

# TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

## ESTUDIO DE TENACIDAD DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN TI-6AL-4V

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela.  
Por los Brs. **García Mavarez, Víctor José.**  
**Martínez Arocha, Armando.**  
Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, Junio de 2004.

# TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

## ESTUDIO DE TENACIDAD DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN TI-6AL-4V

Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela.  
Por los Brs. **García Mavarez, Víctor José.**  
**Martínez Arocha, Armando.**  
Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, Junio de 2004.

Caracas, junio de 2004.

## ACTA

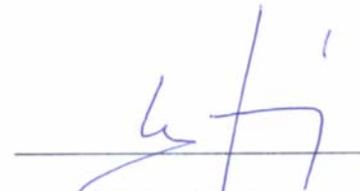
Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres: García M; Víctor J. y Martínez A; Armando.

### “ESTUDIO DE TENACIDAD DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN TI-6AL-4V”

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



Prof. Othman Falcón  
Jurado

  
Prof. Andrea Scagni  
Jurado

Prof. Eli Saúl Puchi  
Tutor

## DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen, luz y esperanza en mi camino; les dedico este trabajo.

A mi abuela aunque no estés físicamente, tu esencia está en mi corazón.

A mi madre y a Noemí, soporte de mi vida; con todo mi amor.

A mis hermanas y amigos (sobretudo a Maye) por darme su apoyo y brindarme muchos momentos de felicidad.

Víctor.

A mis Abuelos Regina y Pedro, cunas de mis principios y valores...

A mi madre, soporte de mi vida...

A ti Juana Rosa, por compartir tu amor, tiempo y sueños conmigo, gracias mi bella Ragazza.

A mi familia, tanto la que se encuentra aquí en la tierra, como a la que se encuentra allá arriba junto a los ángeles (como tu tía badita y Margarita).

A Dios, a la vida, a la fuerza, a la magia y a los sueños que me impulsan..

A mis amigos...todos mis hermanos mayores y menores.

A los que se me olvidó poner aquí, disculpen mi descuido.

Armando

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Central de Venezuela por brindarnos conocimiento, sabiduría y alegrías.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la cual salimos y esperamos representarla con nuestro máximo esfuerzo.

Al Prof. Ing. Eli Saúl Puchi, por prestarnos todo su apoyo y paciencia en la realización de éste trabajo.

A los ingenieros Crisanto Villalobos, Engels Ochoa (Paya), Manuel John, Carlos Merizalde y demás; que nos brindaron su ayuda en la realización de esta tesis.

A todos los profesores que nos brindaron sus conocimientos y consejos a lo largo de esta carrera.

**García M., Víctor J. y Martínez A., Armando.**

## **ESTUDIO DE TENACIDAD DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN TI-6AL-4V**

**Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004. 90 Pág.**

### **Ti-6Al-4V, Fatiga, Tenacidad de fractura**

En este estudio se han llevado a cabo una serie de ensayos de fatiga al aire bajo condición de flexión rotativa, de la aleación Ti-6Al-4V ante la presencia de entallas semi-esféricas (0,25, 0,50 y 0,75 mm de diámetro). Todo esto con la finalidad de determinar los valores de los parámetros de la ecuación de Paris-Erdogan y un valor aproximado de la tenacidad de fractura del material.

Se sometieron las probetas a 4 niveles de esfuerzo alternantes (727, 677, 627 y 577 MPa) los cuales representan una fracción del esfuerzo de fluencia, que permitió el cálculo de los parámetros involucrados en la ecuación de Basquin para cada tipo de entalla. Posteriormente se analizaron las superficies de fractura representativas para cada nivel de esfuerzo por medio de Microscopía Electrónica de Barrido, con el propósito de calcular el valor medio del tamaño de grieta crítica, y de esta forma determinar las constantes de la ecuación de Paris-Erdogan y la tenacidad de fractura. En el presente trabajo se contempló que la presencia de la entalla disminuye la resistencia a la fatiga del material de manera notoria con respecto a las probetas del sustrato, aproximadamente un 85% para el nivel de esfuerzo más alto (727 MPa) y un 77% para el nivel de esfuerzo inferior aplicado (577 MPa). Las dimensiones de las entallas no contribuyeron significativamente en la disminución de la resistencia a la fatiga de la aleación. El coeficiente de resistencia a la fatiga de las probetas entalladas fue tres veces mayor que el de las probetas del material base y el exponente de la ecuación de Basquin fue dos veces superior al de las probetas sin entalla.

Por otra parte, el promedio del tamaño de grieta crítica fue de 3,12 mm para el esfuerzo de 727 MPa y 3,88 mm para el esfuerzo de 577 MPa. Las constantes correspondientes a la ecuación de Paris –Erdogan (C y n) no presentan una variación significativa con el tamaño de la entalla. Para la tenacidad de fractura se encontró un valor promedio de 81 MPam<sup>1/2</sup>.

# Índice General

Capítulo 1 .....	15
1.1 – Marco teórico.....	15
1.1.1 – Generalidades del Titanio y la aleación Ti-6Al-4V.....	15
1.1.2 – Propiedades de la aleación Ti-6Al-4V.....	15
1.1.3 – Tipo de aleaciones.....	16
1.1.4 – Aplicaciones de la aleación.....	18
1.2 – Mecánica de fractura.....	19
1.2.1 – Ensayo de Tenacidad de Fractura.....	20
1.2.2 – Comportamiento de la Tenacidad de Fractura.....	21
1.2.3 – Ensayo de Tenacidad de Fractura de Deformación Plana ( $K_{IC}$ ).....	21
1.2.4 – Selección de la probeta.....	22
1.3 – Entallas y concentradores de esfuerzo.....	23
1.3.1 – Factor de Concentración de Esfuerzo ( $K_t$ ).....	23
1.3.2 – Factor de Reducción de Resistencia a la Fatiga ( $K_f$ ).....	23
1.3.3 – Sensibilidad a la Entalla en Fatiga ( $q$ ).....	24
1.3.4 – Factores que afectan la Sensibilidad a la Entalla.....	24
1.3.5 – Factor de Intensidad de Esfuerzo ( $K$ ).....	25
1.3.6 – Desarrollo matemático utilizado para determinar la tenacidad de fractura utilizando la mecánica de fractura lineal-elástica.....	27
1.3.7 – Estudios recientes.....	32
Capítulo 2 .....	35
2.1 – Procedimiento Experimental.....	35
2.1.1 – Organigrama de Trabajo.....	35
2.1.1.1 – Adquisición del Material.....	36
2.1.1.2 – Mecanizado y pulido de las probetas.....	36
2.1.1.3 – Probetas de Tracción.....	37
2.1.1.4 – Probetas de Fatiga.....	38
2.1.1.5 – Ensayo de Tracción.....	38
2.1.1.6 – Propiedades mecánicas.....	40
2.1.1.7 – Elaboración de las entallas.....	40
2.1.1.8 – Ensayo de Fatiga.....	42
2.1.1.9 – Curvas de Wöhler.....	46
2.1.1.10 – Fractografía.....	46
2.1.1.11 – Determinación del tamaño de grieta crítico.....	47
2.1.1.12 – Cálculo de las constantes de Paris-Erdogan.....	49
2.1.1.13 – Cálculo de la tenacidad de fractura.....	49
2.2 – Descripción de los equipos.....	50
2.2.1 – Máquina de tracción.....	50
2.2.2 – Torno.....	50
2.2.3 – Máquina fresadora.....	51
2.2.4 – Máquina de electroerosión.....	51
2.2.5 – Vernier digital.....	52

2.2.6 – Máquina de fatiga.....	52
2.2.7 – Cortadora de discos abrasivos.....	53
2.2.8 – Microscopio Electrónico de Barrido.....	53
2.2.9 – Analizador de imágenes.....	54
Capítulo 3 .....	56
3.1 – Resultados y análisis.....	56
3.1.1 – Ensayos de tracción.....	56
3.1.2 – Ensayos de fatiga.....	57
3.1.2.1 – Vida a la fatiga.....	60
3.1.2.2 – Relación potencial (ecuación de Basquin).....	63
3.1.2.3 – Factor de fatiga con entalla.....	64
3.1.3 – Estudio fractográfico por medio de Microscopía Electrónica de Barrido.....	66
3.1.3.1 – Evaluación a nivel macroscópico (20x).....	66
3.1.3.2 – Determinación de los tamaños de grieta crítico ( $a_c$ ).....	69
3.1.3.3 – Evaluación de la grieta en la zona de la entalla.....	70
3.1.4 – Obtención de los parámetros C y n de la ecuación de Paris-Erdogan....	74
3.1.5 – Comparación entre la ec. De Basquin y la ec. De Paris-Erdogan.....	75
3.1.6 – Cálculo de la tenacidad de fractura.....	77
Capítulo 4 .....	80
4.1 – Conclusiones.....	80
4.2 – Recomendaciones.....	81
4.3 – Anexos.....	82
A.1 – Certificado del fabricante para la aleación Ti-6Al-4V.....	82
A.2 – Cálculos del tamaño crítico de grieta de fatiga.....	86
A.3 – Cálculos de los factores de fatiga con entalla.....	87
4.4 – Bibliografía.....	88

## Índice de Ilustraciones

Fig. 1-1 Diagrama de fases, mostrando la estabilización $\alpha$ .....	18
Fig. 1-2 Esquema de la zona deformada plásticamente en el frente de grieta, que atraviesa por una lámina.....	20
Fig. 1-3 Selección de probetas estándar para tenacidad de fractura.....	22
Fig. 1-4 Parámetros que describen las ecuaciones de cálculo del factor geométrico.....	28
Fig. 1-5 Caracterización de la rapidez de crecimiento de grietas por fatiga en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos.....	29
Fig. 2-1 Probeta para el ensayo de tracción.....	37
Fig. 2-2 Probeta para el ensayo de fatiga.....	38
Fig. 2-3 Proceso de electroerosión.....	41
Fig. 2-4 Electrodo de cobre utilizados en el proceso de electroerosión.....	42
Fig. 2-5 Esquema de fatiga con flexión rotativa.....	42
Fig. 2-6 Área de propagación de la grieta.....	48
Fig. 2-7 Semi-círculo asociado con el APG y localización del ac.....	48
Fig. 3-1 Curva Esfuerzo Real vs. Deformación Real.....	57
Fig. 3-2 Curva de vida a la fatiga (Serie I, probetas del sustrato).....	60
Fig. 3-3 Curva de vida a la fatiga (Serie II, probetas con entalla de 0,25 mm de diámetro).....	61
Fig. 3-4 Curva de vida a la fatiga(Serie III, probetas con entalla de 0,50mm de diámetro).....	61
Fig. 3-5 Curva de vida a la fatiga (Serie IV, probetas con entalla de 0,75mm de diámetro).....	62
Fig. 3-6 Curvas de vida a la fatiga de todas las series.....	63
Fig. 3-7 Factor de fatiga con entalla.....	65
Fig. 3-8 Superficies de fracturas para las probetas con entallas de 0,25mm.....	66
Fig. 3-9 Superficies de fractura para las probetas con entalla de 0,50mm.....	67
Fig. 3-10 Superficie de fractura para las probetas con entalla de 0,75mm.....	68
Fig. 3-11 Zona de origen y propagación de la grieta para entallas de 0,25mm.....	71
Fig. 3-12 Zona de origen y propagación de la grieta para entallas de 0,50mm.....	72

Fig. 3-13 Zona de origen y propagación de la grieta para entallas de 0,75mm.....	73
Fig. 3-14 Comparación de ciclos a falla teóricos y experimentales para entallas de 0,25mm.....	76
Fig. 3-15 Comparación de los ciclos teóricos y experimentales para entallas de 0,50mm.....	76
Fig. 3-16 Comparación de los ciclos teóricos y experimentales para entallas de 0,75mm.....	77

## Índice de tablas

Tabla 1-1 Composición química de la aleación Ti-6Al-4V.....	16
Tabla 1-2 Propiedades generales de la aleación Ti-6Al-4V.....	16
Tabla 1-3 Intervalos y efectos de algunos aleantes usados con titanio.....	17
Tabla 2-1. Composición química de las barras de Ti-6Al-4V.....	36
Tabla 2-2. Propiedades Mecánicas de las barras de Ti-6Al-4V.....	36
Tabla 2-3 Distribución de las probetas de fatiga del material base.....	43
Tabla 2-4 Distribución de las probetas de fatiga entalladas.....	43
Tabla 3-1 Resultados del ensayo de tracción.....	56
Tabla 3-2 Vida a la fatiga (Serie I, probetas del sustrato).....	58
Tabla 3-3 Vida a la fatiga (Serie II, probetas con entalladas de 0,25 mm de diámetro).....	58
Tabla 3-4 Vida a la fatiga (Serie III, probetas con entalla de 0,50 mm de diámetro).....	59
Tabla 3-5 Vida a la fatiga (Serie IV, probetas con entalla de 0,75 mm de diámetro).....	59
Tabla 3-6 Ecuación de la recta de cada serie.....	63
Tabla 3-7 Parámetros y ecuación de Basquin de cada serie de probetas.....	64
Tabla 3-8 Factor de fatiga de las series entalladas.....	64
Tabla 3-9 Tamaño crítico de grieta de cada serie entallada.....	69
Tabla 3-10 Constantes y ecuaciones de Paris-Erdogan.....	74
Tabla 3-11 Ciclos a falla obtenidos de la ec. de Basquin y la ec. de Paris-Erdogan.....	75
Tabla 3-12 Tenacidad de fractura ( $K_{IC}$ ) para las entallas de 0,25, 0,50 y 0,75mm.....	77

## Introducción

El titanio fue descubierto en 1790, pero fue hasta 1954 cuando comenzó su uso como material estructural. Es el noveno elemento más abundante en la litósfera y el cuarto metal más utilizado luego del aluminio, hierro y magnesio; sin embargo, nunca se extrae de forma directa.

Es un material de coloración gris-plata, que resiste notablemente la corrosión atmosférica, la acción de los ácidos y no se altera usualmente por la exposición a las atmósferas marinas. Desde tiempo atrás, el titanio ha sustituido a otros metales en los usos más diversos, por ello el conocimiento de sus propiedades y ventajas se hace necesario; ya que adicionalmente desde la visión de utilidades estructurales el titanio y sus aleaciones están cada vez más incursionando como materiales de fabricación de piezas de importancia vital, del desarrollo humano.

Hace más de un siglo comenzaron los estudios de fractura de componentes de uso ingenieril, sin embargo, ha sido en los últimos 20 años que la mecánica de fractura se ha expandido rápidamente, desde sus bases teóricas hasta sus aplicaciones en la industria moderna.

Para lograr un mejor desempeño del titanio y sus aleaciones, es frecuente recurrir al empleo de aleantes; para lo cual se deben realizar estudios y ensayos de rigor, a fin de obtener resultados óptimos para sus posteriores aplicaciones. El énfasis en el desarrollo y elección de aleaciones se debe en parte a la mejor comprensión de los procesos de fatiga y de la mecánica de fractura.

En el presente estudio se planteará la evaluación de propagación de grietas debidas a fatiga de una aleación Ti-6Al-4V, a través de la determinación de las constantes de la Ecuación de Paris-Erdogan para este material. Con la particularidad de la aplicación de un método alternativo, que está basado en los valores obtenidos de los ensayos de fatiga a realizar.

Debido a que los métodos tradicionales para el cálculo de la tenacidad de fractura dependen de equipos costosos y de grandes dimensiones, se plantea éste método, mucho más práctico y factible para ser llevado a cabo en lugares de espacio y presupuestos moderados.

# Capítulo 1

# Capítulo 1

## 1.1 – Marco teórico

### 1.1.1 – Generalidades del titanio y la aleación Ti-6Al-4V:

El titanio es abundante en la corteza de la tierra y se extrae comercialmente del dióxido del titanio y del óxido del hierro-titanio. El punto de fusión de este metal es el más elevado en comparación con cualquiera de los metales de construcción usados <sup>(16)</sup>, mientras que su densidad es el doble del aluminio y 2/3 del acero <sup>(21)</sup>. Por el contrario el módulo de elasticidad es solamente la mitad de los aceros. La conductividad eléctrica del titanio y la de los aceros inoxidables son muy semejantes.

El titanio experimenta una transformación alotrópica a 883°C desde la estructura hexagonal compacta (HC) llamada fase  $\alpha$ , estable por debajo de esta temperatura, a la cúbica centrada en el cuerpo (BCC) llamada fase  $\beta$ , por encima de la anterior temperatura ( $\beta$ -transus). El titanio no es magnético y tiene buenas propiedades de transferencia de calor. No es tóxico y por lo general es biológicamente compatible con el tejido humano y óseo.

La aleación Ti-6Al-4V es del tipo  $\alpha$ - $\beta$ . Esta aleación es conocida como el "caballo de batalla" de la industria del titanio, abarcando más del 50% del mercado de titanio total. Es una aleación que es tratada térmicamente para lograr los aumentos moderados en la fuerza y resistencia. La Ti 6Al-4V se recomienda para el uso a las temperaturas de servicio de aproximadamente 350°C, ofreciendo una combinación de resistencia elevada, peso ligero, maleabilidad y resistencia de corrosión.

### 1.1.2 – Propiedades de la aleación Ti-6Al-4V.

Las propiedades básicas más comunes que presenta la aleación Ti-6Al-4V son las siguientes:

Tabla 1-1 Composición química de la aleación Ti-6Al-4V.<sup>(24)</sup>

		Ti	Al	V	Fe	O	C	Ni	H	Y
Porcentaje	Máx.	Base	6,75	4,5	0,3	0,2	0,1	0,05*	0,0125**	0,005***
	Mín.		5,5	3,5						

\* = 500ppm, \*\* = 125ppm, \*\*\* = 50ppm

Tabla 1-2 Propiedades generales de la aleación Ti-6Al-4V.<sup>(24)</sup>

Densidad	4,43 g/cc
Dureza Vickers	349
Resistencia a la tracción	950 MPa
Esfuerzo de fluencia	880 MPa
% Reducción de área	36
Tenacidad de fractura	75 MPam <sup>1/2</sup>

### 1.1.2 – Tipo de aleaciones:

Como se mencionó previamente, el titanio es alotrópico a 883 °C. Por ello, los elementos de aleación modifican la temperatura de transformación alotrópico, y pueden dividirse en cuatro grupos: a.) los que producen endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación; b.) los elementos  $\alpha$ -estabilizadores como el aluminio que incrementan la temperatura a la cual  $\alpha$  se transforma en  $\beta$ ; c.) los  $\beta$ -estabilizadores como el vanadio, que abaten la temperatura de transformación, causando incluso que la fase  $\beta$  sea estable a temperatura ambiente y d.) Los que producen una reacción eutectoide, reduciendo la temperatura a la cual la transformación  $\alpha$ - $\beta$  y produciendo una estructura bifásica a temperatura ambiente<sup>(1)</sup>.

**Aleaciones  $\alpha$ :** <sup>(1)</sup> tienen adecuada resistencia a la corrosión y oxidación, mantienen bien su resistencia a elevadas temperaturas, tienen conveniente soldabilidad y normalmente poseen aceptable ductilidad y conformabilidad a pesar de su estructura (HC).(ver fig.1-1).

**Aleación  $\beta$ :** <sup>(1)</sup> aunque las adiciones de vanadio o de molibdeno producen una estructura enteramente  $\beta$  a temperatura ambiente, ninguna de las llamadas aleaciones  $\beta$  están realmente aleadas a tal grado. En lugar de esto, abundan en estabilizadores  $\beta$ . En la condición recocida, donde solo existe  $\beta$  en la microestructura, la resistencia proviene del endurecimiento por solución sólida.

**Aleaciones  $\alpha$ - $\beta$ :** pueden tratarse térmicamente para obtener alta resistencia. La aleación es tratada por solución cerca de la temperatura  $\beta$ -transus (grado de transición de la fase  $\beta$ ) lo que permite la existencia de una pequeña cantidad de  $\alpha$  para evitar el crecimiento de grano. El tratamiento de solución por lo general es completado a alta temperatura en la zona bifásica  $\alpha$ - $\beta$ , seguido de un temple en agua u otra sustancia. Como resultado del temple, la fase  $\beta$  presente a la temperatura del tratamiento de solución puede ser retenida o puede ser parcialmente transformada durante el enfriamiento, ya sea por una transformación martensítica o por nucleación y crecimiento. La respuesta específica depende de la composición de la aleación, de la temperatura del tratamiento de solución, de la velocidad de enfriamiento y del tamaño de la reacción. Después del tratamiento de solución se realiza un envejecimiento normalmente entre 480 y 650 °C, precipitando  $\alpha$  y produciendo una mezcla fina de  $\alpha$  y  $\beta$  en la fase  $\beta$  transformada o retenida. El tratamiento de solución y el envejecimiento incrementan la resistencia de las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  desde un 30 a 50 % o más, a través de recocido o sobre envejecido <sup>(17)</sup>.

Tabla 1-3 Intervalos y efectos de algunos aleantes usados con titanio.<sup>(5)</sup>

Elemento aleante	Intervalos (aprox.) wt%	Efecto sobre la estructura
Aluminio	3-8	Estabilizador $\alpha$
Vanadio	2-15	Estabilizador $\beta$
Molibdeno	2-15	Estabilizador $\beta$
Cromo	2-12	Estabilizador $\beta$
Cobre	-2	Estabilizador $\beta$
Zirconio	2-15	$\alpha$ y $\beta$ reforzado
Silicon	0,05-0,5	Mejora la resistencia a la deformación

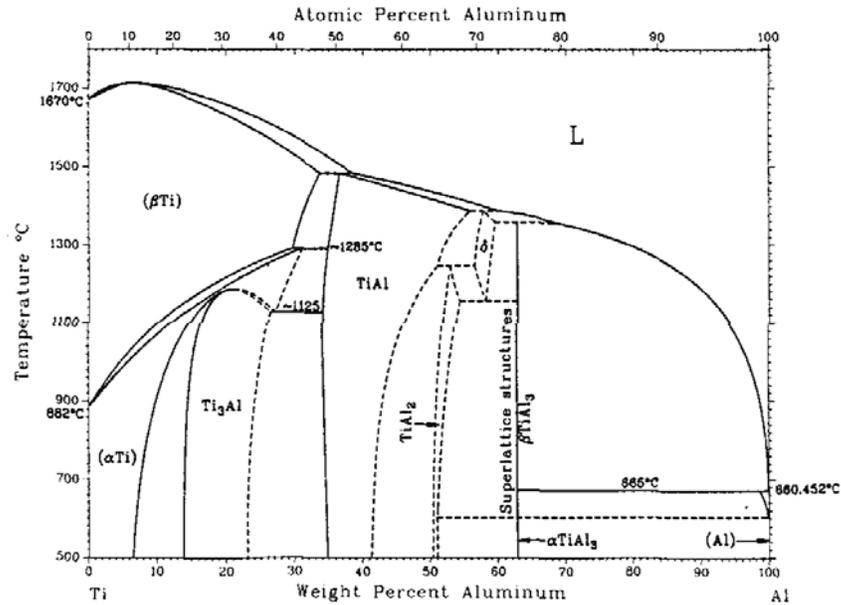


Fig. 1-1 Diagrama de fases, mostrando la estabilización  $\alpha$ .<sup>(5)</sup>

### 1.1.3 – Aplicaciones de la aleación:

La aleación Ti-6Al-4V tiene muchas y diversas aplicaciones por sus excelentes propiedades, entre las que se pueden mencionar:

- **Industria aeroespacial:** Por sus excelentes prestaciones, es utilizada en fuselajes y rotores de aviones comerciales, en tanques de propulsión para naves de satélites.
- **Industria militar:** Por su bajo peso y alta resistencia es empleada en la mayoría de los aviones de combate, en misiles, tanques, etc.
- **En la industria médica:** Por su buena compatibilidad y propiedades ante la corrosión, se usa para implantes óseos y odontológicos.
- **En la industria petroquímica:** Por sus propiedades ante la corrosión en ambientes marinos, forma parte de las plataformas de exploración y explotación, así como equipos en procesos químicos.

- **En la industria automotriz:** Por su relación peso-fuerza, esta aleación es empleada en autos y motos de competencia, así como en modelos comerciales.
- **En diversas áreas:** En la fabricación de palos de golf, cuerpos de bicicletas de carreras, joyería, etc.

## 1.2 - Mecánica de fractura

La Mecánica de Fractura es la rama de la ciencia que estudia la complejidad de problemas asociados con análisis de condiciones de fractura frágil catastrófica, y ha sido desarrollado en paralelo con el concepto físico de fractura. Está basada en la teoría de Griffith modificada para contabilizar la ocurrencia inestable de deformación plástica en fractura de los metales. <sup>(14)</sup> Cuando una región de deformación plástica alrededor de una grieta es pequeña en comparación con el tamaño de la grieta, la magnitud del campo de esfuerzos alrededor de la grieta es descrito por el factor de intensidad de esfuerzo **K**, con:

$$K = \sigma \left( \sqrt{a} \right) \times Y \left( \frac{a}{w} \right) \quad \text{Ec. 1.1} \quad \text{donde:}$$

**$\sigma$** : esfuerzo remoto aplicado.

**a**: dimensión característica de tamaño del defecto.

**Y**: factor que depende del cociente entre la longitud de grieta **a**, con el ancho **w**, determinado por el análisis lineal elástico de los esfuerzos.

El análisis lineal elástico de fluencias de pequeña escala, puede ser usado para determinar un factor único, **K**, que es proporcional al campo de esfuerzos locales en la punta de la grieta fuera de la pequeña zona plástica en la punta de la grieta. <sup>(3)</sup>

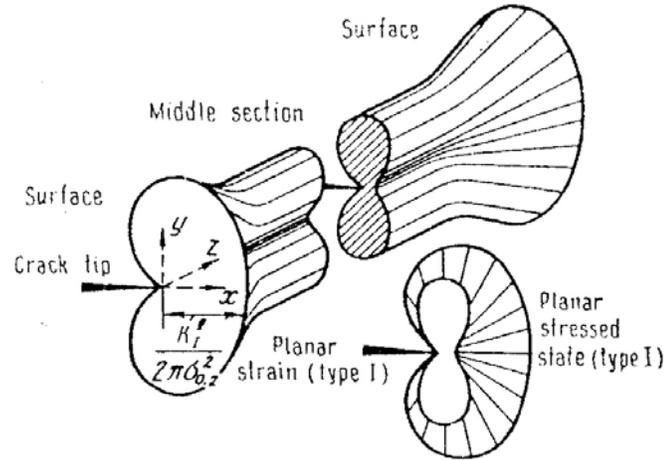


Fig. 1-2 Esquema de la zona deformada plásticamente en el frente de grieta, que atraviesa por una lámina<sup>(16)</sup>.

Estos conceptos dan una base para definir  $K_{IC}$ , el factor de intensidad de esfuerzo crítico para el avanzado crecimiento de grieta, como una propiedad independiente del tamaño y geometría de la probeta. Cuando el espesor de la probeta y las dimensiones del plano en la cercanía de la grieta son suficientemente grandes en comparación al tamaño de la zona plástica, entonces el valor de  $K$  al cual la grieta comienza es una constante y generalmente de mínimo valor llamado tenacidad de fractura de deformación plana del material.  $K_{IC}$  es un parámetro del material ya que es independiente de la probeta.<sup>(3)</sup>

### 1.2.1 - Ensayo de Tenacidad de Fractura <sup>(3)</sup>:

Se define Tenacidad de Fractura  $K_{IC}$  como el término genérico para mediciones de resistencia a la extensión de la grieta. Es una propiedad empírica del material que es determinada por uno o más métodos de ensayo estándar de Tenacidad de Fractura. Los métodos estándar en USA para ensayar la Tenacidad de Fractura son desarrollados por la ASTM (American Society of Testing Materials), son realizables para todo tipo de material sólido, pero especialmente para los metales.

### **1.2.2 - Comportamiento de la Tenacidad de Fractura:**

La Tenacidad de Fractura está definida como la resistencia a la propagación de una grieta. Esta propagación tiende a ser inestable, resultando en una completa separación del componente de dos o más piezas. El evento de la fractura puede ser estable o inestable. Con una extensión inestable de la grieta, usualmente asociada con un evento de fractura frágil, la fractura sucede en un punto bien definido y la caracterización de la fractura puede darse por un sencillo valor del parámetro de fractura.

Con una fractura estable, usualmente asociado con un proceso de fractura dúctil, la fractura es un proceso indetenible que no puede ser descrita por puntos. Este proceso de fractura es caracterizado por una curva de resistencia de crecimiento de la grieta o curva R.

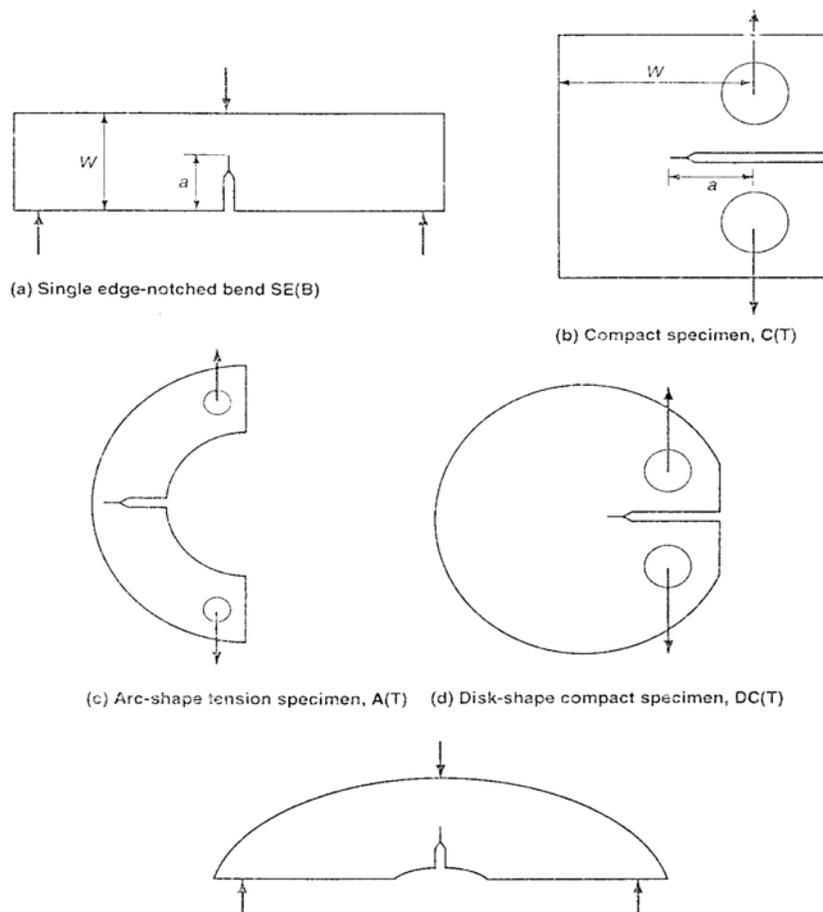
Las pruebas de mecánica de fractura y tenacidad de fractura comienzan con una metodología estrictamente lineal-elástica usan el factor de intensidad de esfuerzo en la punta de la grieta, K. Luego se desarrollaron parámetros no lineales. Sin embargo, los primeros métodos de ensayo desarrollados usaron parámetros lineales-elásticos y fueron basados en K.

### **1.2.3 - Ensayo de Tenacidad de Fractura de Deformación Plana ( $K_{IC}$ ):**

Este ensayo mide la Tenacidad de Fractura que se desarrolla bajo carga predominantemente lineal-elástica con la región en la punta de la grieta sujeta a condiciones de restricción cercanas a la deformación plana a través de su espesor (*ASTM E 399*). El ensayo fue desarrollado para condiciones de fractura dúctil esencialmente, pero puede ser usado también para fractura frágil. Para completar esto, un punto donde la extensión de la grieta dúctil iguala al 2% de la longitud de la grieta original es identificada. Este criterio nos da una medida dependiente de algún tamaño, y de su validez, se escoge para minimizar los efectos de tamaño así como restringir la carga para el régimen esencialmente lineal-elástico.

### 1.2.4 - Selección de la Probeta:

El primer elemento del ensayo es la selección de la probeta. Se permiten cinco geometrías diferentes; esas son: la probeta de flexión de borde entallado sencillo; probeta compacta; probeta de tensión arqueada; probeta compacta en forma de disco; y la probeta arqueada para flexión. Muchas de las geometrías de estas probetas son utilizadas en otras normas. En la figura 1-3 desde la (a) hasta la (e) se muestran las geometrías. Las probetas arqueadas y las compactas son las probetas tradicionales de tenacidad de fractura utilizadas en casi todos los métodos de ensayo de esta propiedad.



La elección entre las probetas arqueada y la compacta está basada en la cantidad del material disponible, facilidades de maquinado (la compacta tiene más detalles y su maquinado es más laborioso), y los equipos de carga disponibles para el ensayo.

La selección de la probeta también requiere de la selección del tamaño. Debido a que la validez del criterio depende del tamaño de la probeta, es importante elegir una probeta de suficiente tamaño, antes de hacer el ensayo. Hay lineamientos para elegir el tamaño correcto pero esto no garantiza que el tamaño elegido pasará los requerimientos de validez. La probeta de ensayo debe ser también elegida para que el material apropiado sea mostrado.

### **1.3 – Entallas y concentradores de esfuerzo<sup>(6)</sup>:**

La Resistencia a la Fatiga se reduce significativamente mediante la introducción de un concentrador de esfuerzos, aquí se discutirá brevemente las concentraciones de tensiones que provienen de las discontinuidades geométricas y su efecto en el comportamiento a la fatiga. Cualquier cambio brusco como una entalla, estría o agujero, produce variación local en la distribución del esfuerzo elástico que depende de la reducción del área de la sección transversal en la discontinuidad y en la forma de ésta.

#### **1.3.1 - Factor de Concentración de Esfuerzo (Kt)<sup>(6)</sup>:**

El factor **Kt** es el cociente entre el esfuerzo en el área de ensayo en la región de la entalla y el esfuerzo nominal correspondiente. Para la determinación de **Kt**, el mayor esfuerzo en la región de la entalla se calcula mediante la teoría de elasticidad, o con valores equivalentes son derivados experimentalmente.

#### **1.3.2 - Factor de Reducción de Resistencia a la Fatiga (Kf)<sup>(14)</sup>:**

Se define como la relación de la resistencia a la fatiga de una probeta sin concentración de tensiones, y la resistencia a la fatiga con concentración de tensiones

$$Kf = \frac{S^{SE}}{S^{CE}} \quad \text{Ec.1.2} \quad \text{donde:}$$

$S^{SE}$  : Resistencia a la fatiga de la serie sin entalla.

$S^{CE}$  : Resistencia a la fatiga de la serie con entalla.

### 1.3.3 - Sensibilidad a la Entalla en Fatiga (q):

Una definición común del factor de sensibilidad a la entalla es:

$$q = \frac{(K_f - 1)}{(K_t - 1)} \quad \text{Ec. 1.3}$$

En el cual  $q$  puede variar entre 0 (si  $K_f = 1$ ) y 1 (si  $K_f = K_t$ ).<sup>(6)</sup>

Si  $q = 1$  se dice que el material es completamente sensible a la entalla. Si  $q = 0$  se dice que la resistencia a la fatiga no se ve afectada por la entalla, es decir, el material no es sensible a la entalla. Se ha encontrado que el valor de  $q$  no depende solo del material, también depende de las condiciones de esfuerzo, tamaño de la probeta y de la fatiga, por lo tanto  $q$  no puede considerarse como una constante del material.

### 1.3.4 - Factores que afectan la Sensibilidad a la Entalla:

Hay mucha información de la relación entre  $K_t$  y  $K_f$ ; es difícil relacionarla debido a que las condiciones de cada ensayo son distintas. Se discutirán algunos factores que influyen en la sensibilidad a la entalla:

- **Influencia del Criterio de Fallo a  $K_t$ :**<sup>(14)</sup> Para la mayoría de las entallas el esfuerzo máximo aparece en la superficie, donde uno de los esfuerzos principales es cero, así que teniendo en cuenta que los dos esfuerzos principales tienen el mismo signo, el criterio del esfuerzo de cizalla máximo da el mismo resultado que el esfuerzo principal máximo. Si  $K_t$  es el factor de concentración basado en el criterio de esfuerzo de cizalla máximo, la condición de que un esfuerzo principal sea cero será:

$$K_t' = K_t \times \sqrt{(1 - c + c^2)} \quad \text{Ec.1.4} \quad \text{donde:}$$

$c$  : Esfuerzo principal secundario dividido entre el esfuerzo principal máximo.

Los valores de  $K_t'$  han sido recopilados por Piterson. El criterio apropiado para las condiciones de fatiga es incierto, pero la diferencia entre  $K_t$  y  $K_t'$  es menor del 15%.

- **Deformación plástica:** Algunos materiales tienen capacidad para deformarse plásticamente en cada ciclo, incluso a valores de esfuerzos por debajo de sus límites de fatiga y esto les vuelve menos sensibles a la entalla que otros materiales. La capacidad de un material para deformarse plásticamente bajo esfuerzos cíclicos da lugar a una reducción en la sensibilidad a la entalla.
- **Efecto del tamaño:** Probablemente el factor más importante que afecta a  $K_f$ , y por lo tanto, a la sensibilidad a la entalla, es el tamaño de la parte entallada. Este es un factor muy importante porque los ensayos realizados con probetas pequeñas de laboratorio pueden dar valores mayores de la resistencia a la fatiga que los que pueden soportar en servicio grandes componentes.
- **Grietas que no se propagan:** Se ha encontrado algunas veces que las grietas de fatiga producidas en la base de las entallas muy agudas alcanzan un cierto tamaño, pero no se propagan más. Estas grietas tienen lugar cuando el esfuerzo fluctuante necesario para formar una grieta es el que determina la resistencia a la fatiga con entalla. Este comportamiento es otro factor que considerarse en la interpretación de la sensibilidad a la entalla.

### 1.3.5 - Factor de Intensidad de Esfuerzo ( $K$ ): <sup>(6)</sup>

Las ecuaciones del campo de esfuerzo muestran que la magnitud del campo de esfuerzos elásticos pueden ser descritos por  $K$ . Un gráfico logarítmico de crecimiento de la grieta por ciclo,  $da/dN$  versus  $\Delta K$  <sup>(5)</sup>, siendo  $da/dN$  la pendiente de la curva de crecimiento de grieta a un valor dado de  $\Delta K$ , que es el intervalo del factor de intensidad de esfuerzo correspondiente al ciclo de carga aplicado a la probeta, donde:

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{min}} \quad \text{Ec.1.5}$$

$$\Delta K = \left( \sigma_{\text{máx}} \sqrt{\pi \times a} \right) - \left( \sigma_{\text{min}} \sqrt{\pi \times a} \right) \quad \text{Ec1.6}$$

$\Delta K$ : Intervalo del factor de intensidad de esfuerzo.

$K_{min} = 0$  si  $\sigma_{min}$  es de compresión, ya que el  $K$  no se define para compresión. <sup>(12)</sup>

El resultado de los ensayos de tasa de crecimiento de grieta para casi todos los materiales estructurales metálicos se muestra en las curvas  $da/dN$  vs  $\Delta K$  que tienen tres regiones diferentes:

**A.-Región I:** Exhibe un umbral en el crecimiento de la grieta de fatiga ( $\Delta K_{th}$ ), el cual corresponde al  $\Delta K$  por debajo del cual la grieta no se propaga.

**B.-Región II:** A valores intermedios de  $\Delta K$ , una línea recta usualmente se obtiene en el gráfico log-log de  $da/dN$  vs  $\Delta K$ . Esta región se representa por la ecuación de París-Erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad \text{Ec. 1.7}$$

Donde  $C$  y  $n$  son constantes para un material dado y una relación de esfuerzos.

**C.-Región III:** A altos valores de  $\Delta K$  ocurre el comportamiento inestable, resultando en un rápido aumento en la tasa de crecimiento de la grieta (TCG) previo a la falla completa de la probeta. Estas tres regiones están modeladas matemáticamente por la ecuación empírica de Mc Evily-Forman: <sup>(3)</sup>

Hay dos posibles causas de este comportamiento. Primero, el incremento de la longitud de grieta durante el ensayo a carga constante, que causa un pico de intensidad de esfuerzo que alcanza la tenacidad de fractura ( $K_{IC}$ ) del material, y este comportamiento inestable está relacionado con las tempranas etapas de la fractura frágil. Segundo, la propagación de la grieta reduce al área remanente de la probeta, haciéndola insuficiente para soportar el pico de esfuerzo.

La primera posibilidad es operativa para metales de alta resistencia; la segunda posibilidad, comportamiento de carga plástica límite, es común para metales dúctiles particularmente si  $K_I$  es alto <sup>(6)</sup>.

### 1.3.6 - Desarrollo matemático utilizado para determinar la tenacidad de fractura utilizando la mecánica de fractura lineal-elástica:

La ecuación que relaciona el factor de intensidad de esfuerzos con el tamaño de grieta de fatiga puede expresarse como:

$$K = f(a) \times S \sqrt{a} \quad \text{Ec.1.8} \quad \text{donde:}$$

**S:** esfuerzo aplicado; **f(a):** factor geométrico; **a:** longitud de grieta.

La ecuación (1.6) se puede escribir en condiciones críticas como<sup>(23)</sup>:

$$K_{IC} = f(a) \times S_{m\acute{a}x} \sqrt{a_c} \quad \text{Ec.1.9} \quad \text{donde:}$$

**K<sub>(IC)</sub>:** tenacidad de fractura; **S<sub>máx</sub>:** es el esfuerzo máximo aplicado y **a<sub>c</sub>:** es el tamaño crítico de grieta.

La ecuación (1.8) también se puede escribir de la siguiente manera<sup>(20)</sup>:

$$\Delta K = f(a) \times \Delta S \sqrt{a \times \pi} \quad \text{Ec.1.10} \quad \text{donde:}$$

**ΔK:** Intervalo del factor de intensidad de esfuerzos

$$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\text{in}} \quad \text{Ec. 1.11}$$

**K<sub>máx</sub>:** factor de intensidad de esfuerzo máximo.

$$K_{m\acute{a}x} = S_{m\acute{a}x} \times f(a) \times \sqrt{\pi \times a} \quad \text{Ec. 1.12}$$

**K<sub>min</sub>:** factor de intensidad de esfuerzo mínimo.

(Debido a que **K<sub>I</sub>** no está definido para esfuerzos de compresión, **K<sub>min</sub>** se toma como igual a cero si **S<sub>min</sub>** es un esfuerzo de compresión).

$$K_{m\text{in}} = S_{m\text{in}} \times f(a) \times \sqrt{\pi \times a} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Para el cálculo del factor geométrico  $f(a)$ , en probetas cilíndricas se utilizan técnicas numéricas y análisis aproximados. Las principales dificultades para encontrar los factores geométricos en barras de sección circular son la naturaleza tridimensional de la grieta, y el cambio del valor del factor de intensidad de esfuerzo a lo largo de todo el frente de la grieta <sup>(9)</sup>. Toribio y colaboradores <sup>(23)</sup> proponen factores geométricos en forma de

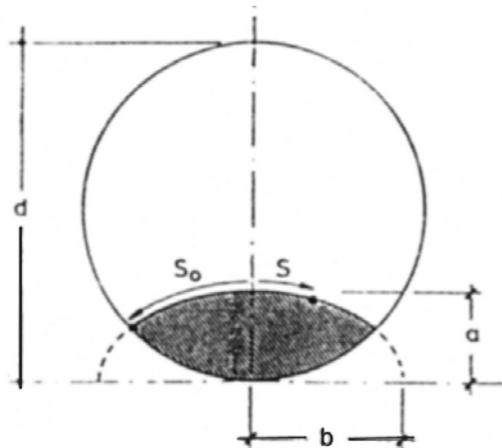


Fig. 1-4 Parámetros que describen las ecuaciones de cálculo del factor geométrico <sup>(23)</sup>.

ecuaciones. En la figura 1-4, se observan los parámetros descritos en dichas ecuaciones y están expresadas de la siguiente manera <sup>(9)</sup>:

**a/b=1:** Condición que supone que la grieta forma parte de un semicírculo.

**a/b=0,2:** Condición que refiere al factor geométrico a un punto situado en el centro del frente de la grieta.

**S/S<sub>0</sub>=0:** Condición que refiere al factor geométrico a un punto situado en el centro del frente de grieta.

**S/S<sub>0</sub>=1:** Condición que refiere al factor geométrico a un punto superficial de la grieta.

Donde: **a:** longitud inicial de la grieta.

**b:** espesor de la grieta.

**d:** diámetro de la probeta.

Las ecuaciones planteadas son:

Para  $a/b=1$

$$S/S_0=0 \rightarrow f(a) = 0,530-0,193 (a/d) + 0,499 (a/d)^2 \quad \text{Ec.1.14}$$

$$S/S_0=1 \rightarrow f(a) = 0,561-0,410 (a/d) + 1,173 (a/d)^2 \quad \text{Ec. 1.15}$$

Para  $a/b= 0,2$

$$S/S_0=0 \rightarrow f(a) = 0,821-0,486 (a/d) + 2,003 (a/d)^2 \quad \text{Ec. 1.16}$$

$$S/S_0=1 \rightarrow f(a) = 0,635-0,837 (a/d) + 2,657 (a/d)^2 \quad \text{Ec. 1.17}$$

Como se ha dicho anteriormente la forma más útil para relacionar la velocidad de crecimiento de la grieta  $da/dN$  con la variación del factor de intensidad de esfuerzos es mediante una curva de escala doble logarítmica (ver fig. 1-5). En ésta curva se pueden observar tres regiones de la fatiga explicadas anteriormente que se pueden describir brevemente de la siguiente manera <sup>(3)</sup>:

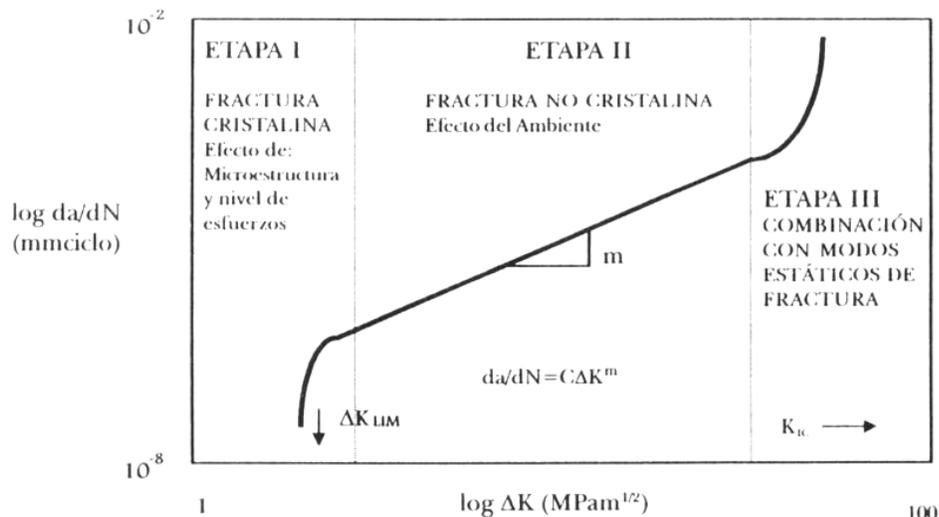


Fig. 1-5 Caracterización de la rapidez de crecimiento de grietas por fatiga en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos.<sup>(15)</sup>

Región I: en esta se encuentra el umbral de fatiga y la zona cercana a esta y en ella  $da/dN$  decrece rápidamente con el aumento de  $\Delta K$  a partir de un valor de umbral, ( $\Delta K_{th}$ )

Región II: es la región intermedia de la curva, controlada por la ecuación de París.

Región III: es la región de mayor velocidad, donde el factor de intensidad de esfuerzo máximo,  $K_{m\acute{a}x}$ , se aproxima al factor de intensidad de esfuerzo,  $K_c$ .

Las tres regiones pueden ser modeladas matemáticamente por la ecuación empírica de Mc Evily-Forman <sup>(3)</sup>:

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{(\Delta K^2 - \Delta K_0^2) \times (1 + \Delta K)}{(K_c - K_{m\acute{a}x})} \right) \quad \text{Ec. 1.18}$$

En esta ecuación el exponente 2 reemplaza a “n” de la ecuación de París, pero esta ecuación debe ser modificada para trabajar con exponentes variables.

Como se puede apreciar en la ecuación 1.10, el intervalo de esfuerzos ( $\Delta S$ ), la longitud de grieta ( $a$ ) están incluidos en el parámetro  $\Delta K$ , por lo que utilizando el factor de intensidad de esfuerzos adecuado para un determinado componente, y su grieta, la integración de la curva sigmoideal puede suministrar la vida a fatiga por crecimiento de grieta para componentes sometidos a diferentes niveles de esfuerzo y diferentes tamaños iniciales de grieta.

Necesitamos una ecuación que relacione las constantes de París con el tamaño de grieta por lo que sustituimos  $\Delta K$  de la ecuación 1-10 en la ecuación 1.7.

$$\frac{da}{dN} = C \left[ f(a) \times \Delta S \times \sqrt{\pi \times a} \right]^n \quad \text{Ec. 1.19}$$

Integrando ambos lados de la ecuación:

$$\int \frac{da}{dN} = \int C \times \left[ f(a) \times \Delta S \times \sqrt{\pi \times a} \right]^n \quad \text{Ec. 1.20}$$

Aplicamos los límites de integración:

$$\int_0^{Nf} \frac{da}{dN} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\left[ f(a) \times \sqrt{\pi \times a} \right]^n} \quad \text{Ec. 1.21}$$

Obtenemos una expresión en donde el número de ciclos a falla está en función de las constantes de la ecuación de París-Erdogan:

$$\hat{Np} = \frac{1}{C} \left[ \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\left( f(a) \times \sqrt{\pi \times a} \right)^n} \right] \times S^{-n} \quad \text{Ec. 1.22}$$

Donde  $\mathbf{Np}$  es el número de ciclos durante la propagación de la grieta,  $\mathbf{a_0}$  es el tamaño inicial de grieta;  $\mathbf{a_c}$  es el tamaño crítico de grieta,  $\mathbf{S}$  es el esfuerzo alternante máximo aplicado a la probeta durante el ensayo. De acuerdo con Pertúz et al <sup>(20)</sup>

Por medio de un análisis de regresión no lineal se puede calcular los valores de  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{n}$ . Para esto se aplica el método de mínimos cuadrados y se define la expresión de suma de cuadrados  $\Phi(\mathbf{C}, \mathbf{n})$ .

$$\Phi(C, n) = \sum (Np - \hat{Np})^2 \quad \text{Ec. 1.23}$$

Donde  $\mathbf{Np}$  es el número de ciclos a falla experimental y  $\hat{\mathbf{Np}}$  es el número de ciclos a falla teórica dado por la Ec. 1.22. Luego se obtiene la siguiente ecuación:

$$\Phi(C, n) = \sum_{i=1}^n \left\{ Np_i - \frac{1}{C} \left[ \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\left( f(a) \times \sqrt{\pi \times a} \right)^n} \right] \times S_i^{-n} \right\}^2 \quad \text{Ec. 1.24}$$

Posteriormente se resuelve el sistema de ecuaciones aplicando la condición de minimización:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial C} = 0 \quad \text{Ec.1.25} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{Ec. 1.26}$$

### 1.3.7 – Estudios recientes:

**Pertúz et al. (2000)**<sup>(20)</sup> llevaron a cabo una investigación sobre la influencia de un recubrimiento auto catalítico Ni-P sobre las propiedades de fatiga de un acero SAE 4140 con entalla y sin ella, obteniendo una reducción de vida de fatiga entre un 68% en el mayor esfuerzo aplicado de 580 MPa y un 88% en el esfuerzo menor de 474 MPa.

En los ensayos realizados con las probetas entalladas y no recubiertas, se reveló que en presencia de un concentrador de esfuerzos de 0,5 mm de longitud, redujo la vida a fatiga entre 69% y 94% dependiendo del esfuerzo alternante aplicado. Determinándose el valor medio del tamaño de grieta crítica junto con el valor de tenacidad de fractura del sustrato, de donde esta última fue muy similar a los valores reportados en la literatura existente.

Además, con los resultados obtenidos de las muestras entalladas, se hizo la presentación de un método de regresión no lineal, por medio del cual fue posible estimar satisfactoriamente los parámetros que se introducen en la ecuación de Paris, para la tasa de crecimiento de grieta en el sustrato, en función del factor de intensidad de esfuerzo en el extremo de la grieta.

**Merizalde (2001)**<sup>(18)</sup> realizó el estudio de la tenacidad de fractura de la aleación de aluminio 6063 mediante el método alternativo de Pertúz et al.(2000), obteniendo los valores de las constantes de la ecuación de Paris-Erdogan, los cuales no presentaron una variación sistemática dependiente del tamaño de las entallas (0,25, 0,50 y 0,75 mm). La reducción de la vida a la fatiga de las probetas entalladas en comparación con las del sustrato varió entre un 67% para los esfuerzos inferiores y un 20% para los superiores. Mientras que el tamaño crítico de grieta no presentó una variación sistemática con el tamaño de la entalla.

**Mendoza (2001)**<sup>(17)</sup> realizó el estudio del comportamiento a fatiga en la aleación beta Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo, en donde se obtuvo que el endurecimiento mecánico del material producto de los tratamientos térmicos de solución y de envejecido, no afectaron la resistencia a la fatiga. Las probetas sometidas al tratamiento térmico de envejecido presentaron valores de umbral ligeramente superiores a las no envejecidas y a su vez

presentaron una fractura frágil de carácter intergranular con áreas de clivaje bien definidas. Y para las probetas sometidas al tratamiento térmico de solución, el estudio fractográfico reveló una fractura del tipo dúctil transgranular con estriaciones de fatiga de diferente orientación.

**Ochoa (2002)**<sup>(19)</sup> realizó un estudio a fatiga de un acero SAE 4340 templado y revenido, entallado; en el que la vida a fatiga varió entre un 60% para el esfuerzo superior de 694 MPa y un 94% para el esfuerzo inferior de 574 MPa. El tamaño de la entalla (0,25, 0,50 y 0,75 mm) no contribuyó significativamente en la disminución de la resistencia a fatiga del material, sin embargo, en el límite de fatiga la disminución si fue apreciable.

Con la utilización del método presentado por Pertúz et al. (2000) se obtuvieron valores de tenacidad de fractura muy similares con los reportados en la literatura para este acero SAE 4340.

**Fernández (2003)**<sup>(13)</sup> realizó estudios de fatiga al aire en una aleación de Ti-6Al-4V, recubierta con una película de Balinit futura, en donde la resistencia a la fatiga de las probetas se evaluó en el orden del 68 al 78% del esfuerzo de fluencia del sustrato. Observándose que la aplicación del recubrimiento disminuyó en un 21% la resistencia a la fatiga para el mayor nivel esfuerzo aplicado y una disminución del 45% para el menor nivel de esfuerzo ensayado.

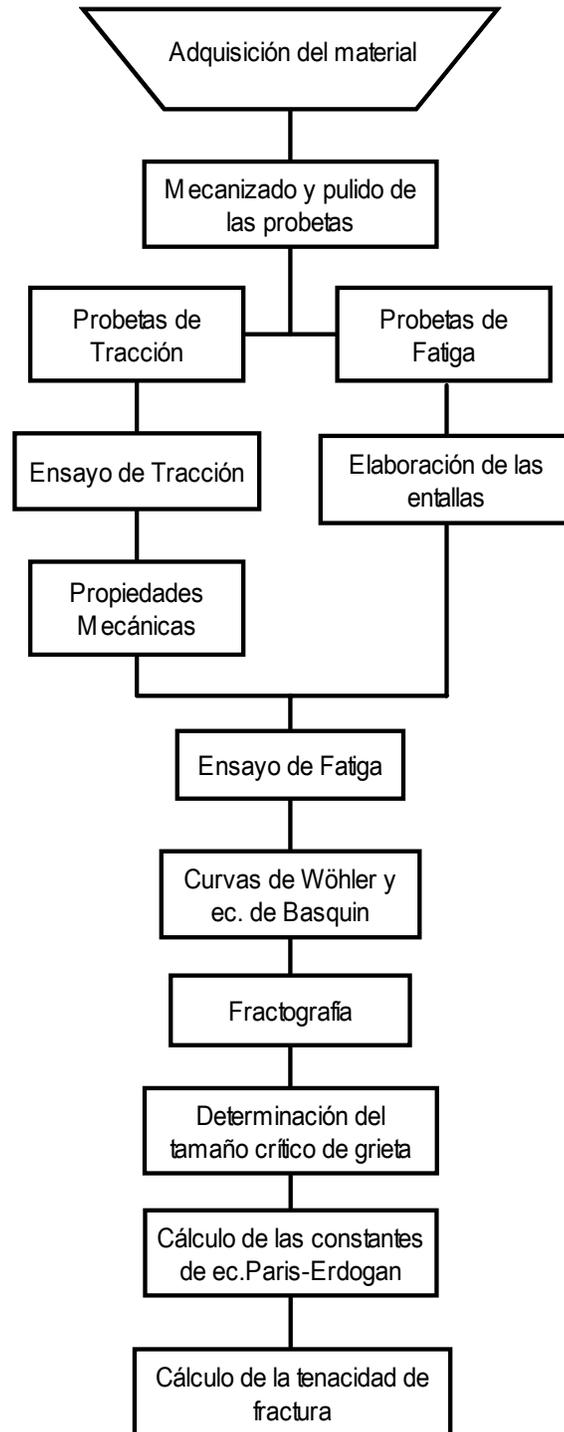
En cuanto al límite de fatiga, las probetas recubiertas presentaron una disminución del 10%, en comparación al límite de fatiga del sustrato. Así mismo se evaluó la condición microestructural del sustrato, mediante el uso de Microscopía óptica, observándose una morfología típica columnar de procesos de conformado de barras en este tipo de aleaciones, no obstante un tamaño de grano menor al reportado por la literatura especializada.

# Capítul o 2

## Capítulo 2

### 2.1- Procedimiento Experimental

#### 2.1.1- Organigrama de Trabajo



### 2.1.1.1 – Adquisición del Material:

El material fue adquirido a la empresa Castle Metals, ubicada en Chicago, Illinois (Estados Unidos de Norteamérica); siendo recibido en cinco barras de Ti-6Al-4V con tratamiento térmico de recocido a 704,4°C por espacio de 1 hora y seguidamente enfriadas al aire. Las dimensiones de las barras eran 12,7mm (½”) de diámetro y 1,905m (75”) de longitud, presentando la siguiente composición química indicada en la tabla 2-1, así como las propiedades mecánicas representadas en la tabla 2-2 entre algunas de las características dadas por el fabricante en el certificado de la aleación (ver anexo A1):

Tabla 2-1. Composición química de las barras de Ti-6Al-4V

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	Cr	Si	Cu	Zr	Mo	Mn	Sn	H	B	Y
Base	6,24	4,22	0,22	0,16	0,026	0,025	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0034	0,001	0,001

Tabla 2-2. Propiedades Mecánicas de las barras de Ti-6Al-4V

Resistencia a la Tracción	Esfuerzo de Fluencia	Módulo de Young	Porcentaje de Elongación	Porcentaje de Reducción de Área	Dureza (HVN)
1133 MPa	932 MPa	117 GPa	14	41	363

### 2.1.1.2 – Mecanizado y pulido de las probetas:

El proceso de mecanizado del material estuvo a cargo del Taller de Precisión J.V. ubicado en la zona industrial de Turumo; Estado Miranda. De las 5 barras se tomaron 3 trozos de aproximadamente 125mm, para el mecanizado de las probetas de tracción y 60 trozos de alrededor 105mm correspondientes a las probetas de fatiga.

Posteriormente se realizó el proceso de rectificado de extremos, el cual dio inicio a la elaboración de las probetas de tracción y fatiga según las normas ASTM. Al término de esta etapa, se procedió a la preparación del acabado superficial mediante continuos desbastes con papel esmeril en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V.

Colocadas las probetas en un torno, se fueron eliminando las huellas del mecanizado previo mediante un movimiento alternante de presión moderada, ejercida manualmente con el papel esmeril sobre la superficie esencial para los ensayos. El papel de granulometría comprendida desde 400 hasta 1200, fue utilizado para el desbaste ordinario, acotando que mientras esto ocurría se originaron sobre la superficie marcas en forma de “X”; debido a la rotación de la pieza junto a la acción del lijado y que fueron degradándose a medida que disminuía el tamaño de los granos.

Finalmente se utilizaron los papeles de granulometría 2000 y 4000 para el desbaste-pulido óptimo de las probetas, llamado comúnmente “acabado tipo espejo”. El punto final de esta acción se realizó con el mismo papel de esmeril 4000, pero ésta vez realizando manualmente movimientos longitudinales sobre la superficie; para así garantizar que no hubiesen concentradores de esfuerzos transversales en la zona esencial para el estudio.

### 2.1.1.3 – Probetas de Tracción:

Las tres probetas de tracción fueron elaboradas siguiendo la norma ASTM-A370 y de la cual se pueden observar sus dimensiones en la figura 2.1.

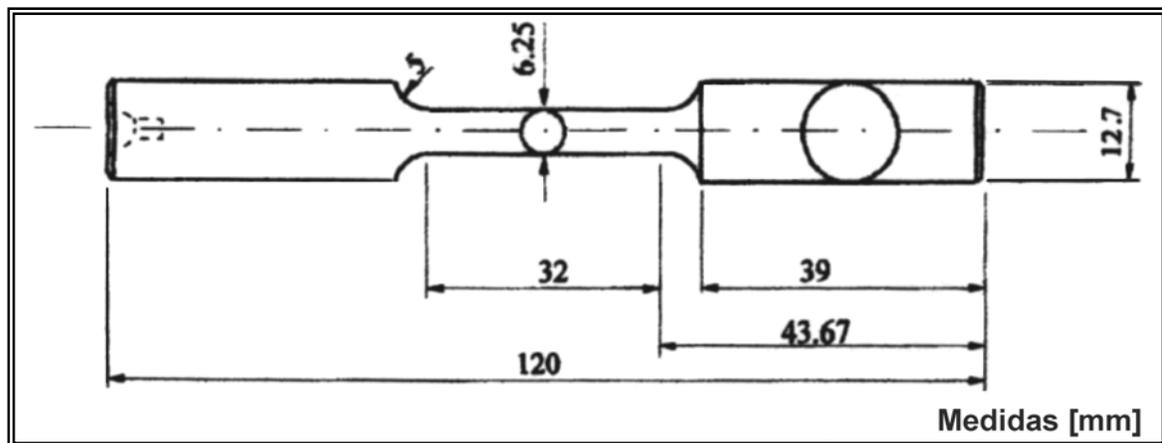


Fig. 2-1 Probeta para el ensayo de tracción.

#### 2.1.1.4 – Probetas de Fatiga:

Las sesenta probetas de fatiga fueron elaboradas siguiendo la norma ASTM-E606 y de la cual se pueden observar sus dimensiones en la figura 2.2.

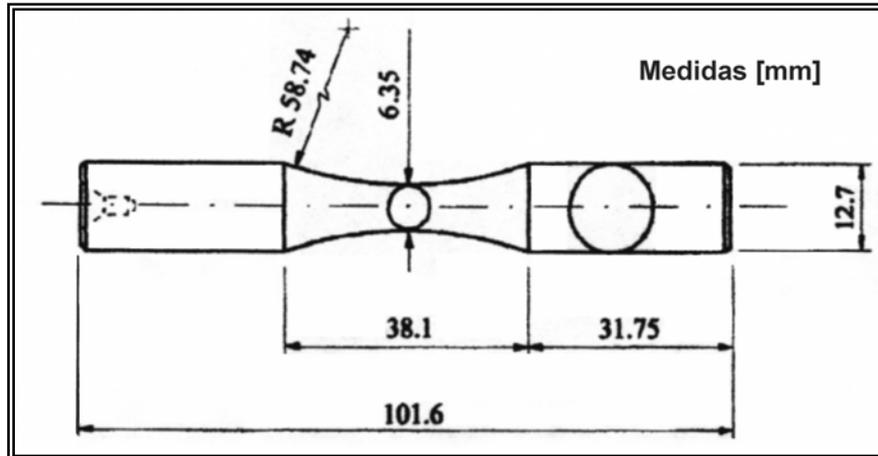


Fig. 2-2 Probeta para el ensayo de fatiga.

#### 2.1.1.5 – Ensayo de Tracción:

El ensayo de tracción se realizó a 3 probetas, siguiendo la norma ASTM A370 la cual indica que éste es el número recomendable de ensayos para mostrar las propiedades estáticas del material. Para ello se utilizó la máquina de tracción, marca Instron; está ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V.; la cual es controlada por medio de su sistema computarizado, y la velocidad operativa del cabezal fue de 3mm/min.

De cada ensayo se obtuvieron los valores correspondientes a la carga aplicada ( $F_i$ ) y los de alargamiento de cada probeta ( $\Delta L_i$ ); reportados del sistema de computación de la máquina universal de ensayos. Igualmente se tomaron las mediciones de los diámetros inicial y final de cada probeta por medio de un vernier digital, con la finalidad de establecer el área inicial y final de la zona de fractura en su sección transversal.

Posteriormente estos datos fueron llevados a una hoja de cálculo Excel, en donde se corrigieron los datos de alargamiento debido a la deformación elástica de los componentes de la máquina; para así obtener el alargamiento real de las probetas utilizando la siguiente fórmula:

$$(\Delta Li)_{corr} = \Delta Li - Fi \times \left( \frac{K_{teo} - K_{exp}}{K_{teo} \times K_{exp}} \right) \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$(\Delta Li)_{corr}$  = Elongación corregida de la probeta.

$\Delta Li$  = Elongación sin corregir de la probeta.

$Fi$  = Fuerza a la cual es cargada la máquina.

$K_{teo}$  = Rigidez teórica de la probeta.

$K_{exp}$  = Rigidez experimental de la probeta.

Para lo que se tiene:

$$K_{teo} = \frac{Ao \times E}{Lo} \quad \text{Ec. 2.2} \quad \text{y} \quad K_{exp} = \frac{\sum Fi}{\sum \Delta Li} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$Ao$  = Área inicial de la sección transversal de la probeta.

$E$  = Módulo de elasticidad inicial de la aleación Ti-6Al-4V (117 GPa).

$Lo$  = Longitud inicial para la zona de ensayo (32mm).

Inicialmente se tiene que:  $\left( Ao = \pi * \frac{Do^2}{4} \right) \quad \text{Ec. 2.4}$

$Do$  = Diámetro inicial de la zona de ensayo.

### 2.1.1.6 – Propiedades mecánicas:

Con el fin de determinar la curva de esfuerzo real – deformación real para cada probeta, se necesitaron los valores ingenieriles cuyas expresiones son:

$$S_i = \frac{F_i}{A_0} \quad \text{Ec. 2.5} \quad \text{y} \quad e_i = \frac{(\Delta L_i)_{corr}}{L_0} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

$S_i$  = Esfuerzo ingenieril.

$e_i$  = Deformación ingenieril.

Para luego tener los valores reales correspondientes:

$$\sigma_i = S_i(1 + e_i) \quad \text{Ec. 2.7} \quad \text{y} \quad \varepsilon_i = \ln(1 + e_i) \quad \text{Ec. 2.8}$$

$\sigma_i$  = Esfuerzo real.

$\varepsilon_i$  = Deformación real.

Con estos datos y después de graficarlos, se procedió a calcular el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ) a 0,2% y el esfuerzo real a carga máxima ( $\sigma_{uts}$ ) de cada una de las probetas ensayadas. También se obtuvieron los valores de reducción de área total y alargamiento total de las mismas.

### 2.1.1.7 – Elaboración de las entallas:

Las entallas en las probetas de fatiga fueron elaboradas por el Taller de Precisión J.V., donde éste proceso lo realizaron a 60 muestras divididas en 3 grupos de 20 probetas. El motivo de realizar las entallas es la creación de un concentrador de esfuerzos sobre la superficie a estudiar, que asegurará el origen de la grieta de fatiga por este punto.

Para ello fue utilizado el proceso de electroerosión, que tiene como característica la falta de inclusión de esfuerzos que pudieran cambiar la resistencia a la fatiga de los materiales. Cuando se acerca un electrodo de cobre al líquido dieléctrico (en nuestro caso

es kerosene) que fluye sobre la superficie, se produce un arco eléctrico que desbasta al material (ver fig. 2.3); haciendo en él una copia de la forma del electrodo.

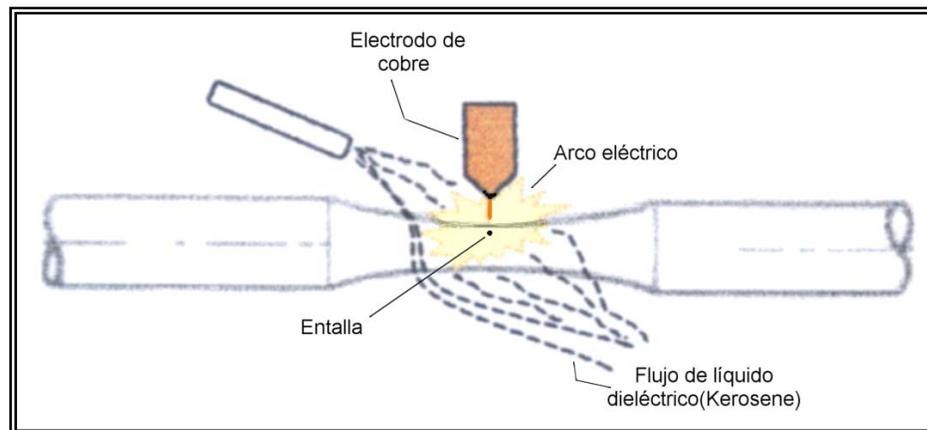


Fig. 2-3 Proceso de electroerosión

Los electrodos que fueron utilizados en éste proceso cuya forma inicial son dados de cobre, se elaboraron mediante una fresadora de control computarizado, a la que se le proporcionaron los datos de desplazamiento para el maquinado; mediante coordenadas cartesianas.

Para éste estudio se requirió que la punta del electrodo tuviese geometría semi-esférica y que se rectificara cada 3 penetraciones, con la finalidad de garantizar dicha forma. El control de las variables tales como intensidad de corriente (I) de 5Amp, el voltaje entre 45 y 50 voltios fueron de vital importancia para proceso de electroerosión que llevó un tiempo aproximado de 2 minutos, por cada entalla realizada.

A cada grupo de 20 probetas de fatiga se le fue asignado un tamaño de entalla (ver fig. 2.4), distribuyendo al material de la siguiente manera:

Serie I : Diámetro de la entalla de 0,25mm.

Serie II : Diámetro de la entalla de 0,50mm.

Serie III : Diámetro de la entalla de 0,75mm.

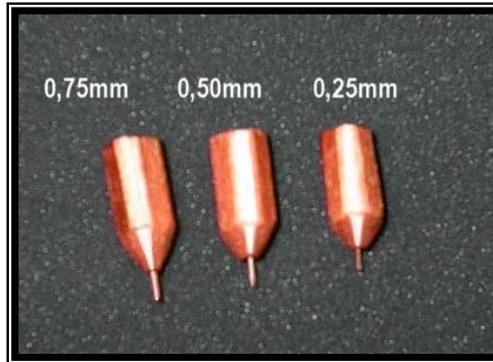


Fig. 2-4 Electrodo de cobre utilizados en el proceso de electroerosión.

### 2.1.1.8 – Ensayo de Fatiga:

Para realizar el ensayo de fatiga se utilizó una máquina de flexión rotativa, la cual fue diseñada para aplicar carga alternante (tensión-compresión) en voladizo, como lo muestra la fig. 2-5 y en la que se emplean probetas cilíndricas siguiendo la norma ASTM E606.

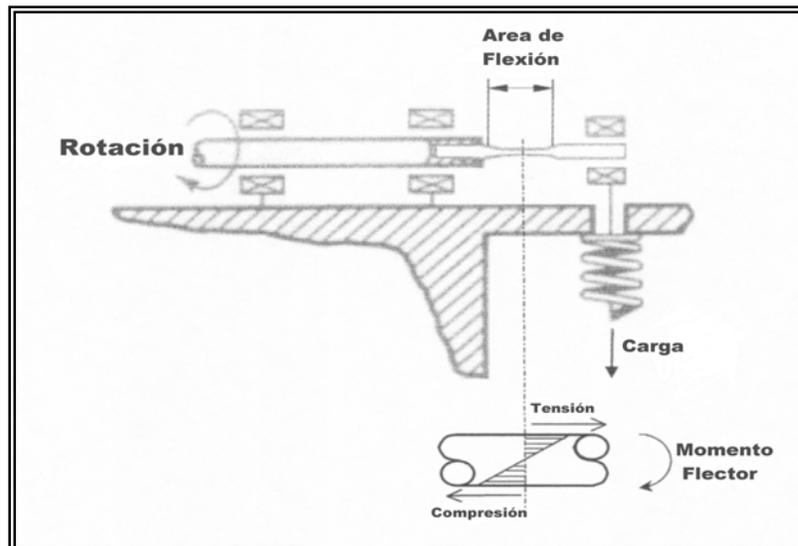


Fig. 2-5 Esquema de fatiga con flexión rotativa.

La máquina posee un regulador de velocidad, un contador de ciclos digital y una barra calibrada con contrapeso en su extremo, siendo estos últimos los encargados de la aplicación del momento flector a la probeta de fatiga.

Apoyados en la norma ASTM E739 la cual indica que para la obtención de la Ec. De Basquin; es necesario ensayar entre 12 y 24 probetas de fatiga para alcanzar tal fin. Por tanto el análisis del sustrato se tomó con 5 niveles de esfuerzo diferentes, ensayando 4 probetas por cada nivel; para un total de 20 probetas (ver tabla 2-3). Estos niveles de esfuerzo fueron distribuidos en el 79, 76, 73, 71, y 68% respectivamente del esfuerzo de fluencia de la aleación, todos estos datos registrados en el trabajo previo de Fernández<sup>(13)</sup>, para la aleación Ti-6Al-4V.

Tabla 2-3 Distribución de las probetas de fatiga del material base.

<b>% S Fluencia</b>	<b>S Aplicado (MPa)</b>	<b>Sustrato del Material</b>
79	754	4 probetas
76	727	4 probetas
73	700	4 probetas
71	675	4 probetas
68	650	4 probetas
<b>Total de probetas</b>		<b>20 probetas</b>

En el caso de las probetas entalladas se dividió en 4 niveles de esfuerzos; con 5 probetas por cada nivel dando un subtotal de 20 probetas, y al ser 3 tamaños diferentes de entallas nos proporciona la cantidad total de 60 muestras. En esta oportunidad, los niveles de esfuerzo correspondieron al 76, 71,66 y 61% del valor de esfuerzo de fluencia para el material (ver tabla 2-4).

Tabla 2-4 Distribución de las probetas de fatiga entalladas.

<b>% S Fluencia</b>	<b>S Aplicado (MPa)</b>	<b>Entalla de 0,25mm</b>	<b>Entalla de 0,50mm</b>	<b>Entalla de 0,75mm</b>
76	727	5 probetas	5 probetas	5 probetas
71	677	5 probetas	5 probetas	5 probetas
66	627	5 probetas	5 probetas	5 probetas
61	577	5 probetas	5 probetas	5 probetas
<b>Total de probetas</b>		<b>20 probetas</b>	<b>20 probetas</b>	<b>20 probetas</b>

Se dispuso de una hoja de cálculo Excel, en la cual se reportarían los valores del diámetro de la probeta en su cuello, donde se le aplicaría el esfuerzo. Al introducir dichos datos se obtiene la cantidad de momento flector que se le induciría al elemento a estudiar. Este valor proviene de la ecuación que relaciona al momento con el esfuerzo aplicado.

$$S = \frac{M \times C}{I} \Rightarrow M = \frac{S \times I}{C} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

S = Esfuerzo aplicado.

I = Momento polar de inercia.

C = Distancia del eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta.  $\left( C = \frac{D}{2} \right)$  Ec, 2.10

D = Diámetro de la probeta.

Se tiene que para una barra de sección circular:  $I = \frac{\pi \times D_o^4}{64}$  Ec. 2.11

Sustituyendo en la ecuación de momento flector, se obtiene:

$$M = \frac{S \times \left( \pi \times \frac{D_o^4}{64} \right)}{\frac{D}{2}} = \frac{S \times \pi \times D^3}{32} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Entonces:  $M = 0,0982 \times S \times D^3$  (lbf × pulg.) Ec. 2.13

Conocido el valor del momento ha ser aplicado, se procede al montaje de la probeta en la máquina para el ensayo de fatiga, siguiendo los siguientes pasos:

- a) Se tiene mucho énfasis en el cuidado de la superficie de la probeta, para así evitar golpes o ralladuras en la zona a estudiar.
- b) Verificar que la máquina se encuentre totalmente apagada.
- c) Situar el peso de la barra calibrada en cero.
- d) Colocar la mordaza en el extremo de la probeta e introducirla verticalmente en el husillo del eje cónico, poner la rosca y ceñir correctamente.
- e) Posicionar la otra rosca con su respectiva mordaza, sujetándola bien e introducir el otro extremo de la probeta en el husillo del lado correspondiente al motor, realizando el ajuste en posición horizontal.
- f) Estimar el vaivén del extremo derecho (donde se aplicará el momento), mientras se aprietan finalmente las roscas; de tal manera que sea lo menor posible.
- g) Activar el interruptor de apagado automático.
- h) Colocar el contador digital en cero.
- i) Mover la carga a través de la barra calibrada hasta el valor de momento deseado.
- j) Sujetar moderadamente el extremo derecho del eje cónico y encender la máquina.
- k) Comprobar que la probeta no esté vibrando, de ser así, apagar la máquina, anotar la cantidad de ciclos realizados para adicionárselos a los venideros y proceder a desmontar la misma, para luego repetir los pasos anteriores desde a) hasta k). De manera que la probeta no vibre o sea mínima dicha acción, para así no afectar los resultados del ensayo.

Con lo anterior realizado, se procede a reportar en la misma hoja de cálculo los valores de ciclos a falla, registrados en el contador digital de la máquina para cada probeta en su respectivo nivel de esfuerzo aplicado.

### 2.1.1.9 – Curvas de Wöhler y ec. de Basquin:

Con los datos recogidos del ensayo de fatiga para las probetas del sustrato y las entalladas; se procedió a la construcción de las curvas de Wöhler mediante la linealización de estos valores, con una gráfica logarítmica de los esfuerzos aplicados con respecto a los números de ciclos a fallas (  $\log(S)$  vs.  $\log(Nf)$  ).

Al tener éstas gráficas; se realiza una regresión lineal de estos datos, para obtener la ecuación de la recta que permitirá determinar los coeficientes  $Sf$  y  $b$  de la ecuación de Basquin. Donde el antilogaritmo del corte con las ordenadas es el parámetro  $Sf$  y la pendiente es el parámetro  $b$ , además se obtiene el coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ) para dicha recta.

Esto permite escribir cada una de las ecuaciones de Basquin para la vida a fatiga; tanto de la serie del material base, como para las series con entallas:

$$\text{Serie del material base: } S_{S.E.} = Sf_{S.E.} \times (Nf)^{b_{S.E.}} \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$\text{Series entalladas: } S_{0,25} = Sf_{0,25} \times (Nf)^{b_{0,25}} \quad \text{Ec. 2.15}$$

$$S_{0,50} = Sf_{0,50} \times (Nf)^{b_{0,50}} \quad \text{Ec. 2.16}$$

$$S_{0,75} = Sf_{0,75} \times (Nf)^{b_{0,75}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

### 2.1.1.10 – Fractografía:

El estudio fractográfico de las probetas entalladas se elaboró por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB); el cual consiste en observar la superficie de grieta principal de fractura, para así localizar 3 zonas específicas, la de fatiga, la zona de

transición y la de sobrecarga. Concentrándose en el inicio, la zona de crecimiento de la grieta y el área final de fractura.

Para esto se tomaron las probetas correspondientes al valor más cercano al promedio de ciclos a falla, para cada nivel de esfuerzo de las series de probetas entalladas. Se tomaron cada una de éstas y se les realizó un corte a su sección transversal, dejando por encima el área de fractura con la ayuda de una cortadora de discos abrasivos. Una vez teniendo todas las muestras clasificadas, se procedió a lavarlas con un disolvente (acetona- $\text{CH}_3\text{COH}_3$ ) por medio de ultrasonido con la finalidad de eliminar los residuos de carburo dejados por la acción del corte; por espacio de 1 hora cada muestra y posteriormente secadas con aire a presión.

La evaluación está conformada por 2 etapas, la primera es un estudio a nivel macroscópico que consiste en el procedimiento de medir el tamaño de grieta crítico ( $a_c$ ). Para ello a las muestras se les tomaron fotomicrografías por MEB a bajo nivel de aumento (20x). La segunda etapa consiste en determinar las características presente en el frente de grieta de las probetas entalladas, por medio de fotomicrografías por MEB de alto nivel de aumento (300x).

#### **2.1.1.11 – Determinación del tamaño de grieta crítico:**

Con la ayuda de un analizador de imágenes se procedió a calcular el área de la zona de fractura dúctil, garantizando así los valores obtenidos y se procedió a realizar los siguientes pasos:

- a) Se mide el área de la zona de fractura final (AZFF) ó zona de fractura instantánea, caracterizada por la alta concentración de micro-hoyuelos.
- b) Con el diámetro de cada probeta que es el mismo de la muestra, se calcula el área transversal total (ATT).
- c) Se le resta el área de despegue al área transversal total (ATT-AZFF).

- d) El área resultante de operación anterior se define como el área de propagación de la grieta (APG). De esta manera:  $APG = ATT - AZFF$  (ver fig. 2-6)

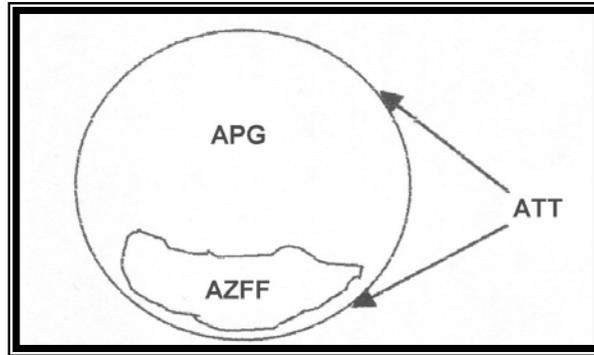


Fig. 2-6 Área de propagación de la grieta.

- e) La APG se asocia al área de un semi-círculo, por practicidad para este estudio:

$$APG = A_{SC} \quad A_{SC} = \frac{\pi \times R^2}{2} \quad \text{Ec. 2. 18}$$

A este semi-círculo se le calcula el radio (R):

$$R = \sqrt{\left(\frac{2 \times A_{SC}}{\pi}\right)} \quad \text{Ec: 2.19}$$

- f) Una vez obtenido el valor del radio, se tomará como igual al tamaño crítico de la grieta  $a_c$  (ver fig.2-7).  $R = a_c$

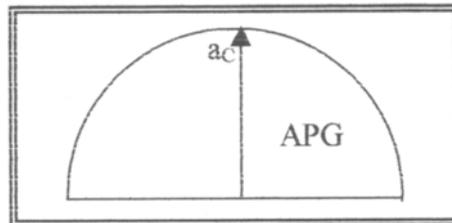


Fig. 2-7 Semi-círculo asociado con el APG y localización del  $a_c$ .

- g) Se realiza la comparación entre las probetas de cada serie, debido a las diferencias en sus diámetros. Ejecutamos una normalización para ellos; que consiste en:

- Efectuar la medición del tamaño crítico de grieta real ( $a_c'$ ).
- Dividir el anterior entre el diámetro real de cada probeta ( $d'$ ).
- Multiplicar esto por el diámetro nominal de la probeta de fatiga ( $d = 6,35\text{mm}$ ).

$$a_c = \left( \frac{a_c'}{d'} \right) \times d \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde:

$a_c$  = Tamaño crítico de grieta normalizado.

#### **2.1.1.12 – Cálculo de las constantes de Paris-Erdogan:**

Se ingresan los valores de  $a_c$  y de los esfuerzos aplicados, al programa computarizado propuesto por Pertúz y colaboradores; en donde se calcula el factor geométrico por medio de la siguiente ecuación:

$$f(a) = 0,821 - 0,486 \left( \frac{a}{d} \right) + 2,003 \left( \frac{a}{d} \right)^2 \quad \text{Ec. 2.21}$$

Este supone que la grieta forma parte de un punto situado en el centro de frente de grieta, de allí se hace un desarrollo matemático para calcular los parámetros C y n de la ecuación de Paris – Erdogan. Con esto se realizará la comparación entre la ecuación de Basquin y la ecuación de Paris – Erdogan (Ciclos a falla teóricos (Nf) vs. Ciclos a falla experimentales (Np)).

#### **2.1.1.13 – Cálculo de la tenacidad de fractura:**

Otro de los valores que se obtienen del método desarrollado por Pertúz y colaboradores, es la tenacidad de fractura para cada una de las series entalladas, al nivel de esfuerzos aplicados a las mismas.

## 2.2 – Descripción de los equipos:

### 2.2.1 – Máquina de tracción:

La máquina universal de ensayos mecánicos donde se realizaron los ensayos de tracción, está ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Ciencia de los Materiales de la U.C.V. Los ensayos de tracción fueron controlados por medio del sistema computarizado de la misma, efectuándose a una rapidez de desplazamiento de 3mm/min. de la mordaza inferior.



#### Características técnicas:

Marca: Instron.

Modelo: 8502

Fuerza máxima: 25 Ton.

Desplazamiento máximo: 100cm.

Velocidad para el ensayo: 3mm/min.

### 2.2.2 – Torno:

El torno utilizado para el proceso de pulido de superficie de las probetas, está ubicado en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Ciencia de los Materiales de la U.C.V.



#### Características técnicas:

Marca: Myford

Modelo: ML7-R

Diámetro máx. de cabezal: 7"

Longitud máx. entre centros: 42"

Conversiones: métricas / inglesas

Taladro de husillo: 0,59" / 15mm

Nº de velocidades: 16

Intervalo de velocidades: 25-2150 rpm

### 2.2.3 – Máquina fresadora:

Para la fabricación de los electrodos necesarios en el proceso de electroerosión, se utilizó una fresadora universal, con sistema computarizado. Este aparato se ubica en el Taller de Precisión J.V., en la zona industrial de Turumo, Edo. Miranda.



#### Características técnicas:

Marca: Deckel

Modelo: FP4A

Desplazamiento máx. en X: 500mm

Desplazamiento máx. en Y: 400mm

Desplazamiento máx. en Z: 385mm

### 2.2.4 – Máquina de electroerosión:

El equipo de electroerosión utilizado en la elaboración de las entallas semi-esféricas de las probetas de fatiga, se localiza igualmente en el Taller de Precisión J.V., en la zona industrial de Turumo, Edo. Miranda. En nuestro caso se necesitó de una intensidad de corriente de 5 Amp, una diferencia de potencial entre 45-50 Volt, dando un tiempo de penetración del electrodo de alrededor de 2 min. sobre cada una de las probetas.



#### Características técnicas:

Marca: Sinitron

Modelo: CNC 320

Intensidad máx.: 50 Amp.

Potencia: 5 kW.

Potencial: 220 Volt.

Frecuencia: 60 Hz.

Dieléctrico: Kerosene

### 2.2.5 – Vernier digital:

Para la medición del diámetro de las probetas de tracción tanto como las fatiga se empleó un vernier digital, con el que se tomaron 3 mediciones como mínimo; a la zona más delgada (zona de estudio) de cada una de ellas, para así obtener el valor confiable de los diámetros.



#### Características técnicas:

Marca: Mitutoyo

Modelo: CD-6”B

Pantalla: LCD

Conversión: métricas – inglesas

Rango de longitud: 0 – 150 mm / 0 - 6”

Resolución: 0,01mm / 0,0005”

### 2.2.6 – Máquina de fatiga:

Los ensayos de fatiga fueron efectuados en una máquina de flexión rotativa, la cual está diseñada para aplicar cargas invertidas en voladizo sobre las probetas. En nuestro caso trabajamos a 3000 rpm aproximadamente, a una frecuencia de 50 Hz. Dicho equipo se localiza en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Ciencia de los Materiales de la U.C.V.



#### Características técnicas:

Marca: Fatigue Dynamics

Modelo: RBF-200

Intervalo de revoluciones: 500– 10000rpm

Intervalo de Momento: 0 – 200 lb/pulg.

Potencia: ½ Hp.

Contador de ciclos: 100 – 999999990

Long. máx. de probeta: 90 mm

### 2.2.7 – Cortadora de discos abrasivos:

A las probetas de fatiga con entallas ensayadas; se les realizó un corte a su sección transversal en la zona de superficie de fractura, con la finalidad de que tuvieran el tamaño adecuado, para ser llevadas al microscopio electrónico de barrido. Por ello se utilizó una cortadora de discos abrasivos, que está localizada en el Centro de Investigaciones Tecnológicas de Aluminio y sus Aleaciones de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Ciencia de los Materiales de la U.C.V.



#### Características técnicas:

Marca: Buehler

Modelo: Abrasimet 2

Potencia: 3 kW

Diámetro máx. de disco: 254 mm

Diámetro máx. de pieza: 76 mm

### 2.2.8 – Microscopio Electrónico de Barrido:

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido localizado en el Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Ciencia de los Materiales de la U.C.V. Se aseguró una incidencia con un ángulo no mayor de 60°, para así reportar dimensiones reales de las muestras a partir de las fotomicrografías.



#### Características técnicas:

Marca: Hitachi

Modelo: S – 2400

Resolución: 4 nm

Magnificación: 20x – 300.000x

Voltaje: 4 – 25 kV

Movimiento en X: 0 – 80 mm

Movimiento en Y: 0 – 40 mm

Movimiento en Z: 5 – 35 mm

Movimiento en R: 360° continuos

Tamaño máx. espécimen: 150 mm

### 2.2.9 – Analizador de imágenes:

A fin de calcular el tamaño crítico de grieta de las muestras, se empleó un analizador de imágenes; que cuenta con un programa para el cálculo de área de la zona final de fractura. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Ciencia de los Materiales de la U.C.V.



#### Características técnicas:

Marca: Leco

Modelo: IA-3001

Mediciones: área, perímetro, longitud, anchura, diámetro equivalente, proporción del aspecto, anchura, anchura de fibra, longitud de fibra, perímetro convexo, redondez convexa.

# Capítul o 3

## Capítulo 3

### 3.1 – Resultados y análisis

#### 3.1.1 – Ensayos de Tracción:

Las tres probetas de tracción ensayadas arrojaron los datos que se reflejan en la tabla 3-1, los cuales provienen de las correcciones realizadas a los datos de alargamiento; debido a los efectos introducidos por la deformación elástica de los componentes de la máquina universal de ensayos; correspondientes al sistema de carga.

Tabla 3-1 Resultados del ensayo de tracción

Nº de Probeta	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)	% Reducción de área
1	947	1194	42,07
2	962	1245	45,49
3	953	1217	44,29
<b>Promedio</b>	954	1219	43,95
<b>Desv. Estándar</b>	8	26	2

Teniendo una vez los valores de esfuerzo real aplicado y deformación real, se procedió a la construcción de la curva de esfuerzo real versus deformación real; como se puede observar en figura 3-1.

Los valores obtenidos del ensayo de tracción discrepan con respecto al certificado del fabricante limitadamente en un 8% para Resistencia a la Tracción, en el Esfuerzo de Fluencia un 2% y un 7% para el Porcentaje de Reducción de Área. Cabe señalar que con respecto a la literatura consultada, nuestras evaluaciones igualmente son satisfactorias; para una aleación de Ti-6Al-4V en condiciones de recocido y enfriado al aire.

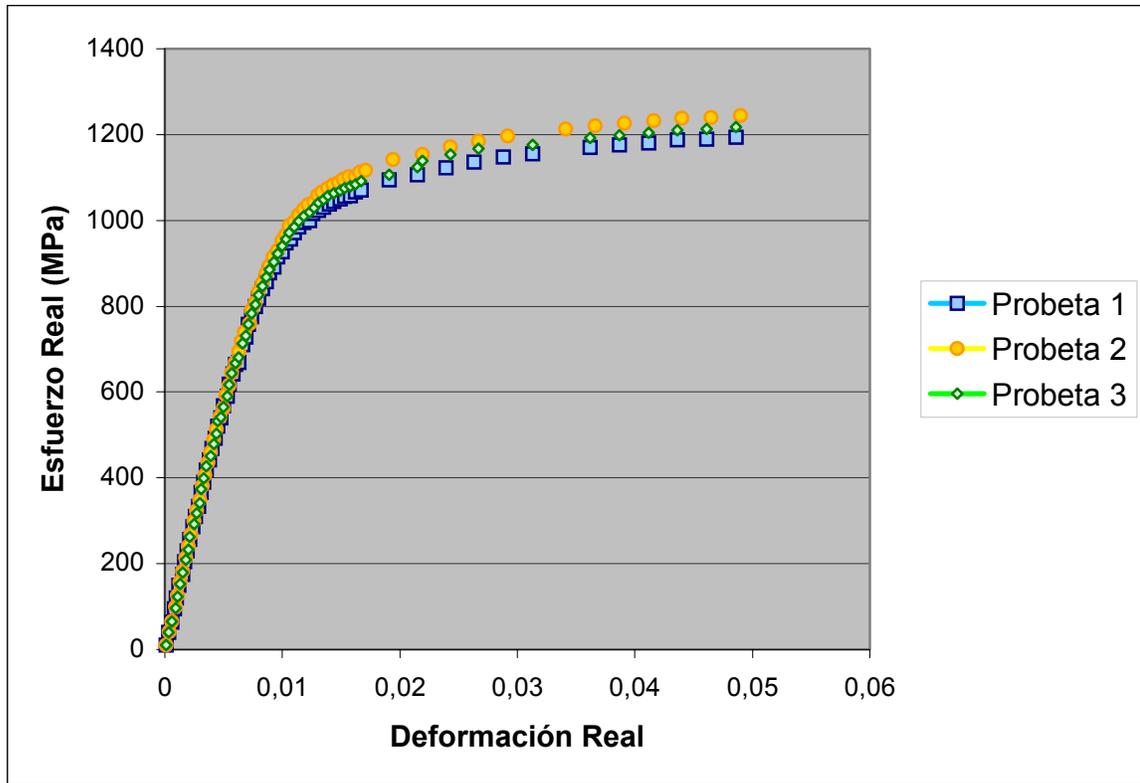


Fig. 3-1 Curva Esfuerzo Real vs. Deformación Real

### 3.1.2 – Ensayos de fatiga:

Para realizar los ensayos de fatiga; las probetas se distribuyeron en cuatro series, la primera de ellas correspondió al material base (sustrato) y las tres siguientes series pertenecientes a las probetas entalladas ordenadas de acuerdo a su diámetro de entalla (0,25 mm, 0,50 mm y 0,75 mm). Los resultados que se obtuvieron de cada serie estudiada fueron presentados de la siguiente manera:

- a) Tabla 3-2: Vida a la fatiga (Serie I, probetas del sustrato)
- b) Tabla 3-3: Vida a la fatiga (Serie II, probetas con entallas de 0,25 mm de diámetro)
- c) Tabla 3-4: Vida a la fatiga (Serie III, probetas con entallas de 0,50 mm de diámetro)
- d) Tabla 3-5: Vida a la fatiga (Serie IV, probetas con entallas de 0,75 mm de diámetro)

Tabla 3-2 Vida a la fatiga (Serie I, probetas del sustrato)

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	754	23500
2		18200
3		27600
4		23400
Promedio		23175
Desv. Estándar		3851

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	727	37600
2		39200
3		31700
Promedio		36167
Desv. Estándar		3950

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	700	28900
2		31100
3		46100
Promedio		35367
Desv. Estándar		9360

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	675	48700
2		31500
3		70700
Promedio		50300
Desv. Estándar		19649

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	650	47300
2		54500
3		74600
4		59200
Promedio		58900
Desv. Estándar		11554

Tabla 3-3 Vida a la fatiga (Serie II, probetas con entalladas de 0,25 mm de diámetro)

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	727	6100
2		5800
3		5100
4		5700
5		5500
Promedio		5640
Desv. Estándar		371

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	677	7700
2		7200
3		7200
4		7300
5		7000
Promedio		7280
Desv. Estándar		259

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	627	10100
2		10200
3		9400
4		8500
5		9000
Promedio		9440
Desv. Estándar		723

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	577	10700
2		11500
3		12300
4		11100
5		12000
Promedio		11520
Desv. Estándar		650

Tabla 3-4 Vida a la fatiga (Serie III, probetas con entalla de 0,50 mm de diámetro)

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	727	4700
2		4900
3		4900
4		3600
5		4600
Promedio		4540
Desv. Estándar		541

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	677	5600
2		5200
3		5900
4		5800
5		5500
Promedio		5600
Desv. Estándar		274

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	627	8600
2		5600
3		7100
4		7300
5		6800
Promedio		7080
Desv. Estándar		1076

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	577	8000
2		8800
3		8900
4		7900
5		10500
Promedio		8820
Desv. Estándar		1043

Tabla 3-5 Vida a la fatiga (Serie IV, probetas con entalla de 0,75 mm de diámetro)

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	727	3300
2		4000
3		4500
4		4000
5		4000
Promedio		3960
Desv. Estándar		428

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	677	4500
2		4600
3		5500
4		4700
5		5000
Promedio		4860
Desv. Estándar		404

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	627	6500
2		6800
3		7000
4		7200
5		7200
Promedio		6940
Desv. Estándar		297

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	577	9200
2		8700
3		6900
4		10400
5		8500
Promedio		8740
Desv. Estándar		1266

### 3.1.2.1 – Vida a la fatiga:

A fin de realizar las curvas de vida a la fatiga de las probetas ensayadas (curvas de Wöhler), se tomaron los datos de las tablas 3-2 hasta la 3-5. Llevándolos a unas gráficas doble logarítmica de esfuerzo aplicado versus número de ciclos a falla, como se puede apreciar en las figuras 3-2 hasta la 3-5, que representan las cuatro series de probetas (probetas del material base y las probetas con entallas de 0,25mm, 0,50mm y 0,75mm).

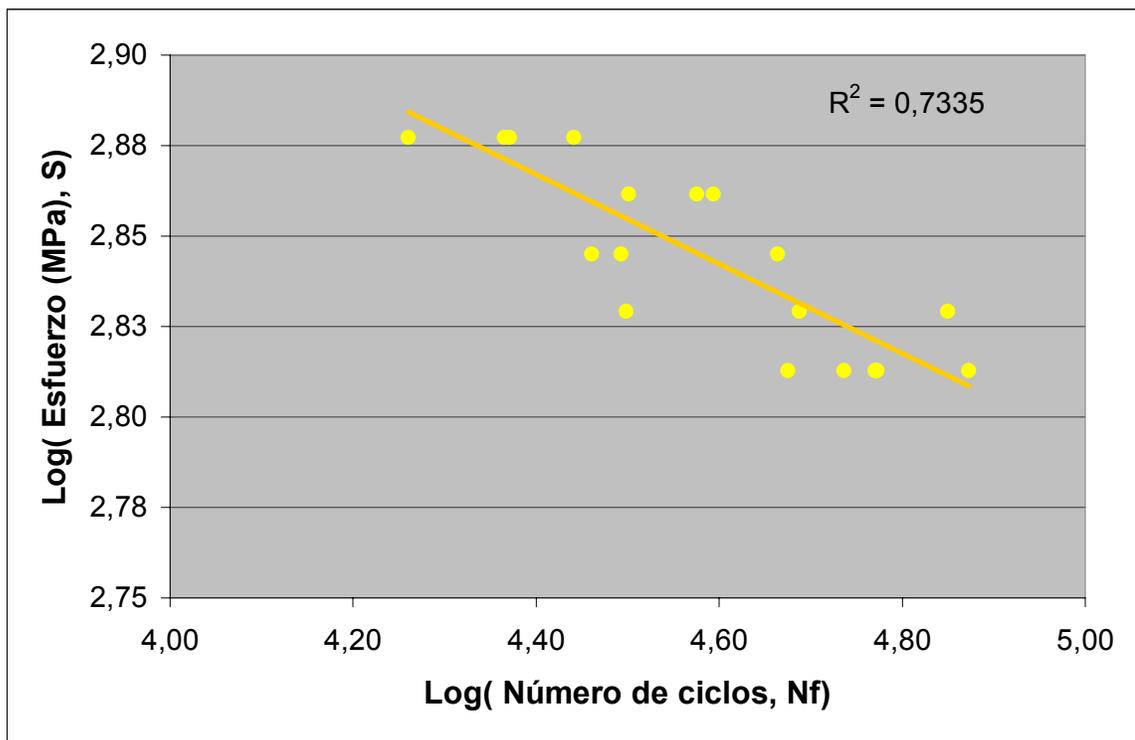


Fig. 3-2 Curva de vida a la fatiga (Serie I, probetas del sustrato)

Para cada curva de Wöhler del material ensayado, se obtuvo el valor del factor de correlación ( $R^2$ ), proveniente del método de regresión lineal aplicado a los mismo y que el cual permite determinar cada una de las ecuaciones de Basquin para la vida a fatiga.

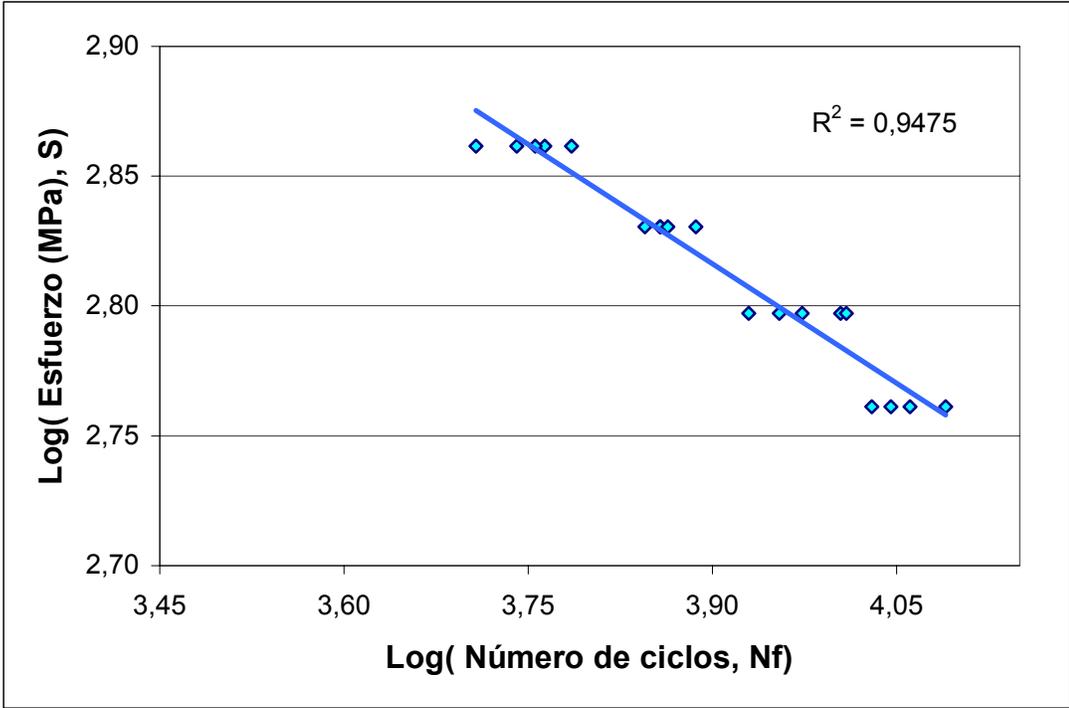


Fig. 3-3 Curva de vida a la fatiga (Serie II, probetas con entalla de 0,25 mm de diámetro)

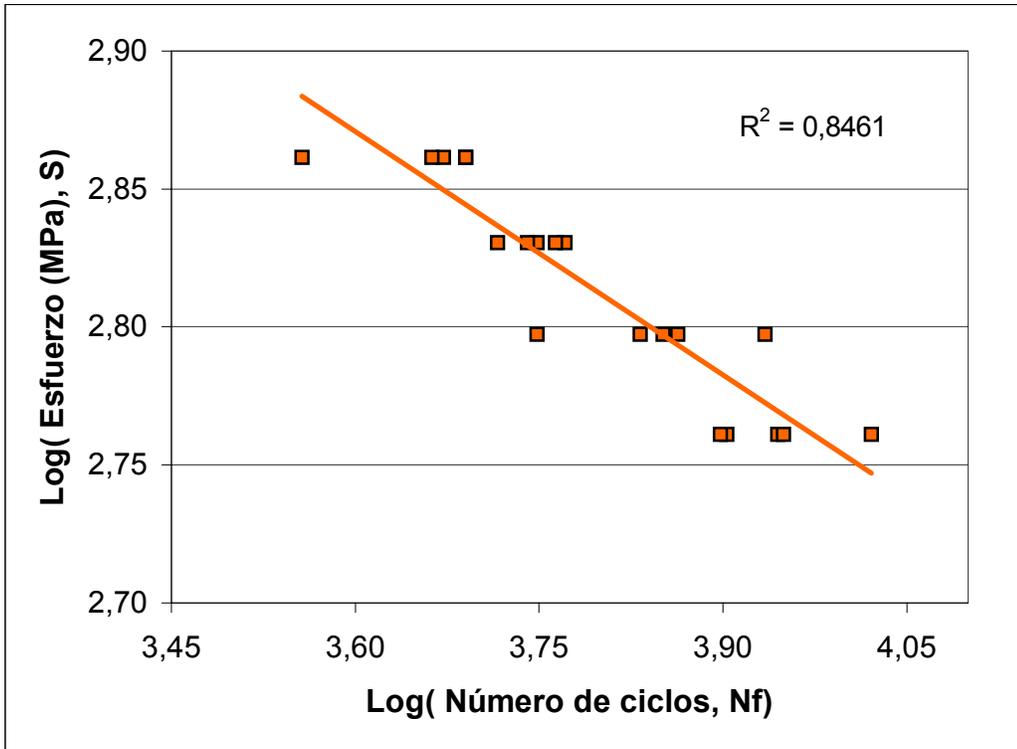


Fig. 3-4 Curva de vida a la fatiga(Serie III, probetas con entalla de 0,50mm de diámetro)

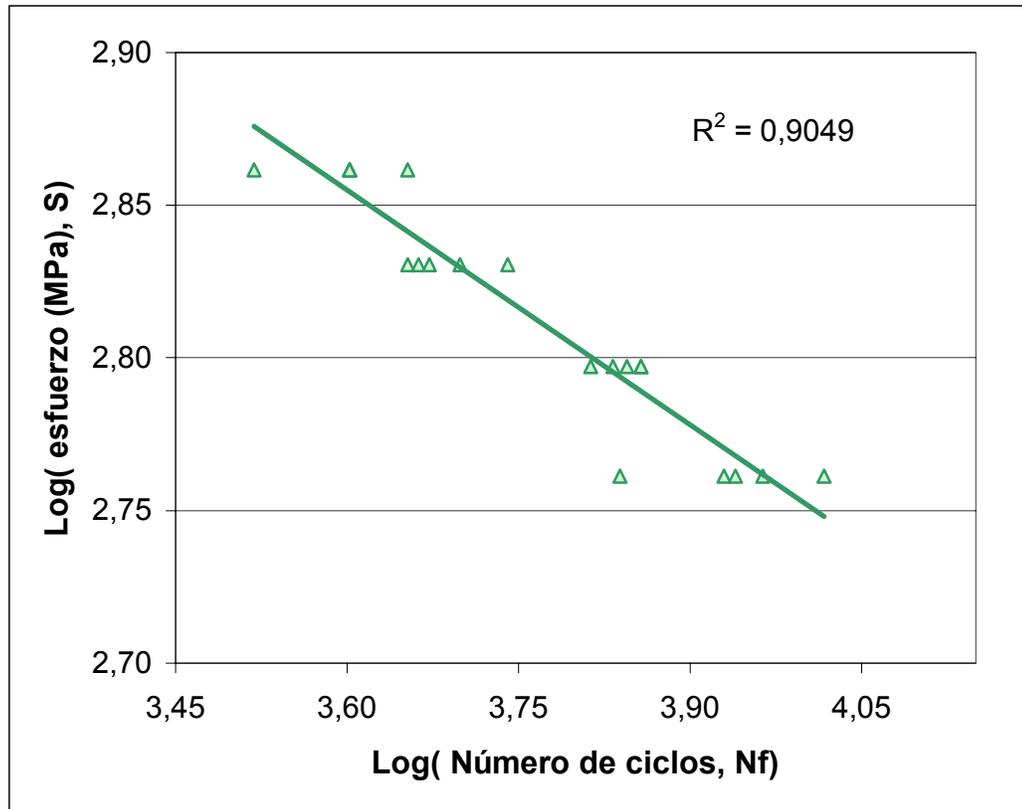


Fig. 3-5 Curva de vida a la fatiga (Serie IV, probetas con entalla de 0,75mm de diámetro)

Como se puede observar en las figuras anteriores, el comportamiento de las curvas es típico, de los estudios referentes de vida a la fatiga para materiales. También se aprecia el intervalo del factor de correlación ( $R^2$ ), de la aplicación del método de regresión lineal aplicado a las series de probeta, varía entre 0,73 y 0,95. Esto nos permitirá calcular los valores de los parámetros de la ecuación de Basquin de los respectivos ensayos realizados.

Analizando el comportamiento de las probetas de material base junto con las entalladas (0,25mm, 0,50mm y 0,75mm de diámetro), la figura 3-6 muestra la marcada disminución de vida a la fatiga que se halla entre las cuatro series. Después de hacer extrapolaciones de los datos obtenidos para el material base, se obtuvo el número de ciclos promedio con respecto a los esfuerzos aplicados a las probetas entalladas.

Realizando la comparación de dichos ciclos, podemos aseverar que la reducción de vida a la fatiga para la entalla de 0,25mm de diámetro oscila entre 85% para el esfuerzo de

727 MPa y un 77% para el esfuerzo de 577 MPa. En el caso de la entalla de 0,50mm la variación se presenta en 82% en el nivel de esfuerzo de 727 MPa y un 75% para el esfuerzo de 577 MPa, para la entalla de 0,75mm de diámetro el rango se establece desde 80% en el esfuerzo de 727 MPa y un 75% en el nivel de esfuerzo de 577 MPa.

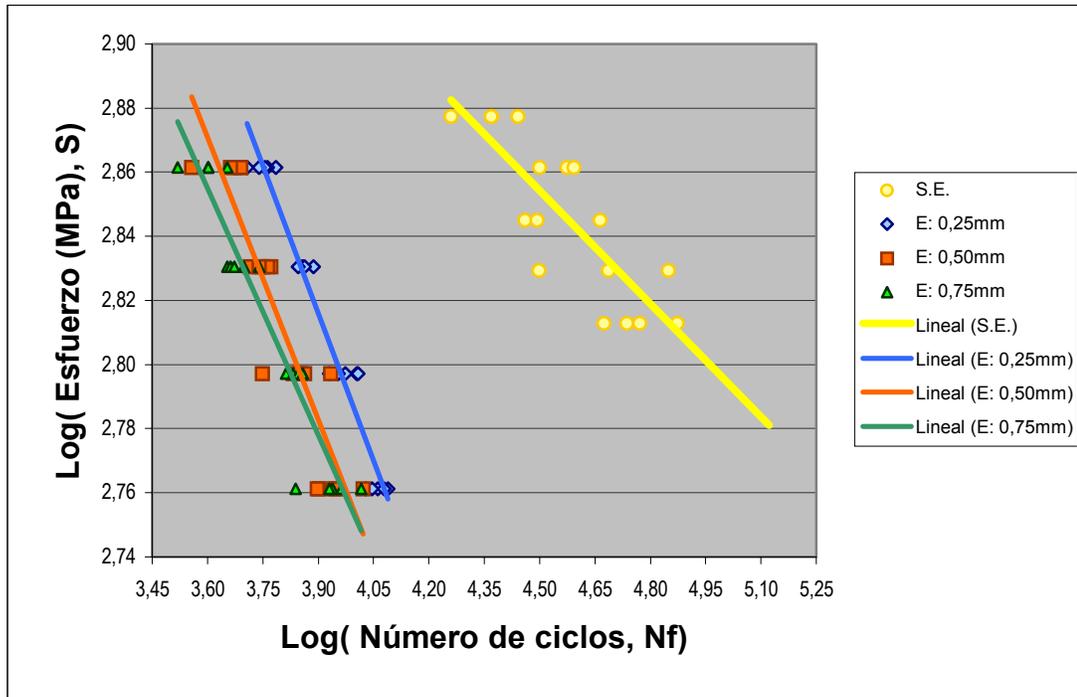


Fig. 3-6 Curvas de vida a la fatiga de todas las series.

### 3.1.2.2 – Relación potencial (Ecuación de Basquin):

De las curvas de vida a la fatiga para las probetas del material base y de las entalladas (0,25mm, 0,50mm y 0,75mm) se extrajeron las ecuaciones de la recta perteneciente a cada serie por medio del método de regresión lineal, como se muestra en la tabla 3-6.

Tabla 3-6 Ecuación de la recta de cada serie.

Probeta	Ec. de la recta
Material base	$y = -0,1235x + 3,4106$
Entalla de 0,25mm	$y = -0,3063x + 4,011$
Entalla de 0,50mm	$y = -0,2935x + 3,9275$
Entalla de 0,75mm	$y = -0,2562x + 3,7774$

En donde el corte con las ordenadas es el parámetro “Sf”, que es el coeficiente de resistencia a la fatiga y la pendiente es el parámetro “ b” que representa el exponente de fatiga de la expresión paramétrica simple tipo Basquin de forma  $S = Sf \times (Nf)^b$ , para la descripción de los valores de vida a fatiga de los ensayos. Estos valores se recogieron mediante el método de mínimos cuadrados en la tabla 3-7.

Tabla 3-7 Parámetros y ecuación de Basquin de cada serie de probetas.

Probeta	Sf	b	Ec. De Basquin
Material base	2573,95	-0,1235	$S_{S.E.} = 2573,95(Nf)^{-0,1235}$
Entalla de 0,25mm	10256,52	-0,3063	$S_{0,25} = 10256,52(Nf)^{-0,3063}$
Entalla de 0,50mm	8462,53	-0,2935	$S_{0,50} = 8462,53(Nf)^{-0,2935}$
Entalla de 0,75mm	5989,63	-0,2562	$S_{0,75} = 5989,63(Nf)^{-0,2562}$

Los parámetros de la ecuación de Basquin reportados en la tabla 3-7; indican una variación entre la serie del material base con respecto a las series con entallas. Se puede indicar que el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga (Sf) para la serie del sustrato, es 3 veces menor que el promedio de las series restantes. Y en cuanto al exponente de fatiga (b) es 2 veces menor al promedio tomado para las probetas entalladas.

### 3.1.2.3 – Factor de fatiga con entalla:

Se empleó la ecuación (1.2) del factor con entalla, para hallar los correspondientes a cada serie con entallas relacionando, el factor de fatiga del material base con el de cada uno de ellas. Tomando en cuenta que las diferentes ecuaciones de Kf son válidas para un mismo número de ciclos, se reportaron los valores en la tabla 3-8.

Tabla 3-8 Factor de fatiga de las series entalladas

Probetas	K <sub>f</sub>
Entalla de 0,25mm	$K_{f1} = 0,251(Nf)^{0,1828}$
Entalla de 0,50mm	$K_{f2} = 0,304(Nf)^{0,17}$
Entalla de 0,75mm	$K_{f3} = 0,430(Nf)^{0,1327}$

Después de tener las distintas ecuaciones de  $K_f$ , se procedió a la construcción de la gráfica de factor de fatiga versus número de ciclos (ver figura 3-7), en donde se tomó el rango entre 25000 y 575000 ciclos.

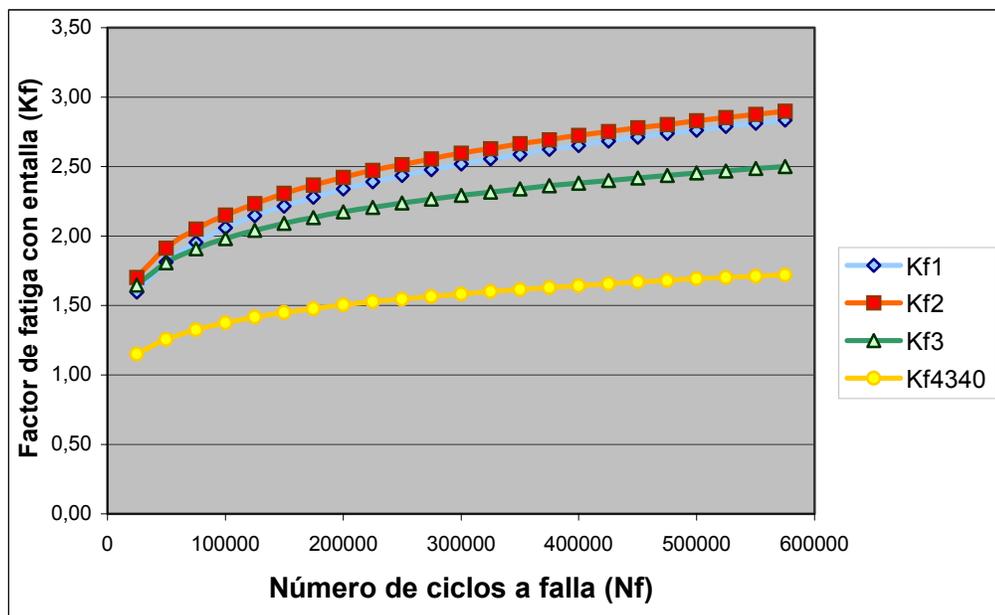


Fig. 3-7 Factor de fatiga con entalla

En la figura 3-7 se muestra el comportamiento ascendente de las series de probetas a medida que aumenta el número de ciclos. Puede notarse que la serie de probetas con entallas de 0,75mm, el factor de concentración de esfuerzos con entalla es notablemente inferior con respecto a la serie de 0,25 y 0,50mm de diámetro, esto nos lleva a decir que la aleación Ti-6Al-4V no presenta cambios sistemáticos del factor de fatiga con entalla con respecto al tamaño de entalla.

También se realiza una comparación entre el comportamiento de la aleación con respecto al acero SAE 4340<sup>(19)</sup>, donde se manifiesta por parte de nuestro material una mayor sensibilidad a la presencia de entallas que el acero antes mencionado.

### 3.1.3 – Estudio fractográfico por medio de Microscopía Electrónica de Barrido:

#### 3.1.3.1 – Evaluación a nivel macroscópico ( 20x ):

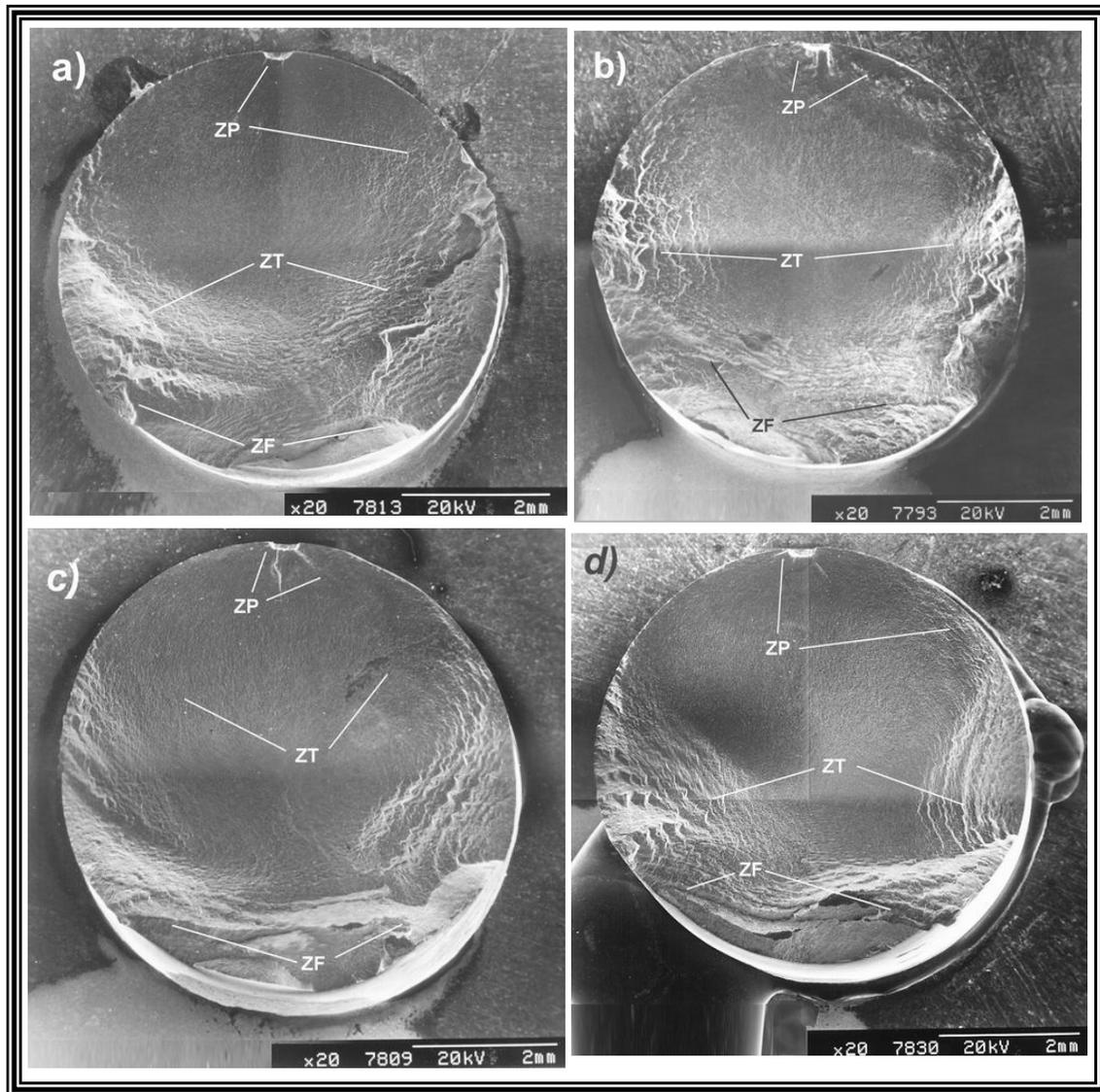


Fig. 3-8 Superficies de fracturas para las probetas con entallas de 0,25mm.

La figura 3-8 muestra las superficies de fractura de las probetas con entalla de 0,25mm de diámetro; más cercanas al promedio del número de ciclos a falla para cada nivel de esfuerzo. Las fotomicrografías están ordenadas de manera descendente; desde el mayor

de los esfuerzos aplicados hasta el menor, por tanto a) es a 727 MPa, b) 677 MPa, c) 627 MPa y d) 577 MPa.

También se hace referencia a tres zonas representativas en el desarrollo de la fractura. La primera de estas zonas es donde nuclea y se propaga la grieta de fatiga desde la raíz de la entalla (ZP), la segunda zona presentada es la transición (ZT); que tiene por característica la expansión acelerada de la grieta de fatiga a través de marcas radiales. Y la tercera zona es la de fractura (ZF), en donde es indudable la irregularidad que muestra.

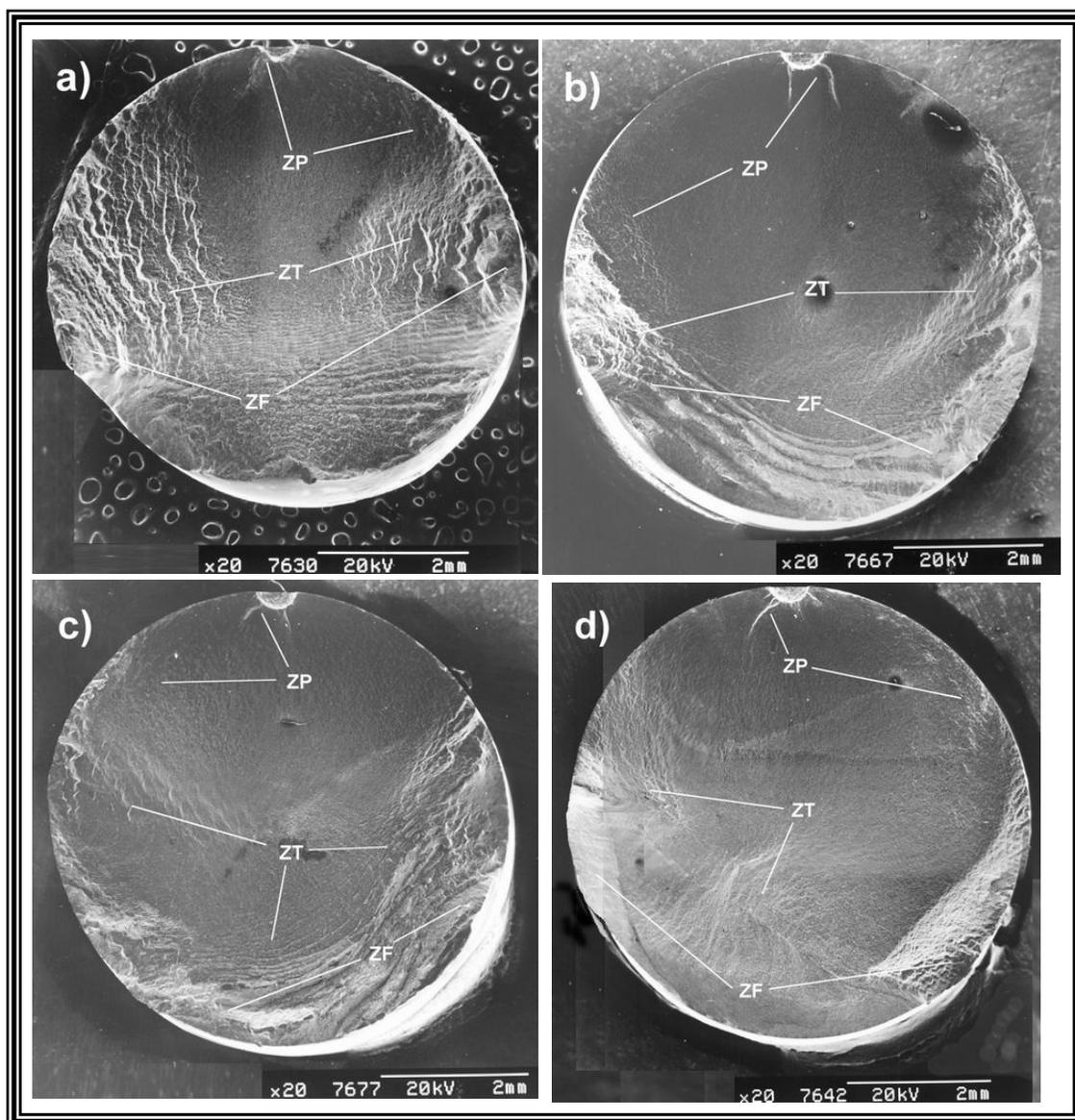


Fig. 3-9 Superficies de fractura para las probetas con entalla de 0,50mm.

En la figura 3-9 se muestran las superficies de fractura para las probetas con entalla de 0,50mm, ordenadas de manera decreciente según el esfuerzo aplicado a cada una de ellas; como se presentaron anteriormente las probetas con entalla de 0,25mm. Igualmente se presentan las zonas de propagación de la grieta de fatiga, la de transición y la zona de fractura final, siendo la única diferencia apreciable el tamaño de la entalla.

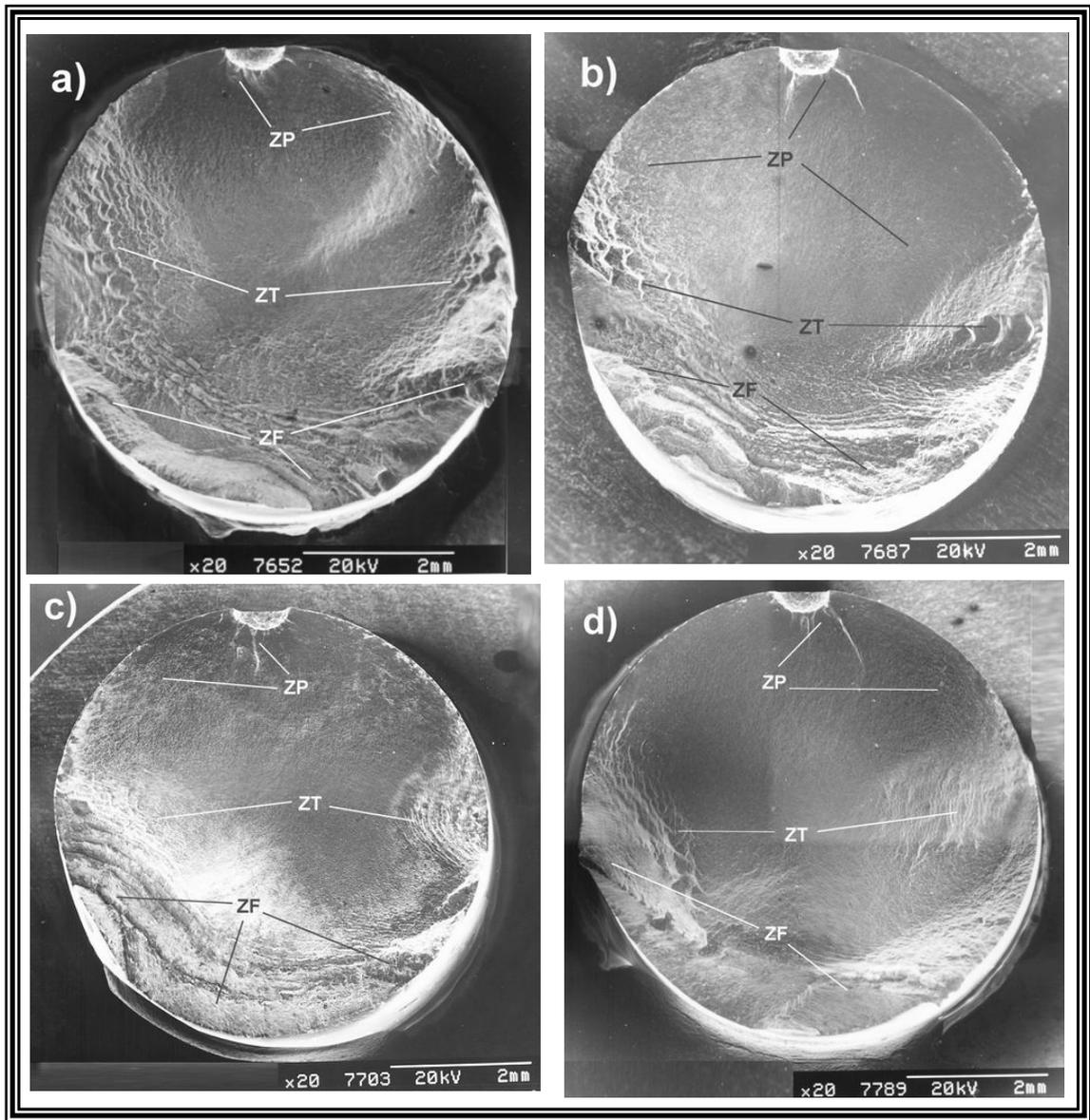


Fig. 3-10 Superficie de fractura para las probetas con entalla de 0,75mm.

Conforme al orden previo establecido, las superficies de fractura para las probetas con entalla de 0,75mm están recopiladas en la figura 3-10, desde a) que es para el mayor esfuerzo aplicado (727 MPa) hasta d) que es para el menor nivel de esfuerzo (577 MPa). Están representadas las zonas de propagación, de transición y fractura de la grieta de fatiga, de la misma manera que fueron presentadas para las probetas con entalla de 0,25mm y 0,50mm de diámetro.

En las tres figuras previas se puede notar como hay un crecimiento de la zona de propagación de la grieta, a medida que disminuye la magnitud de esfuerzo aplicado (727 a 577 MPa). Reduciéndose de modo lógico las zonas de transición y la de fractura de la grieta de fatiga, para los tres tipos de entalla utilizados.

### 3.1.3.2 – Determinación de los tamaños de grieta crítico ( $a_c$ ):

Después de realizar el cálculo del área de la zona de fractura final ( $A_{ZFF}$ ) con la ayuda de las fotomicrografías de bajo nivel de aumento (20x), se estableció el valor del área de propagación de la grieta ( $A_{PG}$ ); asociando ésta al área de una semi-circunferencia en la que su radio fue considerado como el tamaño de grieta preliminar ( $a_c'$ ). Para obtener el valor real del tamaño de grieta ( $a_c$ ), se efectuó una normalización del valor en función del diámetro establecido en la norma ASTM E606, para el cuello de la probeta ( $d = 6,35\text{mm}$ ); todos estos valores se reportan en el anexo A2.

El valor real del tamaño de grieta de cada muestra, conforme al nivel de esfuerzo aplicado se muestra en la tabla 3-9.

Tabla 3-9 Tamaño crítico de grieta de cada serie entallada.

S (MPa)	Probeta			Promedio	Desv. Est.
	E = 0,25mm [mm]	E = 0,50mm [mm]	E = 0,75mm [mm]		
727	3,47	2,91	2,98	3,12	0,31
677	3,76	3,36	3,50	3,54	0,20
627	3,87	3,62	3,68	3,72	0,13
577	3,89	3,86	3,90	3,88	0,02

Se puede observar que hay una variación sistemática de los tamaños de grieta crítica de las muestras estudiadas para las diferentes dimensiones de entalla. Donde el promedio del tamaño de grieta crítica fue de 3,12 mm para el mayor nivel de esfuerzos aplicados (727 MPa) y 3,88 mm para el menor nivel de esfuerzo (577 MPa), esto nos da un 20% en el incremento del tamaño de grieta crítica para la aleación Ti-6Al-4V a medida que disminuye el nivel de esfuerzo aplicado.

Hay que indicar que en las muestras pertenecientes a la entalla de 0,25mm, entre los valores correspondientes a los esfuerzos de 627 y 577 MPa no hay una notada diferencia. Esto nos indica que para los esfuerzos más bajos; el tamaño de grieta crítica fue prácticamente el mismo, para ese tamaño de entalla.

### **3.1.3.3 – Evaluación de la grieta en la zona de la entalla:**

La siguiente etapa del análisis fractográfico para la aleación Ti-6Al-4V consistió en estudiar con más detenimiento el principio de la zona de nucleación y propagación de la grieta de fatiga. Con esta finalidad se utilizaron fotomicrografías de alto nivel de aumento (300x).

Las muestras más cercanas a los promedios de nivel de esfuerzo aplicado, fueron ordenadas de manera decreciente de acuerdo a su esfuerzo, a) es a 727 MPa, b) 677 MPa, c) 627 MPa y d) 577 MPa, de la misma forma en que se mostraron las fotomicrografías en el estudio macroscópico (20x).

En la figura 3-11 se ilustra la zona de origen y expansión de la grieta de fatiga para las probetas con entallas de 0,25mm.; donde se observa perfectamente que la grieta de fatiga se origina en la entalla y de donde desembocan las marcas radiales (MR), también se muestran la existencia de grietas secundarias (GS) y planos de clivaje (PC).

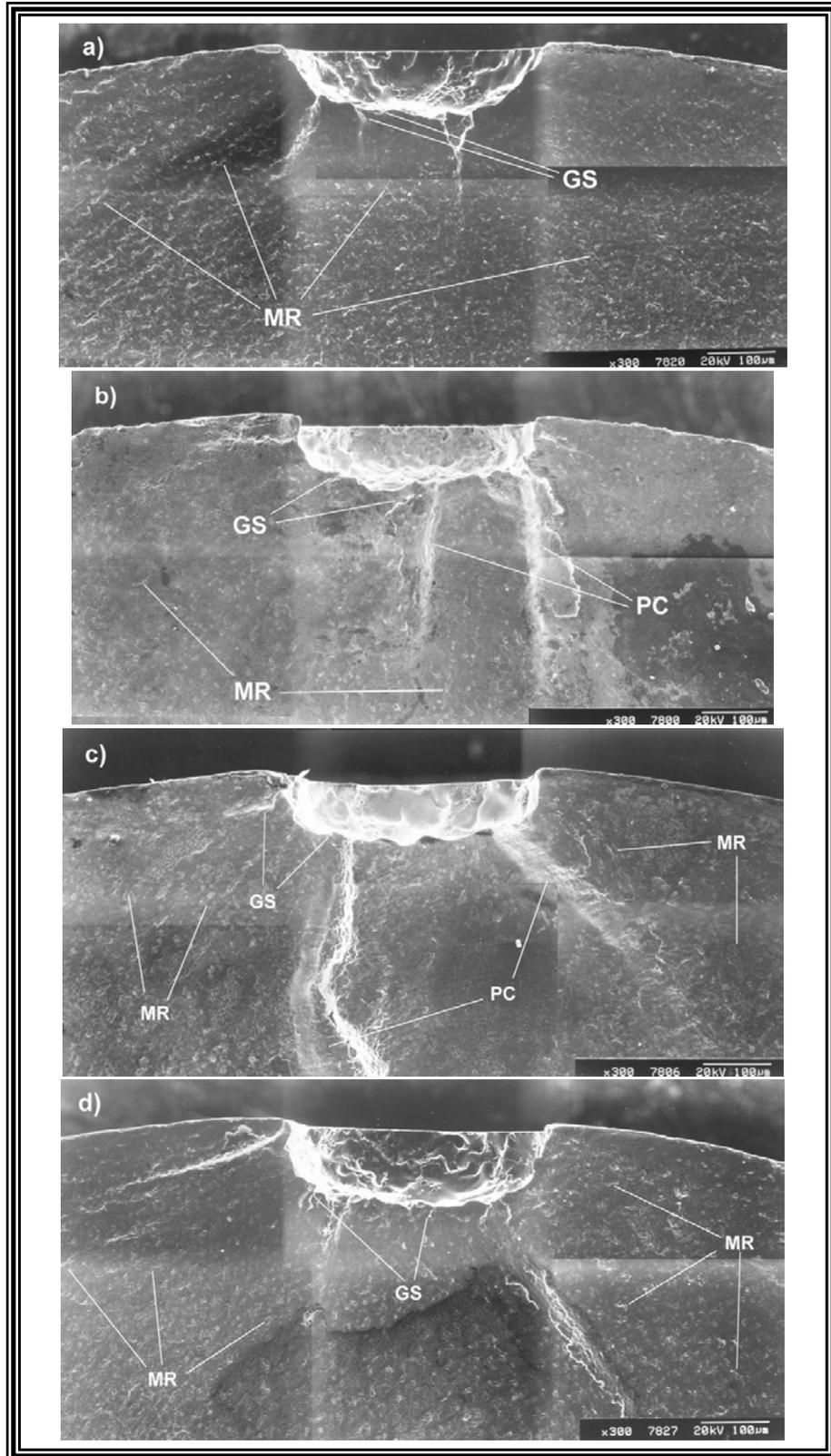


Fig. 3-11 Zona de origen y propagación de la grieta para entallas de 0,25mm.

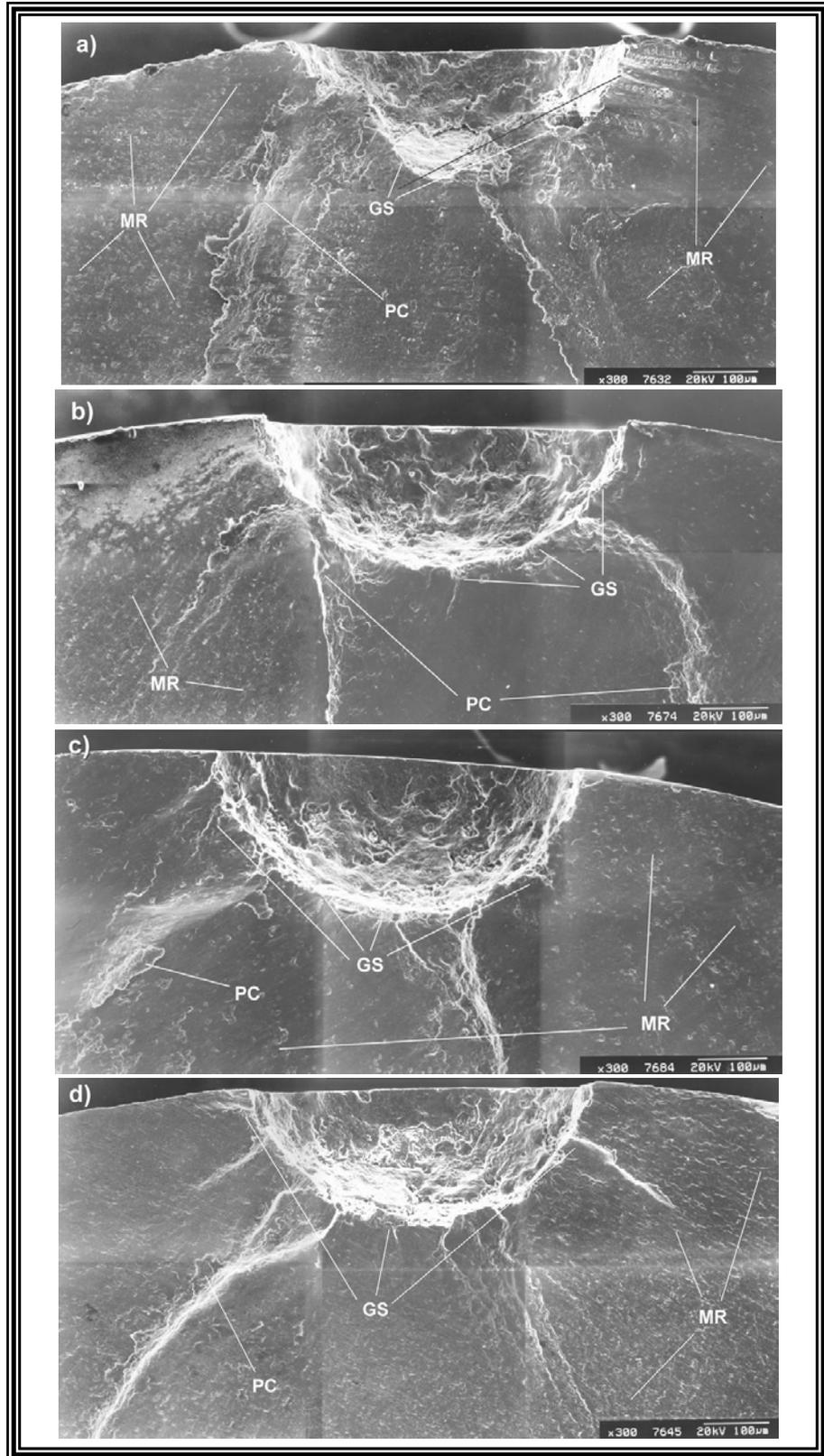


Fig. 3-12 Zona de origen y propagación de la grieta para entallas de 0,50mm.

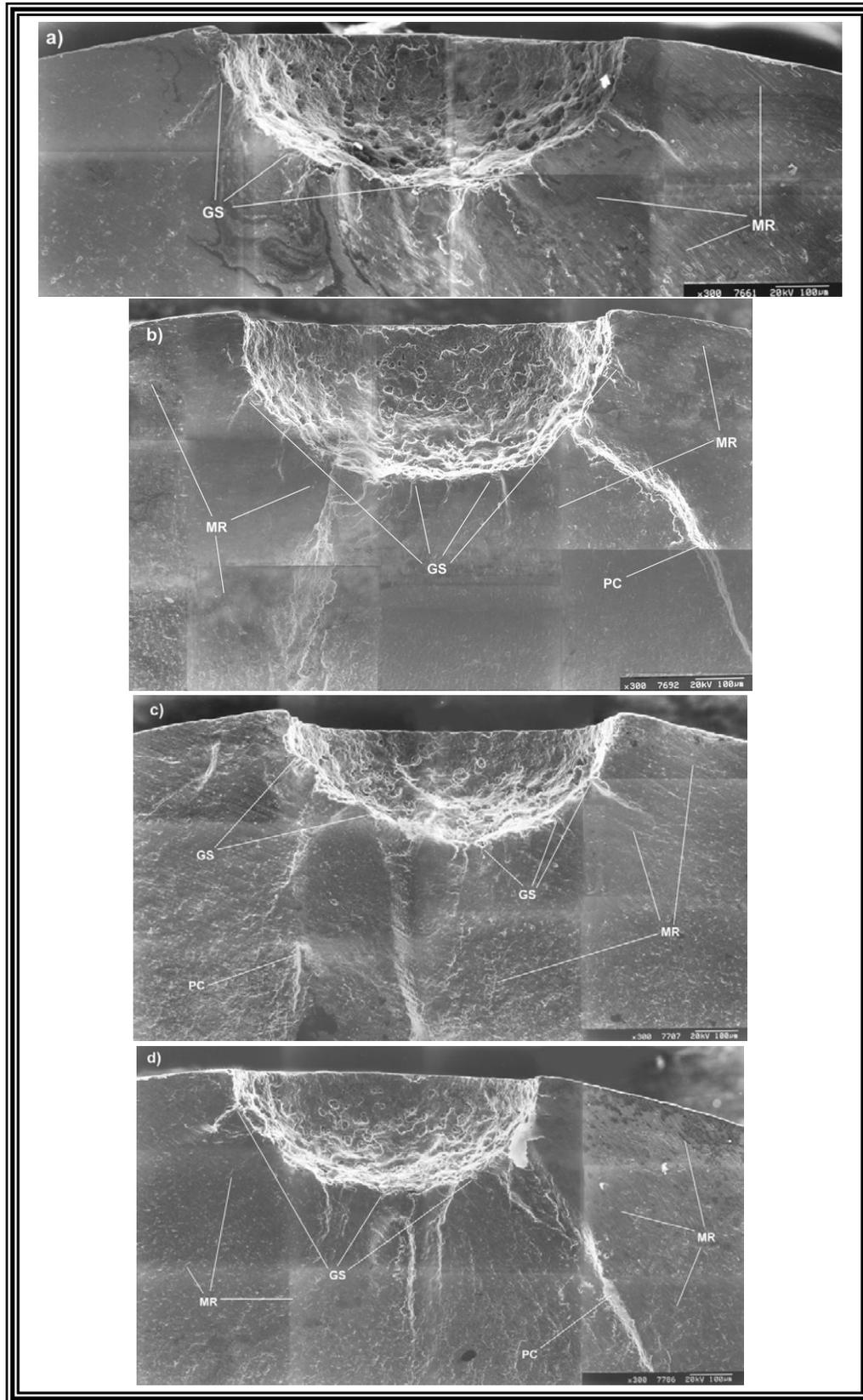


Fig. 3-13 Zona de origen y propagación de la grieta para entallas de 0,75mm.

Las figuras 3-11 y 3-12 corresponden a las zonas de inicio y expansión de la grieta de fatiga para las probetas con entallas de 0,50mm y 0,75mm respectivamente. Se muestran en ellas las marcas radiales que convergen de la raíz de la entalla, las cuales se deben a huellas dejadas por la propagación de la grieta. Igualmente se muestra la presencia de grietas secundarias en las entallas; así como los planos de clivaje.

Lo más resaltante del análisis de grieta en la zona de la entalla, que precisamente es en ella donde se originan las grietas, confirmando su función de concentradora de esfuerzos, independientemente del nivel de esfuerzo a la que fueron sometidas las probetas de fatiga.

### 3.1.4 – Obtención de los parámetros C y n de la ecuación de Paris-Erdogan:

Para calcular los parámetros C y n se utilizó el método desarrollado por Pertúz y colaboradores, y la ecuación (1.24). Se introdujeron en dicho programa los valores de los esfuerzos aplicados (727MPa, 677MPa, 627MPa y 577MPa), el tamaño de grieta crítico correspondiente a cada esfuerzo y las constantes de la ecuación de Basquin (Sf y b).

Tabla 3-10 Constantes y ecuaciones de Paris-Erdogan

Tamaño de entalla	n	C ( mm/ciclos )	Ecuación de Paris-Erdogan
0,25 mm	3,25	6,24E-09	$\frac{da}{dN} = 6,24 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3,25}$
0,50mm	3,31	3,55E-09	$\frac{da}{dN} = 3,55 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3,31}$
0,75mm	3,83	4,04E-10	$\frac{da}{dN} = 4,04 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3,83}$

En la tabla 3-10 se aprecian los valores de las constantes C y n, determinados mediante el programa mencionado, en donde se tiene que el parámetro n incrementa sistemáticamente a medida que aumenta el tamaño de la entalla. En el caso del parámetro C no se presenta una relación dependiente de la magnitud de entalla y cuyos valores no

presenta cambios significativos, tomando en cuenta las unidades de tenacidad de fractura  $MPa\sqrt{m}$ , para la aplicación de ésta ecuación cuando C tiene unidades de mm/ciclos.

### 3.1.5 – Comparación entre la ec. de Basquin y la ec. de Paris-Erdogan:

Al introducir los coeficientes Sf y b, de la ecuación de Basquin al programa desarrollado por Pertúz y colaboradores, se realiza una relación entre los ciclos a falla teóricos (ecuación de Basquin) y los ciclos a falla experimentales (ecuación de Paris – Erdogan) de manera numérica (ver tabla 3-11).

Tabla 3-11 Ciclos a falla obtenidos de la ec. de Basquin y la ec. de Paris-Erdogan.

Esfuerzo (MPa)	Probeta Ent. 0,25mm		Probeta Ent. 0,50mm		Probeta Ent. 0,75mm	
	Basquin	Paris	Basquin	Paris	Basquin	Paris
727	5659,06	5650,10	4284,60	4256,50	3755,66	3725,15
677	7141,26	7146,52	5461,95	5480,84	4959,90	4982,00
627	9174,05	9180,15	7093,78	7111,70	6691,63	6705,81
577	12033,51	12029,93	9415,60	9403,76	9255,62	9245,72

Como puede apreciarse en la tabla 3-11, los valores de los ciclos a falla para cada tamaño de entalla; aportados tanto por la ecuación de Basquin como por la ecuación de Paris-Erdogan son muy semejantes

Además de la comparativa numérica entre ambas ecuaciones para el número de ciclos a falla, se indican los valores expresados en la tabla 3-11 de manera gráfica y se indica el factor de correlación lineal obtenido de la regresión lineal para los mismos, como se aprecia desde la figura 3-14 hasta la 3-16, para cada tamaño de entalla empleado. Gracias al factor de correlación ( $R^2$ ) se puede apreciar que el método aplicado es altamente satisfactorio.

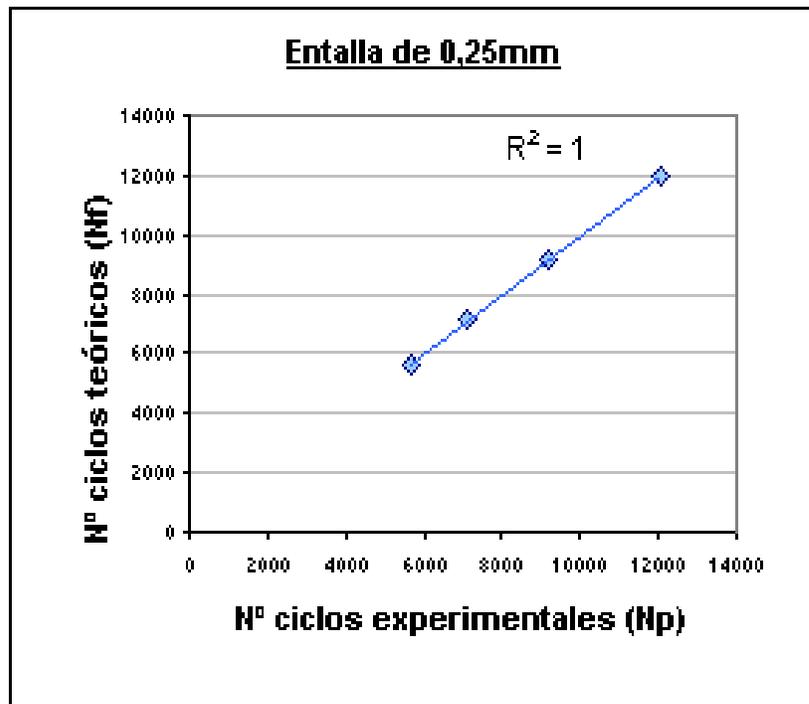


Fig. 3-14 Comparación de ciclos a falla teóricos y experimentales para entallas de 0,25mm

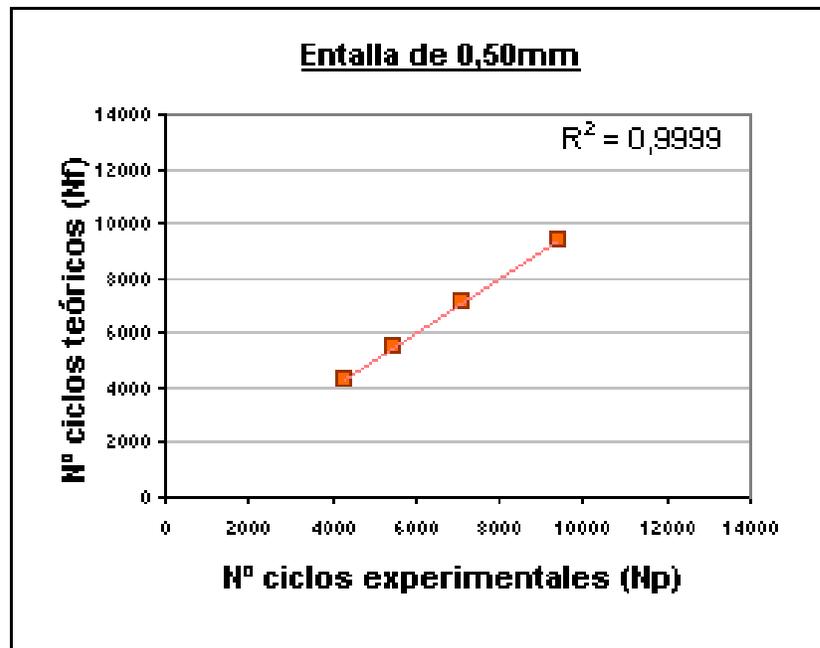


Fig. 3-15 Comparación de los ciclos teóricos y experimentales para entallas de 0,50mm.

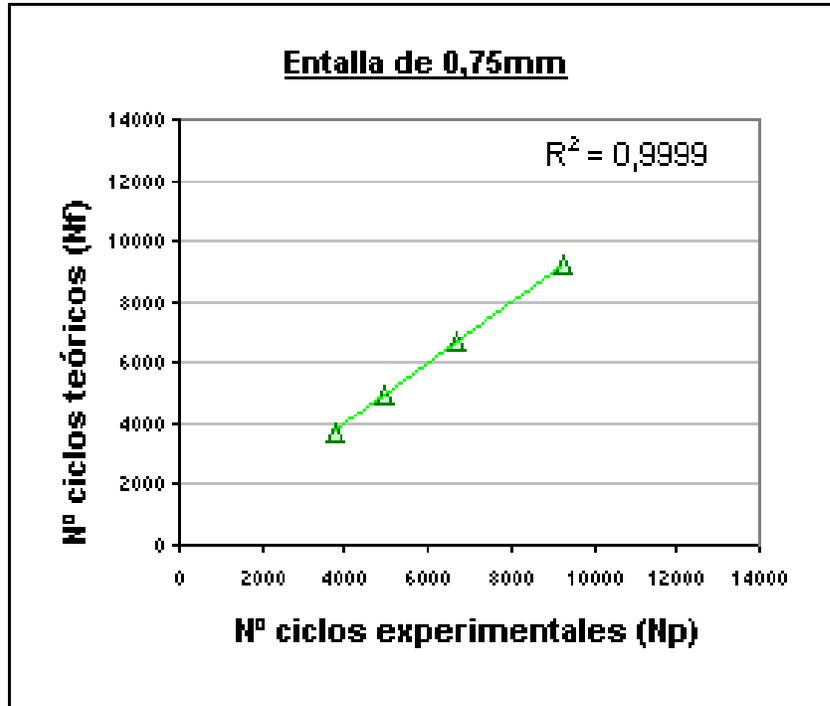


Fig. 3-16 Comparación de los ciclos teóricos y experimentales para entallas de 0,75mm.

### 3.1.6 – Cálculo de la tenacidad de fractura:

Para la obtención de los valores de tenacidad de fractura ( $K_{IC}$ ) para los diferentes tamaños de entalla y niveles de esfuerzo aplicado, se utilizó el método desarrollado por Pertúz y colaboradores y cuyos resultados se presentan en la tabla 3-12.

Tabla 3-12 Tenacidad de fractura ( $K_{IC}$ ) para las entallas de 0,25, 0,50 y 0,75mm.

Esfuerzo (MPa)	$K_{IC} (MPa\sqrt{m})$		
	E: 0,25mm	E: 0,50mm	E: 0,75mm
727	88	71	73
677	91	78	83
627	88	80	82
577	81	80	82

Los valores de la tenacidad de fractura ( $K_{IC}$ ) recogidos en la tabla 3-12, se presentan en el intervalo de 71 hasta  $91 MPa\sqrt{m}$ . Podemos decir que el valor promedio

para la tenacidad está en alrededor de  $81 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ; y si realizamos la comparación con las magnitudes indicadas en la literatura para la aleación Ti-6Al-4V ( $K_{IC}$  oscila entre 32 y  $124 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ), podemos decir que el método aplicado estima satisfactoriamente la magnitud de la tenacidad de fractura.

Se indica igualmente que los valores alcanzados de tenacidad son una sobreestimación de la magnitud real para esta propiedad del material, debido a que se puede manifestar para el presente estudio no se cumple la existencia de una condición de deformación plana en la punta de la grieta, la cual condiciona el tamaño de la zona plástica en el frente de la grieta por debajo de  $\frac{1}{5}$  de las dimensiones principales del componente, en otras palabras quiere decir, que el diámetro de la muestra o probeta debe ser igual a:

$$Dm = \frac{5}{2} \left( \frac{K_{IC}}{S_y} \right)^2$$

Teniendo en cuenta que las probetas de fatiga utilizadas en el presente estudio; presentaron un diámetro promedio de 6,47mm y que los valores de tenacidad de fractura obtenidos para las mismas se localizan en el intervalo de 71 -  $91 \text{ MPa}\sqrt{m}$ , el diámetro que deberían utilizarse para garantizar las condiciones de deformación plana en la punta de la grieta serían del orden de 13,85 – 22,75mm. Que equivaldría a casi el triple de la magnitud del diámetro promedio empleado.

# Capítulo 4

## Capítulo 4

### 4.1 – Conclusiones

- Se aprecia que la aleación estudiada es muy sensible a la presencia de entallas, siendo éstas un concentrador de esfuerzos y asegurando la nucleación de las grietas de fatiga.
- La reducción de la vida a fatiga de las tres series de probetas entalladas en comparación con la serie del material base, varía para el esfuerzo superior (727 MPa) en un 85% hasta un 77% en el esfuerzo inferior (577 MPa).
- El método alternativo empleado permite obtener una aproximación satisfactoria de los valores de constantes C y n de la ecuación de Paris-Erdogan. Se puede indicar que dichos parámetros no presentaron una variación dependiente del tamaño de la entalla.
- Los frentes de grieta generados en las probetas con entallas siguen el modelo definido de propagación, apreciándose claramente la zona de fractura final.
- El valor del factor de fatiga con entalla no presenta una variación sistemática con respecto al tamaño de la entalla. Además la aleación es más sensible a la presencia de entalla que el acero SAE 4340.
- El valor medio del tamaño crítico de grieta para la aleación varió desde 3,12 mm en el esfuerzo de 727 MPa hasta 3,88 mm para el esfuerzo de 577 MPa.
- El método aplicado nos permite tener un estimado de la tenacidad de fractura de la aleación Ti-6Al-4V, que es una característica importante de los materiales estructurales.

## 4.2 – Recomendaciones

- Verificar el estado físico de las mordazas de la máquina de fatiga de flexión rotativa, para evitar que se generen concentradores de esfuerzo externos y de esta forma la pérdida de probetas, como fue el caso del descarte de tres probetas del material base.
- Incluir en el equipo de analizador de imágenes una tabla digital, la cual generará una mayor precisión en el cálculo del área de la zona de fractura final de las muestras estudiadas.
- Realizar este mismo estudio con otros materiales, para afianzar la validación del método alternativo utilizado.

4.3 - Anexos

A.1 - Certificado del fabricante para la aleación Ti-6Al-4V.

**RESIDENCIAS JARDIN COLINAS, TORRE,  
PISO 10, APARTAMENTO 101 COLINAS D  
VENEZUELA**

SHIP TO

**CALLE SUAPUSE, RAMAL 11  
RESIDENCIAS JARDIN COLINAS, TORRE  
PISO 10, APARTAMENTO 101 COLINAS D  
VENEZUELA**

REMITTO:  
A.M. CASTLE & CO. - VIA WIRE TRANSFER BANK OF  
AMERICA NT&SA, CHICAGO, IL ACCOUNT NO. 86554  
00085 SWIFT NO. BOFA US44 ABA NO. 0710-0003-9  
CABLE: CONTL-BANK-TELEX-02-5232

AS ADDRESSED CUSTOMER P.O.

RESIDENCIAS JARDIN COLINAS, TORRE,  
PISO 10, APARTAMENTO 101 COLINAS D  
VENEZUELA

SHIP TO

CALLE SUAPUSE, RAMAL 11  
RESIDENCIAS JARDIN COLINAS, TORRE  
PISO 10, APARTAMENTO 101 COLINAS D  
VENEZUELA

OUR ORDER NUMBER: 28-623385

OUR ORDER NUMBER: 28-623385

OUR ORDER NUMBER: 28-623385

TERMS: PAYABLE AT PAR U.S. FUNDS  
PREPAID

TERMS: PAYABLE AT PAR U.S. FUNDS  
PREPAID

TERMS: PAYABLE AT PAR U.S. FUNDS  
PREPAID

SHIPPING TERMS: CIF AIR VENEZUELA DUTY & TAXES UNPAID

SHIPPING TERMS: CIF AIR VENEZUELA DUTY & TAXES UNPAID

SHIPPING TERMS: CIF AIR VENEZUELA DUTY & TAXES UNPAID

LINE NO.	QUANTITY ORDERED	DESCRIPTION	PACKAGE NUMBER	QUANTITY SHIPPED	UNIT PRICE	AMOUNT
	5 PCS	1/2" RD GAL-4V TITANIUM HR ANN & CG	1	5	\$283.505U	\$1,417.50U
		<b>INVOICED</b> 4.17.01				
		TOTAL		5	\$283.505U	\$1,417.50U

QUANTITY OF DESTINATION: VENEZUELA

QUANTITY OF DESTINATION: VENEZUELA

QUANTITY OF DESTINATION: VENEZUELA

WE HEREBY CERTIFY THIS INVOICE TO BE TRUE AND CORRECT IN ALL PARTICULARS BY

WE HEREBY CERTIFY THIS INVOICE TO BE TRUE AND CORRECT IN ALL PARTICULARS BY

WE HEREBY CERTIFY THIS INVOICE TO BE TRUE AND CORRECT IN ALL PARTICULARS BY

FILE COPY

FILE COPY

FILE COPY

QUALIFICATION OF TEST

80283 A TEST

Page 1 of 4

ALLVAC P.O. Box 447 South Boston, VA 24592 Phone (804) 575-7994	Prof 1 Rev 2
Customer Name CASTLE METALS	Alloy ALLVAC 6-4 (HIGH N & C)
Purchase Order 01-87813	Size .5000"RD
PCS	Weight

Date: 10/09/87	Quality Auditor: CELESTE SMITH	CASTLE METALS-FE
Date Rec'd: 8/09		REC'D FROM: BFL
Approved by: BFL		
AMS 492B	R	** AMS 4965
AMS 4967	G	ASTM B346-1995A GRADE 5
BSI 27811 : 1974	5/74	DMS 1570 C
EN 10204	8/81	MIL-T-9047G AN. 2 COND. A
R56400-01	4	

\*\* Capside of

SPECIFICATIONS

TOP	BOT	CHEMISTRY											
		C	SI	Mn	Mo	Ti	AL	Fe	CH EQ = Chromium Equiv	CH TRT	Ta		
.026	.026	.01	.01	.01	.01	BAL	6.34	-	-	4.30	.21		
		.01	.01	.01	.01	BAL	6.13	-	-	4.14	.22		
CU	B	Zr	Y	O	N	Sn	Cr	Cb	Ta				
.01	.0010	.01	.0010	.16	.027	.01	.02	-	-				
.01	.0010	.01	.0010	.15	.022	.01	.02	-	-				

Traveler(s) Heat # Ingot#  
 80283 A TE67  
 BAR B  
 .0034

ALLVAC P.O. Box 447 South Boston, VA 24682 Phone (804) 875-7914 Page 2 of 4

**CHEMISTRY REMARKS**

TESTED AT T/A MONROE  
 HYDROGEN DETERMINED USING INERT GAS FUSION THERMAL CONDUCTIVITY METHOD. TESTED AT LUYAK LABB.

**Tensile Test**

Operation	Ingot	Heat Treat Code	Test Dir	Temp °F	UTS ksi	.2% Yield ksi	.02% Yield ksi	SEL	%RA	Gage Length	Tested At
RTT		1300A	L	ROOM	164.4	135.2	14.0	40.9	1.0	1.0	.251 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300A	L	ROOM	164.8	135.2	16.0	49.3	1.0	1.0	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300A	L	ROOM	164.2	134.6	17.0	48.2	1.0	1.0	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300A	L	ROOM	164.6	135.4	15.0	48.2	1.0	1.0	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300A	L	ROOM	163.6	134.2	17.0	49.2	1.0	1.0	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300A	L	ROOM	164.6	135.2	16.0	49.3	1.0	1.0	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300A	L	ROOM	164.8	135.0	16.0	49.3	1.0	1.0	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT-AD		1300A	L	ROOM	165.6	136.3	12.0	48.4	1.25	1.25	.250 ACCURATE METALLURGIC
RTT		1300L	L	ROOM	162.2	157.7	14.0	53.2	1.0	1.0	.150 ACCURATE METALLURGIC

Test Dir: L = Longitudinal, T = Transverse, ST = Short Transverse, LT = Long Transverse,  
 TC = Transverse Center at Size, TM = Transverse Mid-Radius At Size,  
 PC = Face-to-Face, DB = Driftbar, FD = Fiddle, TT = Top Transverse At Size,  
 BT = Bottom Transverse At Size, LC = Long Center, TL = Top Transverse Mid-Radius At Size,  
 LM = Longitudinal Mid Radius

Operation: SUP25 = Crosshead Sep Rate of .10



## A.2 – Cálculos del tamaño crítico de grieta de fatiga:

E = 0,25mm    E = 0,50mm    E = 0,75mm

Muestra	Diámetro (mm)	ATT (mm <sup>2</sup> )	AZFF (mm <sup>2</sup> )	APG (mm <sup>2</sup> )	R = a <sub>c</sub> '	a <sub>c</sub>
7813	6,25	30,664	12,329	18,335	3,416	3,471
7793	6,54	33,576	10,067	23,509	3,869	3,756
7809	6,68	35,029	9,056	25,973	4,066	3,865
7830	6,43	32,456	8,117	24,339	3,936	3,887
7630	6,47	32,861	19,081	13,780	2,962	2,907
7667	6,52	33,371	14,725	18,646	3,445	3,355
7677	6,67	34,924	12,169	22,755	3,806	3,623
7642	6,67	34,924	9,116	25,808	4,053	3,859
7652	6,43	32,456	18,135	14,321	3,019	2,982
7687	6,49	33,064	12,914	20,150	3,582	3,504
7703	6,52	33,371	10,893	22,478	3,783	3,684
7789	6,51	33,268	8,154	25,114	3,999	3,900

Diámetro nominal: 6,35mm

### A.3 – Cálculos de los factores de fatiga con entalla:

Nf	Kf1	Kf2	Kf3	Kf <sub>4340</sub>
25000	1,60	1,70	1,65	1,15
50000	1,81	1,91	1,81	1,26
75000	1,95	2,05	1,91	1,33
100000	2,06	2,15	1,98	1,38
125000	2,14	2,24	2,04	1,42
150000	2,22	2,31	2,09	1,45
175000	2,28	2,37	2,13	1,48
200000	2,34	2,42	2,17	1,50
225000	2,39	2,47	2,21	1,53
250000	2,43	2,51	2,24	1,55
275000	2,48	2,56	2,27	1,57
300000	2,52	2,59	2,29	1,58
325000	2,55	2,63	2,32	1,60
350000	2,59	2,66	2,34	1,62
375000	2,62	2,69	2,36	1,63
400000	2,65	2,72	2,38	1,64
425000	2,68	2,75	2,40	1,66
450000	2,71	2,78	2,42	1,67
475000	2,74	2,80	2,44	1,68
500000	2,76	2,83	2,45	1,69
525000	2,79	2,85	2,47	1,70
550000	2,81	2,88	2,48	1,71
575000	2,83	2,90	2,50	1,72

#### 4.4 – Bibliografía:

1. Askeland, D. “La Ciencia e Ingeniería de los Materiales”. Editorial Iberoamericana. México. 1996.
2. ASM International. “ASM Handbook, Alloy Phases Diagrams”. Vol.3. Editorial Metals Parks. Ohio. 1996.
3. ASM International. “ASM Handbook, Fatigue and Fracture”. Vol.19. Editorial Metals Parks. Ohio. 1996.
4. ASM International. “ASM Handbook, Fractography”. Vol.12. Editorial Metals Parks. Ohio. 1996.
5. ASM International. “ASM Handbook, Materials Selection and Design”. Vol.20. Editorial Metals Parks. Ohio. 1996.
6. ASM International. “ASM Handbook, Mechanical Testing”. Vol.8. Editorial Metals Parks. Ohio. 1996.
7. ASM International. “ASM Handbook, Properties and selection”. Vol.2. Editorial Metals Parks. Ohio. 1996.
8. Barksdale, J. “Titanium, its occurrence, chemistry and technology”. 2<sup>a</sup> Edición. Editorial The Honald Press Company. New York. 1966.
9. Batoni, E y Lozada, B. Tesis “ Influencia del Recubrimiento Ni-P Electroless sobre la resistencia de un acero AISI-4140”. U.C.V. Facultad de Ingeniería. 1999.
10. Bernard, J. “Metalurgia General”. Editorial Hispano Europea. Barcelona. 1973.
11. Bernstein. M.K. y . Zaimovsky, V.A. “Mechanical properties of metals. Edit. MIR .Moscú. 1983.

12. Erjjan, Si. "Stress intensity factors for edge cracks in room bars". Journal of Engineering Fractures Mechanics. Vol. 37. Londres. 1990. Págs. 807-816.
13. Fernández, L. Tesis " Estudio de fatiga al aire de una aleación de Ti-6Al-4V con película de Balinit futura". U.C.V. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Caracas. 2003.
14. Forrest, P. G. "Fatiga de los metales". Editorial Urmo. Bilbao. 1962.
15. González, J. L. "Mecánica de fracturas, bases y aplicaciones". Editorial Noriega Limusa. México. 1986.
16. Jimeno, E. "Metalurgia general, extractiva, física, mecánica y química", Universidad de Madrid. Madrid. 1955.
17. Mendoza, Jhonny. Tesis "Estudio del comportamiento a fatiga en aleaciones beta titanio (Beta C)". U.C.V. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Caracas. 2001.
18. Merizalde, Carlos. Tesis "Estudio de tenacidad de fractura de la aleación de aluminio 6063". U.C.V. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Caracas. 2001.
19. Ochoa, Engels. Tesis "Estudio a fatiga de un acero SAE 4340, templado, revenido y entallado". U.C.V. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Caracas. 2002.
20. Pertúz, A; Berrios, J. A; Puchi E. S; "Influence of a comercial electroless Ni-P deposit on fatigue properties of a notched and unnotched SAE 4140 steel". Editorial Elsevier. Amsterdam. 2000. Págs.1-11.
21. Ross, R. B. "Metallics Materials". Editorial Chapman and Hall. Londres. 1968.
22. Rovira , A. "Metalurgia General". 2<sup>a</sup> Edición. Editorial Dossat. Madrid. 1982.

23. Toribio, J. et al. "Stress intensity factors solutions for a cracked bolt under tension, bending and residual stress loading". Journal of Engineering Fractures Mechanics. Vol. 39. Londres. 1991. Págs. 357-371.
24. Wei, R. P. "Aerospace Structural Metals Handbook". Editorial Battelle Columbus Laboratories. Vol. 4. 1986.