	0.6	2.0	0.025	0.015	27	31	3.5	1.0

1.1.1.1 Propiedades Mecánicas del Acero Sanicro 28.

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del Sanicro 28 a 20 °C. ^[1]

Propiedades mecánicas del Sanicro 28 a 20 °C			
Resistencia a la Tracción R_m MPa	% de Elongación min.	% de Reducción de Área ^{a)} min.	Dureza Vickers aprox.
550-750	40	40	160

a) Basado $L_0=5.65\sqrt{S_0}$, donde L_0 es la longitud original y S_0 es el área de la sección transversal.

Debido a su estructura austenítica el Sanicro 28 tiene muy buena resistencia al impacto tanto a temperatura ambiente como a temperaturas por debajo de los -196 °C. Los valores mínimos de energía en el impacto producto del ensayo Charpy-V a una temperatura de -60 °C son de 96J para un espécimen paralelo a la dirección de laminación y 80J para un espécimen perpendicular a la dirección de laminado.

Debido a la fragilización causada por la precipitación de las fases intermetálicas el Sanicro 28 no debe ser expuesto a temperaturas superiores a los 600°C por prolongados periodos de tiempo.

1.1.1.2 Resistencia a la Corrosión.

Diseñado para trabajar en ambientes corrosivos, el Sanicro 28 fue utilizado originalmente para la manufactura de ácido fosfórico, especialmente para intercambiadores de calor en las unidades de concentración del ácido, donde existen las peores condiciones de corrosión en la línea de producción, y luego se noto que presenta una excelente resistencia a la corrosión en diversos ambientes de trabajo, como ácido sulfhídrico (H₂S), ácido sulfúrico (H₂SO₄), agua de mar (solución de

cloruro de sodio al 3% en peso), etc. Por lo cual ha sido ampliamente usada en diversas aplicaciones en la empresa petroquímica, en el transporte de gas, en intercambiadores de calor en plantas nucleares y sistemas de enfriamiento por agua salada.

Dentro del proceso de manufactura de ácido fosfórico se encuentran impurezas como cloruros y fluoruros derivados del material en bruto de la roca de fosfato, estos presentan concentraciones importantes. Pruebas de laboratorio demuestran que el Sanicro 28 es más resistente a estas impurezas que otras aleaciones, como se muestra en la figura 1.2. La temperatura es otro factor que afecta de forma directa la influencia de la corrosión en los materiales, como puede observarse en la figura 1.3.

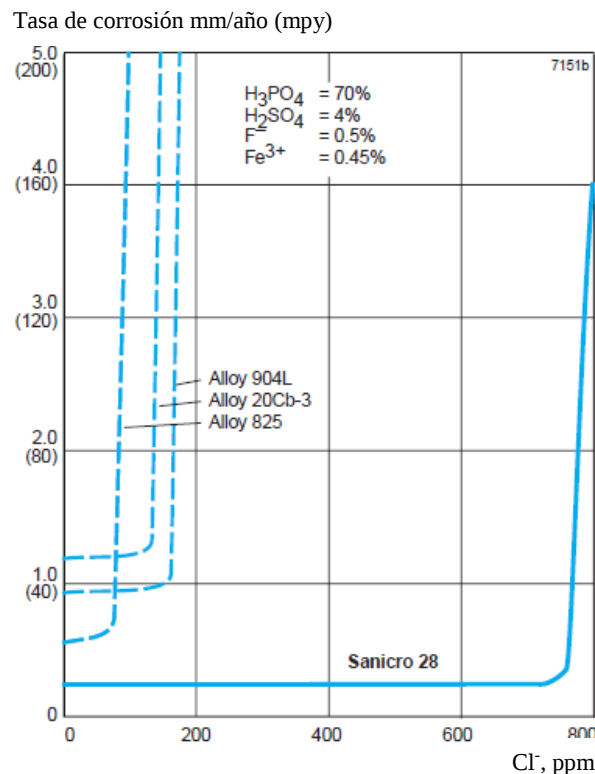


Figura 1.2 Tasa de corrosión (mm/año) en ácido fosfórico contaminado con distintas concentraciones de cloruros (ppm) a 100°C, para Sanicro 28 y otras aleaciones. ^[1]

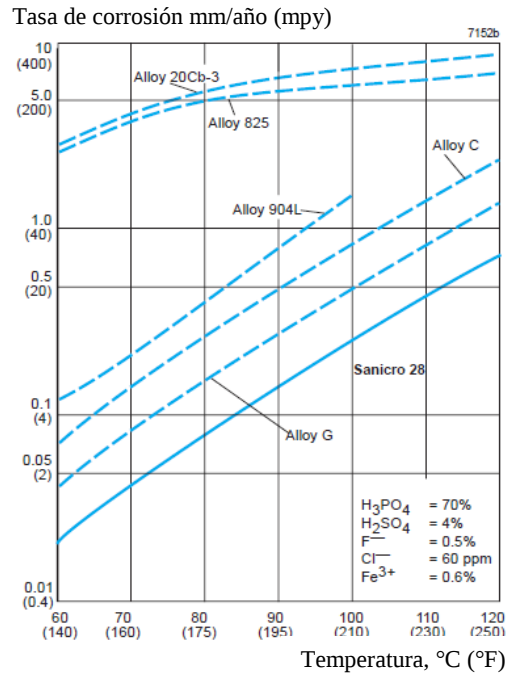


Figura 1.3 Tasa de corrosión (mm/año) en ácido fosfórico contaminado con a diferentes temperaturas (°C), para Sanicro 28 con otras aleaciones. ^[1]

El Sanicro 28 muestra muy buena resistencia a la corrosión al ataque del ácido fosfórico contaminado. Como se puede observar en la siguiente figura 1.4, un diagrama de isocorrosión donde la curva representa la tasa de corrosión de 0.1 mm/año, la respuesta del Sanicro 28 a otro ácido como el ácido sulfúrico continúa siendo mejor que otras aleaciones como la ANSI 316L y La 904 L.

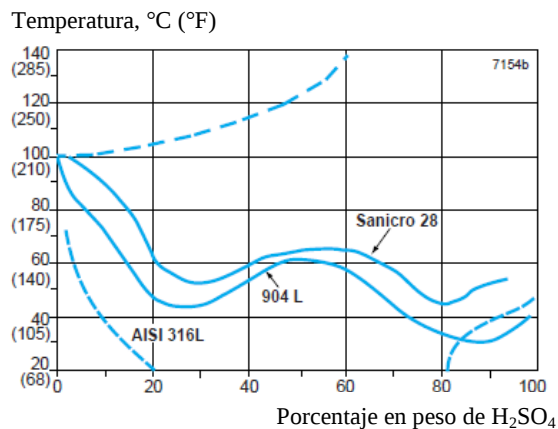


Figura 1.4 Diagrama isocorrosión para Sanicro 38, aleación 904L y AISI 316L, en ácido sulfúrico, la curva representa una tasa de corrosión de 0.1mm/año. ^[1]

En el proceso de producción de ácido sulfúrico se encuentran iones de cloruro contaminantes, esto incrementan la corrosividad de la solución, de igual manera el Sanicro 28 tiene buena resistencia, esta es mejor que la aleación 904L, especialmente para trabajo con ácido sulfúrico altamente contaminado (por encima del 20%), el Sanicro 28 es mucho más resistente que la aleación súper-dúplex de acero inoxidable SAF 2507 como se muestra en la figura 1.5.

La aleación Sanicro 28 es más resistente al ataque del ácido clorhídrico que las aleaciones de acero inoxidable con menor contenido porcentual de cromo y molibdeno, esto lo hace una opción fiable para trabajos en ambientes contaminados con este ácido, esto se evidencia en la figura 1.6. Otra cualidad del Sanicro 28 es la resistencia al ácido fluorhídrico y al ácido hidrofluosilícico ($\text{H}_2\text{SiF}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), como puede observarse en la figura 1.7.

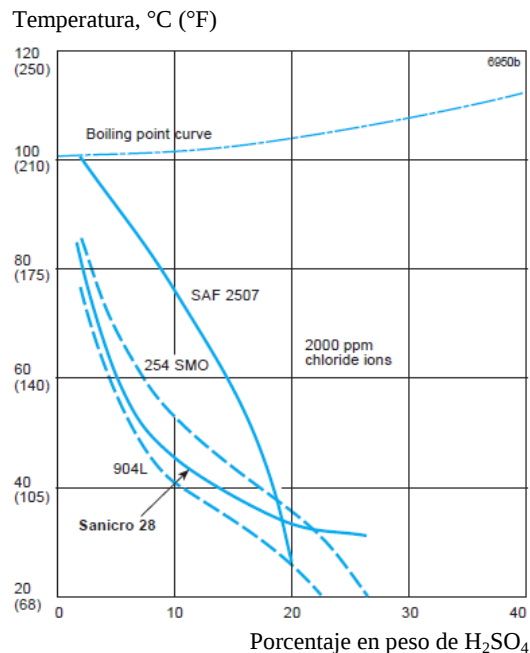


Figura 1.5 Diagrama isocorrosión para Sanicro 28 y otras aleaciones en ácido sulfúrico contaminado con iones de cloruro en 2000 ppm, la curva representa una tasa de corrosión de 0.1 mm/año.^[1]

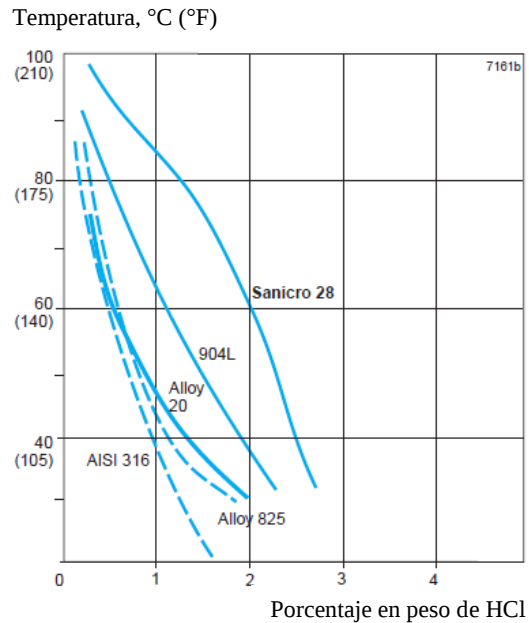


Figura 1.6 Diagrama isocorrosión para Sanicro 28 y otras aleaciones en ácido clorhídrico, la curva representa una tasa de corrosión de 0.1 mm/año. ^[1]

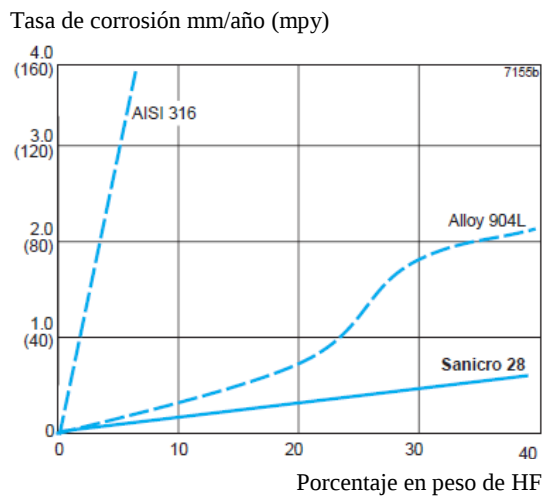


Figura 1.7 Tasa de corrosión en ácido fluorhídrico a 20 °C, para Sanicro 28, aleación 904L y AISI 316. ^[1]

Tanto la aleación 316L y el Sanicro 28 son completamente resistentes al ácido acético a cualquier temperatura y concentración a presión atmosférica, sin embargo al elevar la presión y la temperatura el 316L presenta corrosión, mientras que el Sanicro

28 resiste al ácido, véase figura 1.8. El ácido acético a menudo se encuentra contaminado por ácido fórmico, esto lo hace más corrosivo.

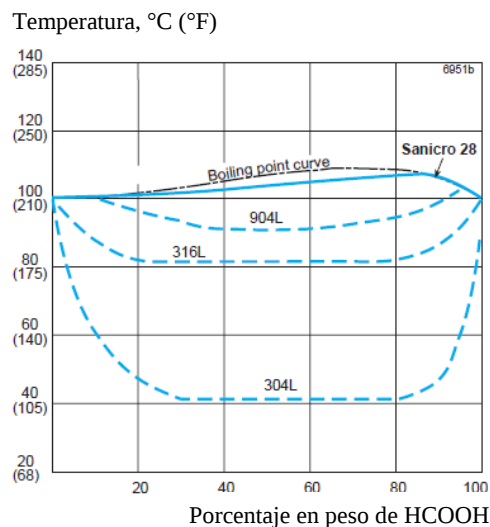


Figura 1.8 Diagrama isocorrosión para Sanicro 28 y otras aleaciones, en ácido fórmico, a una tasa de corrosión de 0.1 mm/año. ^[1]

Sanicro 28 posee excelente resistencia a la corrosión al ácido nítrico, pruebas realizadas de acuerdo a la norma ASTM A262 ^[2], la tasa de corrosión resultado de esta prueba es menor a 0.1 mm/año.

Debido al alto contenido de cromo y níquel el Sanicro 28 es considerablemente más resistente a la corrosión del hidróxido de sodio (NaOH), a temperaturas y concentraciones moderadas, que otras aleaciones convencionales como la AISI 304 y AISI 316. El Sanicro 28 también es una opción adecuada para reemplazar al níquel puro, el cual puede ser afectado por la erosión.

1.1.1.3 Corrosión por Picadura.

La alta aleación Sanicro 28 puede resistir a muy altas temperaturas en ambientes agresivos sin ser afectado por la picadura. En la figura 1.9 la temperatura crítica a la picadura (CPT por sus siglas en inglés) para ciertas aleaciones en solución de cloruro de sodio comparable al de mar, se observa que el Sanicro 28 posee una

mayor CPT que la de la aleación 904L y la aleación 825 incluso en este tipo de soluciones. La curva se desplaza hacia arriba para soluciones con menor salinidad.

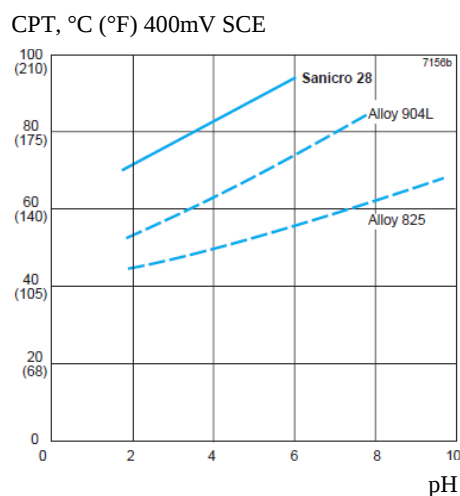


Figura 1.9 Temperatura crítica a la picadura (CPT) a 400mV, para diferentes aleaciones en agua salada simulada (NaCl 3%) con diferentes valores de PH. ^[1]

1.1.1.4 Corrosión Bajo Tensión.

Aceros austeníticos ordinarios como las aleaciones AISI 304 y AISI 316 son susceptibles a la corrosión bajo tensión (SCC por sus siglas en ingles) en solución de cloruro de sodio a temperaturas por encima de 60°C. Esta susceptibilidad a la corrosión disminuye a medida que aumenta la concentración de níquel en la aleación. También si el contenido de cromo es superior al 20% en peso. Debido al alto contenido de cromo y níquel del Sanicro 28, este posee una buena resistencia a SCC, como se muestra en la figura 1.10 que muestra los resultados de SCC en una solución de cloruro de calcio al 40%.

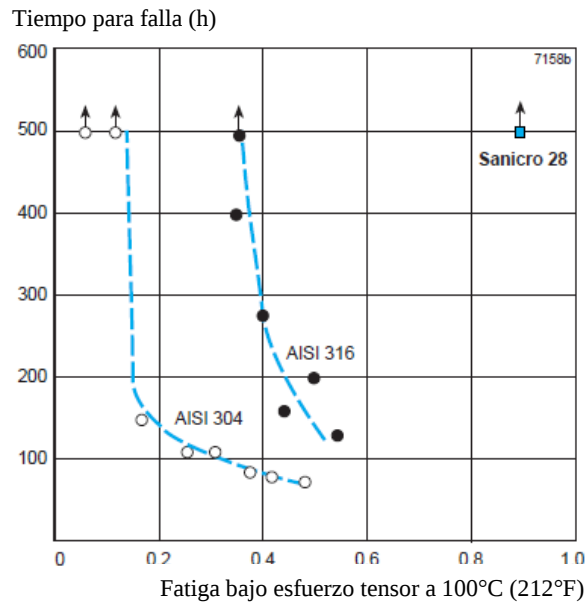


Figura 1.10 Resultado de prueba de SCC para diferentes aleaciones en una solución de cloruro de calcio (CaCl_2) al 40% y a 100°C con un pH de 6.5. ^[1]

1.1.1.5 Corrosión Inter granular.

En la figura 1.11 se observa el diagrama temperatura tiempo concentración (TTC) resultado de una prueba realizada de acuerdo a la norma ASTM G-28 ^[3] (inmersión en sulfato de hierro y ácido sulfúrico por un periodo de 120 horas), como puede observarse en el diagrama la aleación Sanicro 28 resiste a la corrosión inter granular en un intervalo de temperatura crítico entre 600-700 °C por un tiempo máximo de 30 minutos en un ambiente altamente corrosivo, también se puede observar que la aleación 904L es más susceptible a la corrosión inter granular.

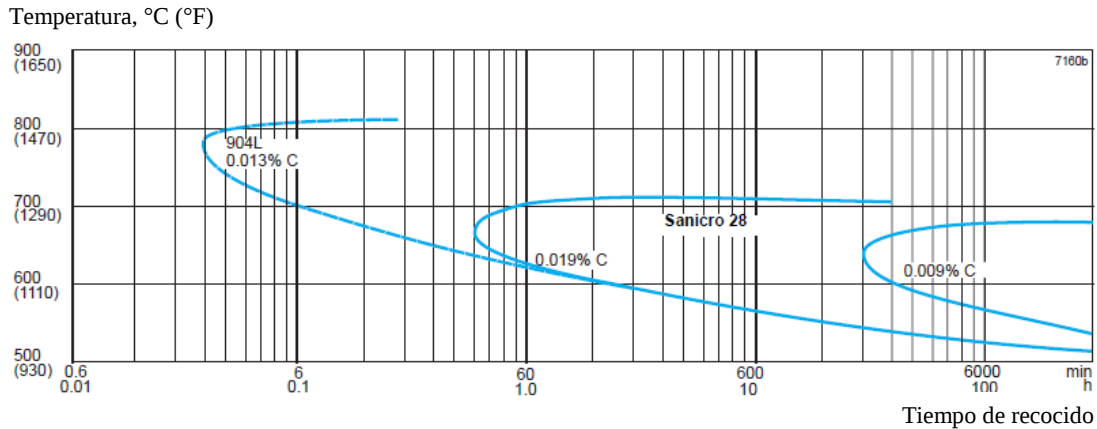


Figura 1.11 Diagrama TTC para Sanicro 28 y otras aleaciones con distintas concentraciones de carbono. La curva representa los límites de concentración normales para el contenido de carbono.^[1]

1.2 Fatiga.

Desde la antigüedad es conocido que los materiales rompen bajo cargas dinámicas con mayor facilidad que con cargas estáticas, sin embargo este comportamiento de los materiales, no fue considerado de interés por los ingenieros, si no hasta mediados del siglo XIX, cuando comenzaron a producirse prematuras roturas en las ruedas de los ferrocarriles, que en la época de la revolución industrial, se presentaban como el medio más importante de transporte y desarrollo ingenieril.

1.2.1 Definición.

Existen múltiples componentes que durante su servicio, según y cómo estén operando, rompen de manera brusca y sin evidenciar deformación plástica, aun y cuando estos se encuentran sometidos a valores de carga inferiores al valor de ruptura. Este efecto indeseable en los elementos se conoce como fatiga y es necesario estudiarlo por varias razones, entre las que se encuentran, vidas humanas, pérdidas económicas, e interferencia en la producción de productos y servicios.

Aunque la causa de las fallas y el comportamiento de los materiales sean conocidos, la detección de las mismas no es fácil de establecer. La selección de materiales, manejo inadecuado de los equipos y diseños inapropiados, son algunas de las fuentes más comunes del origen de estos inconvenientes.

Debido a que estas fallas son inevitables, ya que tarde o temprano ocurrirán, es deber del ingeniero predecirlas y tomar las medidas preventivas necesarias para anticipar cuando van a ocurrir y evitar futuras eventualidades.

Se conoce como fatiga, al efecto por el cual, materiales sometidos a cargas dinámicas cíclicas y variables y cuyos esfuerzos promedio a menudo son bajos, concentran tensiones locales que aunque no reducen de manera significativa la resistencia estática, producen la fractura de los componentes fabricados con los mismos. “Se estima que la fatiga comprende aproximadamente el 90% de todas las fallas de los componentes metálicos, siendo de tipo catastrófica y ocurriendo rápidamente sin aviso”.^[4]

“La fatiga se define como un cambio estructural progresivo, localizado y permanente que ocurre en un material sometido a cargas repetidas o fluctuantes que tienen valores máximos menores que el esfuerzo de fluencia del material, que pueden culminar en la formación de grietas o en la fractura total tras un número suficiente de ciclos.”^[5]

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzos cíclicos, esfuerzos de tracción y deformación plástica; si alguno de estos tres elementos no está presente, el agrietamiento por fatiga no se iniciará y propagará. Existen otro tipo de variables que afectan la vida de la fatiga como las concentraciones de esfuerzo, temperatura, corrosión, micro estructura, tensiones residuales y tensiones combinadas”.^[6]

Debido a la velocidad con la que se producen las fallas por fatiga, son consideradas altamente peligrosas ya que las mismas no evidencian deformación

plástica del material en la zona de la falla, haciendo de esta característica la más notable del fallo por fatiga.

El colapso de los elementos por fatiga se inicia con la aparición de una grieta, de tamaño microscópico, la cual aumenta a partir de alguna discontinuidad y se desarrolla cada vez más con cada ciclo. Para el momento en el que una grieta se hace evidente y de tamaño macroscópico, el colapso del componente ocurrirá en muy corto plazo, la fractura de la pieza no ocurre precisamente por el crecimiento de la grieta, la misma ocurre debido a que la sección remanente a la grieta es muy pequeña para soportar la carga, lo que produce el colapso por sobre carga.

La fatiga ocasiona tres efectos principales en el material, pérdida de la resistencia, pérdida de la ductilidad y aumento en la incertidumbre en cuanto a la resistencia y vida útil del material. Es común observar que las grietas por fatiga se produzcan en cambios de secciones o discontinuidades superficiales del material, estas discontinuidades generan concentradores de tensiones que, aunque no afectan la resistencia estática ya que la concentración de tensiones es liberada por deformación plástica. Al contrario en las cargas de fatiga existe poca deformación plástica por lo que el valor del esfuerzo se mantiene considerablemente alto en estos concentradores, lo que reduce la resistencia a la fatiga en estas zonas.

1.2.2 Tipos de esfuerzos de fatiga.

Los materiales y elementos de máquina fabricados con estos, pueden estar sometidos a sistemas de carga sencillos los cuales generan esfuerzos de flexión, torsión o axiales (tensión compresión). Es la combinación de estas cargas lo que ocasiona los sistemas complejos como se ha mencionado anteriormente, no es la combinación de estas fuerzas.

Estas fuerzas variables en el tiempo son las que generan los esfuerzos fluctuantes. Mott afirma que... “Todo esfuerzo variable con promedio distinto de cero se considera esfuerzo fluctuante” ^[7]. Existe un caso especial de esfuerzo

fluctuante, muy común, conocido como, *esfuerzo repetido en una sola dirección*, en el cual una carga es aplicada y removida repetidamente.

Una característica acentuada de los esfuerzos fluctuantes sobre maquinaria, es que los mismos manifiestan un patrón sinusoidal, ya que estos son muy comunes en elementos rotativos. Sin embargo existen otros tipos de patrones, algunos bastante irregulares.

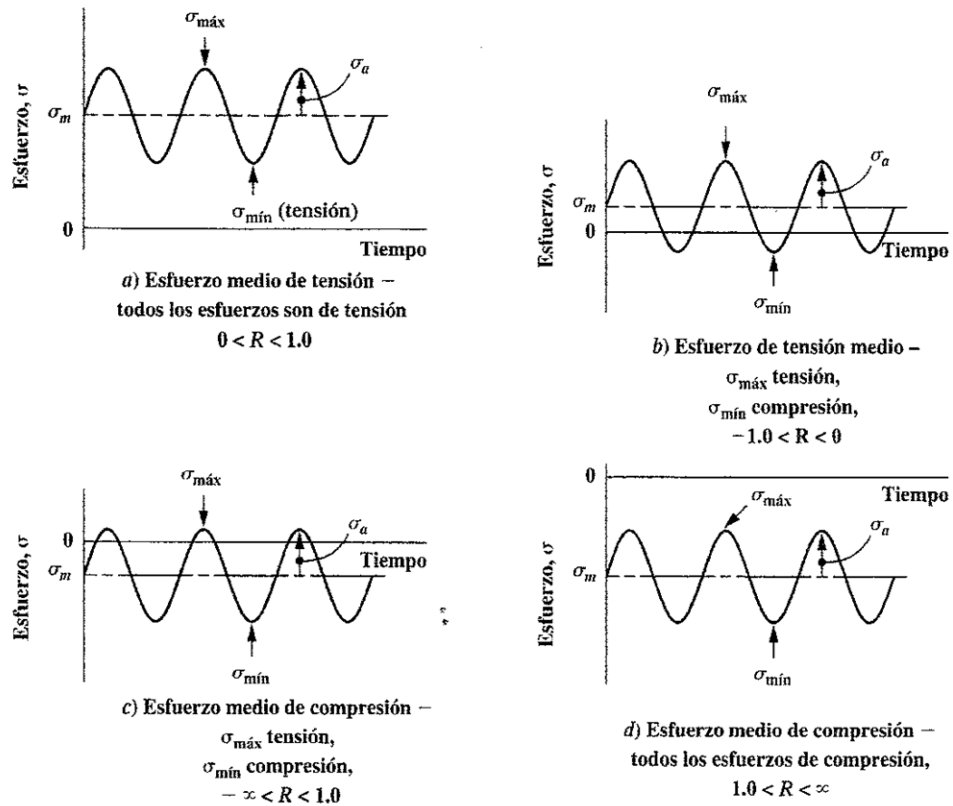


Figura 1.13 Esfuerzos fluctuantes. ^[7]

En la figura 1.13 se representan las diferencias que existen entre los distintos esfuerzos, en las mismas se identifican los esfuerzos con la letra “ σ ”, sin embargo también pueden ser identificados por la letra “S”, por la inicial de su denominación en inglés “*STRESS*”.

Los esfuerzos descritos en la grafica son S_m y S_a , donde S_m representa el esfuerzo medio y S_a el valor del esfuerzo alternante. Las condiciones de los esfuerzos pueden definirse en base a los esfuerzos máximos y mínimos. La relación de esfuerzos se define como:

$$R = \frac{S_{max}}{S_{min}} \quad (E. 1)$$

Donde:

S_{max} = esfuerzo máximo

S_{min} = esfuerzo mínimo.

Los esfuerzos alternantes y medios se definen como:

$$\text{Esfuerzo alternante: } S_a = \frac{\Delta S}{2} \quad (E. 2)$$

$$\text{Esfuerzo medio: } S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (E. 3)$$

Los esfuerzos máximos y mínimos se definen como:

$$\text{Esfuerzo máximo: } S_{max} = S_m + S_a \quad (E. 4)$$

$$\text{Esfuerzo mínimo: } S_{min} = S_m - S_a \quad (E. 5)$$

Se conoce ΔS , como el intervalo de esfuerzo y el mismo se define como:

$$\Delta S = S_{max} - S_{min} \quad (E. 6)$$

Conocidos los términos presentes en las graficas y la definición de los mismos, se observa que, para un valor de relación de esfuerzo entre 0 y 1 nos encontramos en una condición de esfuerzo medio de tensión (figura 1.13 a), ya que los valores de S_{max} y S_{min} son de tensión (positivos). Caso contrario cuando el valor de R se encuentra entre -1 y 0 nos encontramos en la condición de esfuerzo medio de compresión (figura 1.13 d), donde todos los esfuerzos son de compresión (negativos). Los demás casos (figura 1.13 b y c), son variantes de las condiciones antes

mencionadas, conocidas como, esfuerzo medio de compresión – S_{max} tensión S_{min} compresión, esfuerzo de tensión medio – S_{max} tensión S_{min} compresión, cuyos valores de relación de esfuerzo son $1 > R > -\infty$ y $-1 > R > \infty$, respectivamente.

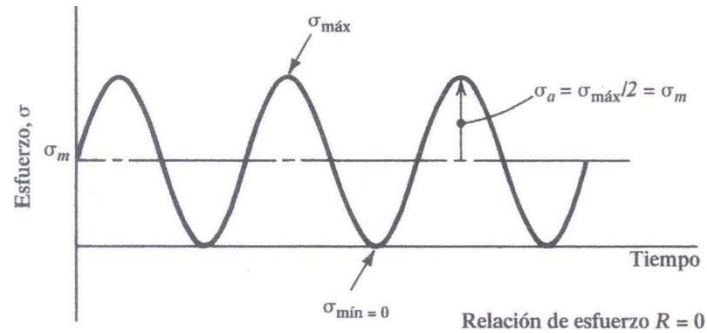


Figura 1.14 Esfuerzo repetido en una sola dirección o pulsante. ^[7]

En la figura 1.14 se observa el caso de *esfuerzo repetido en una sola dirección o pulsante*, antes mencionado, donde el valor de S_m es igual a S_a , y el valor de S_{max} o S_{min} se hace nulo. Según sea el caso se le considera de tensión (positivo) o compresión (negativo), y el valor de R es siempre cero.

Existen condiciones en las cuales los esfuerzos no se encuentran uniformemente distribuidos en la probeta, por lo que sus resultados se expresan en términos del esfuerzo nominal S , que es la sollicitación calculada por la teoría, sin tener en cuenta sus variaciones en las condiciones producidas por las discontinuidades geométricas tales como agujeros, muesca y roscas. ^[5]

1.2.3 Etapas o zonas del proceso de fatiga.

Al observar una superficie que fractura por fatiga, esta presenta una apariencia característica, en la cual se pueden apreciar tres zonas bien definidas desde el punto de vista morfológico (figura 1.15). Estas tres zonas se deben al proceso progresivo mediante el cual se produce la falla por fatiga, este proceso está dividido en tres etapas y las mismas están definidas como:

Etapa I: Es la iniciación de la grieta y su propagación por el plano de deslizamiento de la fractura, extendiéndose desde la superficie hacia el centro aproximadamente 45° de la dirección del esfuerzo axial, en esta etapa la fractura nunca se extiende por más de 2 o 5 granos de alrededor del origen. En cada grano, la superficie de fractura está a lo largo de un plano cristalográfico bien definido. Usualmente no existen estriaciones de fatiga asociadas con la superficie de fractura en esta etapa. En algunos casos, dependiendo del material, el ambiente y el nivel de esfuerzo, la fractura de la etapa I puede que no sea perceptible.^[8]

Etapa II: El crecimiento de la grieta no está gobernado por el esfuerzo cizallante local sino por el esfuerzo normal máximo principal en la vecindad de la punta de la grieta. Así, la punta de la grieta está obligada a desviarse desde su camino de deslizamiento y propagarse en una dirección perpendicular a la dirección del máximo esfuerzo normal.^[8]

Etapa III: Ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no puede soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es el resultado de una sobre carga, puede ser frágil, dúctil, o una combinación de ambas.^[8]

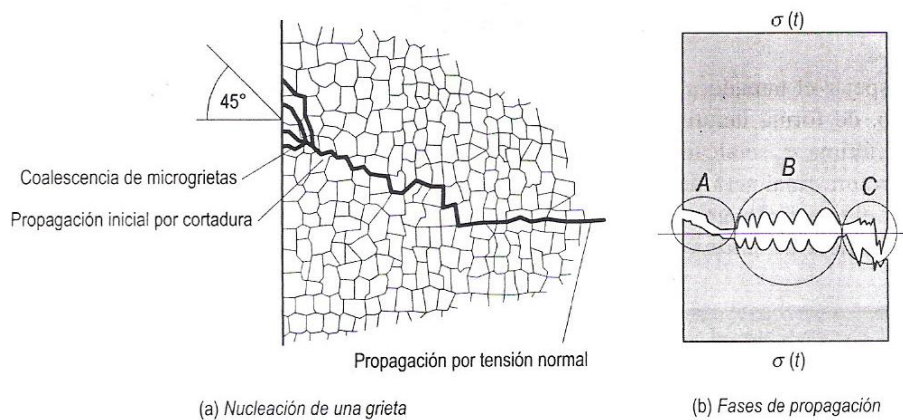


Figura 1.15 Zonas de iniciación (A), propagación (B) y fractura (C).^[9]

1.2.4 Superficie de fractura.

Es común que la fractura por fatiga presente una apariencia frágil (como una fractura por impacto en frío), en la cual no existe deformación aparente. Macroscópicamente la superficie es normal al eje del esfuerzo principal.

Cerca de su origen la superficie es aparentemente lisa y la misma se vuelve cada vez más áspera (Etapa I), a lo largo de la propagación de la grieta esta se vuelve fibrosa (Etapa II), en su etapa final se identifica una superficie de aspecto irregular debido al colapso de la pieza, ya que su sección transversal se vuelve tan pequeña que fractura por sobre carga, al no poder resistir los esfuerzos a los que está sometido el elemento (Etapa III) figura 1.16.

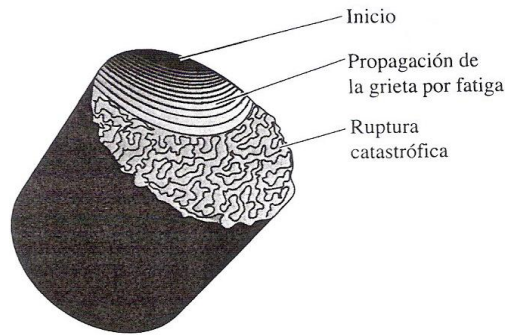


Figura 1.16 Superficie de fractura en fatiga. ^[9]

Durante la segunda etapa la grieta se propaga a una velocidad elevada y se producen las conocidas estrías de fatiga, las cuales son útiles ya que pueden ser utilizadas en el análisis de la falla por fatiga para determinar origen de la falla, dirección de propagación y la velocidad de propagación.

En esta etapa de propagación se pueden identificar tres tipos de marcas características conocidas como:

Marcas de playa: Son visibles macroscópicamente y se presentan como anillos concéntricos, que se expanden a partir del punto o puntos de playa. Estas pueden

indicar la posición de la punta de la fisura. Cuando la propagación de la grieta ocurre de manera ininterrumpida y bajo condiciones de carga no variables, no se exhiben marcas de playa, figura 1.17.

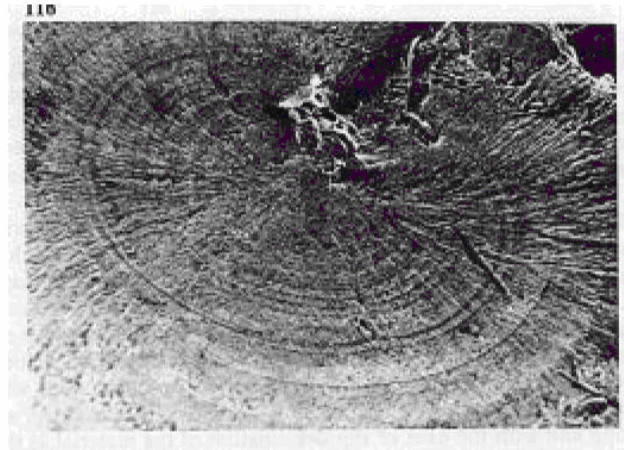


Figura 1.17 *Marcas de Playas y marcas radiales*

Estriaciones: Son de tamaño microscópico por lo que solo pueden ser observadas mediante análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM), en algunos casos es necesario utilizar replicas fractográficas. Cada estriación representa la distancia de avance del frente de fisura en cada ciclo y el ancho de las mismas depende y aumenta con el incremento del intervalo de tensión. Aunque son de apariencia similar a las marcas de playa, estas poseen origen y tamaño distinto, figura 1.18.

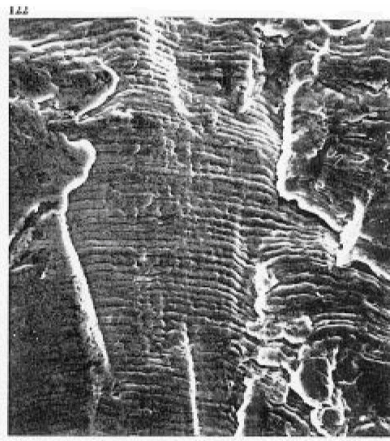


Figura 1.18 *Estriaciones y marcas radiales.*

Marcas radiales: Pueden ser detectadas a simple vista, y se dice que, en conjunto con las marcas de playa, estas indican la dirección de propagación de las grietas, figura 1.18.

Es de destacar que la presencia de estas características marcas en la superficie de fractura, confirma que la causa de la misma ha sido fatiga. Sin embargo la ausencia de una o todas estas marcas no excluye a la fatiga como causa de la falla ya que si esta ocurre de manera rápida y sin variación de carga no aparecerán estas marcas.

1.2.5 Velocidad de propagación de la grieta.

La vida a la fatiga es función de dos aspectos importantes, la nucleación y la velocidad de propagación de la grieta. La nucleación de la grieta es el aspecto aleatorio y que introduce el factor probabilístico en el estudio de la fatiga, por lo que el mismo es imposible de determinar por el ingeniero. Al contrario la velocidad de propagación de la grieta, es una función bien definida, la cual puede ser anticipada por el ingeniero para determinar y controlar el efecto de fatiga. Es necesario recordar que no es función del diseñador evitar la fatiga, si no anticiparse a esta, para predecir cuándo ocurrirá y así evitar daños indeseados, sobre todo porque la fatiga es un fenómeno que ocurre en servicio, por lo que sus consecuencias pueden ser catastróficas.

La rapidez de crecimiento de la grieta es una función del intervalo del factor de intensidad de esfuerzo, ΔK , que caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. Por debajo de un ΔK umbral no crece grieta; para intensidades de esfuerzo un poco mayores, una grieta crece con una velocidad determinada por la expresión de Paris-Edrogon ^[10]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \text{ (E. 7)}$$

Donde:

n: Valor empírico dependiente del material.

C: Valor empírico dependiente del material.

da/dN: pendiente de la curva de velocidad de crecimiento.

La velocidad de crecimiento de la grieta aumenta a medida que aumenta esta misma. A medida que aumenta ΔK , las grietas crecen de manera inestable y con mayor rapidez, hasta que acontece el colapso del material.

A continuación se muestra un gráfico representando la velocidad de crecimiento de grieta en relación con el intervalo de factor de intensidad de tensiones ΔK .

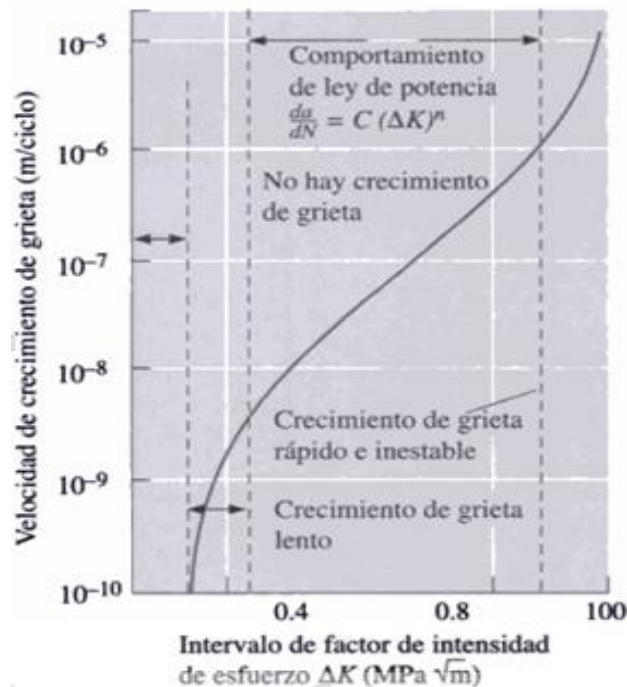


Figura 1.19 Gráfico de Velocidad de crecimiento de grieta en función del intervalo de factor de intensidad de esfuerzo. ^[11]

Este grafico fue realizado por primera vez por Paul C. Paris (1961), del mismo se obtuvo la siguiente ecuación:

$$N_f = \frac{da}{C\pi^{\frac{n}{2}}(\Delta\sigma)^n} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{Y^{\frac{n}{2}}a^{\frac{n}{2}}} da \quad (E. 8)$$

Donde:

N_f : número de ciclos hasta la rotura

Y : parámetro independiente de la longitud de la fractura

C y n : parámetros definidos por el material

a_c : longitud crítica de la grieta

a_0 : longitud de la grieta inicial

a_c se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (E. 9)$$

Siendo K_{Ic} es la tenacidad de fractura en deformaciones planas ^[10].

1.2.6 Curva S/N.

Existen múltiples ensayos para medir las propiedades de fatiga en materiales, uno de los más comunes es el ensayo de flexión rotativa, el cual se lleva a cabo bajo condiciones controladas, donde el esfuerzo medio, S_m , es nulo y la relación de esfuerzos $R = -1$. Los datos obtenidos de este ensayo son utilizados para realizar la curva S-N.

La curva S-N o curva de Whöler se genera ensayando un numero de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga. Se comienza por un valor alto de esfuerzo, el cual usualmente tiene un valor de dos tercios del límite de

fluencia, y se cuenta el número de ciclos (N) que resiste la probeta bajo esta carga. Este procedimiento se repite disminuyendo gradualmente el valor de la carga y contabilizándose el número de ciclos para cada ensayo.

Estos datos son representados en escala log-log, o semi-log. Es el numero de ciclos (N) el que se representa en la escala logarítmica ya que este puede variar de unos millares a muchos millones, cuando se representan los valores de esfuerzo en escala logarítmica, lo que se busca es que la representación de los datos se aproxime a una línea recta.

Es posible separar en zonas características y bien definidas, la mayoría de las curvas S-N, a) zona de bajo y medio ciclaje y una zona b) de alto ciclaje. Otras zonas que pueden identificarse y que son independientes de las antes mencionadas son, c) vida finita y d) vida infinita.

Se considera bajo ciclaje al área de la curva que se encuentra entre 1 y 10^3 ciclos, donde los especímenes resisten altas cargas que producen deformación tanto plástica como elástica. A partir de los 10^3 ciclos se considera zona de alto ciclaje y esta se asocia a cargas más bajas, donde la deformación es netamente elástica y se obtienen vidas más prolongadas.

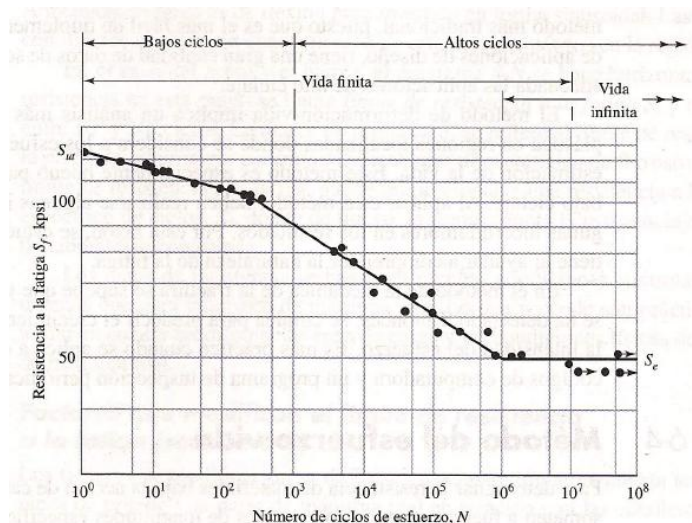


Figura 1.20 Diagrama S-N. ^[12]

En la figura se aprecia un cambio brusco en el comportamiento de la curva, entre la zona de vida finita (10^0 a 10^6 ciclos) y vida infinita (más de 10^6 ciclos), esto para el caso de los aceros. A partir de la zona de vida infinita no se aprecian daños en el material, por lo que podríamos inducir que para esfuerzos por debajo de este valor, el material resistirá infinitamente los esfuerzos alternantes, por lo que no se evidenciara el fenómeno de fatiga.

1.2.7 Resistencia y límite de fatiga.

Según la ASTM la resistencia a la fatiga se conoce como: *“El valor de esfuerzo bajo el cual después de N ciclos no ocurre falla”*. Existen múltiples variables que afectan la resistencia a la fatiga, la misma se ve afectada mayormente por, Esfuerzos residuales en la superficie del material, condiciones ambientales (corrosión), rugosidad superficial (tipo de maquinado empleado) y concentraciones de esfuerzos (muescas, agujeros, melladuras, etc.).

La resistencia a la fatiga, o mejor dicho su valor, son calculados a través de la curva S-N o diagrama de Whöler, el cual se encuentra en el intervalo de valores de carga, para los cuales la tendencia de la grafica es horizontal.

De igual manera de esta curva se determina el *límite de fatiga*, el cual no es más que el valor de los esfuerzos a los cuales la fractura por fatiga no ocurrirá. Estos valores suelen ser de entre un 35 a 60 % del valor de resistencia a la tracción permisible por el material.

Existen materiales como el aluminio, magnesio o cobre, para los cuales no se observa este comportamiento horizontal de la grafica, si no que la misma continúa decreciendo con el número de ciclos (N), por lo que no importa el valor de carga máxima aplicada la fractura por fatiga ocurrirá.

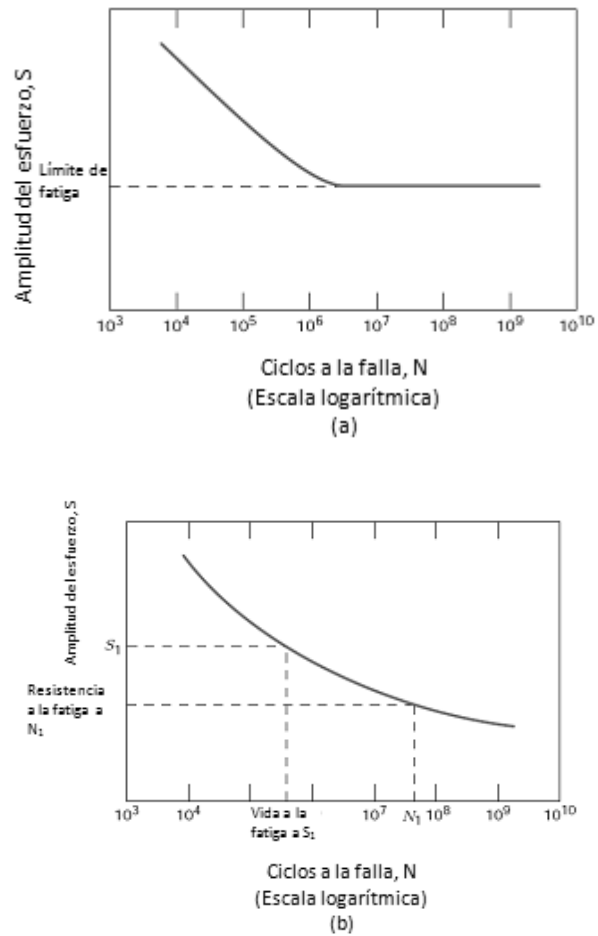


Figura 1.21 Curvas S-N. ^[13]

1.2.8 Modelos curva S/N.

Desde que A. Wohler, alrededor de 1850, comenzó a estudiar en Alemania el comportamiento de los materiales sometidos a cargas cíclicas, muchas han sido las funciones sugeridas para presentar la conducta del material. Una de las más comunes es la relación de Basquin, en la cual se modela mediante una hipérbola, donde b es el llamado coeficiente de Basquin, el cual es de valor negativo, que para la mayoría de los metales su valor se encuentra entre $-0,05$ y $-0,12$; S_f representa el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga:

Modelo de Basquin $S_a = S_f (N_f)^b$ (E. 10)

Otros modelos como el de Stromeyer, Palmgren o Weibull, son modificaciones o caracterizaciones del modelo de Basquin.

Para la zona de alto ciclaje, la cual incorpora el límite de fatiga, un modelo que da una aproximación para esta área es la ecuación de Stromeyer:

Modelo de Stromeyer $S_a = S_e + \left(\frac{N_f}{c}\right)^m$ (E. 11)

Donde:

Se: Limite de fatiga del material

C y m: son valores constantes propios de cada material y se pueden determinar por mínimos cuadrados.

Ya que el modelo de Stromeyer posee poca exactitud con los resultados para bajo ciclaje, se introduce el valor K , que ajusta dichos resultados, a esta nueva ecuación se le conoce como modelo de Palmgren:

Modelo de Palmgren $S_a = S_e + \left(\frac{N_f + K}{c}\right)^m$ (E. 12)

1.2.9 Modelo probabilístico de Weibull.

En la actualidad es de vital importancia recurrir a los modelos probabilísticos, para estudiar la prevención de fallas en los procesos industriales, ya que estos nos permiten contar con técnicas de predicción adecuadas, las cuales son fundamentales para asegurar una producción de calidad.

La Distribución de Weibull es un complemento entre la Distribución Normal y la Distribución Exponencial, que son casos particulares de ella. Por su complejidad, sólo se usa cuando se anticipa que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallas o cuando se producen muchas fallas y los tiempos

correspondientes no se ajustan a una distribución más simple. Este modelo tiene una extensa gama de uso, desde previsiones meteorológicas hasta prevención de fallas de cojinetes y mecanismos transmisores de potencia. ^[14]

El modelo de Weibull permite estudiar la distribución de fallas de cierto componente que deseemos conocer, la cual a través de un registro de las fallas nos permite observar la variación en el tiempo, en el intervalo considerado como vida del elemento, además facilita la identificación de las fallas aparte de permitirnos contar con una herramienta de predicción de comportamientos.

Es posible modelar los esfuerzos a los que son sometidos tanto los materiales mediante la Distribución de frecuencias de Weibull, así como también pueden modelarse situaciones del tipo tiempo-falla, ó bien puede indicar la vida útil y la seguridad de un elemento de maquina gracias a la capacidad de cambiar de forma dependiendo de la variación del valor del parámetro de forma β .

En 1951 Weibull propuso que la expresión empírica más simple que podía representar una gran variedad de datos reales podía obtenerse escribiendo:

$$\int \lambda(\tau) d\tau = \left(\frac{\tau - \delta}{\alpha} \right)^\beta \quad (\text{E. 13})$$

Por lo que la fiabilidad será:

$$R(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau - \delta}{\alpha} \right)^\beta} \quad (\text{E. 14})$$

Donde:

δ = Parámetro inicial de localización, el cual se utiliza para desplazar una distribución hacia un lado u otro. Este parámetro define el punto de partida u origen de la distribución.

α = Parámetro de escala o vida característica, Este es el parámetro que caracteriza a las distribuciones uniparamétricas. El parámetro de escala define cuán dispersa se encuentra la distribución.

β = parámetro de forma o pendiente de Weibull. Este parámetro define la forma de la distribución, y representa la pendiente de la recta de $F(t)$ vs t , describiendo el grado de variación de la tasa de fallas.

1.2.10 Factores que influyen en el comportamiento de la curva S/N.

Existen factores que deben ser tomados en cuenta ya que estos cambian la resistencia a la fatiga de los materiales sometidos a cargas fluctuantes, y al actuar en muchos casos en forma sinérgica podrían causar resultados no deseados en la respuesta del material. La micro estructura, condición superficial, tensión media, frecuencia de aplicación de carga y el tamaño entre otros son factores que afectan el comportamiento a la fatiga de los materiales.

En cuanto a la microestructura, en la mecánica de sólidos se suelen modelar los metales como materiales homogéneos, isotrópicos y elásticamente lineales. En un nivel microscópico algunas de estas suposiciones no son reales y la fatiga de metales es significativamente influenciada por la microestructura. ^[15]

La composición química, tratamiento térmico y trabajo en frío tienen una amplia influencia en el límite de fatiga de un material. Estos tres factores tienen un enorme número de variaciones sinérgicas y las generalizaciones concernientes a sus efectos en el comportamiento de la fatiga no son prácticas. Sin embargo, algunas consideraciones pueden ser formuladas para otros aspectos micro estructurales. ^[15]

Los granos finos generalmente proveen una mejor resistencia a la fatiga que los gruesos, pero no siempre ya que para altas temperaturas puede existir un efecto combinado de fluencia lenta y fatiga. Estos reducen las deformaciones locales, disminuyendo la cantidad de deslizamiento irreversible y proveen de mayores bordes

de grano para asistir la deflexión o detención de grietas transcristalinas, reduciendo de esta forma la tasa de crecimiento de estas.

Igualmente, la anisotropía causada por el trabajo en frío incrementa la resistencia a fatiga cuando el material se somete a carga en la dirección del trabajo, a diferencia de cuando la carga es aplicada en una dirección transversal. Esto se debe al endurecimiento por deformación y también al producto de las estructuras orientadas en la dirección del trabajo en frío.^[15]

Las inclusiones y porosidades actúan como concentradores de esfuerzo y son sitio común para la nucleación de micro grietas de fatiga, aunque también se producen fisuras en estos lugares durante el tratamiento térmico o el trabajo en frío del material. Bajo cualquiera de estas condiciones la resistencia a la fatiga es reducida por dichas discontinuidades.

En lo que se refiere al tamaño de la pieza, si el diámetro o espesor del espécimen es $< 10\text{mm}$, entonces el comportamiento a fatiga (curvas S-N) es razonablemente independiente al diámetro o espesor. A medida que el diámetro o espesor incrementa hasta 50mm , el límite de fatiga disminuye hasta un factor límite de alrededor de 0.7 a 0.8 del límite de la fatiga para especímenes menores de 10 mm en diámetro o espesor. Lo anterior es válido para el caso de flexión alternativa.^[15]

La mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie y es por esto que el acabado superficial juega un papel importante, debido a que es en la superficie donde normalmente se encuentra el esfuerzo máximo.

Se ha observado que mejorando la calidad del acabado superficial de las piezas mediante pulido, es posible prolongar de manera significativa la vida a la fatiga de los materiales, ya que al realizar este proceso se eliminan las marcas y surcos dejados por las herramientas de corte durante el proceso de mecanizado de las piezas.

Por otra parte, en lo que concierne a la frecuencia de aplicación de carga, su influencia en el comportamiento a la fatiga de los metales es complicado por los efectos sinérgicos de la temperatura, ambiente corrosivo y sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación del material con la tasa de deformación. Independientemente, las temperaturas elevadas y los ambientes corrosivos disminuyen la resistencia a la fatiga. El calentamiento del espécimen a frecuencias muy elevadas, debido al amortiguamiento de la histéresis, puede incrementar la temperatura del espécimen y cambiar el verdadero comportamiento a temperatura ambiente, lo cual es particularmente importante para metales de baja resistencia. En ausencia de corrosión y efectos de temperaturas y otros ambientes agresivos, los efectos de la frecuencia por encima de los 200 Hz pueden no ser tomados en cuenta. Mientras que para frecuencias en el rango de 1Hz a 200Hz los efectos en el comportamiento de fatiga son bajos para la mayoría de los aceros estructurales. Por lo contrario, si el intervalo de frecuencias es del mayor a los 1000 Hz, ocurren grandes cambios en la resistencia a la fatiga. ^[15]

La dependencia de la vida a la fatiga con la amplitud de la tensión media (E. 3) se observa en el diagrama S-N (figura 1.22), donde el aumento de la tensión media conduce a una disminución de la vida a fatiga. ^[13]

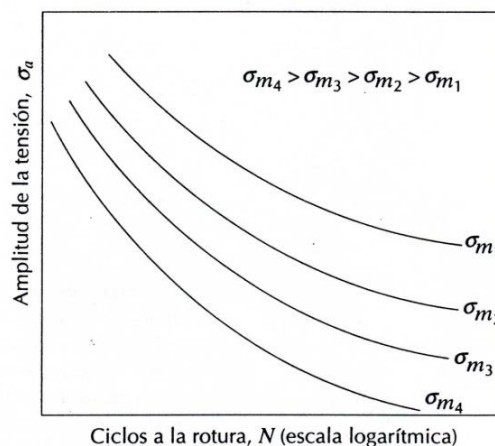


Figura 1.22 Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga. ^[13]

Asimismo, el diseño de un componente puede tener una influencia significativa en sus características de fatiga. Cualquier entalla o discontinuidad geométrica puede actuar como un concentrador de tensiones y como lugar donde se puede nuclear la grieta de fatiga; estos detalles del diseño incluyen orificios, ranuras de chavetas, roscas y otros. Cuanto más aguda es la discontinuidad (es decir, cuanto menor es el radio de curvatura), más severa es la concentración de tensiones.^[11]

ANTECEDENTES

Entre las investigaciones anteriores relacionadas al tema de este trabajo especial de grado podemos hacer referencia a las que a continuación se exponen:

- Perdomo, L (2003) ^[18] estudio el comportamiento a fatiga y fatiga corrosión, en flexión rotativa, de una aleación de titanio Ti-6Al-4V Eli recubierta con un deposito de WC-12%Co termo rociado por HVOF. Realizó ensayos de fatiga al aire tanto para el material base como al material recubierto, así como ensayos de fatiga en ambiente corrosivo al material base recubierto, utilizando una solución salina al 3% NaCl. Los esfuerzos a los cuales realizó los ensayos representaron una fracción del esfuerzo de fluencia tanto del material base como recubierto, los cuales se obtuvieron a partir de los ensayos de tracción realizados para cada condición. Encontró que el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima a la tracción del material recubierto disminuyeron producto de la fractura del recubrimiento en la zona elástica durante el ensayo. Los resultados de resistencia a la fatiga los obtuvo aplicando la ecuación de Basquin y el límite de fatiga del sustrato y el material base recubierto los obtuvo mediante el método de la escalera. Para los resultados de fatiga al aire del material recubierto obtuvo una disminución de resistencia a la fatiga entre 76% y 78% respecto al material base sin recubrir, así mismo el límite de fatiga del material recubierto disminuyó en un 60% pasando de 595 MPa para el sustrato, a 233 MPa para el material recubierto. Para la condición de fatiga en ambiente corrosivo obtuvo una disminución que varía entre 76 y 77 % respecto al material base ensayado al aire. Del estudio fractográfico observo que existe una buena adherencia del recubrimiento y la formación de múltiples inicios de grietas de fatiga, producto de la presencia de partículas de carburo de tungsteno no fundidas en la superficie del recubrimiento las cuales actúan como concentradores de esfuerzos, por lo que se obtuvo una gran

disminución en la vida a fatiga en los especímenes recubiertos con WC/12%Co.

- Silva, M., Pacheco, J. ^[19] Estudiaron el comportamiento a la fatiga y fatiga corrosión de un acero inoxidable 316L recubierto con una capa delgada de carbono tipo diamante (DLC), para lo que en primer lugar evaluaron las propiedades mecánicas estáticas del material recubierto y sin recubrir, mediante ensayos de tracción uniaxial, luego determinaron la curva S-N para ambas condiciones, tanto al aire como en una solución de NaCl al 3% en peso. Obtuvieron que la deposición de un recubrimiento de DLC sobre el acero origina un mejor comportamiento tanto para fatiga al aire como en ambiente corrosivo, aumentándose la vida a la fatiga al aire en un 12% para el nivel de esfuerzo más alto y en un 422% al más bajo, para el evento de fatiga corrosión se evidenciaron aumentos de 601% y 8157% respectivamente. El estudio fractográfico realizado a las muestras ensayadas a fatiga sugirió una aparente nucleación preferencial en la superficie del recubrimiento propagándose hacia el sustrato.

METODOLOGIA

2.1 Diagrama de Metodología.

El diagrama de flujo a continuación (figura 2.1) muestra el esquema del procedimiento experimental realizado.



Figura 2.1 Diagrama de Metodología.

2.2 Preparación de las Probetas.

Para el presente trabajo, se fabricaron probetas o especímenes de cuatro tipos, probetas para ensayo de fatiga en flexión rotativa, probetas para ensayo de tracción y especímenes para estudio de micro estructura y micro dureza tipo Vickers.

2.2.1 Preparación de probetas de fatiga y tracción.

La empresa SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY, proporcionó barras de acero inoxidable, de 20mm de diámetro y 200mm de longitud aproximadamente, trabajadas en caliente, recocidas, torneadas y pulidas. Este acero es designado con el nombre Sanicro 28 cuya composición química se especifica en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química del acero inoxidable Sanicro 28 % en peso.

Composición Química del Acero Inoxidable Sanicro 28 % en Peso									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,011	0,44	1,64	0,016	0,0005	26,75	30,60	3,31	0,96	0,054

Una vez obtenido el material, se realizó el mecanizado de las probetas a ser ensayadas, 28 de radio continuo para ensayos de fatiga al aire y fatiga-corrosión en flexión rotativa según la norma ASTM E 606 ^[16] en la cual se especifican sus dimensiones, tal y como se muestra en la figura 2.1.

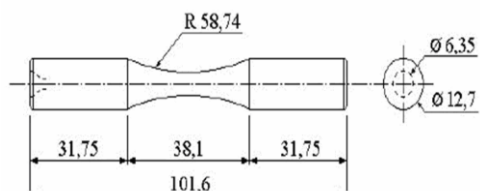


Figura 2.1 Esquema del dimensionamiento de las probetas de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E606. (Medidas en mm).^[16]

Las dos probetas restantes se dimensionaron según la norma ASTM E370 ^[17], la cual especifica el diagrama para probetas de ensayo de tracción, como se muestra en la figura 2.2.

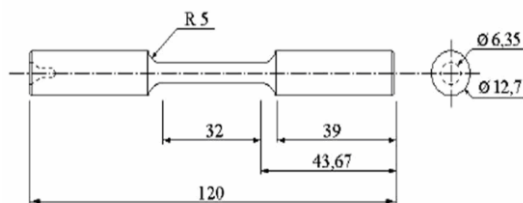


Figura 2.2 Esquema del dimensionamiento de las probetas de Tracción según la norma ASTM E370. (Medidas en mm).^[17]

2.2.2 Preparación de especímenes para ensayo de micro dureza y micro ataque.

Para los especímenes de ensayos de micro dureza se utilizó una barra de acero inoxidable trabajado en caliente, recocido, torneado y pulido Sanicro 28 de 20 mm de diámetro y 20 mm de longitud, de composición química descrita en la tabla 2.1.

Para los especímenes de micro ataque, se realizaron 3 cortes a una tubería sin costura de acero inoxidable Sanicro 28, conformada en caliente, cuya composición química se describe en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición química del acero inoxidable Sanicro28 % en peso.

Composición química del acero inoxidable Sanicro28 % en peso.									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0,012	0,53	1,65	0,015	0,0007	26,96	30,62	3,33	0,82	35,7

Se realizaron 2 cortes longitudinales y 1 transversal, los cuales fueron montados en una matriz de resina fenólica Buehler No. 20-3300-080, Figura 2.3. Para el montaje se utiliza la embutidora PRESTOPRES Struers, mostrada en la figura 2.4.

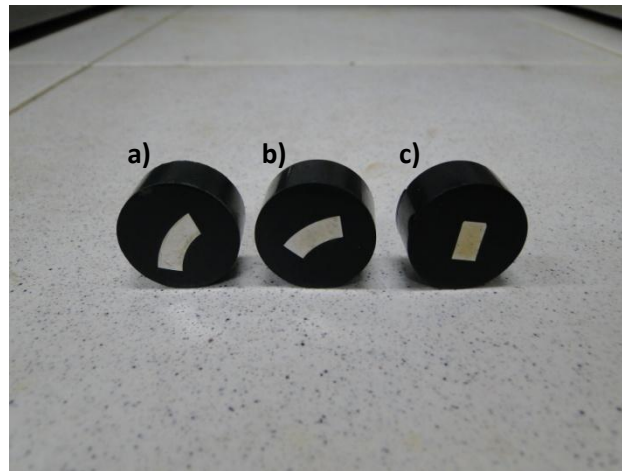


Figura 2.3 Montaje de las probetas en resina fenólica para el ensayo de microestructura, a) y b) corte longitudinal, c) corte transversal.



Figura 2.4 Embutidora PRESTOPRES Struers.

2.3 Pulido de Probetas.

Como continuación del proceso de preparación de probetas y especímenes, para la realización de los ensayos de fatiga, micro ataque y micro dureza, los especímenes después de haber sido preparados, fueron sometidos a un proceso de pulido.

Las probetas para ensayo de tracción no ameritan pulido, ya que las marcas ocasionadas por el proceso de mecanizado, tienen poca o ninguna incidencia en los resultados del ensayo en cuestión.

2.3.1 Probetas de fatiga y fatiga-corrosión.

Se procedió a realizar un desbaste fino de la superficie del cuello de las probetas con el fin de eliminar las marcas obtenidas en el proceso de mecanizado de las mismas, ya que estas podrían alterar el comportamiento a la fatiga del material.

Para este proceso se utilizó un torno marca MYFORD, modelo ML7-R, Figura 2.7, este posee un plato de mordazas graduables, en el cual se fija un lado de la probeta, mientras que del lado contrario de ésta se apoya en un centro punto.



Figura 2.7 Torno MYFORD, modelo ML7-R.

El pulido consistió en el deslizamiento longitudinal de un papel de lija sobre el área de ensayo, mientras que se hace girar la probeta a baja velocidad. Para este proceso se emplearon lijas en secuencia ascendente desde la número 320 hasta 2000, en algunos casos fue necesario desbastar con lija 240 para eliminar las marcas presentes. El acabado final de las probetas puede observarse en la figura 2.8.



Figura 2.8 Probetas ensayo de fatiga en flexión rotativa, a) Espécimen pulido, b) Espécimen sin pulir.

2.3.2 Especímenes de micro dureza.

Se realizó el desbastado de una de las caras transversales a eje de la barra, utilizándose para esto una secuencia de lijas desde 120 hasta 2000 y la bandeja de lijado marca Struers, modelo Lunn Major, figura 2.9. A su vez cada etapa de pulido se realizó en un sólo sentido, hasta que no se evidencié marcas en otro sentido que no fuese el del lijado, posterior a esto se gira la probeta 90° y se repite el proceso aumentando al nivel de lija siguiente, así sucesivamente hasta llegar a la lija 2000. Todo esto se realizó respondiendo con las especificaciones de la guía práctica de preparación metalográfica, del laboratorio de materiales para ingeniería de la escuela de ingeniería mecánica, de la facultad de ingeniería, de la UCV ^[18]. Paso siguiente se realiza un pulido con paño de fieltro y suspensión de alúmina de $0,3\mu\text{m}$ en agua, utilizando para esto una pulidora marca BUEHLER, modelo metaserv 2000 variable “speed grinder-polisher” como la que se enseña en la figura 2.10. El resultado del proceso de pulido puede evidenciarse en la figura 2.11.



Figura 2.9 Bandeja de lijado marca Struers, modelo Lunn Major.



Figura 2.10 Pulidora marca BUEHLER, modelo metaserv 2000 variable “speed grinder-polisher”.

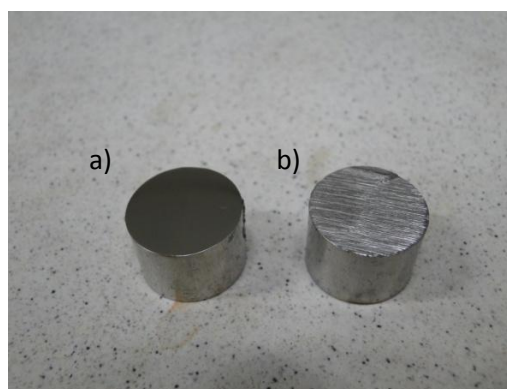


Figura 2.11 Probetas ensayo de micro dureza, a) Espécimen pulido, b) Espécimen sin pulir.

2.3.3 Especímenes de micro ataque.

Al igual que en los casos anteriores se realizó desbaste con lija de la cara en la cual se encuentra el corte al que se le aplicará el ensayo, sólo que en este caso la secuencia de lija a utilizar va desde la 240 hasta la 2000, posteriormente se realizó el pulido con paño de fieltro y suspensión de alúmina de $0,3\mu\text{m}$ en agua, utilizando para esto una pulidora marca BUEHLER, modelo metaserv 2000 variable “speed grinder-polisher” como la que se enseña en la figura 2.10.

2.4 Micro ataque.

De acuerdo a la norma ASTM E 407-07 ^[19], para materiales con la composición química del acero inoxidable Sanicro 28, se debe realizar un montaje de laboratorio como el mostrado en la figura 2.12. Este montaje se compone de una fuente de poder, en este caso una del fabricante Hewlett-Packard, modelo Vernier, transmitiendo 5V de corriente continua, a través de cables de transmisión, un cátodo de acero inoxidable y una unión para la probeta de aleación de níquel-cromo o similar. Se utilizó como atacante 10g de ácido oxálico en 100ml de agua, el tiempo de duración del ataque es de 1 minuto.



Figura 2.12 Montaje de ensayo de micro ataque.

Luego se procede a la inspección del ejemplar ensayado en el microscopio digital compuesto por el computador marca Dell, modelo OPTIPLEX 330 mostrado en la figura 2.13 con sistema operativo Windows Vista y el micro durómetro marca Buehler mostrado en la figura 2.15, El procesamiento y manipulación de las imágenes se realizó utilizando el software Buehler Omnimet 9.5, figura 2.14.



Figura 2.13 Computador Dell, modelo OPTIPLEX 330.

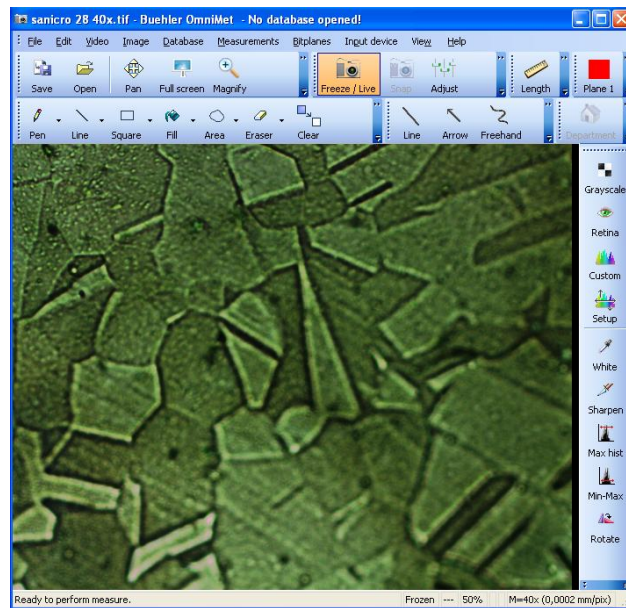


Figura 2.14 Software Buehler Omnimet 9.5.

2.5 Ensayos Mecánicos.

2.5.1 Ensayo de micro dureza.

Para el ensayo de micro dureza Vickers se utilizó un equipo marca Buehler modelo No. 1105, como el que se muestra en la figura 2.15, en el cual son colocadas las probetas con la cara pulida hacia la parte superior. Luego se procede a realizar la indentación sobre la probeta.

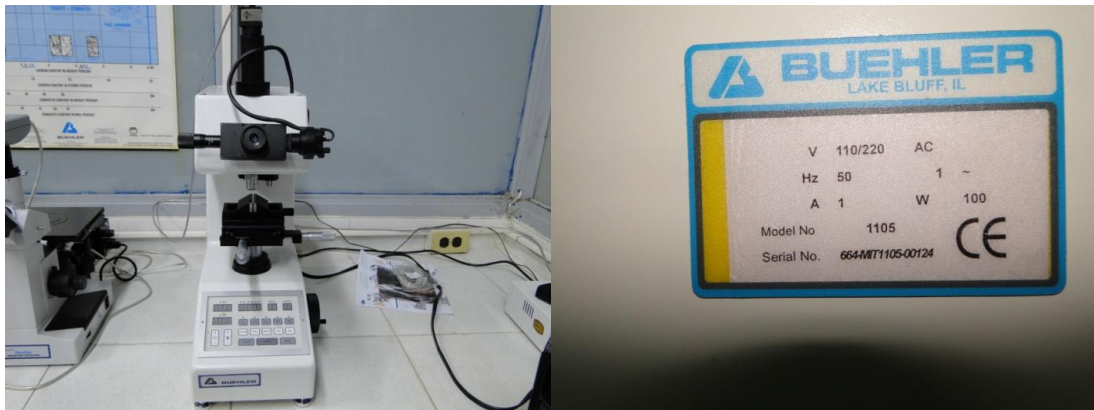


Figura 2.15 Micro durómetro Buehler.

En este experimento fueron realizadas doce indentaciones a seis niveles de carga, 50g, 100g, 200, 500g y 1000g, para cada nivel carga se realizaron dos ensayos.

En cada una de las indentaciones se tomó nota de los valores de la longitud de ambas diagonales, así como del valor de dureza HV. Posterior a la toma de datos se realizó una tabla para calcular el valor de la diagonal promedio como:

$$D_{prom} = \sqrt{D_1 * D_2} \quad (E. 15)$$

Donde:

D_1 : Diagonal uno. D_2 : Diagonal dos.

D_{prom} : Diagonal promedio

También fueron calculados los valores del inverso de la diagonal promedio y promedio de los valores de dureza HV, para realizar las curvas $1/D_{\text{prom}}$ vs Dureza HV y Carga vs Dureza HV_{prom} .

2.5.2 Ensayo de Tracción.

Los ensayos de tracción se realizaron en la máquina de ensayo de tracción Losenhausen ubicada en el laboratorio de ensayos mecánicos de la escuela de mecánica de la facultad de ingeniería de la UCV, figura 2.16. Por medio de la máquina de ensayo se obtuvo el esfuerzo real a carga máxima y la curva de carga contra variación de la longitud. En la figura 2.17 se puede observar con detalle el montaje de la probeta.



Figura 2.16 Máquina de ensayo de tracción Losenhausen, año 1969.



Figura 2.17 Montaje de la probeta en la máquina de ensayo de tracción.

Los valores de la variación de longitud obtenidos en el procedimiento experimental deben ser corregidos, debido a que existe deformación en los elementos de máquina. Se corrigen los valores tomando la siguiente consideración.

$$\Delta L_{exp} = \Delta L_{prob} + \Delta L_{maq} \quad (E.16)$$

Donde:

ΔL : Variación de la longitud.

De la ley de Hooke (E.17) procedemos a despejar la variación de longitud (E.18).

$$F = \Delta L * K \quad (E.17)$$

$$\Delta L = \frac{F}{K} \quad (E. 18)$$

Donde:

F: Carga.

K: Constante de Elasticidad.

Sustituyendo la ecuación E.18 en la ecuación E.16 obtenemos.

$$\frac{F}{K_{exp}} = \frac{F}{K_{prob}} + \frac{F}{K_{maq}} \quad (E.19)$$

Al multiplicar por el inverso de la carga y despejar de la ecuación E.19 el valor de la K_{maq} , obtenemos.

$$K_{maq} = \frac{K_{prob} * K_{exp}}{K_{prob} - K_{exp}} \quad (E.20)$$

Los valores de la variación de la longitud máquina se obtienen al sustituir en la ecuación E.18 el valor de la carga aplicada y de la constante previamente calculada.

EL valor de la constante de elasticidad experimental se obtiene de la pendiente del la curva de zona elástica de la gráfica carga vs variación de longitud.

$$K_{exp} = m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (E.21)$$

Los valores de la variación de la longitud experimental se obtienen al leer de la gráfica producto del ensayo de tracción.

Sustituyendo en la ecuación E.22 las ecuaciones E.23 y E.24.

$$S = E * e \quad (E.22)$$

$$S = \frac{F}{A} \quad (E.23)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (E.24)$$

Donde:

e= Deformación unitaria.

E: Modulo de Elasticidad del Acero.

S= Esfuerzo.

Lo= Longitud inicial.

A: Área Transversal.

Se obtiene la expresión.

$$F = \frac{E \cdot A}{L_o} * \Delta L \quad (\text{E.25})$$

Igualando de la ecuación (E.25) con la ley de Hooke (E.17), se obtiene la expresión que indica el valor de la constante de elasticidad de la probeta.

$$K_{prob} = \frac{E \cdot A}{L_o} \quad (\text{E.26})$$

Previo al ensayo se registro la longitud inicial de la probeta, y el diámetro del cuello, con este se calcula el área de sección transversal de la probeta.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{E.27})$$

Donde d: Diámetro de la probeta.

Despejando de la ecuación E.16 se obtiene el valor de la longitud corregida de la probeta.

$$\Delta L_{prob} = \Delta L_{exp} - \Delta L_{maq} \quad (\text{E.22})$$

Una vez calculada la variación de la longitud de la probeta se procede a realizar la gráfica esfuerzo ingenieril (S) vs deformación unitaria (e), y esfuerzo real (σ) vs deformación real (ϵ).

Donde:

$$e_i = \frac{\Delta L_i}{L_o}$$

$$e_i = \frac{L_i - L_o}{L_o}$$

$$e_i = \frac{L_i}{L_o} - 1$$

$$\frac{L_i}{L_o} = e_i + 1 \quad (\text{E.23})$$

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad ; \quad A_i = \frac{A * L_o}{L_i}$$

$$\sigma = S * \left(\frac{L_i}{L_o} \right)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior la ecuación E.23, se obtiene que:

$$\sigma = S * (1 + e_i) \quad (\text{E.24})$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e_i) \quad (\text{E.25})$$

2.5.3 Ensayo de Fatiga.

2.5.3.1 Ensayo de fatiga al aire.

Los ensayos de fatiga fueron realizados en las instalaciones de la escuela de metalurgia y ciencia de los materiales, de la facultad de ingeniería, de la Universidad Central de Venezuela, utilizando una máquina de ensayo de fatiga en flexión rotativa tipo viga en voladizo, marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200, como la que se observa en la figura 2.18.



Figura 2.18 Máquina de fatiga “Fatigue Dynamics, RBF-200”.

Este equipo está diseñado para aplicar ciclos de carga de inversión completa, con lo que se induce sobre la probeta una condición de flexión rotativa, al mantener uno de los extremos de la misma conectado al eje de rotación del equipo, a su vez el otro extremo se encuentra unido a un eje cónico, en el cual se aplica la carga. Este eje cónico se encuentra conectado a una barra calibrada, sobre la cual reposa un peso móvil, que al ser desplazado a lo largo de esta, aplica un momento flector responsable de generar el esfuerzo al cual se encuentran sometidas las probetas durante el ensayo.

El nivel de esfuerzo aplicado en función del momento flector se calcula mediante la siguiente expresión.

$$S = \frac{M \cdot C}{I} \quad (\text{E.26}) \quad M = \frac{S \cdot I}{C} \quad (\text{E.27}) \quad C = d/2 \quad (\text{E.28})$$

Donde:

S: Esfuerzo a aplicar.

I: Momento rectangular de inercia.

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

d: Diámetro de la probeta.

M: Momento flector.

Considerando que el momento rectangular de inercia de una barra de sección circular es:

$$I = \frac{\pi * d_o^4}{64} \quad (E.29)$$

Sustituyendo las ecuaciones E.28 y E.29 en la expresión E.27 se obtiene que:

$$M = \frac{S * (\pi * \frac{d_o^4}{64})}{d/2} = \frac{S * \pi * d^3}{32} \quad (E.30)$$

$$M = 0.0982 * S * d^3 [Lbf * pulg] \quad (\text{Ecuación del momento en la maquina}).$$

Si realizamos el cambio de mega pascales (MPa) a libras fuerza (Lbf) y de milímetros (mm) a pulgadas (pulg), obtenemos que:

$$M = 0.00087 * S * d^3 \quad (E.31)$$

Donde:

S: Esfuerzo a aplicar en mega pascales (MPa).

d: Diámetro de la probeta en milímetros (mm).

M: Momento flector en libras fuerza por pulgada (Lbf.pulg).

Conocido el valor de esfuerzo que debe ser aplicado (MPa) y el diámetro de la probeta (mm), se utiliza la formula anterior para determinar el valor del momento necesario a aplicar. Conocido este dato se coloca el peso, que reposa sobre la barra calibrada, en el lugar indicado y se da inicio al ensayo.

La máquina de ensayos se encuentra provista de un dispositivo contador de ciclos, el cual al producirse la falla por fatiga de la muestra, a través de otro dispositivo de parada se detiene, pudiéndose de esta manera determinar el número de ciclos necesarios para producir la falla de la probeta ha determinado nivel de esfuerzo. Se debe destacar que el display del contador ofrece valores nominales, estos

deben ser multiplicados por 100 para obtener el valor real de ciclos a los cuales se ha sometido la probeta.

2.5.3.2 Ensayo de fatiga-corrosión.

Para la realización del ensayo de fatiga corrosión se utilizo la misma máquina de ensayo (figura 2.18) y se siguió el mismo procedimiento experimental. Debido a que el ensayo se llevo a cabo bajo ambiente corrosivo, se adapto una cámara de acrílico al equipo (figura 2.19), ajustada en la región calibrada (cuello) de la probeta, a través de la cual se hizo circular un goteo continuo de solución salina de NaCl al 3%, utilizando para esto una bomba de pecera marca ASCOLI, modelo PowerHead 201 y un regulador de flujo.



Figura 2.19 Capsula de acrílico, para generar condición de ambiente corrosivo.

Todos los ensayos fueron realizados a una frecuencia de 50Hz, es decir a una velocidad promedio de 3000 RPM. Cabe destacar que solo cambios de varios órdenes de magnitud en la frecuencia de giro, tienen la capacidad de alterar el comportamiento a la fatiga de las probetas.

2.5.3.3 Determinación de los parámetros de la Ecuación de Basquin.

Para la evaluación de las propiedades de fatiga y fatiga en ambiente corrosivo, se establecieron 4 niveles de esfuerzos principales, que representan una fracción del esfuerzo de fluencia del material base.

Para el caso de fatiga en ambiente corrosivo se ensayaron cuatro especímenes al 90% del valor del esfuerzo de fluencia, cuatro al 85%, cuatro al 80% y tres al 75%, también se ensayo una probeta al 98% aproximadamente del valor de fluencia, para evaluar el comportamiento del material en condición extrema, para el caso de fatiga al aire solo se ensayaron tres niveles de esfuerzo 90%, 85% y 80%. El valor del esfuerzo de fluencia utilizado, fue el determinado mediante el ensayo de tracción.

Sabiendo los valores de los esfuerzos y habiendo obtenido el numero de ciclos para la falla en cada valor de esfuerzo, fue posible definir en una escala doble logarítmica (Log S vs Log Nf) la recta que mejor define el comportamiento del material en ambas condiciones ensayadas (aproximación lineal). Mediante la regresión lineal de la ecuación de esta recta, fue posible obtener la expresión que involucra los parámetros de Basquin, con lo que se puede predecir el comportamiento a fatiga de los materiales sometidos a cargas cíclicas durante servicio.

2.6 Estudio Fractográfico.

2.6.1 Preparación de las probetas para ensayo de fractografía.

Finalizados los ensayos de fatiga se procedió a realizar el corte de las probetas ensayadas, para extraer dos especímenes. Este estudio solo se realizo en probetas ensayadas en fatiga-corrosión. Debido a que se hizo énfasis en los estudios en esta condición de operación ya que esta es más crítica.

El corte de las mismas se realizó a una distancia aproximada de 5-7 mm de la zona de fractura. Para realizar el corte se utilizó una cortadora de disco marca BUEHLER, modelo SamplMet 2 “abrasive cutter” como la que se muestra en la figura 2.20.

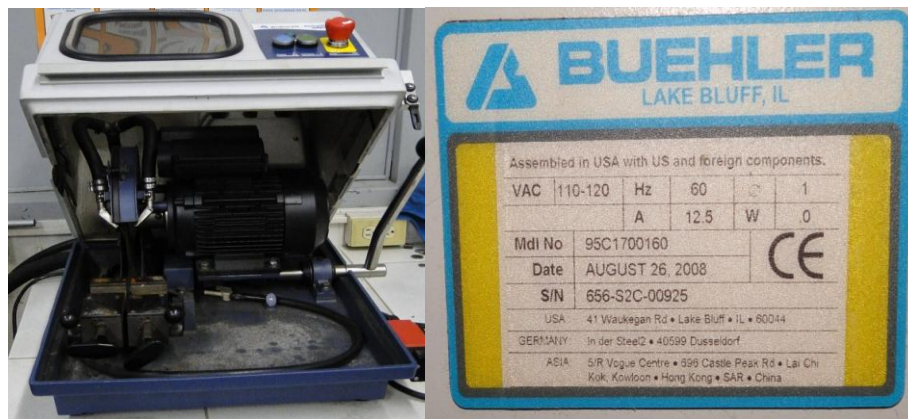


Figura 2.20 Cortadora de disco marca BUEHLER, modelo SamplMet 2 “abrasive cutter”.

Después de cortadas se procedió a realizar la limpieza de las probetas utilizando para esto acetona y equipo de ultrasonido marca Buehler, modelo Ultramet II Sonic Cleaner, figura 2.21.



Figura 2.21 Equipo de limpieza por ultrasonido Buehler Ultramet II Sonic Cleaner.

Del universo de probetas experimentadas, se escogieron las ensayadas al 90% y 75% de su valor de esfuerzo de fluencia y que además hayan fallado a un número de ciclos cercano al promedio de falla.

Posteriormente se procedió a montar estos especímenes en porta muestra propio del microscopio electrónica de barrido, este montaje se realiza mediante la unión con pega de rápido secado. Con el propósito de mejorar la conducción entre el porta muestra y el espécimen se agrega una resina conductora de grafito, como se aprecia en la figura 2.22, con esto la muestra queda en condiciones para ser ensayada.



Figura 2.22 Probetas para microscopía electrónica de barrido.

2.6.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Este tipo de estudio se lleva a cabo para determinar los mecanismos de falla que actuaron sobre las probetas ensayadas a fatiga en ambiente corrosivo. El estudio se realizó mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), la cual permite analizar a través de inspección de la superficie de fractura, zonas características como puntos de nucleación y crecimiento de grietas, marcas radiales, estriaciones y zona de despeje.

La microscopía fue llevada a cabo en el Centro de Microscopía Electrónica, facultad de ingeniería, escuela de metalurgia, UCV. Para ella se empleó un microscopio electrónico marca HITACHI, modelo S-2400 “Scanning Electron Microscope” el cual es mostrado en la figura 2.23 y figura 2.24. El estudio fue

realizado utilizando un voltaje de aceleración de 20kV y obtención de imágenes de haz de electrones secundarios.



Figura 2.23 Microscopio Electrónico de Barrido Hitachi S-2400.

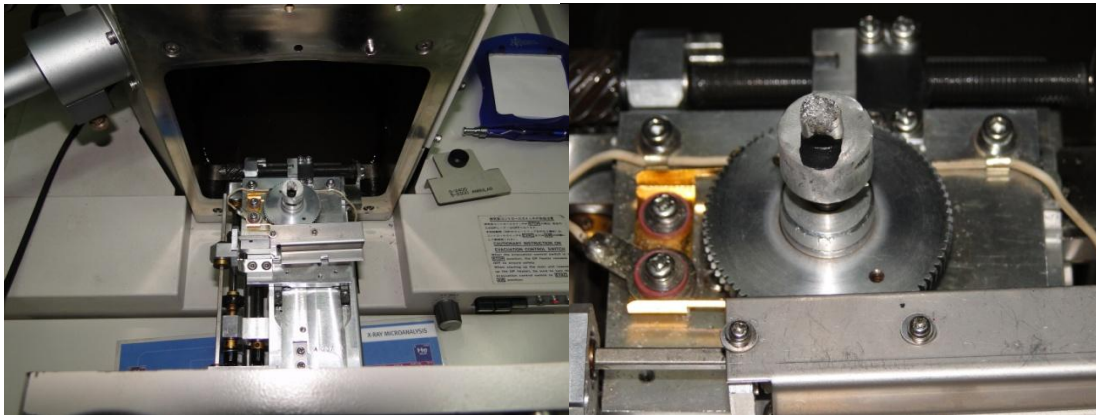


Figura 2.24 Detalle de montaje de la probeta a ser inspeccionada.

Para ambas probetas se archivaron fotos a escala macro de la zona de fractura y ampliaciones de mayor resolución de áreas específicas como puntos de entalla, zonas de despeje y avances de grieta. También se realizó estudio a la superficie perimetral de una de las probetas, donde se podía observar un segundo plano de avance de grieta, el cual no fracturó.

RESULTADOS Y ANALISIS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados durante esta investigación, en los cuales se incluyen tablas, gráficos y fotografías que permiten un mejor entendimiento y complemento de lo analizado para cada uno de los estudios que fueron realizados.

3.1 Ensayo de micro dureza.

Los resultados obtenidos para el ensayo de micro dureza de la aleación Sanicro 28, son reflejados en las tablas 3.1 y 3.2 y las figuras 3.1 y 3.2, presentadas a continuación.

Tabla 3.1 Resultados ensayo de micro dureza Vickers.

Carga (g)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _{prom} (mm)	1/D _{prom}	Dureza HV
50	24,00	23,20	23,60	0,0424	166,50
50	23,20	23,00	23,10	0,0433	173,80
100	32,00	30,90	31,45	0,0318	187,50
100	31,90	32,10	32,00	0,0313	181,10
200	44,30	44,60	44,45	0,0225	187,70
200	46,80	46,40	46,60	0,0215	170,80
300	54,70	55,50	55,10	0,0181	183,20
300	57,40	57,50	57,45	0,0174	168,60
500	73,60	74,30	73,95	0,0135	169,50
500	68,90	69,40	69,15	0,0145	193,90
1000	103,30	104,50	103,90	0,0096	171,80
1000	106,00	105,70	105,85	0,0094	165,50
Desv. Std.					9,58

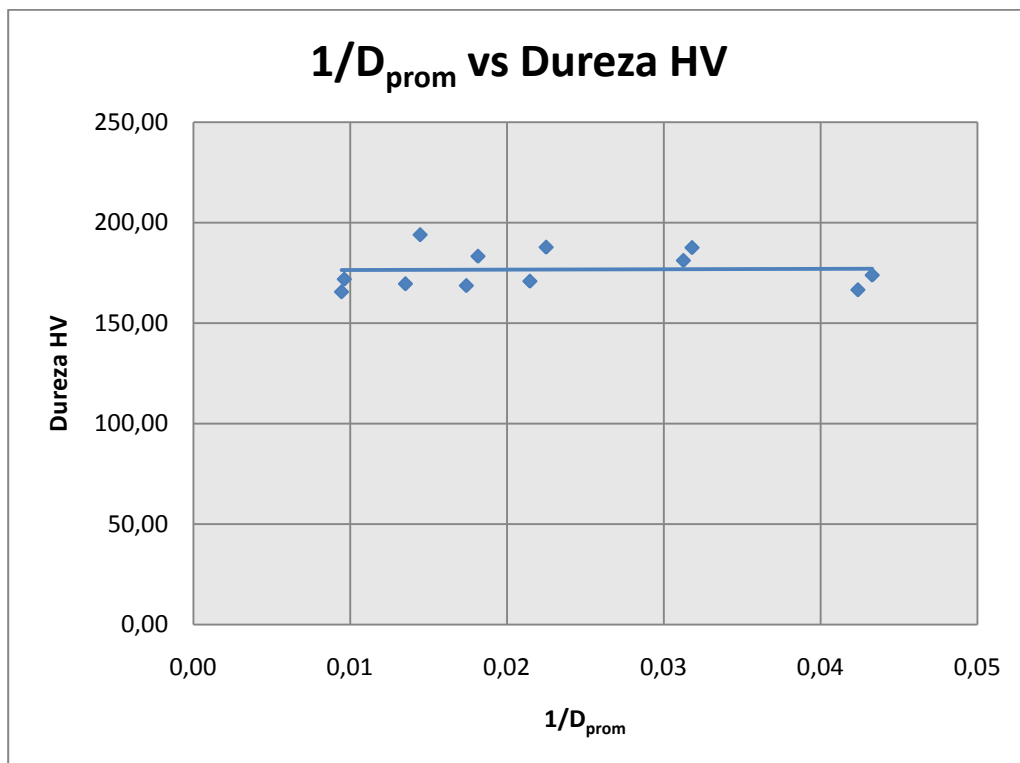


Figura 3.1 Grafica inverso de la diagonal promedio vs dureza Vickers.

Tabla 3.2 Dureza promedio calculada para cada nivel de carga aplicada.

Carga (g)	Dureza HV _{prom}
50	170,15
100	184,30
200	179,25
300	175,90
500	181,70
1000	168,65
Desv. Std.	6,29

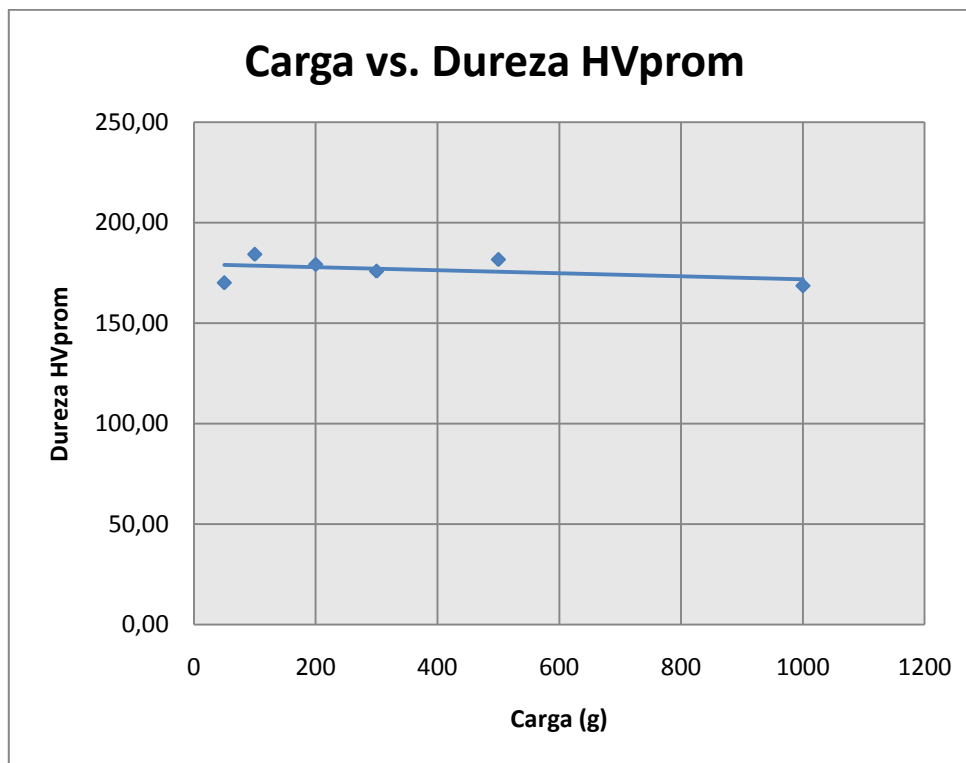


Figura 3.2 Grafica carga vs dureza promedio.

A pesar de ser una aleación austenítica fundamentalmente monofásica se procedió al estudio de micro indentación estática, objeto de verificar alguna dependencia funcional entre la carga aplicada y el valor de la propiedad, así como descartar la presencia de heterogeneidades mecánicas en la aleación. En la figura 3.1 y 3.2 se aprecia claramente que el valor de dureza es independiente del valor de carga utilizado para su determinación, así mismo se verifica la homogeneidad mecánica al encontrar bajos valores de desviación estándar.

3.2 Estudio micro estructural.

Este ensayo se ha llevado a cabo con la finalidad de corroborar que el Sanicro 28 es una aleación monofásica donde predominan granos austeníticos.

A continuación se presentan las fotografías obtenidas en el modo de imagen de campo claro, de la microestructura del Sanicro 28, para los cortes longitudinal y transversal al eje de extrusión. Figura 3.3 y 3.4, figura 3.5 y 3.6 respectivamente,

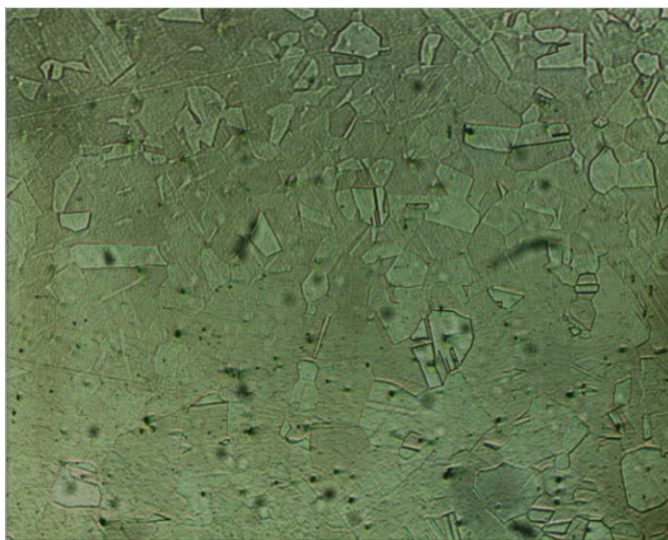


Figura 3.3 Foto microestructura Sanicro 28 corte longitudinal, aumento 10x.

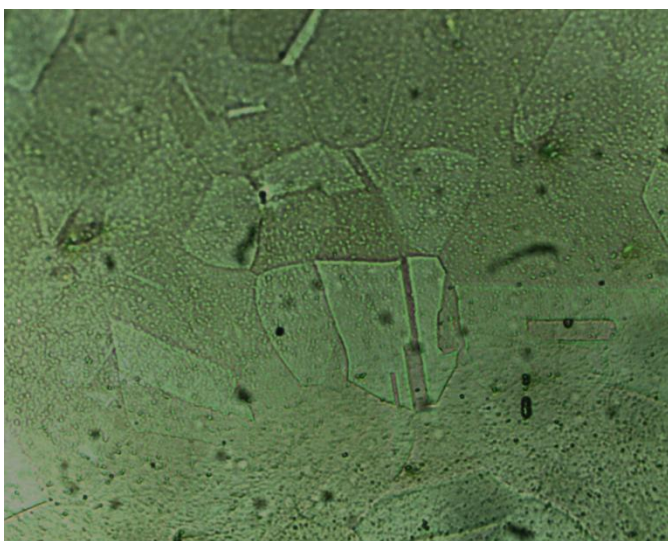


Figura 3.4 Foto microestructura Sanicro 28 corte longitudinal, aumento 40x.

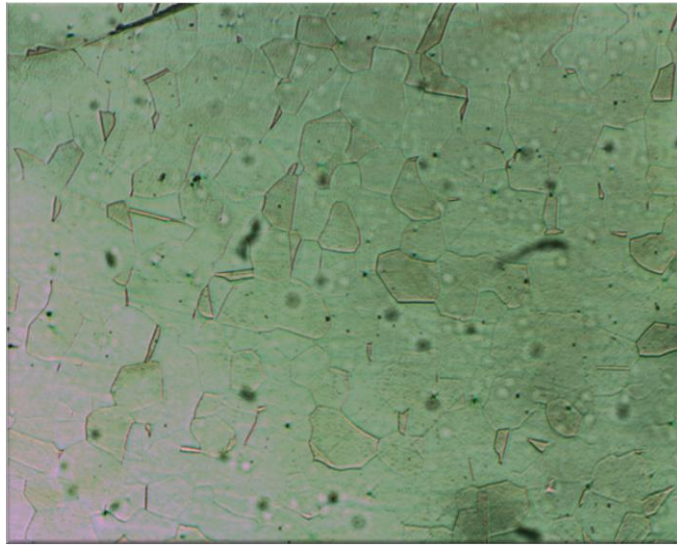


Figura 3.5 Foto microestructura Sanicro 28 corte transversal, aumento 10x.

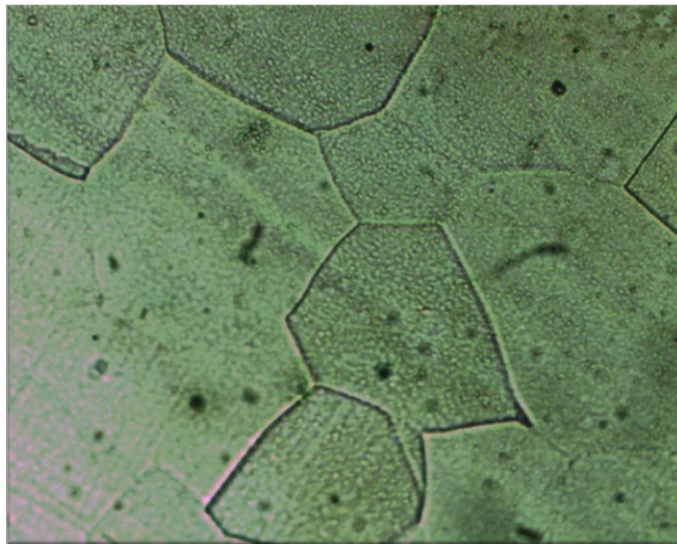


Figura 3.6 Foto microestructura Sanicro 28 corte transversal, aumento 40x.

Es evidente una distribución uniforme del tamaño grano austenítico en la microestructura del material. Así mismo se observa en ambas direcciones un grano equiaxial, poca presencia de maclas y sutilmente son observadas pequeñas partículas globulares finamente distribuidas en la matriz característica. No obstante lo descrito anteriormente la presencia de maclas es más evidente en los cortes longitudinales del

material, lo cual sugiere algún grado mayor de deformación producto del flujo plástico durante el procedimiento de fabricación.

Esta homogeneidad observada en la aleación podría ser debido a que el material es sometido a un proceso de recocido posterior a la extrusión de la barra, que ocasiona el reordenamiento de la subestructura y alivio de las tensiones internas, lo cual también fue corroborado en el ensayo de micro indentación estática.

3.3 Ensayo de tracción.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la grafica producto del ensayo de tracción realizado a velocidad de avance constante. En la tabla 3.3 se muestran algunos aspectos de interés relacionado con las características de los especímenes, tales como: diámetro y área transversal del cuello y la longitud calibrada de la probeta.

Tabla 3.3 Datos de probetas ensayadas.

Probeta N°	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Longitud Inicial (mm)
1	6.00	28.27	24.10
2	6.45	32.67	26.95

Los valores de Carga y variación de longitud, obtenidos de la medición manual sobre la grafica anexo 1 correspondiente al ensayo de la probeta 1, se ven reflejados en la tabla 3.4, de igual manera para la probeta 2, reflejados en la tabla 3.5.

Tabla 3.4 Resultados Ensayo de tracción. Probeta N°1.

F (N)	ΔL_{exp} (mm)	ΔL_{prob} (mm)	S (Pa)	e	σ (Pa)	ε
11321.60	0.0696	0.0696	4.00E+08	0.0029	3.99E+08	0.0029
13273.60	0.1392	0.1392	4.69E+08	0.0058	4.67E+08	0.0058
15225.60	0.6960	0.6960	5.38E+08	0.0289	5.23E+08	0.0285
17177.60	2.0880	2.0880	6.08E+08	0.0866	5.55E+08	0.0831
19129.60	4.0368	4.0368	6.77E+08	0.1675	5.63E+08	0.1549
20500.00	7.8648	7.8648	7.25E+08	0.3263	4.88E+08	0.2824
19129.60	9.7092	9.7092	6.77E+08	0.4029	4.04E+08	0.3385
17177.60	10.3704	10.3704	6.08E+08	0.4303	3.46E+08	0.3579
15225.60	10.7880	10.7880	5.38E+08	0.4476	2.97E+08	0.3699
13273.60	11.0000	11.0000	4.69E+08	0.4564	2.55E+08	0.3760

Tabla 3.5 Resultados Ensayo de tracción. Probeta N°2.

F (N)	ΔL_{exp} (mm)	ΔL_{prob} (mm)	S (Pa)	e	σ (Pa)	ε
11874.60	0.0811	0.0810	3.63E+08	0.0030	3.62E+08	0.0030
13853.70	0.1622	0.1621	4.24E+08	0.0060	4.21E+08	0.0060
15832.80	0.6488	0.6487	4.85E+08	0.0241	4.73E+08	0.0238
17811.90	2.3925	2.3924	5.45E+08	0.0888	4.97E+08	0.0851
19791.00	4.4200	4.4199	6.06E+08	0.1640	5.06E+08	0.1519
21770.10	7.0557	7.0556	6.66E+08	0.2618	4.92E+08	0.2325
22760.00	10.7052	10.7051	6.97E+08	0.3972	4.20E+08	0.3345
21770.10	12.0028	12.0027	6.66E+08	0.4454	3.70E+08	0.3684
19791.00	12.7327	12.7326	6.06E+08	0.4725	3.20E+08	0.3869
17811.90	13.3193	13.3192	5.45E+08	0.4942	2.76E+08	0.4016
15832.80	13.5437	13.5436	4.85E+08	0.5025	2.41E+08	0.4072
14249.50	13.7000	13.6999	4.36E+08	0.5083	2.14E+08	0.4110

De las tablas se puede observar el poco o nulo cambio de la magnitud del valor de la variación de la longitud experimental con respecto a la variación de longitud de la probeta, esto evidencia alta rigidez de los elementos de máquina, y la precisión en la realización de las graficas anexo 1 y anexo 2 por medio de la máquina de ensayo (figura 2.16).

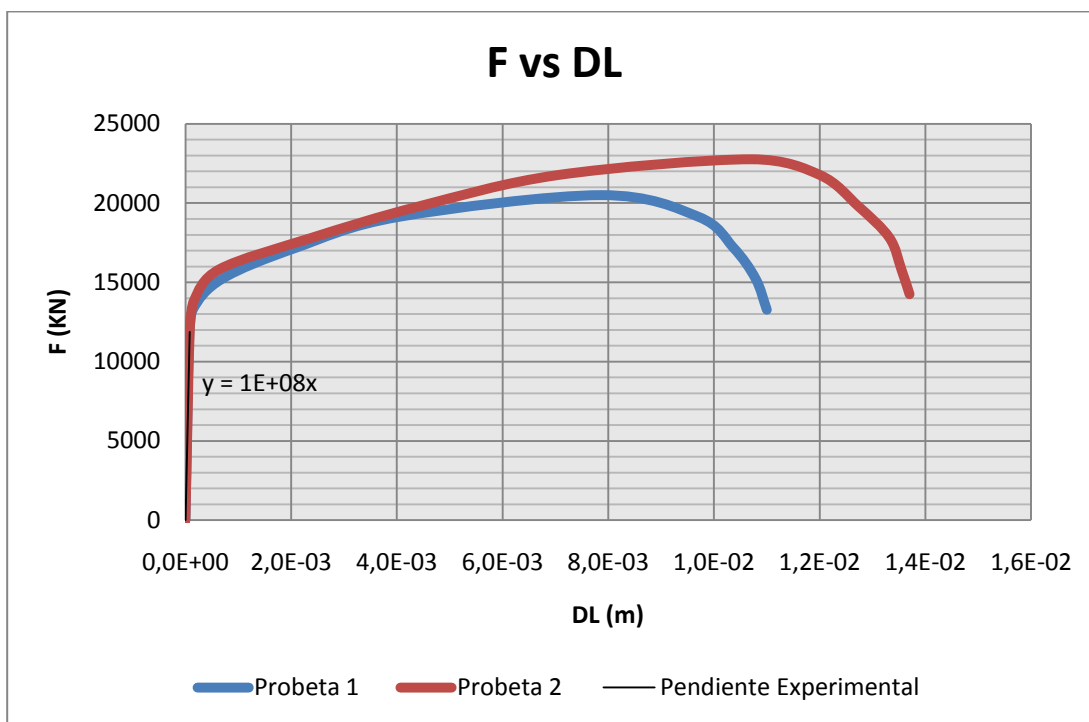


Figura 3.7 Curva carga vs variación de longitud.

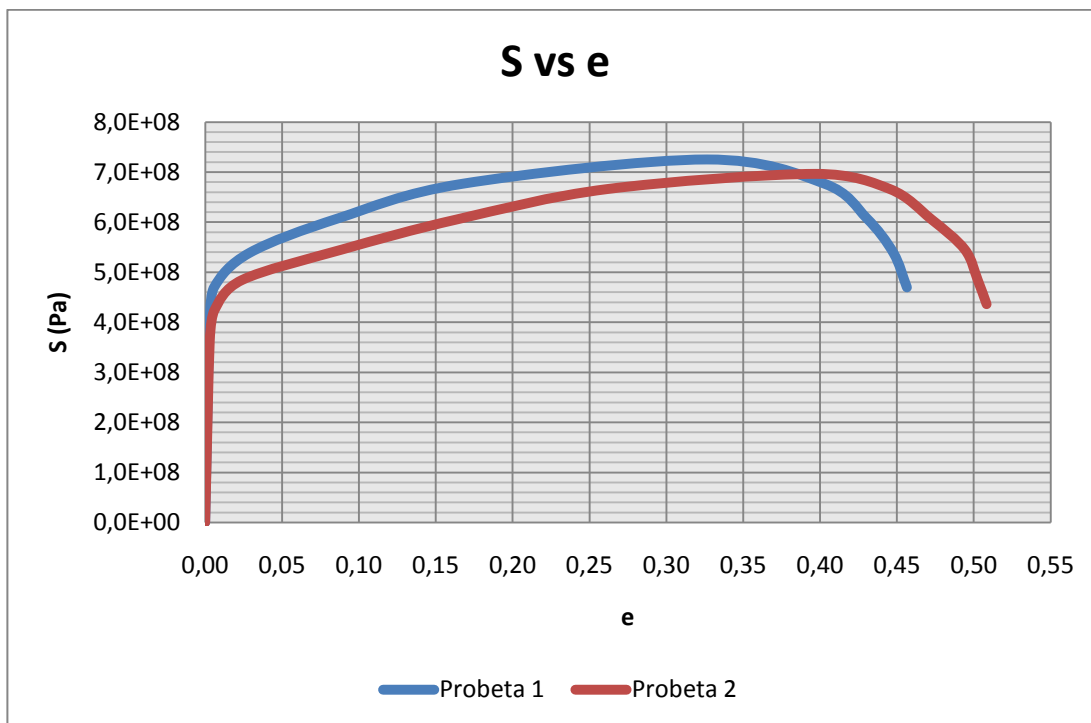


Figura 3.8 Esfuerzo vs deformación unitaria.

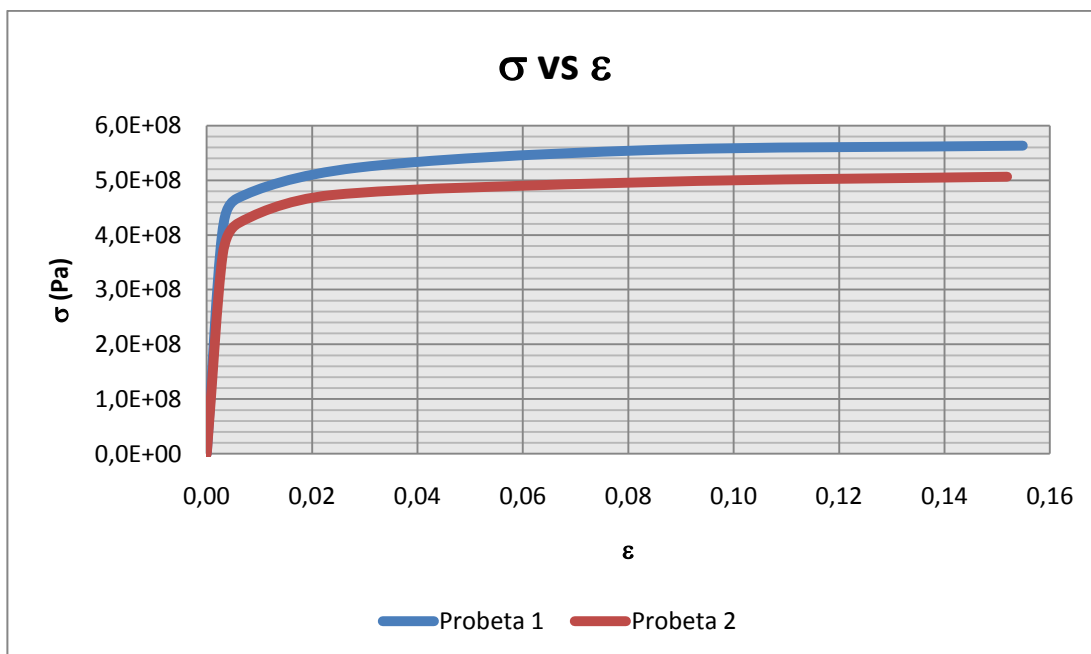


Figura 3.9 Esfuerzo real vs deformación real.

A partir de la figura 3.9 se aproximó el esfuerzo de fluencia del material, trazando una paralela a la recta de deformación elástica por el 2% del valor de la deformación total, el valor obtenido del corte con las curvas σ vs ϵ de ambas probetas son promediados, para así obtener el resultado del esfuerzo de fluencia, el cual está en el orden de los 450MPa.

Al comparar el valor de esfuerzo de fluencia obtenido de la aleación Sanicro 28 con otras aleaciones metálicas como: la aleación de titanio (6% Al, 4% V) que posee un $\sigma_y = 887\text{MPa}$ ^[20], y la aleación 316L posee un $\sigma_y = 529\text{MPa}$ ^[21]. El Sanicro 28 no supera el valor del esfuerzo de fluencia de la aleación de acero inoxidable convencional 316L, de igual manera con la aleación de titanio.

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción, la morfología de la superficie de fractura en los especímenes y la presencia de estriaciones en el cuello de las probetas, es evidencia de la ductilidad del material.

3.4 Ensayo de fatiga.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de fatiga al aire (tabla 3.6) y fatiga corrosión (tabla 3,7), para la aleación súper austenítica multipropósito Sanicro28.

Tabla 3.6 Resultados del ensayo de fatiga al aire para el Sanicro 28.

Numero de Ensayo	Diámetro (mm)	Momento (Lb*pulg)	Esfuerzo (%)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de Falla Nominal	Ciclos de Falla (Nf)
1	6,38	91,5	90	405,0	687	68.700,0
2	6,35	90,2	90	405,0	789	78.900,0
3	6,41	92,8	90	405,0	758	75.800,0
4	6,33	89,4	90	405,0	673	67.300,0
5	6,35	85,2	85	382,5	2.004	200.400,0
6	6,39	86,8	85	382,5	2.870	287.000,0
7	6,37	86,0	85	382,5	2.121	212.100,0
8	6,34	84,8	85	382,5	1.780	178.000,0
9	6,42	82,9	80	360,0	4.336	433.600,0
10	6,38	81,3	80	360,0	2.378	237.800,0
11	6,33	79,4	80	360,0	7.301	730.100,0
12	6,35	80,2	80	360,0	3.412	341.200,0

Tabla 3.7 Resultados del ensayo de fatiga corrosión para el Sanicro 28.

Numero de Ensayo	Diámetro (mm)	Momento (Lb*pulg)	Esfuerzo (%)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de Falla Nominal	Ciclos de Falla (Nf)
1	6,37	91,1	90	405,0	328	32.800,0
2	6,41	92,8	90	405,0	631	63.100,0
3	6,35	85,2	85	382,5	1.302	130.200,0
4	6,31	83,6	85	382,5	1.406	140.600,0
5	6,28	77,6	80	360,0	1.513	151.300,0
6	6,35	80,2	80	360,0	789	78.900,0
7	6,36	100,7	100	450,0	148	14.800,0
8	6,35	75,2	75	337,5	2.038	203.800,0
9	6,44	78,4	75	337,5	2.368	236.800,0
10	6,44	94,1	90	405,0	221	22.100,0
11	6,38	91,5	90	405,0	261	26.100,0
12	6,35	85,2	85	382,5	550	55.000,0
13	6,42	88,1	85	382,5	299	29.900,0
14	6,32	79,1	80	360,0	1.113	111.300,0
15	6,35	80,2	80	360,0	858	85.800,0
16	6,37	75,9	75	337,5	2.779	277.900,0

Los resultados obtenidos para los dos ensayos realizados se presentaron en un grafico S-N el cual se muestra en la figura 3.10, donde se observa el efecto que produjo el fenómeno corrosivo en las probetas ensayadas bajo esta condición.

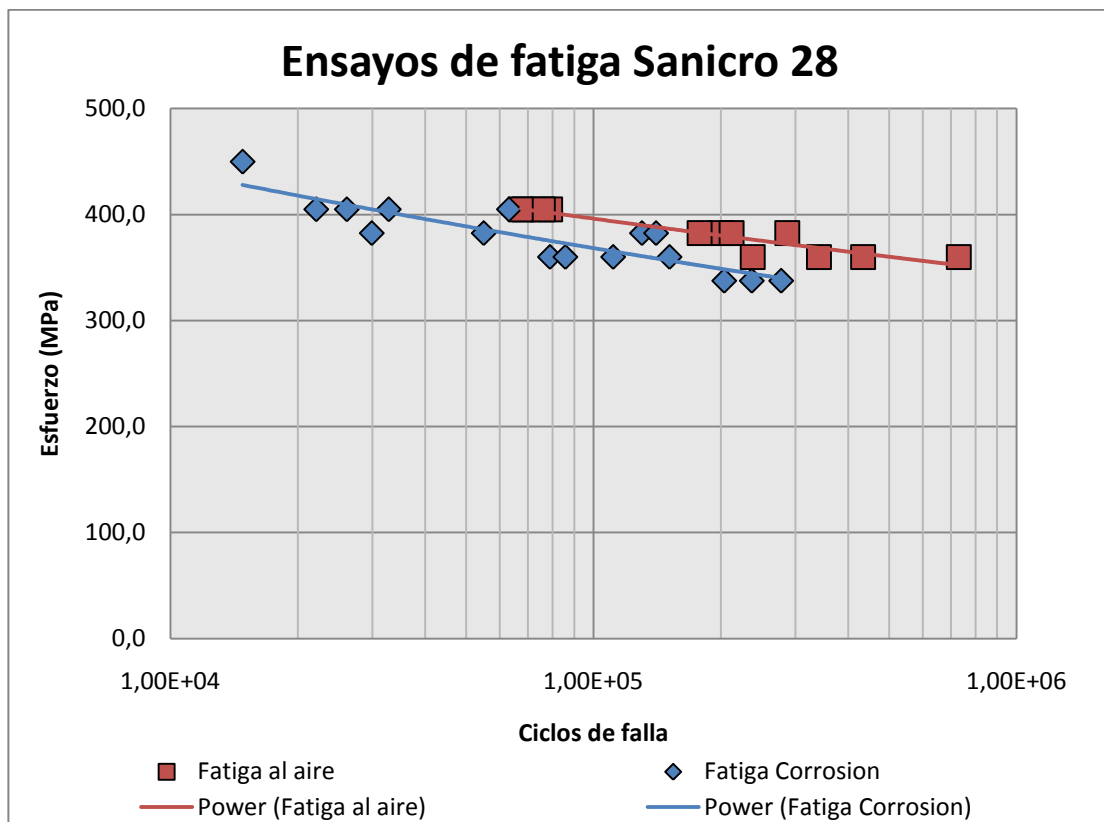


Figura 3.10 Curva S-N en escala semilogarítmica de los resultados obtenidos para los ensayos de fatiga al aire y en ambiente corrosivo del Sanicro 28.

Al comparar el comportamiento obtenido para cada ensayo, es evidente que el fenómeno corrosivo disminuye el número de ciclos a falla, debido a esto y a que las condiciones de trabajo en las cuales operan las torres de destilación de crudo son de ambiente corrosivo, se analizaran en detalle los resultados del ensayo de fatiga corrosión ya que los mismos son determinantes a la hora de la toma de decisión para la sustitución.

Debido a que los resultados obtenidos presentan cierto grado de asimetría en la dispersión para cada nivel de esfuerzo en torno a la esperanza matemática se procedió a tratar los puntos por medio de la metodología propuesta por Weibull utilizando para esto el software Weibull++ 7 a través del cual se determino la vida promedio para cada nivel de esfuerzo utilizando la distribución de Weibull de dos

parámetros (tablas 3.7 y 3.9) y se realizó la curva Log (S) vs Log (Nf) del Sanicro 28 para los dos ensayos (figura 3.11, tablas 3.8 y 3.10).

Tabla 3.7 *Calculo de la vida promedio mediante método de Weibull para el ensayo de fatiga al aire del Sanicro 28.*

N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	6,38	91,5	405,00	68700	5	6,35	85,2	382,50	200400
2	6,35	90,2		78900	6	6,39	86,8		287000
3	6,41	92,8		75800	7	6,37	86		212100
4	6,33	89,4		67300	8	6,34	84,8		178000
Vida promedio				72295	Vida promedio				217510
N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)					
9	6,42	82,9	360,00	433600					
10	6,38	81,3		237800					
11	3,33	79,4		730100					
12	6,35	80,2		341200					
Vida promedio				440830					

Tabla 3.8 *Cálculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo para el ensayo de fatiga al aire del Sanicro 28.*

Esfuerzo (Mpa)	Vida prom (Nf)	Log S (MPa)	Log Nf
405,00	72295	2,607455	4,859108
382,50	217510	2,582631	5,337479
360,00	440830	2,556303	5,644271

Tabla 3.9 *Calculo de la vida promedio mediante método de Weibull para el ensayo de fatiga corrosión del Sanicro 28.*

N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	6.37	91.1	405.00	32800	1	6.35	85.2	382.50	130200
2	6.41	92.8		63100	2	6.31	83.6		140600
3	6.44	94.1		22100	3	6.35	85.2		55000
4	6.38	91.5		26100	4	6.42	88.1		29900
Vida promedio				35754	Vida promedio				94743
N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	6.28	77.6	360.00	151300	1	6.35	75.2	337.50	203800
2	6.35	80.2		78900	2	6.44	78.4		236800
3	6.32	79.1		111300	3	6.37	75.9		277900
4	6.35	80.2		85800	-				
Vida promedio				106210	Vida promedio				237720

Tabla 3.10 *Cálculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo para el ensayo de fatiga corrosión del Sanicro 28.*

Esfuerzo (Mpa)	Vida prom (Nf)	Log S (MPa)	Log Nf
405.00	35754	2.607455	4.553325
382.50	94743	2.582631	4.976547
360.00	106210	2.556303	5.026165
337.50	237720	2.528274	5.376066

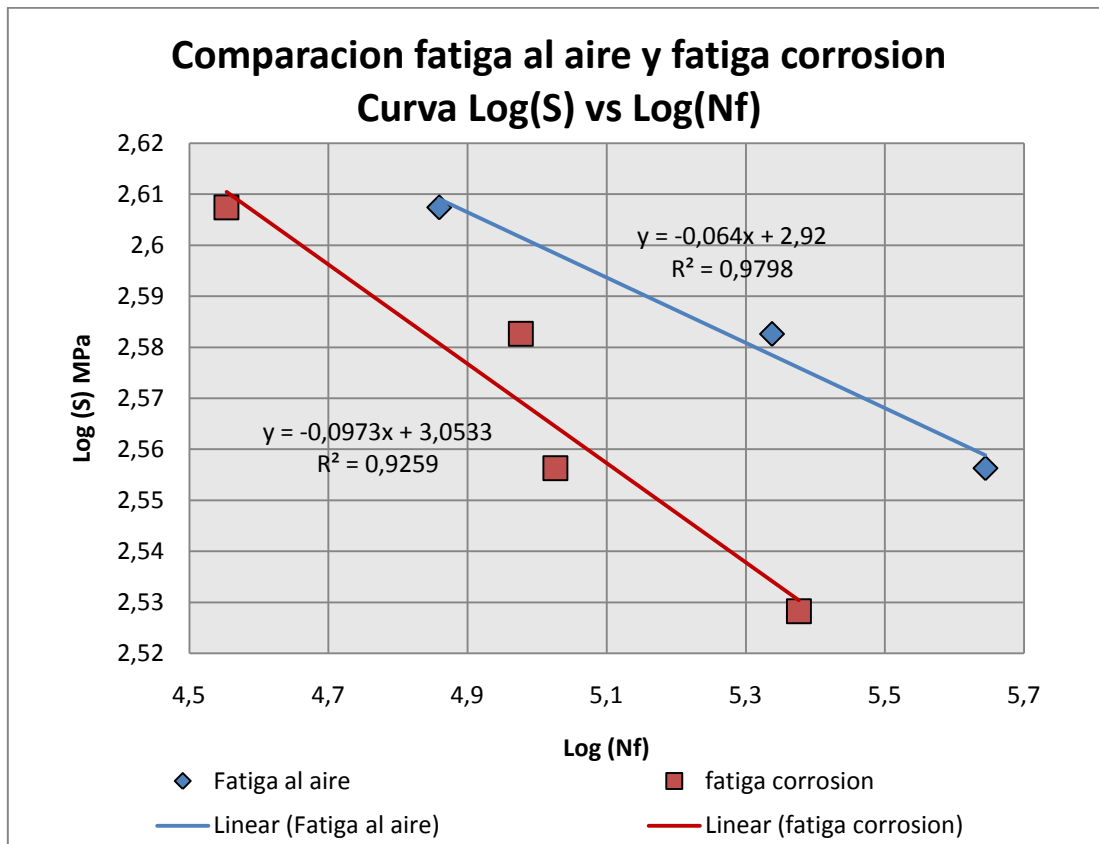


Figura 3.11 Curvas comparativas $\log(S)$ vs $\log(N)$ del Sanicro 28 utilizando los resultados de la distribución de Weibull.

Haciendo una comparación de las curvas de comportamiento del Sanicro 28 para los ensayos de fatiga al aire y fatiga corrosión podemos observar que debido a que la curva de fatiga corrosión posee una mayor pendiente, a medida que aumenta el número de ciclos de vida también aumenta la diferencia entre los valores de ambas curvas, por lo que para menores valores de esfuerzo el efecto corrosivo tendrá mayor efecto en la disminución del valor de la vida a fatiga. Ya que es la condición corrosiva la más crítica de ambas se le dará mayor importancia al análisis de esta situación. Así mismo se observa una mayor dispersión en los datos de fatiga al aire, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura, ya que de alguna manera el fenómeno de la corrosión condiciona la etapa de nucleación disminuyendo la dispersión de los datos.

Utilizando los datos obtenidos en las investigaciones de Perdomo (2003) ^[20] y de Silva y Pacheco (S/F) ^[21], para las aleaciones Ti-6Al-4V recubierta con WC-Co y acero inoxidable 316L respectivamente, se determino la vida promedio para cada una de ellas mediante la utilización del método de Weibull (tablas 3.11 y 3.13) y se compararon en una grafica con los resultados obtenidos para el ensayo de fatiga corrosión del Sanicro 28 (figura 3.12).

Tabla 3.11 Cálculo de la vida promedio mediante método de Weibull Ti-6Al-4V recubierto con WC-Co. Corrosión.

N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	6.78	181.9	671.00	16500	1	6.83	179.1	646.00	9800
2	6.8	183.6		10600	2	6.92	186.2		9900
3	6.73	177.9		4500	3	6.92	186.2		10900
4	6.74	178.7		5300	4	6.93	187		16300
Vida promedio				9401.423	Vida promedio				11566
N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Diámetro (mm)	Momento (lbf.plg)	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	6.96	182.7	623.00	24800	1	7.21	195.6	600.00	33300
2	7.03	188.3		10300	2	7.15	190.8		11400
3	6.97	183.5		10100	3	7.1	186.8		16900
4	6.99	185.1		12500	4	7.12	188.4		6800
Vida promedio				14109	Vida promedio				17788

Habiéndose obtenido los valores de vida promedio para cada nivel de esfuerzo mediante la distribución de Weibull de dos parámetros se calcularon los valores de logaritmo del esfuerzo y de vida promedio, los mismos presentados en la tabla 3.12, de igual manera se hará con los valores obtenidos para el acero inoxidable 316L (tabla 3.14).

Tabla 3.12 *Calculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo del Ti-6Al-4V recubierto con WC-Co.*

Esfuerzo (MPa)	Vida prom (Nf)	Log S (MPa)	Log Nf
671	9401	2.826723	3.973174
646	11566	2.810233	4.063183
623	14109	2.794488	4.149496
600	17788	2.778151	4.250127

Tabla 3.13 *Cálculo de la vida promedio mediante método de Weibull Acero inoxidable 316L corrosión.*

N°	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	475	175000	1	460	136000
2		172000	2		220000
3		87400	3		197500
4		179000	4		189600
5		132000	5		192000
6		82800	6		210000
Promedio Weibull		137640	Promedio Weibull		189780
N°	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)	N°	Esfuerzo (MPa)	Ciclos de falla (Nf)
1	445	184900	1	430	210000
2		422300	2		458000
3		409000	3		395800
4		179400	4		613200
5		195000	5		747000
6		398000	6		320300
Promedio Weibull		294150	Promedio Weibull		462470

Tabla 3.14 *Calculo del Logaritmo del esfuerzo y los promedios de vida para cada nivel de esfuerzo del acero inoxidable 316L.*

Esfuerzo (MPa)	Vida prom (Nf)	Log S (MPa)	Log Nf
475	137640	2.676694	5.138745
460	189780	2.662758	5.27825
445	294150	2.64836	5.468569
430	462470	2.633468	5.665084

A continuación se presenta la grafica (figura 3.12) de comparación de las curvas obtenidas mediante el método de Weibull entre las aleaciones Sanicro 28, Ti-6Al-4V y acero inoxidable 316L, ensayadas bajo ambiente corrosivo.

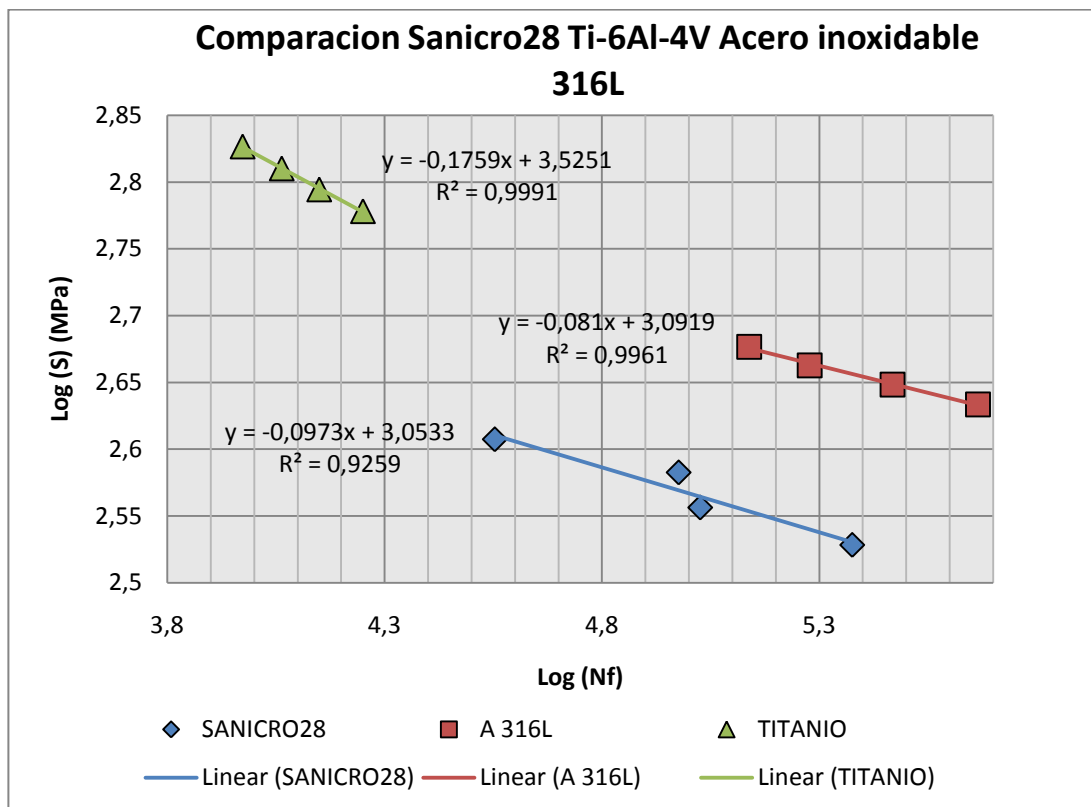


Figura 3.12 *Comparación del comportamiento en fatiga corrosión del Sanicro 28 con la aleación Ti-6Al-4V recubierta con WC-Co y el acero inoxidable 316L, utilizando para todas la distribución de Weibull.*

Extendiendo las líneas de comportamiento de los tres materiales, como se muestra en la figura 3.13, es posible comparar las propiedades del sanicro28 con las de los otros materiales.

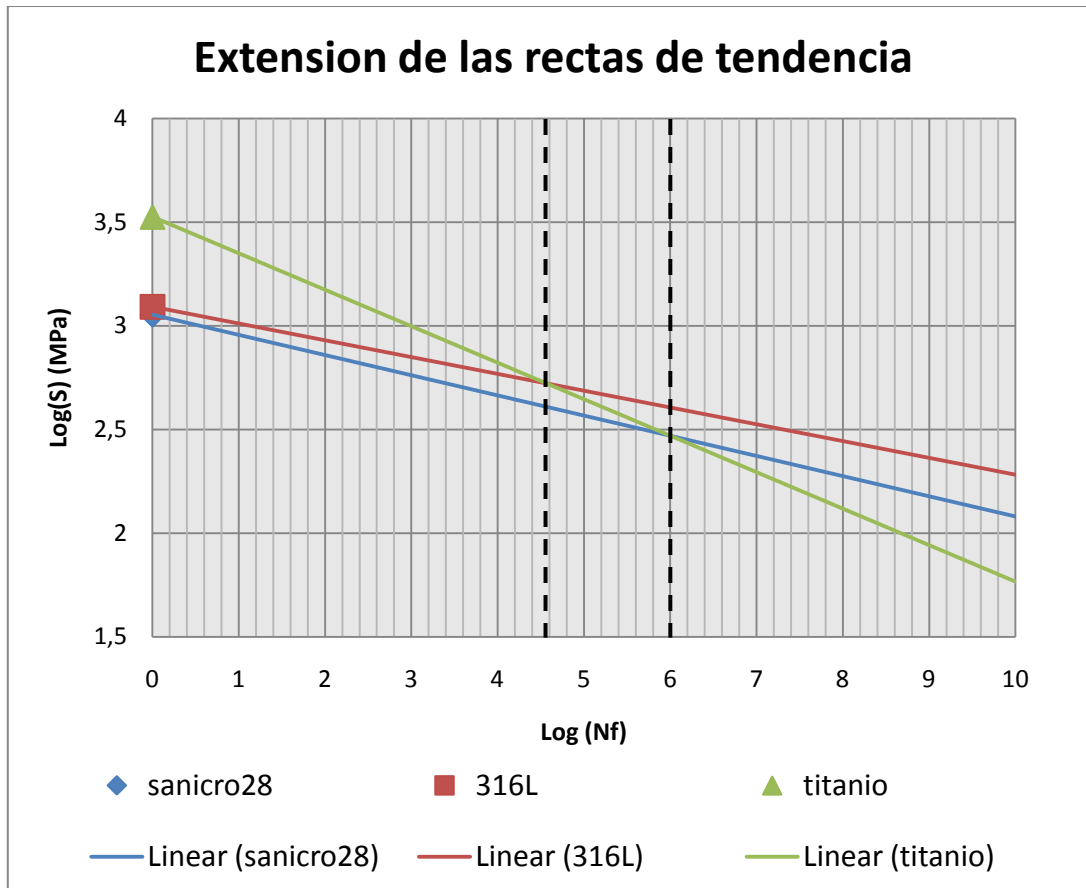


Figura 3.13 Comparación del Sanicro 28 con el Ti-6Al-4V recubierto con WC-Co y el Acero inoxidable A316L.

En general los elementos estructurales de acero expuesto al medio ambiente, se encontraran sometidos a cargas de viento, las cuales son producto del esfuerzo producido por el aire al chocar contra su superficie. Debido a este fenómeno los elementos y piezas que los componen experimentan deformaciones y se encuentran sometidos a cargas dinámicas fluctuantes, ya que la fuerza con la cual actúa el viento no es constante.

Las torres de destilación de los complejos refinadores no se encuentran exentas de sufrir el fenómeno anteriormente mencionado, por lo que sus piezas y componente se encontraran trabajando en un régimen de cargas cíclicas, en especial todas las piezas transversales o paralelas a la dirección de la carga. Debido a que los condensadores de tope son piezas transversales que se encuentran a lo largo de la torre de destilación (figura 3.14), estos se verán sometidos a esfuerzo de fatiga, debido a la tracción y contracción producida en ellos por las deformaciones experimentadas producto de las cargas de viento.

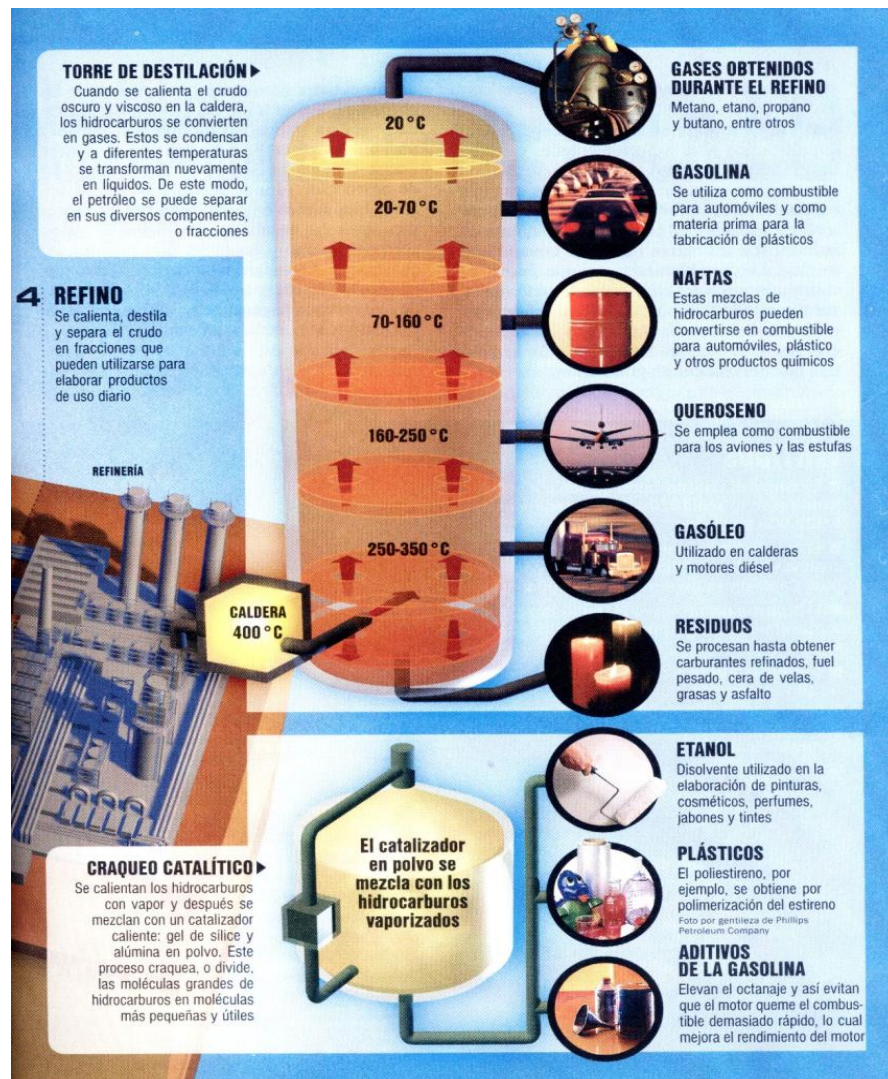


Figura 3.14 Diagrama de una torre de destilación de crudo.

Ya que las torres de destilación son elementos fundamentales de un complejo refinador, estas son diseñadas para trabajar durante prolongados periodos de servicio, por lo que sus elementos se encontraran sometidos a un régimen de cargas dinámicas de alto ciclaje, siendo diseñados para trabajar a vida infinita.

Si observamos la figura 3.13 donde se compara el comportamiento del Sanicro 28 con respecto a otras aleaciones ensayadas en ambiente corrosivo, podemos apreciar que a partir de 1.000.000 ciclos aproximadamente, el Sanicro 28 presenta mejores propiedades en cuanto a su resistencia y vida a la fatiga que la aleación Ti-6Al-4V la cual a pesar de poseer muy buena resistencia mecánica, no presenta buen comportamiento a la fatiga a partir de este numero de ciclos. Con respecto al acero inoxidable 316L, debido a la dispersión en resultados, se podría decir que el comportamiento para ambas aleaciones se encuentra dentro de una banda donde se pueden solapar las curvas por lo que su comportamiento con respecto a la fatiga se considera similar. La presencia del cromo en el Sanicro 28 lo caracteriza por una altísima resistencia a la corrosión, mucho mayor a la del 316L (figura 1.4, 1.6 y 1.7), lo que convierte a este en una mejor opción como material para la construcción de condensadores de tope debido a que estos operan en ambientes de trabajo altamente corrosivos, con presencia de HCl y H₂S.

Por todas las razones antes mencionadas es que el Sanicro 28 se presenta como una mejor opción para la elaboración de condensadores de tope, que los materiales habitualmente utilizados para esta aplicación.

Mediante la utilización de las líneas de tendencia para cada material y los datos de la ecuación que describe a cada una de ellas, se obtuvo la Ecuación de Basquin para cada material, tablas 3.15, 3.16 y 3.17.

Tabla 3.15 Obtención de la ecuación de Basquin para el Sanicro 28 ensayado en ambiente corrosivo.

Obtención de la ecuación de Basquin para el Sanicro 28 Corrosión			
Datos de la curva		Parámetros de la Ecuación de Basquin	
Pendiente=	-0,0973	b=	-0,0973
Intersección (eje Y)=	3,0533	Sf=	1130,5766
R² =	0,9198	Ecuación de Basquin	$S = 1130.5766 * (Nf)^{-0,0973}$

Tabla 3.16 Obtención de la ecuación de Basquin para el 316L ensayado en ambiente corrosivo.

Obtención de la ecuación de Basquin para el 316L Corrosión			
Datos de la curva		Parámetros de la Ecuación de Basquin	
Pendiente=	-0,081	b=	-0,081
Intersección (eje Y)=	3,0919	Sf=	1235,6629
R² =	0,9961	Ecuación de Basquin	$S = 1235,6629 * (Nf)^{-0,081}$

Tabla 3.17 Obtención de la ecuación de Basquin para el sTi-6Al-4V ensayado en ambiente corrosivo.

Obtención de la ecuación de Basquin para el Ti-6Al-4V Corrosión			
Datos de la curva		Parámetros de la Ecuación de Basquin	
Pendiente=	-0,1759	b=	-0,1759
Intersección (eje Y)=	3,5251	Sf=	3350,4258
R² =	0,9991	Ecuación de Basquin	$S = 3350,4258 * (Nf)^{-0,1759}$

3.5 Estudio fractográfico.

A continuación se presenta el análisis de las superficies de fractura realizado mediante Microscopia Electrónica de Barrido en el Centro de Microscopia Electrónica de la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales de la UCV. Las probetas utilizadas para el estudio en cuestión fueron las ensayadas a 90% y 75% del valor del límite de fluencia, lo que representa 405MPa y 337,5MPa respectivamente.

El estudio general se llevo a cabo con el fin de inferir las zonas de nucleación, propagación y fractura presentes en el material.

En la figura 3.15 se observa la superficie de fractura de la probeta que fallo a 32800 ciclos a 405MPa, en la cual se observan múltiples frentes de propagación de grieta, así como se puede evidenciar la presencia de escalones de clivaje los cuales se producen en el momento en que dos frentes de propagación se encuentran, produciendo un colapso abrupto y sin consumo de energía del material.

También es apreciable como la grieta se prolonga desde la parte exterior o periferia de la probeta hacia la parte interior, donde se puede observar la zona de despeje caracterizada por su rugosidad.

Cabe destacar que las fotografías han sido tomadas utilizando el modo de imagen de electrones secundarios, ya que este es el más adecuado para imágenes donde se desea apreciar morfología de la superficie de fractura.

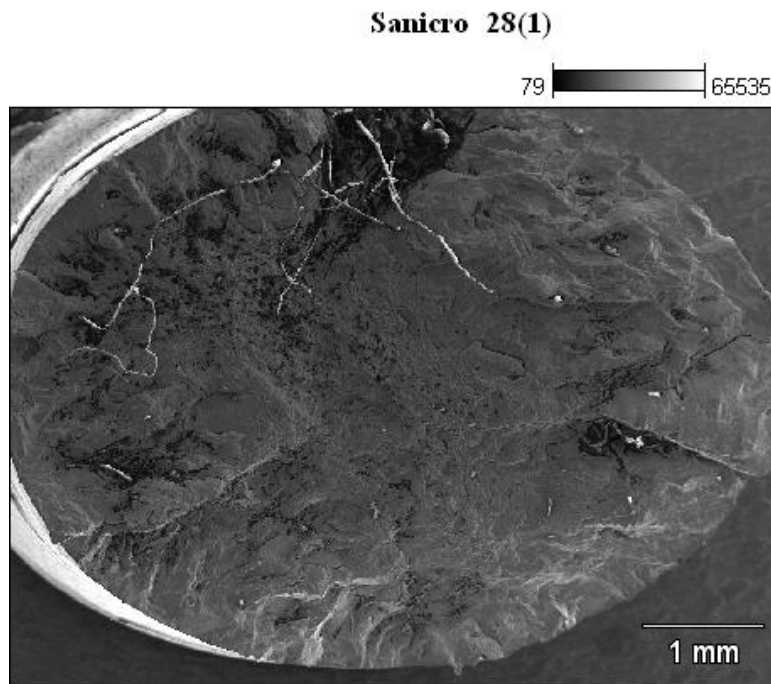


Figura 3.15 Vista general del área de fractura de la probeta ensayada a 405Mpa.

En la figura anterior se puede observar la presencia de otra grieta en la superficie de la probeta, la cual constituye aparentemente una grieta principal aunque esta no sea la responsable de la fractura, esto posiblemente se debe a que en principio se espera una menor velocidad de propagación en la zona de mayor sección transversal de la región calibrada de la probeta, por lo que al estar ensayando probetas de radio continuo podemos asegurar que el crecimiento de la grieta será más rápido en la zona de menor diámetro. Todo esto ocurre siempre y cuando el evento de nucleación de la grieta se produzca para esta sección, ya que puede darse el caso de probetas que fracturen en planos de mayor diámetro debido a la presencia de entallas que favorecen el fenómeno de nucleación de la grieta.

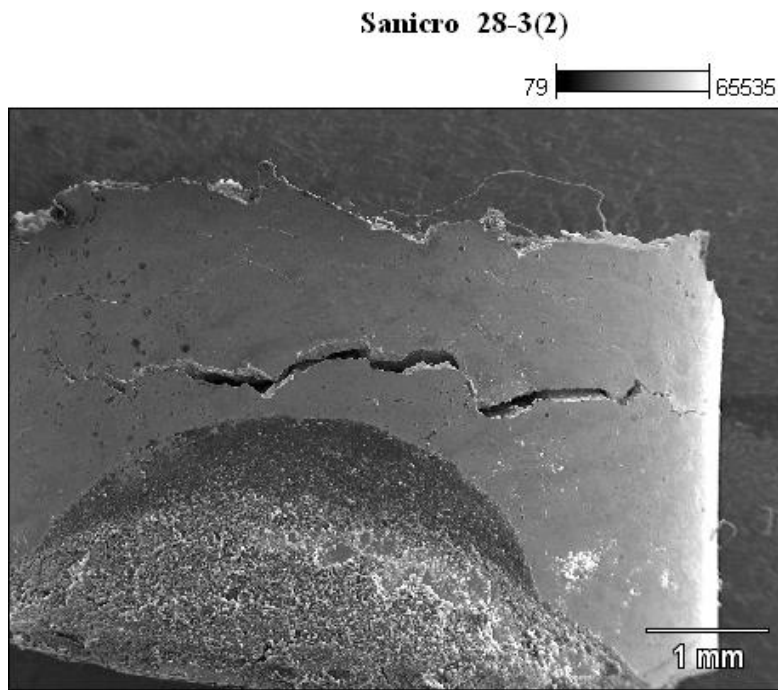


Figura 3.16 *Detalle de la superficie perimetral de la probeta ensayada a 405MPa, en la que se observa otro plano de propagación de grieta, lo que evidencia la presencia de entalla en esa zona.*

En la figura 3.16 se observa en detalle la grieta secundaria presente en la superficie de la probeta, así como también pueden apreciarse otras grietas de menor tamaño. Otro aspecto a destacar en esta fotografía es la similitud de forma que presentan tanto la grieta principal como la secundaria, al parecer siguen el mismo patrón de propagación.

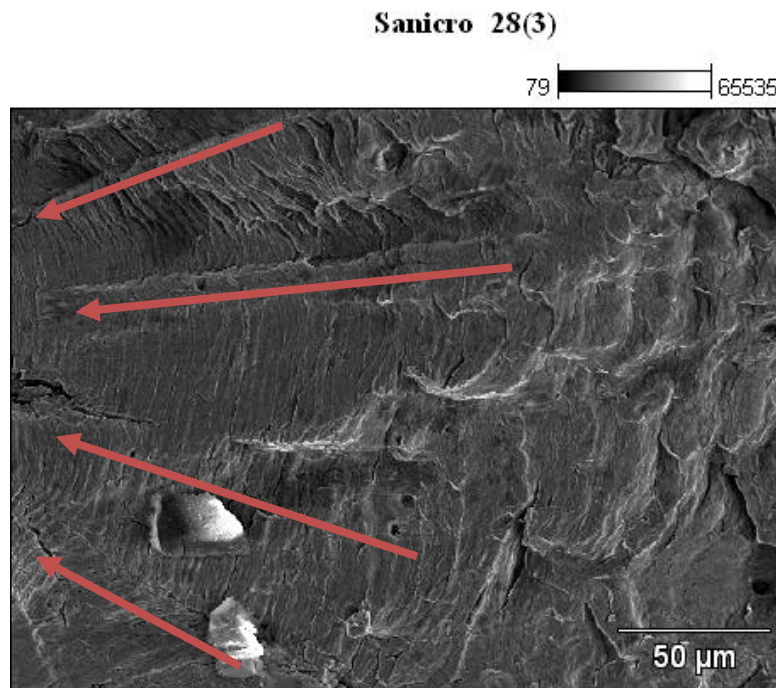


Figura 3.17 Detalle de marcas radiales y estriaciones presentes en la superficie de la probeta.

En la figura 3.17, son fácilmente apreciables las marcas radiales las cuales convergen en uno de los múltiples puntos de nucleación de la grieta, así como también son fácilmente apreciables en esta fotografía las estriaciones producto de la deformación plástica en la punta de la grieta de acuerdo a la propuesto por la literatura como mecanismo clásico de avance, lo cual habla de la alta ductilidad que presenta el material, además mediante el estudio de la distancia entre estas marcas es posible determinar la velocidad de propagación de la grieta y si existen o no alteraciones en el valor del esfuerzo medio durante el ensayo.

Al encontrarnos en precencia de un proceso de inversion completa de carga y de un material altamente ductil, resulta complicado conseguir posibles puntos de nucleacion de grieta debido a que cuando la grieta se encuentra en su punto de maxima compresion, el choque entre ambas caras de la superficie de fractura produce deformacion plastica en esta area que borra cualquier evidencia de nucleacion de grieta (figura 3.18).

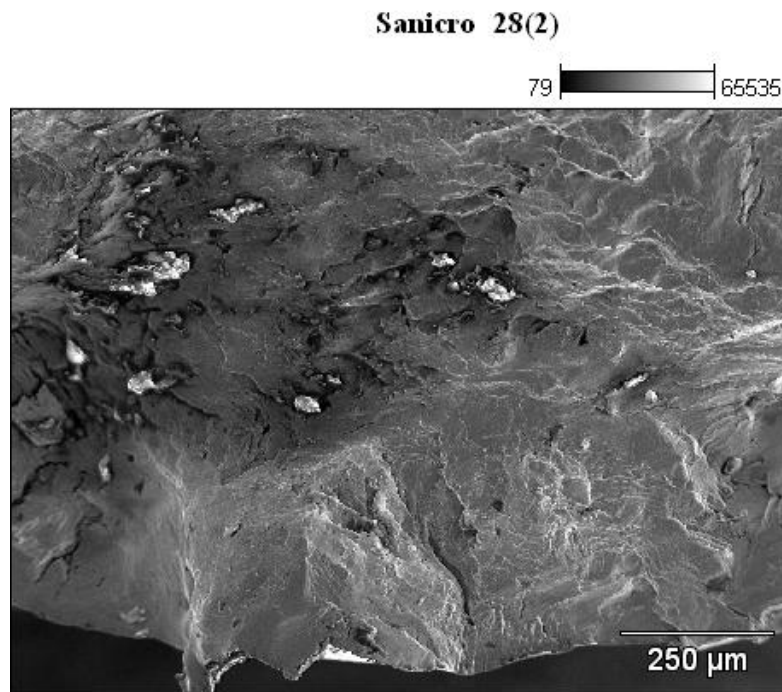


Figura 3.18 *Detalle de un punto de nucleación de grieta en el cual las marcas características han sido borradas por efecto de la deformación plástica producto del choque entre las dos caras de la superficie de fractura.*

A continuación se hará el análisis de los efectos ocasionados en la superficie de fractura de una probeta ensayada a 337,5 MPa la cual fractura a 236800 ciclos. Debido al menor esfuerzo y a la mayor vida de este espécimen, se evidenciaron con mayor facilidad las marcas características presentes en un evento de colapso por fatiga.

Si observamos la figura 3.19 podemos apreciar un punto de nucleación de grieta con sus marcas radiales bien definidas las cuales convergen al punto en cuestión.

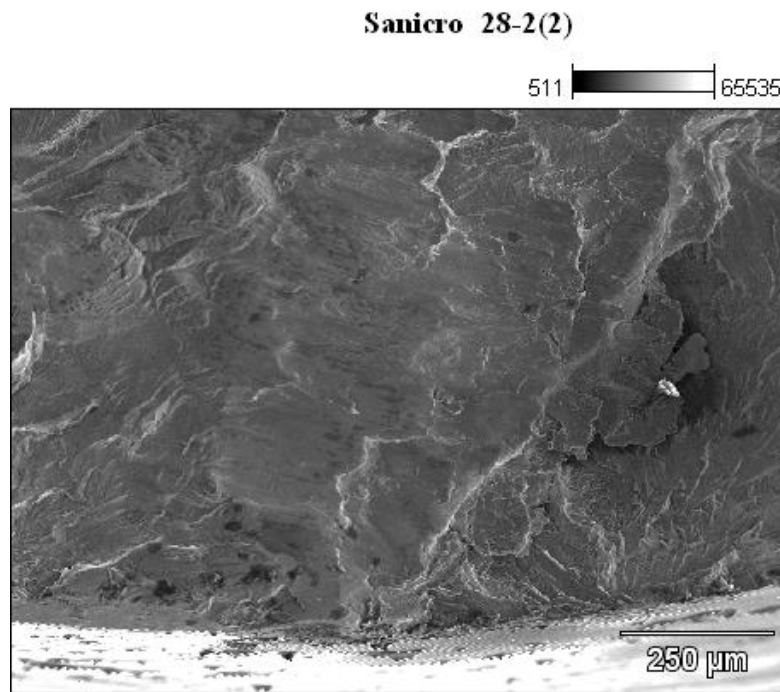


Figura 3.19 Punto de enucleación de grieta de una probeta ensayada a 337,5MPa.

En la figura 3.20 se pueden evidenciar con claridad los múltiples frentes de avance de las distintas grietas producto de la fatiga, nuevamente la evidencia de estriaciones nos habla de la ductilidad y velocidad de propagación de las grietas, en la misma se aprecia claramente como en la medida que transcurre el proceso que acumula daño en el material, la reducción de área inherente a este proceso lleva consigo una variación progresiva en la velocidad de propagación, la cual es evidente al examinar el espaciamiento existente entre las estriaciones.

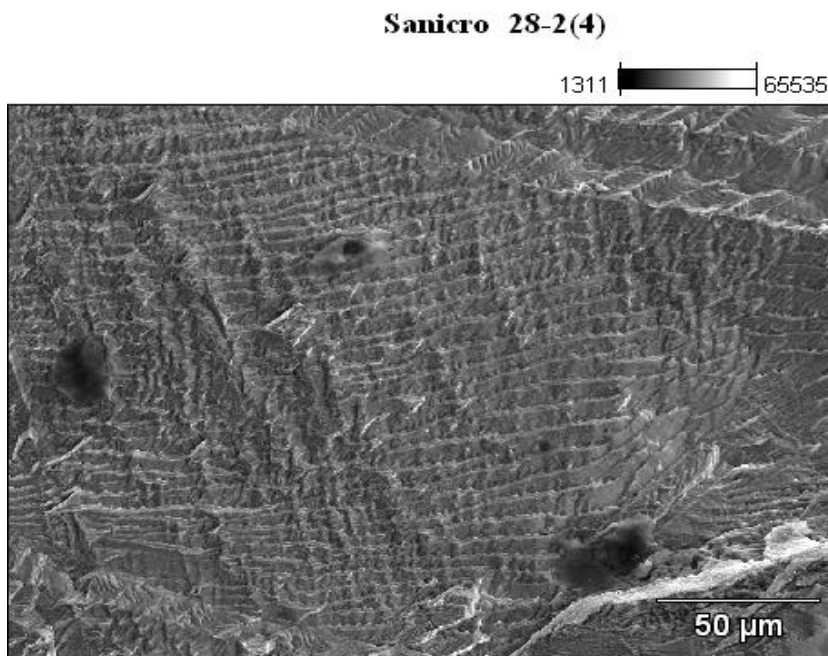


Figura 3.20 Evidencia de múltiples frentes de avance de una grieta por fatiga.

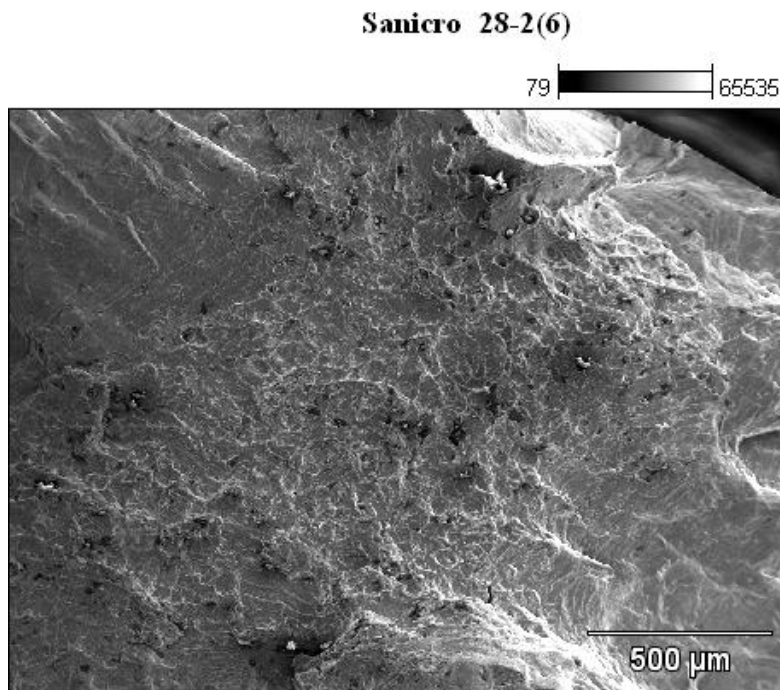


Figura 3.21 Zona de despeje y avance de dos frentes de crecimiento de grieta.

Al observar la figura 3.21 se aprecia la zona de despeje la cual se caracteriza por su apariencia rugosa que al hacer un acercamiento de la misma (figura 3.22) evidenciara la presencia de micro hoyuelos característicos de una fractura catastrófica por sobrecarga de tipo dúctil. En esta fotografía se observan claramente dos frentes de avance de grieta y en el medio la zona de despeje producida por sobrecarga debido a que el área remanente no fue capaz de soportar la carga a la cual se encontraba sometida la probeta.

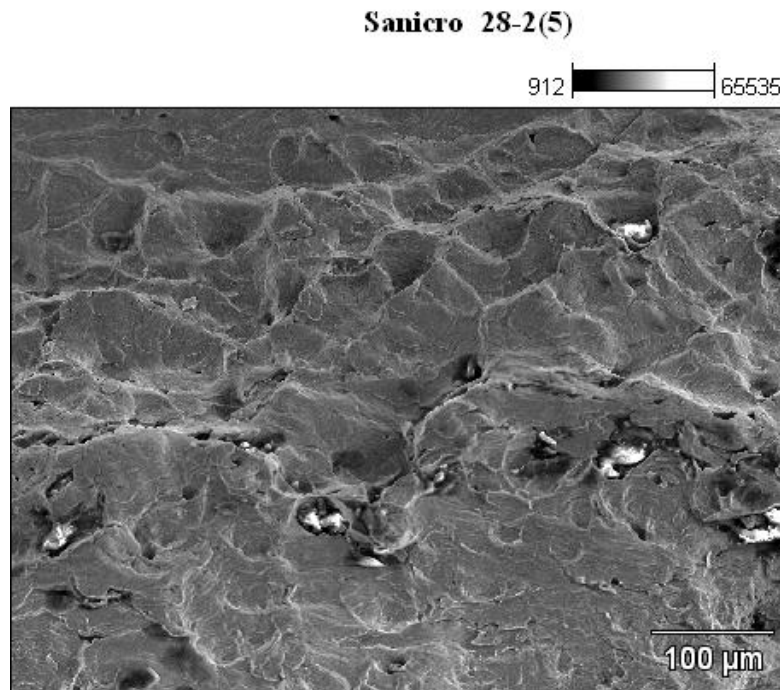


Figura 3.22 Detalle de la zona de despeje, con la presencia de micro hoyuelos característicos.

CONCLUSIONES

Revisadas las condiciones de operación de las torres de destilación y considerando que estas se ven influenciadas durante el servicio por sistemas fluctuantes de cargas, se presentaran a continuación un conjunto de conclusiones en términos del desempeño que estas aleaciones exponen bajo solicitudes mecánicas dinámicas, controladas en laboratorio y se tratara de extrapolar este comportamiento a las condiciones reales de servicio, partiendo de la comparación con otras aleaciones comúnmente utilizadas en este tipo de aplicaciones que demandan alto desempeño de los materiales involucrados.

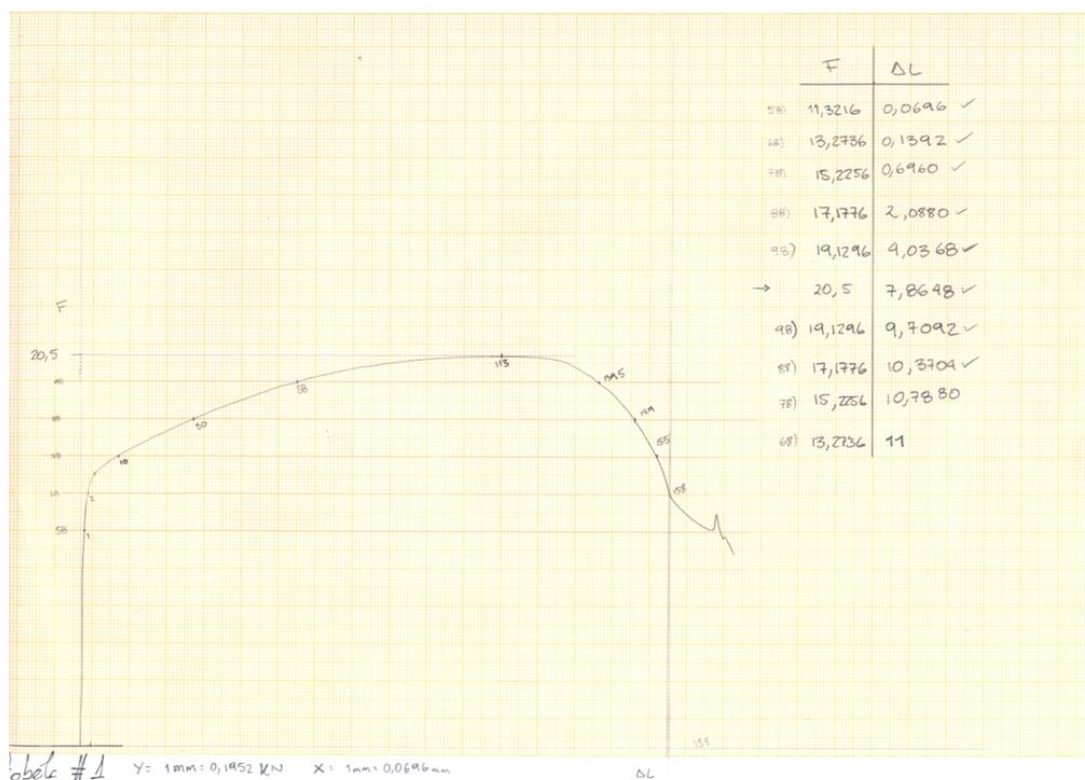
De acuerdo a los resultados obtenidos y el posterior análisis de los mismos, se confirma entonces que el Sanicro 28 se presenta como una mejor opción para la construcción de los condensadores de tope de las torres de destilación, que los materiales actualmente utilizados para la elaboración de estos, ya que Sanicro 28 presenta mejores propiedades tanto a fatiga corrosión como al fenómeno corrosivo en sí. Aunque la corrosión no fue objeto de estudio en esta investigación la misma es determinante para la selección entre un material u otro.

Otro aspecto por el cual se presenta el Sanicro 28 como una mejor opción, es que este presenta su mejor comportamiento para alto ciclaje, este aspecto es muy significativo debido a que por la importancia que presentan las torres de destilación en un complejo refinador, estas se construyen para trabajar durante largo tiempo, por lo que sus elementos estarán sometidos a alto número de ciclos de carga sin esperar mantenimiento preventivo frecuente.

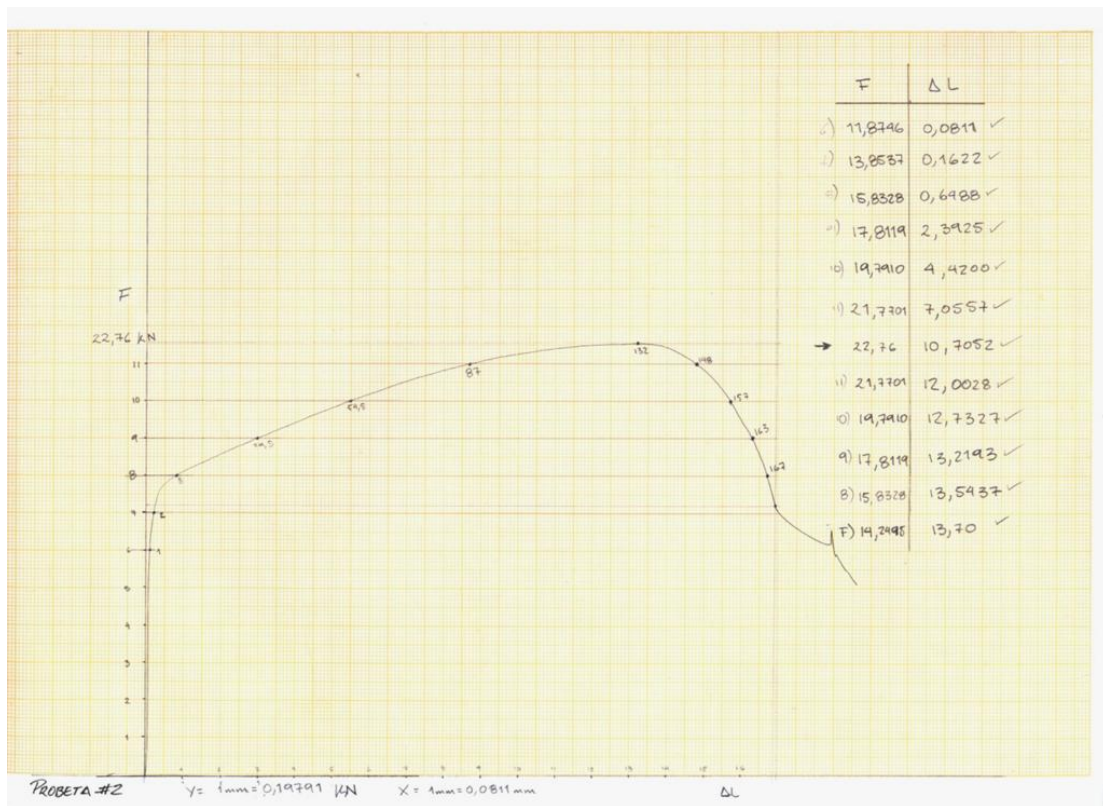
RECOMENDACIONES

- Realizar los ensayos de fatiga corrosión en distintos tipos de ambientes corrosivos, como solución de HCl o H₂S, los cuales son ácidos que se encuentran presentes en los procesos de destilación de crudo.
- Realizar ensayos de fatiga corrosión variando el valor de la temperatura del ensayo.
- Realizar ensayos de corrosión, con distintos tipos de agentes corrosivos como ácido clorhídrico HCl y ácido sulfhídrico H₂S que son agentes altamente corrosivos y presentes en los procesos de destilación de crudo.
- Hacer estudios de daño acumulado.
- Complementar los ensayos de fatiga al aire, con ensayos de alto ciclaje para la determinación de los valores referenciales del límite de fatiga y así aportar información importante en el ámbito del diseño de este tipo de estructuras.

ANEXOS



Anexo 1 Grafica variación de longitud vs carga real para la probeta 1, obtenida de la máquina de ensayo de tracción.



Anexo 2 Grafica variación de longitud vs carga real para la probeta 2, obtenida de la máquina de ensayo de tracción.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AB Sandvik Steel, (1999), “Ficha técnica Sandvik Sanicro 28 (S-1885-ENG)”, Sandviken, Suecia.
- [2] ASTM A262. “Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels”.
- [3] ASTM G-28. “Standard Test Methods for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloys” (2008).
- [4] ÁLVAREZ, P., HERNÁNDEZ, R. (2007). “Estudio del Comportamiento a la Fatiga y a la Fatiga Corrosión de un Acero Estructural AISI 4340 Recubierto por una Película de Diamante Policristalino Sintético”. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [5] JOA, C. (2010). “Estudio del comportamiento a la fatiga de un acero estructural de tipo SAE 4340 templado y revenido, recubierto por una película de CrN obtenida por un proceso de deposición física en fase vapor asistido por plasma”. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [6] ASM Handbook. “failure analysis and prevention”. Vol 10. 8th edition.
- [7] MOTT, R. (2006) “Diseño de elementos de maquinas” 4° ed. México: Editorial Prentice-Hall.
- [8] ASM Handbook. (1986) “Failure analysis and prevention”. 9° ed. ASM International. Cincinnati.
- [9] AVILES, R (2005) “Análisis de fatiga en máquinas”. Editorial Thomson, México.
- [10] ASKELAND, D. (2004) “Ciencia e Ingeniería de los materiales”. 4° ed, Editorial Thomson, México.
- [11] HUNG, M., PLAZ, D. (2010) “Estudio probabilístico de la fatiga al aire de una aleación de aluminio a partir de muestras con defectos de colada” Facultad de

Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- [12] BUDYNAS, R.; NISBETT, J. (2008) “Diseño en ingeniería mecánica”. 8° ed. México: Editorial McGraw-Hill.
- [13] CALLISTER, W. (2004) “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”. Barcelona, España: Reverté.
- [14] WEIBULL, W. (1961) “Fatigue Testing and Analysis of results”. Oxford: Pergamond Press.
- [15] STEPHENS, R. ET AL (2000) “Metal fatigue in engineering”. Nueva York: Wiley-IEEE.
- [16] ASTM E 606. “Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing”, 2004. Estados Unidos de América.
- [17] ASTM A 370. “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products” (2003).
- [18] UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. “Guía de laboratorio, materiales para ingeniería, practica N° 6: Metalografía”. Caracas.
- [19] ASTM E 407-07. “Micro etching Metals and Alloys” (2009).
- [20] PERDOMO, L. (2003) “Estudio de fatiga y corrosión-fatiga en la aleación Ti-6Al-4V recubierta con una deposición WC-CO termo rociado por HVOF” Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [21] SILVA, M., 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)” Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela, Caracas.