



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS IMPONETUR VIRILIS TOGA. 1948

Universidad Central Marta Abreu de las Villas



Facultad de Ingeniería Mecánica

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE SOLDADURA

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Análisis de crecimiento de grietas por fatiga en una aleación de aluminio 5454 H-32.

Autor: Pedro Díaz Gutiérrez.

Tutor: M Sc. Juan A. Pozo Morejon.

Curso: 2005-2006





PENSAMIENTO

Hagamos el propósito de redoblar nuestros esfuerzos, y juremos ante nosotros mismos que si un día nuestro trabajo nos parece bueno, debemos luchar por hacerlo mejor y si fuera mejor debemos luchar por hacerlo perfecto, conociendo de antemano que para un comunista nada será nunca suficientemente bueno, y ninguna obra humana será jamás suficiente.

Fidel Castro Ruz.



DEDICATORIA



Deseo dedicar este trabajo a un grupo de personas muy queridas para mí

- ✚ A mis padres, este es el fruto de sus desvelos y mi regalo para ustedes.***
- ✚ A mi hijita Rosa linda.***
- ✚ A mi hermano.***
- ✚ A mi novia.***

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos las personas que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

- ✚ A mis padres por su ayuda y el sacrificio que han tenido que hacer para ver realizado el cumplimiento de este sueño.***
- ✚ A todos mis familiares.***
- ✚ A mi tutor M Sc. Juan A. Pozo Morejon.***
- ✚ A mis compañeros de estudio.***

Índice

Resumen		10
Abstract		12
Introducción		14
Capitulo I	Estudio del crecimiento de grietas a fatiga mediante la mecánica de la fractura.	18
Epígrafe 1.1	Definición e historia de la fatiga.	18
Epígrafe 1.2	Fatiga en ciclos altos.	20
Epígrafe 1.3	Etapas de la fatiga.	26
Epígrafe 1.4	Fractura por fatiga.	27
Epígrafe 1.5	Fatiga en ciclos bajos.	29
Epígrafe 1.6	Crecimiento de grietas por fatiga.	29
Epígrafe 1.6.1	Lo necesario para el análisis de crecimiento de grieta.	30
Epígrafe 1.6.2	Definiciones de crecimiento de grieta.	33
Epígrafe 1.6.3	Descripción del comportamiento del crecimiento de grieta de los materiales.	34
Epígrafe 1.7	Método de prueba y análisis de datos.	37
Epígrafe 1.7.1	Variables de prueba.	38
Epígrafe 1.7.2	Estimación de la vida para amplitud de carga constante.	40
Capitulo II	Determinación del comportamiento de la aleación 5454 H 32 en cuanto al crecimiento de grietas por fatiga.	43
Epígrafe 2.1	Propiedades de la aleación de aluminio 5454 H 32.	43
Epígrafe 2.2	Dimensionamiento de la probeta compacta según norma ASTM E 647.	46
Epígrafe 2.3	Procedimiento utilizado en el ensayo.	50
Epígrafe 2.3.1	Equipamiento utilizado en el ensayo.	50
Epígrafe 2.3.2	Obtención de las pregrietas.	50
Epígrafe 2.3.3	Configuración del equipo.	55
Epígrafe 2.4	Resultados experimentales.	60
Conclusiones		67
Recomendaciones		69
Bibliografía		71
Anexos		73

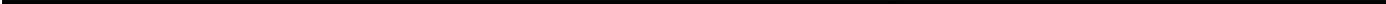


RESUMEN



Resumen

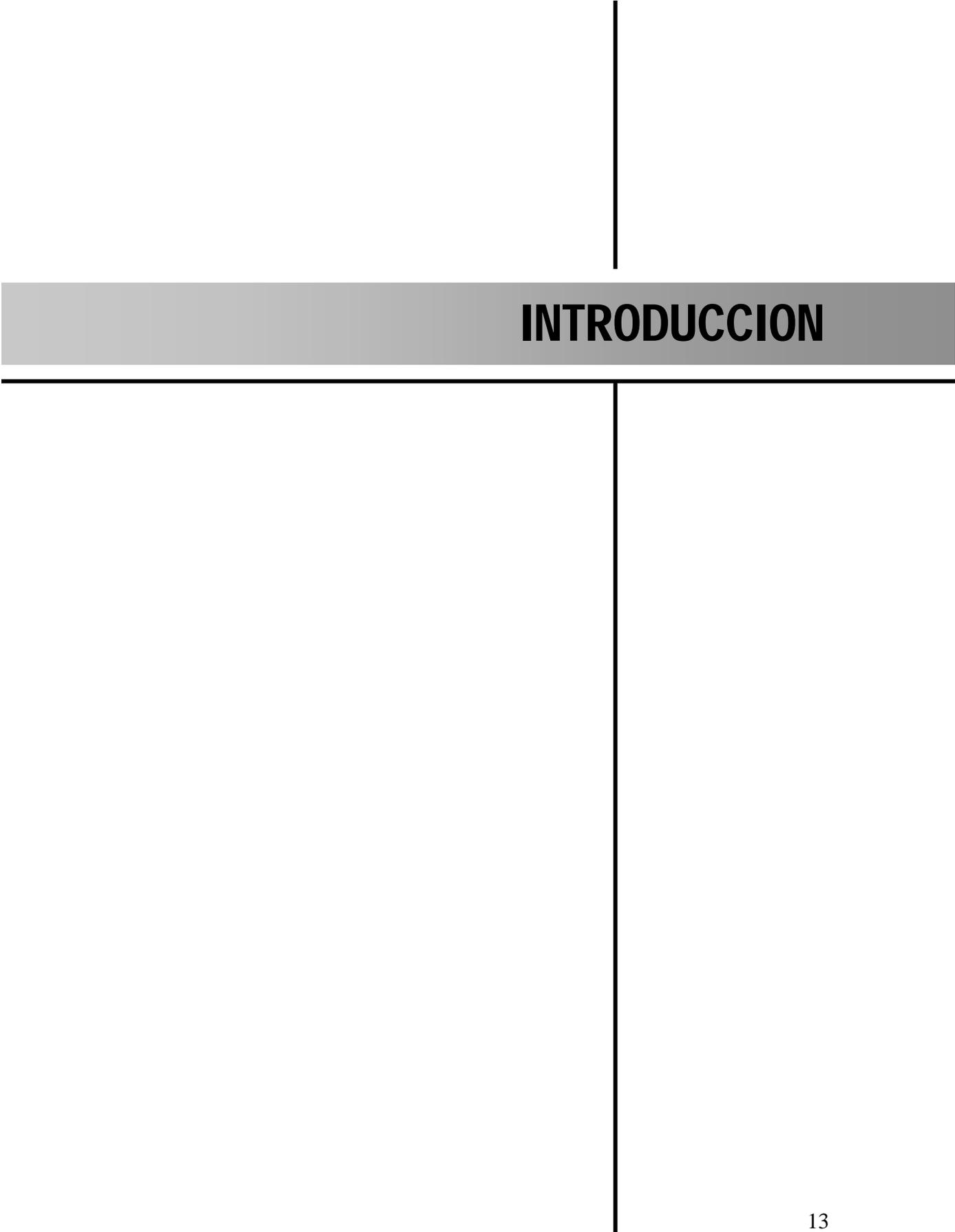
En el presente trabajo se caracterizó el crecimiento de grietas a fatiga en la aleación de aluminio – magnesio 5454 H 32 con la que se fabrican los autotanques que utiliza CUPET para el traslado de combustibles ligeros a lo largo y ancho del país, y que en el pasado han salido de servicio por presentar fisuración por fatiga en su envoltura. Mediante ensayos de crecimiento de grietas de probetas sometidas a una carga cíclica, realizados en una máquina servo hidráulica de ensayos de fractura según la norma ASTM E 647, se determinó la ecuación de Paris que caracteriza su comportamiento bajo este fenómeno. En el futuro esta ecuación permitirá establecer la vida en servicio que le queda a estos tanques, o determinar períodos de inspección seguros para los mismos.



ABSTRACT

Abstract

In the present work was characterized the fatigue crack of the aluminum - magnesium alloy 5454 H 32, material with that is manufactured the CUPET's tanks which is used in the distribution of slight fuels for the whole country, and that in the past many of them have present cracking en their shell. Using tests of the cracks growth under cycle load, carried out in a fracture machine, according to the standard ASTM E 647, was determined the Paris equation that characterizes the behavior of this material. In the future this equation will allow to establish the service life, or to determine sure periods of inspection, that avoid a catastrophe.



INTRODUCCION

Introducción.

La fractura de los materiales de ingeniería es casi siempre un hecho no deseado por varias razones; entre éstas cabe resaltar las posibles pérdidas humanas, las pérdidas materiales, y su incidencia en el suministro de productos y servicios, además de su influencia en las posibles contaminaciones ambientales que podría provocar. Aún cuando las causas de la fractura y el comportamiento de los materiales sean conocidos, la prevención de las fracturas es muy difícil de garantizar.

La fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a un esfuerzo aplicado estático (es decir, constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. En los materiales de ingeniería, existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil para el caso del aluminio esta fractura es dúctil porque está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. Los materiales dúctiles exhiben normalmente deformación plástica sustancial con muy alta absorción de energía antes de la fractura

La fatiga es un proceso de agrietamiento progresivo que culmina en la fractura de un material sujeto a cargas repetidas o fluctuantes, cuyo valor máximo es menor a la resistencia tensil. Las fracturas por fatiga inician como grietas que crecen bajo la acción de esfuerzos fluctuantes hasta que alcanzan su tamaño crítico y sobreviene la fractura final. La fatiga, en sus etapas inicial e intermedia, no produce cambios aparentes en la geometría ni en la microestructura del material y las grietas producidas son muy finas, lo que hace difícil de detectar anticipadamente, de ahí su peligrosidad.

La fatiga es un fenómeno que fue reconocido desde principios del uso de maquinarias y estructuras metálicas a gran escala, a mediados del siglo XIX. La fractura aparente frágil de las piezas que fallaban por fatiga, en aquel tiempo se interpretó como una “cristalización” del metal durante el uso, que lo volvía frágil

como el vidrio y hacía que una fracturara bajo cargas o impactos súbitos; pero gracias a las investigaciones de Whölher (1860), se supo que la fatiga no alteraba las propiedades del material, sino que era un proceso de agrietamiento paulatino producido por la acción de cargas repetitivas, introduciendo el concepto de fatiga.

Actualmente se sabe que la fatiga ocurre en prácticamente todos los materiales de uso ingenieril. Incluyendo los plásticos y algunos cerámicos. A pesar de los grandes avances en su estudio, la fatiga aun no es completamente entendida y una gran cantidad de investigaciones son realizadas con el fin de predecir la vida en fatiga, desarrollar materiales resistentes a ella y comprender mejor sus mecanismos

Justificación del proyecto

CUPET en la actualidad realiza la distribución de combustibles por todo el país empleando carros cisternas fabricados de aleaciones de aluminio, que en algunos casos tienen mas de 15 y 20 años de explotación. Producto de la prolongada explotación, en ocasiones en condiciones extremas, varios de estos contenedores han presentado agrietamiento de su envoltura producto de la fatiga mecánica. Esta falla es en extremo peligrosa porque provoca el derrame de combustible, con el consiguiente peligro de explosión o incendio. Debido a esta problemática, de gran relevancia a nivel nacional es que se decide realizar el estudio de las propiedades del aluminio al magnesio 5454 H32 presente en un gran número de estos contenedores, así como su comportamiento en cuanto al crecimiento de grietas a fatiga, determinado mediante el ensayo en máquina de fractura, que permite finalmente arribar a los coeficientes de la ecuación de Paris. El conocer la ecuación de Paris para estos materiales permitirá establecer periodos de inspección seguros de estos contenedores, sin que se produzca una fuga de combustible.

Planteamiento del problema

Analizar las propiedades de la aleación de aluminio 5454 H32, y determinar el comportamiento de esta aleación en cuanto al crecimiento de grietas por fatiga, utilizando como herramienta la Mecánica de la Fractura, que permita determinar los coeficientes de la ecuación de Paris y por tanto dicha ecuación, que describe el comportamiento del material a la fatiga.

Objetivos generales

- ✚ Determinar mediante la Mecánica de la Fractura y el ensayo con estas técnicas el comportamiento de la aleación de aluminio 5454 H32 en cuanto al crecimiento de grietas por fatiga, arribando a su ecuación de Paris característica.

Objetivos específicos

- ✚ Abordar lo referido al estudio del crecimiento de grietas a fatiga mediante la mecánica de la fractura
- ✚ Estudiar en la literatura las propiedades de la aleación de aluminio 5454 H32.
- ✚ Determinar la Ecuación de Paris característica que describe el comportamiento de la aleación 5454 H32 en cuanto al crecimiento de grietas a fatiga, mediante el correspondiente tipo de ensayo de fractura normado.



CAPITULO I



Capítulo I *“Estudio del crecimiento de grietas a fatiga mediante la mecánica de la fractura.”*

1.1 Definición e historia de la fatiga

La fatiga es un proceso de agrietamiento progresivo que culmina en la fractura de un material sujeto a cargas repetidas o fluctuantes, cuyo valor máximo es menor a la resistencia tensil. Las fracturas por fatiga inician como grietas que crecen bajo la acción de esfuerzos fluctuantes hasta que alcanzan su tamaño crítico y sobreviene la fractura final [7].

La fatiga es un fenómeno que fue reconocido desde principios del uso de maquinarias y estructuras metálicas a gran escala, a mediados del siglo XIX. La fractura aparente frágil de las piezas que fallaban por fatiga, en aquel tiempo se interpretó como una “cristalización” del metal durante el uso, que lo volvía frágil como el vidrio y hacía que una fracturara bajo cargas o impactos súbitos; pero gracias a las investigaciones de Whölher (1860), se supo que la fatiga no alteraba las propiedades del material, sino que era un proceso de agrietamiento paulatino producido por la acción de cargas repetitivas, introduciendo el concepto de fatiga.

Actualmente se sabe que la fatiga ocurre en prácticamente todos los materiales de uso ingenieril. A pesar de los grandes avances en su estudio, la fatiga aun no es completamente entendida y una gran cantidad de investigaciones son realizadas con el fin de predecir la vida en fatiga.

Para que la fatiga ocurra es necesario que se cumplan las tres condiciones; si alguna de estas condiciones no se presenta, la fatiga no ocurre. Las tres condiciones son:

1. Un esfuerzo de tensión, suficientemente alto pero menor que la resistencia última del material.
2. Una variación o fluctuación del esfuerzo mayor a un valor dado llamado límite de fatiga.
3. Un número suficiente de ciclos de carga.

Si alguna de estas tres condiciones no se presenta, la fatiga no ocurre.

Existen muchas situaciones en las que la fatiga es posible ya que es muy probable tener las tres condiciones. Dicho en otras palabras, lo importante en la fatiga no es tanto si ésta ocurrirá o no (teóricamente siempre va a ocurrir), sino en cuanto tiempo o número de ciclos se presentará y si ese tiempo o número de ciclos es mayor que la vida esperada de servicio del componente.

La vida en fatiga es mayor que la vida esperada, es decir, lo más probable es que el componente falle por algún otro mecanismo antes que por fatiga. Esto limita la preocupación por evaluar la vida de componentes en los que la fatiga se presenta temprana en su vida útil o bien, que bajo ciertas condiciones se puede presentar de manera inesperada y rápida.

Desafortunadamente, existen una gran cantidad de componentes que son candidatos a la fatiga algunos de los más importantes son:

- Partes estructurales de aviones
- Partes de suspensión, dirección y frenos de vehículos terrestres
- Toda clase de motores
- Pistones y prensa hidráulicas
- Estructuras de puentes y edificios
- Partes de maquinarias
- Grúas, elevadores y equipos de movimientos de materiales
- Bombas

- Turbinas
- Tuberías
- Reactores
- Ruedas y rieles de ferrocarril, etc.

Dos de los primeros descubrimientos en relación a la naturaleza de la fatiga: primero, que a mayor amplitud de esfuerzo, el número de ciclos de carga son necesarios para producir fatiga (la vida) se reduce en relación exponencial y segundo, que la presencia de entallas agudas, grietas y en general, cualquier concentrador de esfuerzos reduce drásticamente el número de ciclos de falla.

1.2 Fatiga en ciclos altos

Para tensiones inferiores, cuando las deformaciones son prácticamente totalmente elásticas, las vidas son mucho mayores. Esto se denomina fatiga de alto número de ciclos ya que se requiere un gran número de ciclos para que se produzca la rotura. La fatiga de alto número de ciclos se asocia con vidas mayores que aproximadamente $10^4 - 10^5$ ciclos [11].

Algunas de las aplicaciones prácticas, y también muchas pruebas de fatiga en materiales, involucran comportamientos cíclicos de esfuerzo entre un máximo y un mínimo que son constantes esto es llamado esfuerzo de amplitud constante y es ilustrado en la Figura 1.1

El rango de esfuerzos, $\Delta\sigma$, es la diferencia entre el máximo y el mínimo de los valores. El promedio del valor máximo y el valor mínimo da el esfuerzo medio, σ_m . El esfuerzo medio puede ser cero, como en la Figura 1.1 (a), pero no siempre es, como en (b).

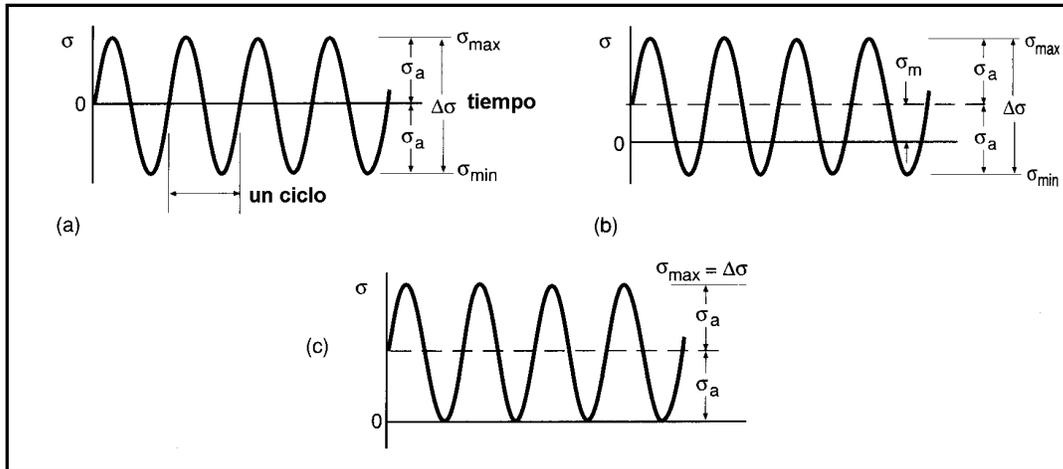


Figura 1.1 Amplitud constante cíclica y la nomenclatura asociada. Caso (a) esfuerzo completamente reversible, $\sigma_m = 0$, (b) tiene un esfuerzo medio σ_m diferente de cero, y (c) es esfuerzo cero-a- tensión, $\sigma_{\min} = 0$.

La mitad del rango es llamada amplitud de esfuerzo, σ_a , dada que esta es la variación del esfuerzo medio. Expresiones matemáticas de estas definiciones son:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (1.1)$$

El término de esfuerzo alternante es usado por algunos autores y tiene el mismo significado que amplitud de esfuerzo. Esto se usa para denotar que

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (1.2)$$

Los signos de σ_a y de $\Delta\sigma$ son siempre positivos puesto que $\sigma_{\max} > \sigma_{\min}$, donde la tensión es considerada positiva. Las cantidades σ_{\max} , σ_{\min} y σ_m pueden ser tanto positivas o negativas; ciertas relaciones de variables vistas anteriormente son también usadas.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (1.3)$$

Donde R es llamada relación de esfuerzo y A la relación de amplitud. Algunas relaciones adicionales derivadas de la ecuación 1.3 son también usadas.

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{\max}(1 - R), \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}(1 + R) \quad (1.4)$$

$$R = \frac{1 - R}{1 + A}, \quad A = \frac{1 - R}{1 + A}$$

De la misma manera que otras características mecánicas, las propiedades de fatiga de los materiales pueden ser determinadas a partir de ensayos de simulación en laboratorio.

Una serie de ensayos se empieza sometiendo la probeta a tensiones cíclicas con una amplitud máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) relativamente grande, normalmente alrededor de dos tercios de la resistencia estática a tracción; se registra el número de ciclos a la rotura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas progresivamente decrecientes. Los resultados se representan en un diagrama de tensión, S , frente al logaritmo del número N ciclos hasta la rotura para cada una de las probetas. El número de ciclos a la falla cambia rápidamente con el nivel de esfuerzo y puede cubrir varias magnitudes. Por esta razón, el número de ciclos usualmente se gráfica en escala logarítmica. La dificultad con gráficas en escala lineal como se ilustra en la Figura 1.2, donde el mismo valor de N_f es graficado tanto en escala lineal como en escala logarítmica. En la escala lineal, el número de ciclos par vidas cortas no puede leerse con exactitud. Una escala logarítmica se usa frecuentemente para el eje de los esfuerzos.

Si los datos en $S-N$ son encontrados aproximando una línea recta sobre una grafica Log-lineal, la siguiente ecuación ajusta para obtener una representación matemática de la curva:

$$\sigma_a = C + D \log N_f \quad (1.5)$$

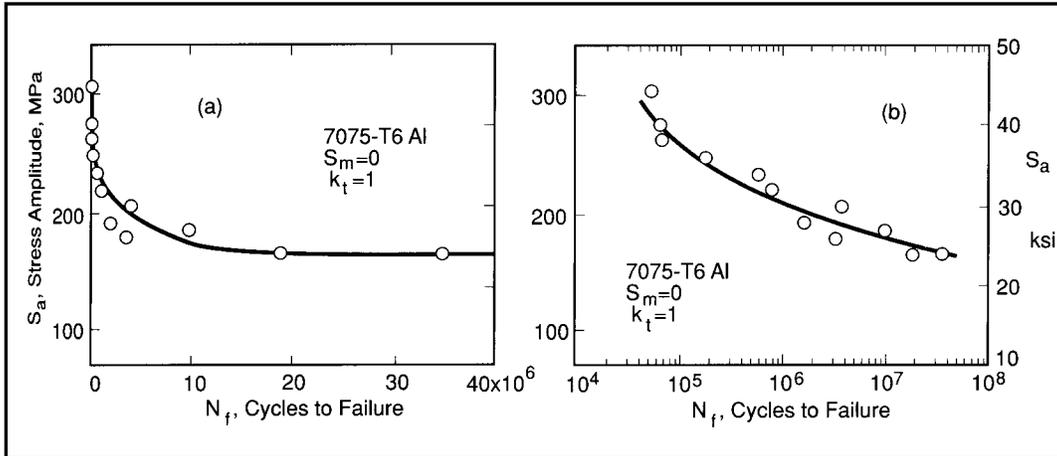


Figura 1.2 Esfuerzo contra vida ($S-N$) curvas de pruebas de flexión rotativa en especímenes sin muesca de una aleación de aluminio. Escalas lineales idénticas se usaron en el esfuerzo, pero el número de ciclos es graficado en escala lineal (a), y otra en escala logarítmica (b) [9]

Donde C y D son constantes de ajuste. Para valores aproximándose a una línea recta sobre un gráfico Log-Log, la correspondiente ecuación es.

$$\sigma_a = AN_f^B \quad (1.6)$$

Esta segunda ecuación se usa frecuentemente en una forma diferente.

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (1.7)$$

Las constantes de ajuste para las dos formas están relacionadas por:

$$A = 2^b \sigma_f', \quad B = b \quad (1.8)$$

Las constantes para las ecuaciones 1.6 y 1.7 están dadas en la siguiente Tabla 1.1 [9]

Los valores de S se toman normalmente como amplitudes de tensión; en algunas ocasiones se utilizan los valores de $\sigma_{máx}$ o de $\sigma_{mín}$.

TABLA 1.1 Constantes de las curvas S-N de varios metales dúctiles de ingeniería para pruebas con esfuerzo medio cero en especímenes axiales sin muesca

Material	Yield Strength	Ultimate Strength	True Fracture Strength	$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = AN_f^B$		
	σ_o	σ_u	$\tilde{\sigma}_{fB}$	σ'_f	A	$b = B$
<i>(a) Steels</i>						
AISI 1015 (normalized)	227 (33)	415 (60.2)	725 (105)	976 (142)	886 (128)	-0.14
Man-Ten (hot rolled)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	1089 (158)	1006 (146)	-0.115
RQC-100 (roller Q & T)	683 (99.0)	758 (110)	1186 (172)	938 (136)	897 (131)	-0.0648
AISI 4142 (Q & T, 450 HB)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (290)	1937 (281)	1837 (266)	-0.0762
AISI 4340 (aircraft quality)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	1758 (255)	1643 (238)	-0.0977
<i>(b) Other Metals</i>						
2024-T4 Al	303 (44.0)	476 (69.0)	631 (91.5)	900 (131)	839 (122)	-0.102
Ti-6Al-4V (solution treated and aged)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	2030 (295)	1889 (274)	-0.104

Se observan dos tipos de curvas $S-N$, los cuales están representados esquemáticamente en las figuras 1.3 (a) y (b). Tal como se indica en estos diagramas, cuanto mayor es la magnitud de la tensión, menor es el número de ciclos que el material es capaz de resistir antes de romperse. En algunas aleaciones férreas y en aleaciones de titanio, la curva $S-N$ Figura 1.3 (a) se hace horizontal para los valores grandes de N ; o sea, existe una tensión límite, denominada Límite de fatiga (resistencia a la fatiga), por debajo del cual la rotura por fatiga no ocurrirá. Este límite de fatiga representa el mayor valor de la tensión fluctuante que no producirá la fractura en un número infinito de ciclos. En muchos aceros, los límites de fatiga están comprendidos entre el 35 y el 60% de la resistencia a la tracción.

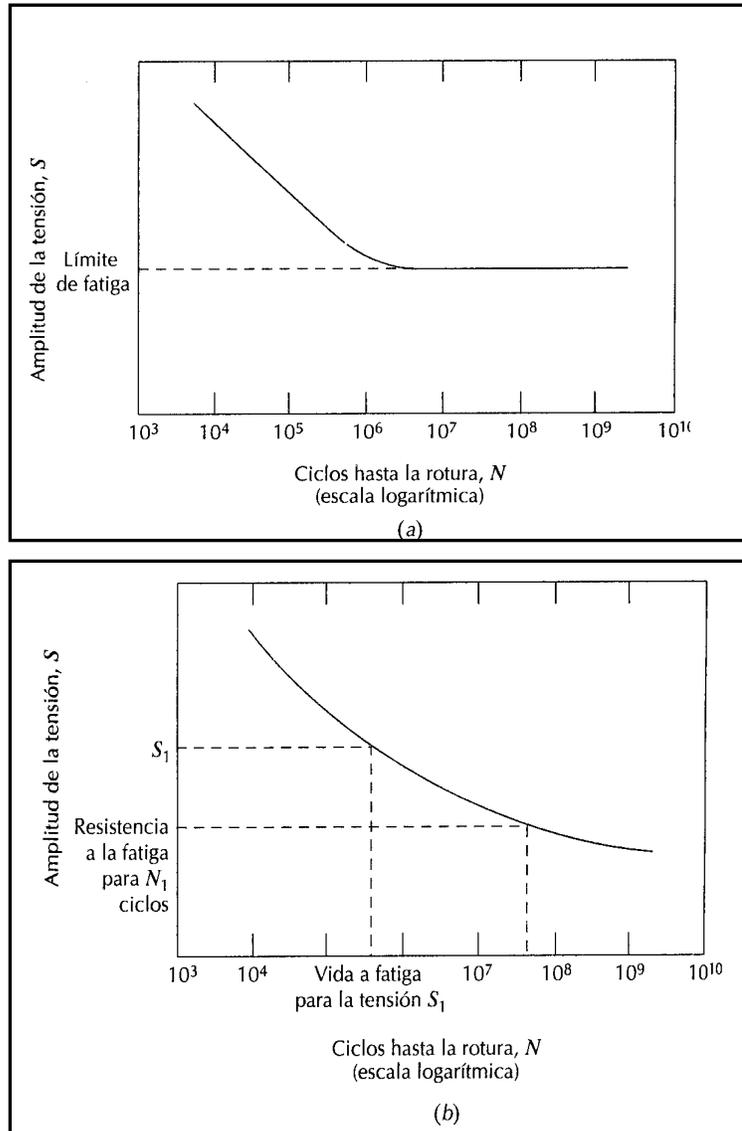


Figura 1.3 Amplitud de tensión S frente a logaritmo del número de ciclos hasta la fractura por fatiga N (a) un material que presenta un límite de fatiga, y (b) un material que no presenta un límite de fatiga.

Muchas de las aleaciones no férreas (por ejemplo, aluminio, cobre, magnesio) no tienen un límite de fatiga, en el sentido de que la curva $S-N$ continúa decreciendo al aumentar N Figura 1.3 (b) [11]. Por consiguiente, la rotura por fatiga ocurrirá independiente de la magnitud de la tensión máxima aplicada. Para estos materiales, la respuesta fatiga se especifica mediante la resistencia a fatiga que se define como el nivel de tensión que produce la rotura después de un determinado número de ciclos (por ejemplo 10^7 ciclos). La determinación de la resistencia a la fatiga se muestra en la Figura 1.3 (b).

Otro parámetro importante que caracteriza el comportamiento a fatiga de un material es la vida a fatiga N_f . Es el número de ciclos para producir la rotura a un nivel especificado de tensiones tal como está indicado en el diagrama $S-N$ figura 1.3 (b).

1.3 Etapas de la fatiga

La fatiga puede ser dividida en tres etapas, las cuales son perfectamente distinguibles. Las etapas de fatiga son:

Etapa I, Nucleación de grietas.- También es llamada etapa de “daño interno” y se presenta en ausencia de concentradores de esfuerzos. En esta etapa la deformación cíclica produce una alteración de la subestructura de dislocaciones que conduce a la formación de discontinuidades geométricas que posteriormente se desarrollarán como grietas. La extensión de esta etapa depende de la amplitud de esfuerzos.

Etapa II, propagación de grietas.- Para la mayoría de los casos reales, la fatiga transcurre como la propagación de una grieta estable en el material, ya sea por la presencia de concentradores de esfuerzos o porque la Nucleación de grietas es acelerada por algún medio. En esta etapa la fractura ocurre por un mecanismo particular asociado con la deformación cíclica de la punta de la grieta, mientras que la deformación del resto de la pieza puede ser elástica. Esta situación es la que permite la aplicación de la mecánica de fractura lineal elástica para el análisis y predicción de la vida en fatiga de componentes reales.

Etapa III, fractura final.- Cuando la grieta está próxima a alcanzar su tamaño crítico, la fractura comienza a ocurrir por una combinación de fatiga (o sea deformación cíclica en la punta de la grieta) y formas de fractura estática, como la fractura por clivaje o por coalescencia de huecos. En esta etapa la falla es

controlada por la tenacidad a la fractura del material y con gran influencia de la microestructura y del estado de esfuerzos.

Los factores principales que influyen en la fatiga son:

1. Concentración de esfuerzos (Geometría)
2. Estado de esfuerzos y deformaciones
3. Tamaño
4. Microestructura
5. Propiedades mecánicas (dureza, tensión, tenacidad a la fractura)
6. Temperatura
7. Ambiente
8. Esfuerzos residuales
9. Combinación de esfuerzos(carga multiaxial)
10. Acabado superficial.

1.4 Fractura por fatiga

La fatiga es fácilmente identificable en una pieza ya fracturada, por la apariencia de la superficie fracturada. El siguiente esquema (Figura 1.4) muestra al aspecto típico de una fractura por fatiga [4]

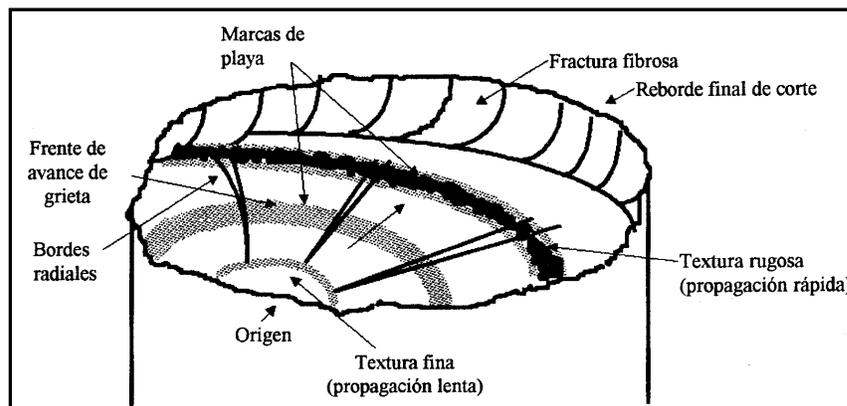


Figura 1.4 Superficie de fractura por fatiga

La superficie de fractura puede ser dividida en tres zonas:

1. **Zona de inicio.**- Las superficies de fractura por fatiga en su etapa de inicio no presentan rasgos sobresalientes, siendo éstas superficies lisas, planas, brillantes y con muy pocas líneas, pudiendo notarse pequeños escalones en la zona de iniciación debido a la nucleación de varias grietas simultáneamente. Usualmente el límite de la zona de iniciación está bien definido de frente de propagación.

2. **Zona de propagación estable.**- Es una superficie relativamente plana, orientada perpendicularmente a la dirección del esfuerzo principal máximo, brillante u opaca según en medio en que se encontrara la pieza. La principal característica de esta superficie es la presencia de marcas paralelas en formas de ondas o surcos paralelos entre sí, conocidos como marcas de una playa. Estas marcas son formadas por el frente de propagación de la grieta, cuando éste sufre alguna alteración por variación de la amplitud de la carga, detención temporal, o cambio del ambiente y por lo mismo son muy valiosas en el análisis de fallas, para reconstruir la secuencia de la falla. La segunda característica sobresaliente de esta superficie son una serie de escalones o bordes radiales, paralelos a la dirección de propagación de la grieta y que se forma cuando la grieta se propaga en niveles ligeramente diferentes.

3. **Zona de fractura final.**- Cuando la grieta está próxima a alcanzar su tamaño crítico, la alta concentración de esfuerzos provoca una transición a la fractura por corte y la de superficie fractura se hace más rugosa y comienza a inclinarse hasta un ángulo cercano a los 45° , formando un labio de la zona de desprendimiento final, puede presentarse una severa deformación e incluso un cuello en esta zona.

1.5 Fatiga en ciclos bajos

Los comportamientos a fatiga mostrados en las Figuras 1.3 (a) y (b) pueden ser clasificados en dos dominios. Uno está asociado a cargas relativamente grandes que no sólo producen deformaciones elásticas sino también alguna deformación plástica en cada ciclo. Por consiguiente, las vidas a fatiga son relativamente cortas; este dominio se denomina fatiga de bajo número de ciclos (oligofatiga) [11]

1.6 Crecimiento de grietas por fatiga

La presencia de una grieta puede reducir significativamente la resistencia de un componente ingenieril provocando la fractura frágil. La situación más común se presenta como una pequeña imperfección, en la cual dentro de ella se desarrolla una grieta, que crece hasta alcanzar su tamaño crítico y provocar la fractura frágil [9].

El crecimiento de la grieta puede ser causado por cargas cíclicas, debido a un comportamiento llamado crecimiento de grieta por fatiga. Sin embargo si un ambiente químico hostil está presente, una carga estable puede provocar un crecimiento de grieta por ambiente hostil. Ambos crecimientos de grietas pueden ocurrir si cargas cíclicas son aplicadas en presencia de un ambiente hostil, especialmente si los ciclos son lentos o existen periodos en los que la carga permanece estable interrumpiendo el ciclo.

El análisis de crecimiento de grieta puede ser obtenido usando el concepto de factor de intensidad de esfuerzos, K , de mecánica de fractura. K cuantifica la severidad de la combinación de longitud de grieta, cargas y geometría existente, donde esta se expresa como:

$$K = FS\sqrt{\pi a} \quad (1.9)$$

Donde a = longitud de la grieta, S = Esfuerzo nominal, el cual es usualmente definido en base al área del elemento sin muesca y F = función adimensional de geometría, el valor de F es afectado por la longitud relativa de la grieta, $\alpha = a/b$, b es la dimensión del ancho del miembro tal que si $\alpha = 1$ el miembro esta completamente agrietado.

La tasa de crecimiento por fatiga es controlada por F . Por lo tanto bajo amplitudes de carga cíclica constante, la dependencia de K sobre a y F provocan un acelerado crecimiento en las grietas. A continuación es mostrada en la Figura 1.5, la variación de la longitud de la grieta conforme crece el número de ciclos:

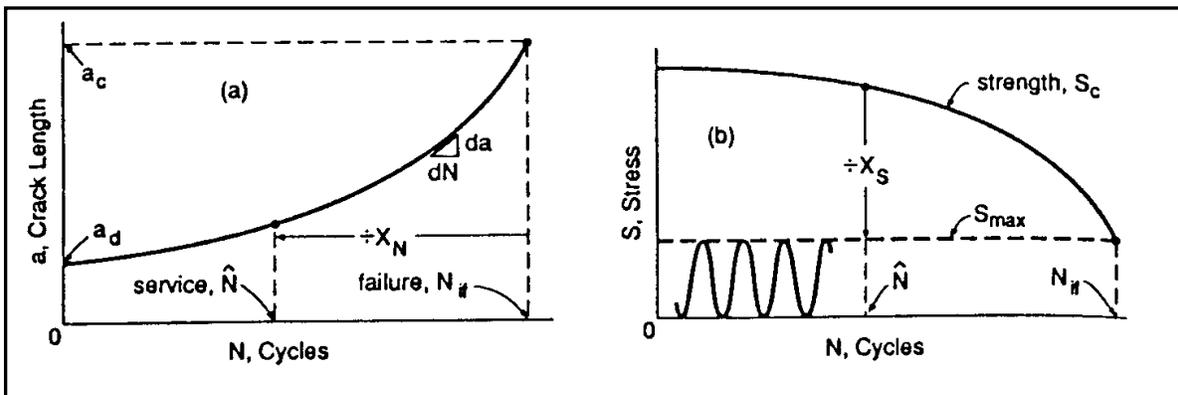


Figura 1.5 Crecimiento de grieta en el peor de casos para una longitud mínima detectable a_d para la falla (a) y la variación resultando en el peor de los casos la resistencia (b).

1.6.1 Lo necesario para el análisis de crecimiento de grieta

Durante una inspección cuidadosa de componentes ingenieriles, seguido es revelada la presencia de grietas. La probable presencia de grietas en los componentes sugiere fuertemente que sea realizado un análisis basado en mecánica de fractura. En el peor de los casos la grieta de longitud inicial a_d

crece hasta alcanzar una longitud crítica a_c , después de N_{if} ciclos de carga, ocurriendo con ello la fractura frágil.

El factor de seguridad con respecto a la vida de un componente es el siguiente:

$$X_N = \frac{N_{if}}{N} \quad (1.10)$$

Donde N = Número de ciclos esperados en servicio actual.

La resistencia crítica para fractura frágil de un miembro esta determinada por la longitud actual de grieta y la tenacidad de la fractura K_c para el material y espesor envueltos.

$$S_c = \frac{K_c}{F \sqrt{\pi a}} \quad (1.11)$$

En el peor de los casos, durante el crecimiento de la grieta, la longitud aumenta, causando a la vez que la resistencia crítica disminuya, la falla ocurre cuando S_c alcanza el valor de $S_{máx}$, este es el valor máximo del esfuerzo aplicado en el actual servicio. Esto es ilustrado en la Figura 1.16 (b)

El factor de seguridad de esfuerzo contra fractura frágil repentina es el siguiente:

$$X_c = \frac{S_c}{S_{max}} \quad (1.12)$$

Tal factor de seguridad es necesario en adición a X_n debido a un inesperado crecimiento de carga, la cual puede exceder la carga cíclica normal. Dentro del esperado servicio de vida actual X_c decrece asta un valor mínimo obtenido al final del servicio de vida.

Algunas veces ocurre que la combinación de una longitud de grieta mínima detectada a_d y un esfuerzo cíclico para el cual el margen de seguridad fue expresado por X_n y X_c , es insuficiente. La predicción de la falla antes de que

sea alcanzado el servicio de vida actual, $X_N < 1$, podría ser el caso. Es por ello que deben realizarse inspecciones periódicas, para localizar una o varias grietas de longitud igual o mayor a a_d y al hacerlo se deben reparar o según el caso reemplazar la parte. Lo anterior asegura que después de cada inspección no existan grietas en el componente iguales o mayores a a_d . Asumiendo que las inspecciones son realizadas a cada N_p ciclo, la longitud de la grieta en el peor de los casos aumenta entre cada inspección variado como lo muestra en la siguiente Figura 1.6:

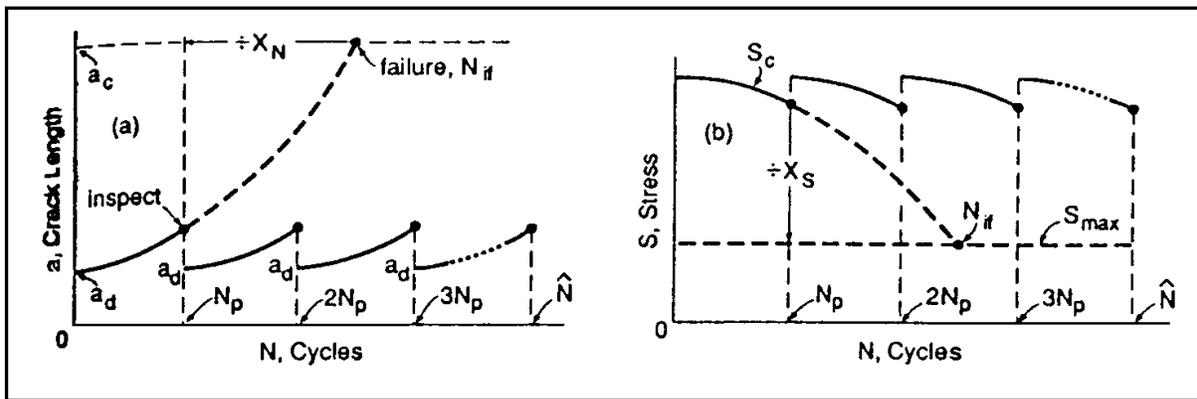


Figura 1.6 Variación de la longitud en el peor de los casos (a) y resistencia en (b) Donde las inspecciones son requeridas periódicamente.

Por lo tanto el factor de seguridad de vida es determinado por la inspección, y está dado por:

$$X_N = \frac{N_{if}}{N_p} \quad (1.13)$$

Después de cada inspección en el peor de los casos la resistencia del componente aumenta como es mostrado en la Figura 1.17 (b). El análisis basado sobre fractura mecánica permite las variaciones de longitud de grieta así como de resistencia estimados, tal que los factores de seguridad puedan ser evaluados. Cuando las inspecciones son necesarias, el análisis por mecánica de fractura permite una inspección segura.

En adición a las aplicaciones de diseño, el análisis de crecimiento de grieta durante la vida de un componente, es usado en ocasiones donde una grieta inesperada ha sido encontrada en un componente de una máquina, vehículo o estructura. La vida restante puede ser calculada para determinar si la grieta puede ser ignorada, reparada o la parte debe ser remplazada inmediatamente o a la vez si esto puede ser pospuesto a una fecha mas conveniente. Una situación similar ha sido llevada a cabo en unidades de turbina generador de plantas eléctricas, donde la fractura o daño de un componente de acero podría causar la perdida de electricidad así como de millones de dólares.

1.6.2 Definiciones de crecimiento de grieta

Considerar un crecimiento de grieta que incrementa la longitud por una cantidad Δa durante la aplicación de un número de ciclos ΔN . La tasa de crecimiento con respecto a los ciclos puede ser caracterizada con la relación $\Delta a / \Delta N$, o por intervalos pequeños como da/dN . La tasa de crecimiento de grieta por fatiga, es la pendiente sobre un punto de una curva a contra N .

Asumiendo que las cargas aplicadas son cíclicas con valores constantes de carga $P_{m\acute{a}x}$ y $P_{m\acute{i}n}$ y por lo tanto valores constantes de esfuerzo nominal de $S_{m\acute{a}x}$ y $S_{m\acute{i}n}$. Para el crecimiento de grieta por fatiga es común el uso del rango y relación de esfuerzos:

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min} \qquad R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \qquad (1.14)$$

La variable primaria que afecta la taza de crecimiento de una grieta es el rango del factor de intensidad de esfuerzo, el cual es calculado del rango de esfuerzos como sigue:

$$\Delta K = F \Delta S \sqrt{\pi a} \qquad (1.15)$$

El valor de F depende solamente de la geometría y de la longitud de grieta relativa $\alpha = a/b$ como si la carga fuera no cíclica, el máximo y mínimo rango de K y la relación de R esta dada por:

$$K_{\max} = FS_{\max} \sqrt{\pi a} , \quad K_{\min} = FS_{\min} \sqrt{\pi a} \quad (1.16)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} , \quad R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$

A la vez puede ser importante para especímenes de prueba de laboratorio, el utilizar la expresión alternante de K en términos de la carga aplicada P :

$$\Delta K = F_p \frac{\Delta P}{t \sqrt{b}} , \quad R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (1.17)$$

1.6.3 Descripción del comportamiento del crecimiento de grieta de los materiales

Para un material y condiciones de prueba dados, el comportamiento del crecimiento de la grieta puede ser descrito por la relación entre la tasa de crecimiento de grieta cíclico da/dN y el rango del factor de intensidad de esfuerzos ΔK . Los datos de prueba y curva aptos para un material son mostrados en grafico log – log en la Figura 1.7.

Para los valores intermedios de ΔK , seguido se observa una línea recta sobre el grafico $\log -\log$, como es el caso de la figura, la ecuación que representa esta línea es la siguiente:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.18)$$

Donde C es una constante y m es la pendiente sobre el grafico log – log, asumiendo en el transcurso que las décimas sobre ambas escalas logarítmicas tienen la misma longitud.

Discusión: Si deseamos obtener C y m de una manera exacta, se deberán consultar los valores de los puntos, se realiza un ajuste empleando mínimos cuadrados en el gráfico log-log, donde se obtiene una línea recta de la forma:

$$y = mx + b \quad (1.19)$$

Tomando logaritmos en ambos lados de la ecuación 1.18 da:

$$y = \log \frac{da}{dN}, \quad x = \log(\Delta K), \quad m = m, \quad b = \log C \quad (1.20)$$

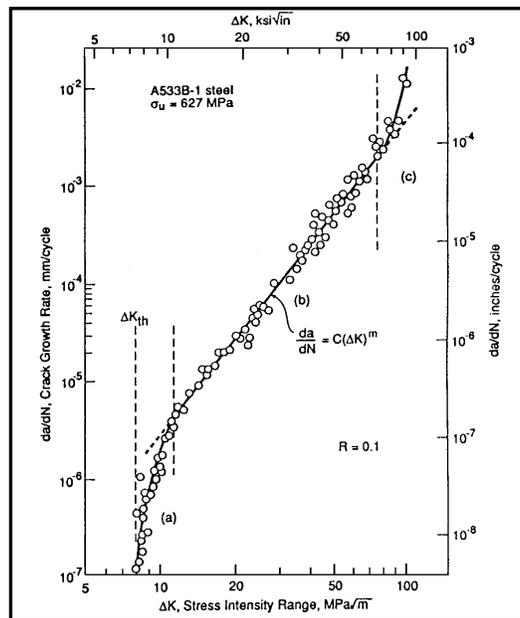


Figura 1.7 Razón de crecimiento de grieta cubriendo un amplio rango de intensidades de esfuerzos para un acero dúctil de un recipiente a presión [9]

Esta ecuación fue identificada por *P.C. Paris* y a la vez fue de influencia en la primera aplicación de la mecánica de fractura sobre fatiga alrededor de los 60's.

Para bajas tasas de crecimiento, la curva generalmente comienza empinada y se acerca a una vertical asintótica llamada ΔK_{th} , la cual es llamada umbral del crecimiento de grieta por fatiga. Esta cantidad es interpretada como el valor

límite mas bajo de ΔK para el cual el crecimiento no ocurre ordinariamente. Para altas tasas de crecimiento la curva puede empezar a empinarse, esto es debido al inestable crecimiento de la grieta, justo antes de la falla final del espécimen de prueba. Tal comportamiento puede ocurrir donde la zona plástica es pequeña, en tal caso la curva asintótica se aproxima a la tenacidad a la fractura K_c para el material y espesor de interés. El crecimiento de la grieta rápido e inestable a altas ΔK algunas veces envuelve cedencia plástica completamente.

El valor de relación de esfuerzos afecta la tasa de crecimiento. Para un ΔK dado, incrementando R incrementa la tasa de crecimiento y viceversa, la figura 1.8 muestra algunos datos los cuales demuestran esto.

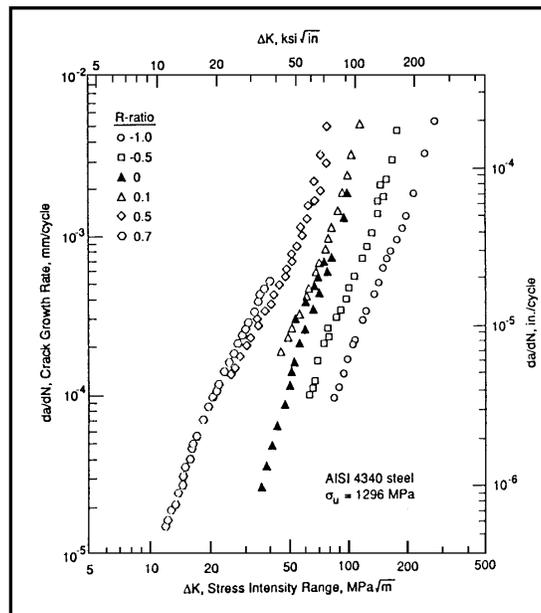


Figura 1.8 Efecto de la relación de R sobre la razón de crecimiento de grieta para un acero aleado. Par $R < 0$, la porción de compresión del ciclo de carga es incluido en el calculo de ΔK [9]

Primero es empleada una conveniente geometría del espécimen de prueba, para cada uno de los diferentes niveles de carga, tal que sean obtenidos en un amplio rango de tasas de crecimiento por fatiga. Las tasas de crecimiento son evaluadas y graficadas contra ΔK , obteniendo con ello la curva

da/dN contra ΔK , esta curva puede ser usada posteriormente en una aplicación ingenieril, con valores de ΔK calculados apropiadamente para una geometría de interés. La curva longitud de grieta contra número de ciclos para una longitud de grieta inicial puede ser predicha para el componente, tomando las estimaciones de vida y la determinación de los factores de seguridad y los intervalos de inspección como fue discutido anteriormente.

1.7 Método de prueba y análisis de datos

El método estándar para llevar a cabo la prueba de crecimiento de grieta por fatiga esta desarrollada en ASTM E 647 [5].

En una prueba típica es aplicada una carga cíclica de amplitud constante a un espécimen de prueba. Antes de comenzar la prueba es necesario hacer un preagrietamiento. Esto es realizado en principio maquinando una muesca fina en el espécimen y después comenzando a agrietar por medio de un ciclo de carga de bajo nivel. Posteriormente la carga es aplicada al más alto nivel para el resto de la prueba. El progreso de la grieta es grabado en términos del número de ciclos requeridos para alcanzar de diez a veinte o más diferentes valores de longitud de grieta, estos son del orden de un 1mm de distancia para un espécimen con tamaño $b = 50\text{mm}$. Los resultados de longitud de grieta pueden ser graficados como puntos discretos contra el correspondiente número de ciclos como se muestra en siguiente Figura 1.9

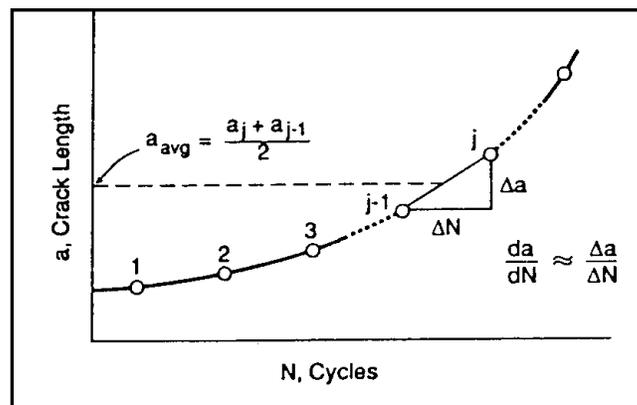


Figura 1.9 Razón de crecimiento de grieta para obtener puntos pares adyacentes de a vs N

Para medir estas longitudes de grieta, una aproximación utilizada es simplemente notar por observación visual, a través de un microscopio de bajo poder (de 20 a 50X), cuando la grieta alcanza varias longitudes las cuales han sido marcadas previamente sobre los especímenes. Métodos sofisticados pueden ser usados para medir la longitud de la grieta, por ejemplo en el crecimiento de la grieta, la deflexión del espécimen incrementa, resultando con ello un decrecimiento en la rigidez.

El cambio de la rigidez puede ser medido y usado para calcular la longitud de la grieta. Otra aproximación es la de pasar una corriente eléctrica a través del espécimen, midiendo cambios en el campo de voltaje durante el crecimiento de la grieta, se puede obtener la longitud de la grieta. Las ondas ultrasónicas pueden ser también reflejadas de la grieta y usadas para medir este progreso.

Para obtener tasas de crecimiento de la longitud de la grieta contra número de ciclos una simple y generalmente conveniente aproximación es la de calcular las pendientes entre los puntos de los datos como lo muestra la figura anterior, si los datos de los puntos son numerados como 1, 2, 3, 4... j, entonces la tasa de crecimiento para el segmento final para el punto j es:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_j \approx \left(\frac{\Delta a}{\Delta N}\right) = \frac{a_j - a_{j-1}}{N_j - N_{j-1}} \quad (1.21)$$

El correspondiente ΔK es calculado del promedio de la longitud de la grieta en el intervalo.

$$\Delta K_j = F\Delta S\sqrt{\pi a_{avg}} \quad , \quad \Delta K_j = F_p \frac{\Delta P}{t\sqrt{b}} \quad (1.22)$$

Donde:

$$alfa_{avg} = \frac{a_{avg}}{b} = \frac{a_j - a_{j-1}}{2b} \quad (1.23)$$

Este procedimiento es valido solamente si la longitud de grieta es medida a intervalos equivalentemente pequeños. De lo contrario, la tasa de crecimiento y K pueden diferir mucho entre observaciones adyacentes.

1.7.1 Variables de prueba

Las pruebas de crecimiento de grieta son comúnmente conducidas usando cero- a tensión $R=0$, o tensión – tensión cargando con un pequeño valor de R , tal como $R=0.1$. Variaciones de R en el rango de 0 a 0.2 tiene un efecto pequeño materiales, y las pruebas en este rango son aceptadas por convención en la norma por la comparación de varios efectos en materiales, medio ambiente etc. Esto es usualmente necesario al ensayar diferentes especimenes a diferentes niveles de carga para obtener datos que cubran un amplio rango de razón de crecimiento. Dichos resultados para un acero son mostrados en las Figuras 1.10 y 1.11

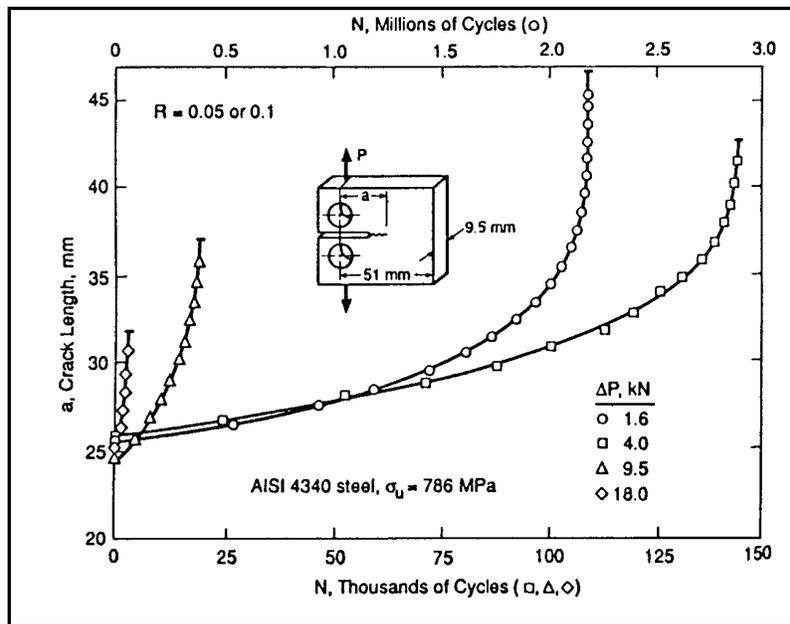


Figura 1.10 Longitud de grieta contra numero de ciclos de diferente amplitud de carga cíclica para probetas compactas para un acero aleado [9].

Un amplio rango de variables posibles la razón de crecimiento de grietas por fatiga en un material, dado que las condiciones de prueba son seleccionadas para incluir situaciones que asemejen el servicio anticipado usando por el

material. Algunas de estas variables son: temperatura, frecuencia de la carga cíclica, y medios hostiles químicos.

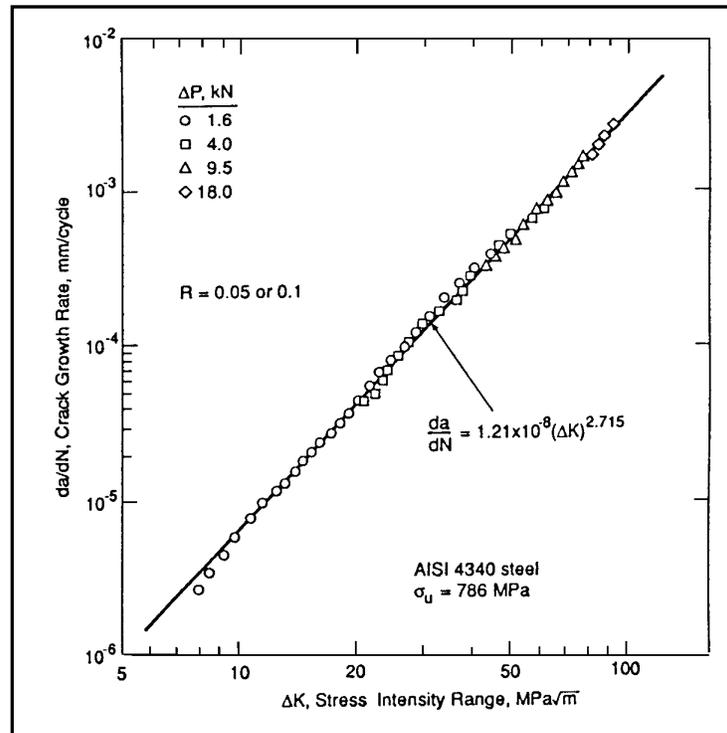


Figura 1.11 Valores y ajuste con mínimos cuadrados por medio de una línea para da/dN vs ΔK de los datos de a vs N de la figura 1.21 [9]

1.7.2 Estimación de la vida para amplitud de carga constante

Dado que ΔK incrementa con la longitud durante la amplitud del esfuerzo ΔS constante y puesto que la razón de la longitud de grieta da/dN depende de ΔK , la razón de crecimiento no es constante, pero se incrementa con la longitud de grieta. En otras palabras la grieta se acelera con forme crece Figura 1.22.

Esta situación de cambio da/dN necesita el uso de un procedimiento de integración para obtener la vida requerida por el crecimiento de grieta. La razón de crecimiento de grieta da/dN para una combinación de material y la relación R son dadas como función de ΔK en una forma general:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (1.24)$$

Donde algunos efectos como el medio ambiente, frecuencia, etc. Son asumidos o incluidos como constantes del material. La vida cíclica del material requerida para crecimiento de grieta puede ser calculada resolviendo esta ecuación para dN e integrando en ambos lados

$$\int_{N_i}^{N_f} dN = N_f - N_i = N_{if} = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (1.25)$$

Esta integral da el número de ciclos requeridos para la grieta acrecer desde un tamaño inicial a_i en un numero de ciclos N_i a un tamaño final a_f a un número de ciclos N_f . Nota $N_{if} = N_f - N_i$.

La inversa de la razón de crecimiento, da/dN , es la razón de acumulación de ciclos, N , por unidad del incremento de la longitud de la grieta a . De la ecuación 1.24 resulta lo siguiente:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{da/dN} = \frac{1}{f(\Delta K, R)} \quad (1.26)$$

Note que la ecuación 1.25 también puede escribirse como:

$$N_{if} = \int_{a_i}^{a_f} \left(\frac{dN}{da} \right) da \quad (1.27)$$

Existe una solución de forma cerrada, considerando que la razón de crecimiento esta dada por la ecuación 1.18 y donde $F = F(a/b)$

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) = C(\Delta K)^m, \quad \Delta K = F \Delta S \sqrt{\pi a} \quad (1.28)$$

Sustituyendo $f(\Delta K, R)$ en la ecuación 1.27 tenemos:

$$N_{if} = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(F\Delta S\sqrt{\pi a})^m} = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(F\Delta S\sqrt{\pi})^m} \frac{da}{a^{m/2}} \quad (1.29)$$

Teniendo en cuenta que $C, m, \Delta S, F$ todas son constantes la única variable es a , y la integración es reducida a:

$$N_{if} = \frac{a_f^{1-m/2} - a_i^{1-m/2}}{C(F\Delta S\sqrt{\pi})^m (1-m/2)} \quad (m \neq 2) \quad (1.30)$$

CAPITULO II

Capítulo II “*Determinación del comportamiento de la aleación 5454H32 en cuanto al crecimiento de grietas por fatiga.*”

2.1 “Propiedades de la aleación de aluminio 5454 H32.”

Para la fabricación de las probetas se utilizó la norma ASTM E-647 donde son planteados los requisitos y dimensiones que estas deben cumplir para llevar a cabo un experimento de forma satisfactoria para estas probetas fue empleada una placa de aluminio aleado 5454 H 32 extraída del fondo de un tanque de combustible. Para poder determinar su composición química fue empleado un espectrómetro de emisión de chispa y el porcentaje de los resultados son mostrados a continuación en la tabla 2.1.

Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Cr %	Ti %	Al %
0.11	0.30	0.06	0.69	2.68	0.054	0.059	0.014	96.033

Tabla 2.1 Composición química.

Propiedades mecánicas (según ASME sección II Parte B S-209).

Limites de la composición química

Si	0.25 % máx.
Fe	0.40 % máx.
Cu	0.10 % máx.
Mn	0.50 – 1.0%
Mg	2.4 – 3.0%
Cr	0.05 – 0.20 %
Zn	0.25% máx.
Ti	0.20 % máx.

Propiedades mecánicas

σ_u	36.0 Ksi min.	248 MPa
	44 Ksi min.	303 MPa

σ_y	26.0 Ksi	179 MPa
------------	----------	---------

Propiedades disponibles del aluminio 5454 se presentan a continuación.

Propiedades de diseño

Esta es una aleación de aluminio y magnesio no tratable térmicamente. Es una aleación con resistencia media que puede ser endurecida por trabajado en frío.

Aplicaciones

Usada comúnmente en la manufactura de estructuras soldadas, recipientes de presión, y en aplicaciones marinas.

Maquinabilidad

La maquinabilidad del aluminio 5454 está entre aceptable y baja. Es mejor hacer las operaciones de mecanizado con la aleación en la condición de endurecimiento H34. Se recomienda el uso de lubricantes, excepto para cortes ligeros que pueden hacerse en seco.

Conformado

Esta aleación posee buenas características de trabajado en frío y en caliente. Puede ser trabajada en frío fácilmente en cualquier estado de revenido o recocido.

Soldadura

Todos los métodos comerciales de soldadura podrán trabajarse satisfactoriamente con la aleación de aluminio 5454. Los procesos de soldadura de tungsteno con gas inerte (TIG) y soldadura metálica con gas inerte, con aluminio 5554 o 5356 como metal de aporte, se trabajan especialmente bien.

Tratamiento térmico

Esta aleación no es tratable térmicamente, excepto para el recocido de alivio de tensiones – ver "Recocido".

Forja

Esta aleación puede ser forjada, aunque no se dispone del rango de temperaturas para el proceso. Consulte al proveedor.

Trabajo en caliente

El trabajo en caliente puede llevarse a cabo en el intervalo de temperaturas de 700 a 400 F.

Trabajo en frío

El trabajo en frío se ejecuta fácilmente con la aleación por métodos convencionales. Puede ser trabajada en frío satisfactoriamente tanto en estado recocido como en cualquiera de los endurecidos H-32, H-34, H-111.

Recocido

El recocido, si es necesario para aliviar tensiones por trabajo en frío, puede hacerse a 650 F, permitiendo un tiempo suficiente para calentamiento de toda la pieza, seguido por enfriamiento al aire.

Envejecimiento

No es aplicable a esta aleación.

Revenido

No aplicable.

Endurecimiento

Endurece sólo por métodos de trabajado en frío.

Otras propiedades físicas

32% de la conductividad eléctrica del cobre.

Otras propiedades mecánicas

La resistencia al cortante varía un poco desde 23 Ksi en estado recocido hasta 26 Ksi en el endurecimiento H34.

Según www.Matweb.com

Physical Properties

Metric

English

Density

2.69 g/cc

0.0972 lb./in³

Mechanical Properties

Hardness, Brinell

73

73

Hardness, Knoop

96

96

Hardness, Vickers

83

83

Ultimate Tensile Strength	<u>276 MPa</u>	40000 psi
Tensile Yield Strength	<u>207 MPa</u>	30000 psi
Elongation at Break	<u>10 %</u>	10 %
Modulus of Elasticity	<u>70.3 GPa</u>	10200 ksi
Ultimate Bearing Strength	<u>496 MPa</u>	71900 psi
Bearing Yield Strength	<u>303 MPa</u>	43900 psi
Poisson's Ratio	0.33	0.33
Fatigue Strength	<u>130 MPa</u>	18900 psi
Shear Modulus	<u>26 GPa</u>	3770 ksi
Shear Strength	<u>165 MPa</u>	24000 psi

Electrical Properties

Electrical Resistivity	<u>5.1e-006 ohm-cm</u>	5.1e-006 ohm-cm
------------------------	------------------------	-----------------

Thermal Properties

CTE, linear 68°F	<u>23.6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$</u>	13.1 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$
CTE, linear 250°C	<u>25.6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$</u>	14.2 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$
Specific Heat Capacity	<u>0.9 J/g·°C</u>	0.215 BTU/lb·°F
Thermal Conductivity	<u>134 W/m·K</u>	930 BTU-in/hr·ft ² ·°F
Melting Point	602 - 646 °C	1115 - 1195 °F
Solidus	<u>602 °C</u>	1115 °F
Liquidus	<u>646 °C</u>	1195 °F

Processing Properties

Annealing Temperature	<u>343 °C</u>	650 °F
Hot-Working Temperature	260 - 510 °C	500 - 950 °F

Tabla 2.2 Propiedades del aluminio 5454

2.2 “Dimensionamiento de la probeta compacta según norma ASTM E647 [2].”

Las probetas fueron elaboradas primeramente por un fresado luego se taladraron dos agujeros y para finalizar se elabora una entalla que debe ser realizada en una electroerosionadora de hilo porque se necesita una gran precisión a la hora de elaborar la grieta debido que de eso depende la calidad del experimento que se llevara ha cabo.

De acuerdo a la norma ASTM E 647 debe cumplirse que:

$$a_n \geq 0.2 \cdot W \quad W_{\min} = 25 \text{ mm}$$

Espesor recomendado

$$\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4}$$

$$h \leq \frac{W}{16}$$

Angulo de fondo de la entalla = 30°

Radio de redondeo de fondo de entalla $\rho \leq 0.25 \text{ mm}$ asumo $\rho = 0.20 \text{ mm}$

Para que los resultados sean validos se requiere que la probeta se comporte elásticamente de forma predominante a todos los valores de carga aplicada por lo que se debe cumplir según epígrafe 7.2 de la norma E 647 [2]:

$$(w - a) \geq \left(\frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{k_{\max}}{\sigma_y} \right)^2$$

w-a = ligamento de la probeta no fracturada

σ_y = Fluencia

Para (w-a) se debe tomar la longitud final de grieta de fatiga.

Asumimos longitud de grieta final 15 mm.

Despejando K_{\max}

$$K_{\max} \leq \sigma_y \sqrt{\frac{(w - a)\pi}{4}}$$

Como K_{\max} se determina según epígrafe 9.3.1 de la norma E 647 [2]

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{W}} * \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} * (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.74\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

Donde: $\alpha = \frac{a}{w}$; valida para $\frac{a}{w} \geq 0.2$

De aquí se puede despejar P_{\max} que garantiza el comportamiento elástico.

Según epígrafe 8.3.1 de la norma E 647 [2] la mínima longitud de pregrieta se determina por el valor mayor que se obtenga por los siguientes tres aspectos 0.1*B; h; 1mm.

Finalmente se mide la pregrieta por ambos lados de probeta con precisión de 0.1mm o 0.002 *W de estos el que mayor valor presente. Si la grieta medida por ambas caras difiere en mas de 0.25B para este caso 1.6mm la operación de preagrietamiento no es aceptada y se rechaza la probeta.

$$0.1B = 0.1 * 6.4 = 0.64 \text{ mm}$$

$$H = 3.1 \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm}$$

Analizando estos resultados se toma que la longitud de pregrieta estará entre los valores de 3.1 y 5 mm.

Condiciones que garantiza un comportamiento elástico

$$K_{\max} \leq \sigma_y \sqrt{\frac{(w-a)\pi}{4}}$$

$$K_{\max} \leq 179 \text{MPa} \sqrt{\frac{(50.8 \text{mm} - 27 \text{mm})\pi}{4}}$$

$$K_{\max} \leq 773.9 \text{MPa} \sqrt{\text{mm}}$$

$$K_{\max} \leq 24.47 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Como

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{w}} * F(\alpha)$$

$$F(\alpha) = \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

$$\alpha = \frac{a}{w} = \frac{27}{50.8} = 0.5315$$

Como $\alpha \geq 0.2$ entonces es valido.

$$F(\alpha) = \frac{2 + 0.5315}{(1 - 0.5315)^{3/2}} (0.886 + 4.64 * (0.5315) - 13.32 * (0.5315)^2 + 14.72(0.5315)^3 - 5.6(0.5315)^4)$$

$$F(\alpha) = \frac{2 + 0.5315}{(1 - 0.5315)^{3/2}} * (1.3526)$$

$$F(\alpha) = 10.6778$$

$$P_{\max} = \frac{K_{\max} * B\sqrt{w}}{F(\alpha)}$$

$$P_{\max} = \frac{773.9 \text{ MPa} \sqrt{\text{mm}} * 6.4 \text{ mm} * \sqrt{50.8 \text{ mm}}}{10.6778} = 3306 \text{ N}$$

Por tanto la carga máxima que garantiza un comportamiento elástico de la probeta es de 3306 N.

Para dimensionar la probeta se siguieron los criterios de la Fig. 1 de la norma E 647 (probeta compacta)

Determinado todos los parámetros se tiene que las condiciones de ensayo de las probetas 1 y 2 son:

Norma utilizada ASTM E 647

$P_{\max}=3050 \text{ N}$ $P_{\min}=390 \text{ N}$ Frecuencia=20 Hz

Longitud de grieta de la probeta 1 = 4 mm

Longitud de grieta de la probeta 2 = 3.7 mm

Probeta compacta

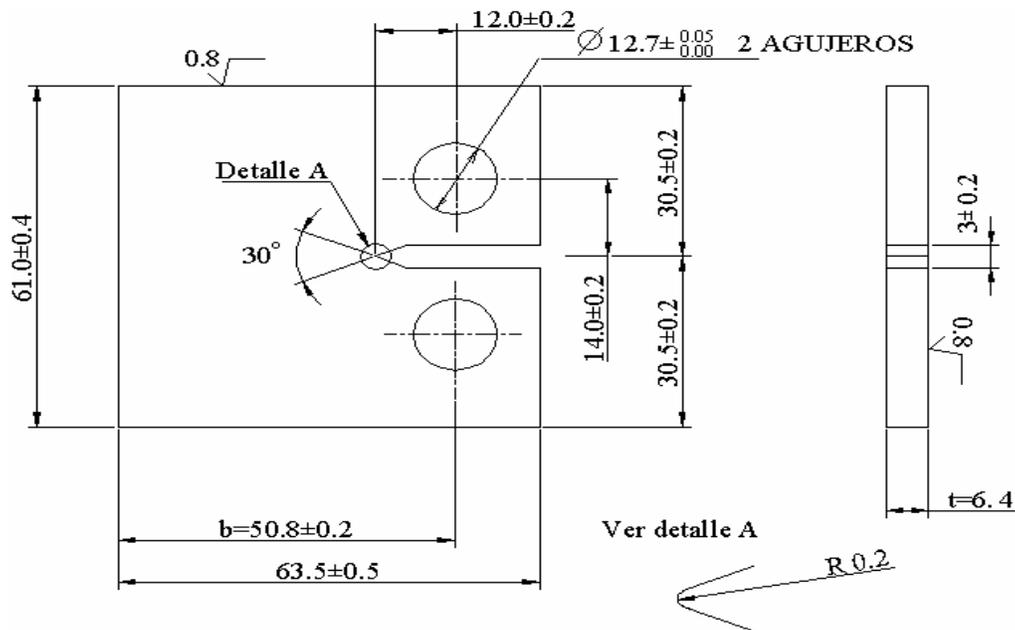


Figura 2.1. Dimensiones de la probeta.

2.3 Procedimiento utilizado en el ensayo.

2.3.1. Equipamiento utilizado en el ensayo.

Para realizar el ensaño fue preciso el empleo de una maquina servo-hidráulica modelo MTS 810 para la realización de ensayos de fractura, del laboratorio de Mecánica de Fractura del Centro de Ingeniería y desarrollo industrial (CIDESI), de Querétaro en México. Ver figura 2.2.

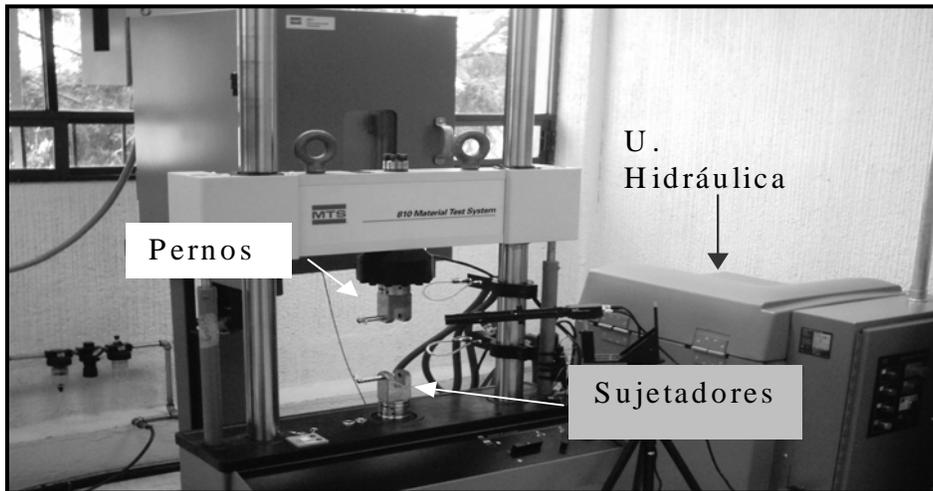


Figura 2.2 Máquina de fatiga MTS 810 servo-hidráulica del Laboratorio de mecánica experimental del CIDESI.

2.3.2 “Obtención de las pregrietas.”

El ensayo normado de crecimiento de grietas a fatiga según la norma ASTM E 647 consiste en primeramente provocar una pregrieta en la probeta con una

longitud, que en este caso debe ser de 3 a 5 mm, posterior a lo que se realiza el ensayo de crecimiento estable de grietas a fatiga. La ejecución del preagrietamiento lo que busca es sacar fuera de los resultados del ensayo la influencia del primer estadio de la fatiga que es el de nucleación de la grieta, de forma que los resultados solo respondan al período de crecimiento estable.

Para la obtención del preagrietamiento se sometió la probeta compacta de dimensiones estándar a una carga cíclica de:

Potencia mínima 390 N

Potencia máxima 3050 N

$R = 0.12$

Frecuencia empleada 20 Hz

Con estos parámetros se genera una pregrieta de 4 mm de longitud para la probeta 1 y de 3.7 mm para la probeta 2.

La longitud de la grieta fue medida con una escala usando un papel milimétrico colocado sobre la probeta, según se muestra en Figura 2.3

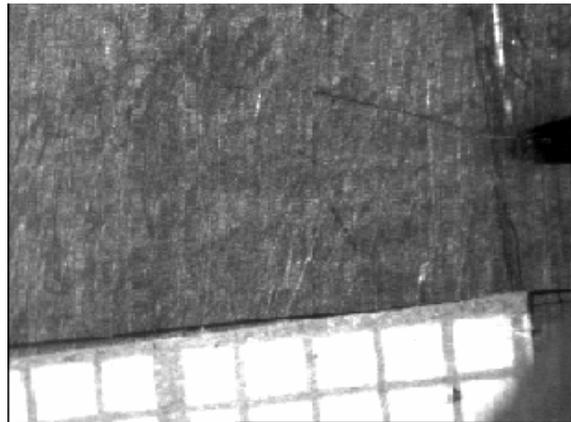


Figura 2.3 Probeta con escala milimétrica.

Se colocó la probeta en los sujetadores como lo muestra en la Figura 2.4 a) y verificando que los pasadores estuvieran colocados en posición correcta. Para evitar que la probeta tuviera juego se colocaron un par de separadores Figura 2.4 b). Posteriormente a la colocación de la probeta se inicio la prueba.

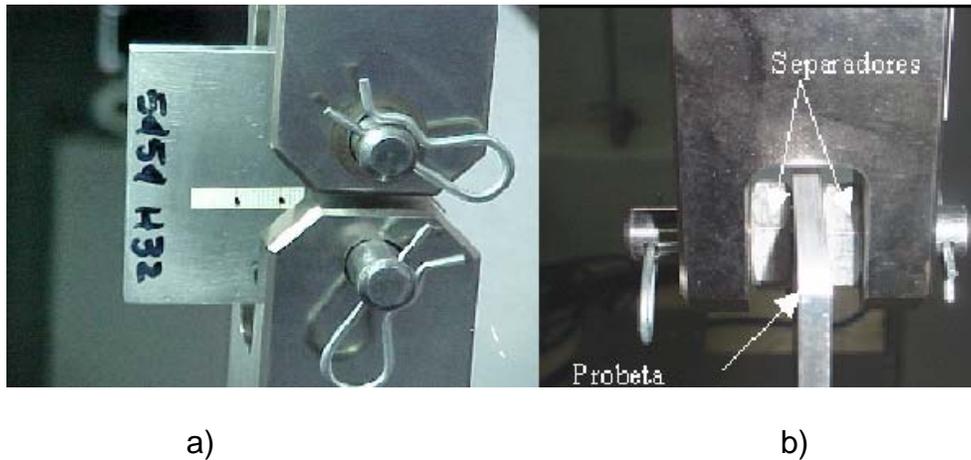


Figura 2.4 a) Probeta colocada en los sujetadores para inicio de pre-grieta.
 b) Se aprecia el perno, los pasadores y la sujeción de la probeta con la ayuda de los separadores

Aplicándole secuencias de 2000 ciclos, registrando el número de ciclo en al inicio de la grieta y en cada milímetro hasta alcanzar los 4 y 3.7 mm; para tener una mejor visión del crecimiento nos auxiliamos con una cámara digital (Figura 2.5)



Figura 2.5 Cámara digital acoplada para obtener una mejor medición

Una vez realizado el preagrietamiento y comprobada la medición en el monitor de la computadora acoplada a la cámara digital como se muestra en la figura 2.6 se comienza a realizar la medición hasta que se alcanzan aproximadamente los 15 mm. A este método se le conoce como óptico (directo); se aplico este método porque se quiere conocer la respuesta del componente debido a la

aplicación de una carga externa este método lo recomienda la norma ASTM E 647.



Figura 2.6 Monitor de la computadora acoplada a la cámara digital

Con los resultados obtenidos se procesan y se obtienen los valores para realizar la curva $\frac{da}{dN}$.

Los datos del número de ciclos serán capturados por cada milímetro de crecimiento de grieta mediante la visualización del contador que nos indica el número de ciclo activo como lo muestra la Figura 2.7

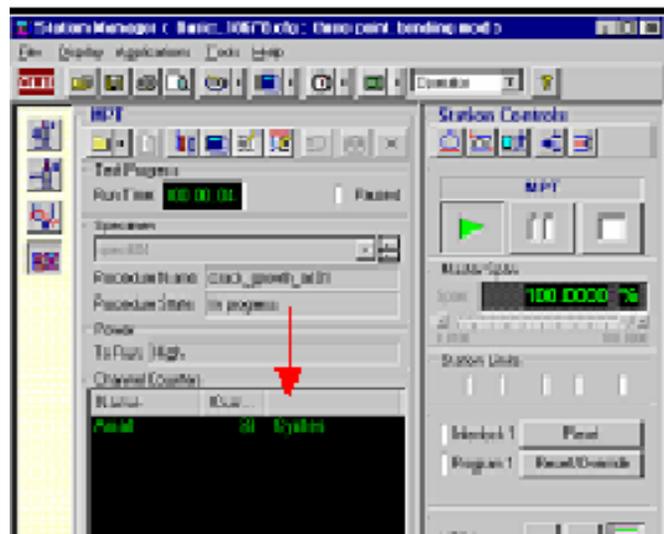


Figura 2.7 Pantalla mostrando el número de ciclo corriente en la prueba de crecimiento de grieta

Para obtener una mejor apreciación del crecimiento de la grieta se emplea una cámara digital (CCD 4.5X) como se aprecia en la Figura 2.8 a). La Figura 2.8 b) muestra una imagen captada con la cámara digital logrando una amplificación visual de la grieta.

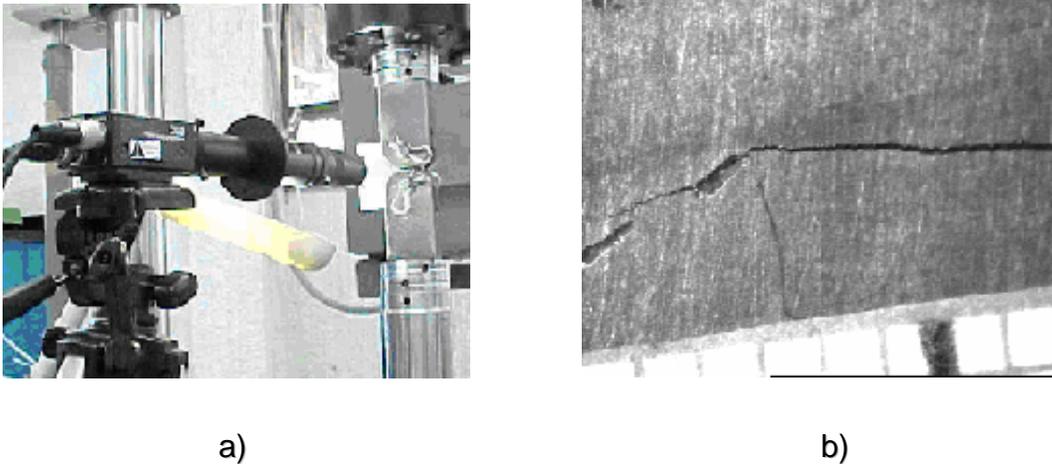


Figura 2.8 Cámara digital

(a) Muestra el montaje de la probeta y la cámara digital para la prueba de crecimiento de grieta y (b) Un acercamiento de la grieta empleando la cámara de video

La relación entre el crecimiento de la grieta y el número de ciclo se calcula mediante la ecuación apéndice x-1 epígrafe x 1.1 método de la secante de la norma E 647 [5].

$$\left(\frac{da}{dN} \right) \cong \left(\frac{\Delta a}{\Delta N} \right) = \frac{a_{j+1} - a_j}{N_{j+1} - N_j}$$

El factor de intensidad de esfuerzos K_{\max} dada la carga externa P fue determinado por la ecuación del epígrafe 9.3.1 de la norma E 647.

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{W}} * \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} * (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.74\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

$$\alpha = \frac{a}{w}$$

En la norma ASTM E 647, el ancho de la probeta se denota como W y el espesor como B .

La Figura 2.9 muestra las etapas de caracterización de una probeta desde que comienza la pregrieta hasta que alcanza la longitud de la prueba de crecimiento de grieta.

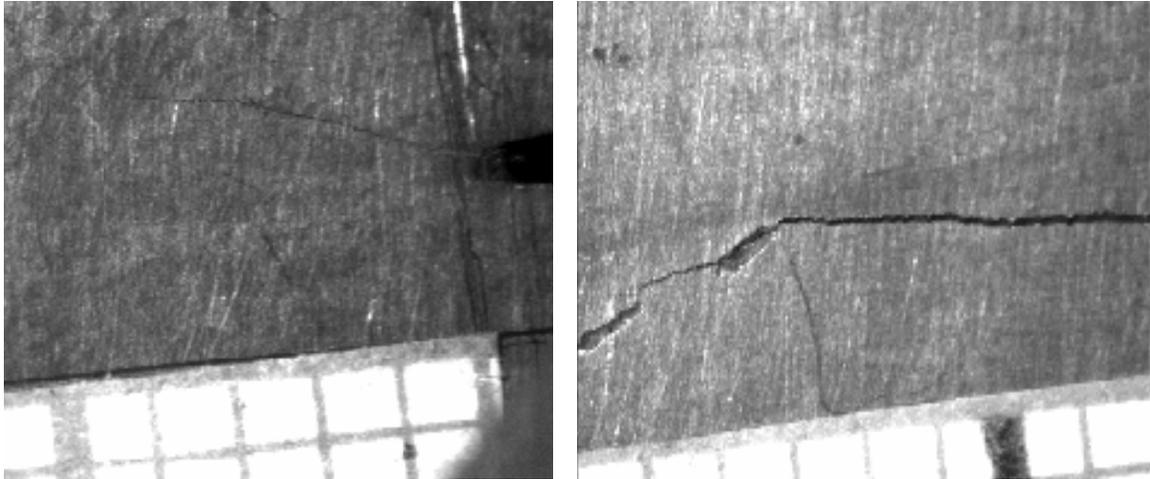


Figura 2.9 a) Probeta con pregrieta de 5mm. b) Probeta con grieta de 15 mm de longitud.

2.3.3 “Configuración del equipo.”

En este apartado, se describe la configuración (SETUP) de la máquina MTS 810 para llevar a cabo las pruebas mencionadas anteriormente. También se mencionan algunas recomendaciones para el buen uso y operación de la máquina, cuidando algunas variables que son esenciales en la obtención de los resultados.

Los pasos para montaje de la probeta son los siguientes:

1. Después de haber energizado los enfriadores, la unidad hidráulica y el controlador, se accede al programa (*Station Maneger>Basic_18678>three point bending mod> function Generator*), se puede apreciar en la pantalla de la Figura 2.10, se activan las bombas de alta presión para poder desplazar el cilindro hasta una altura donde se pueda colocar la probeta.

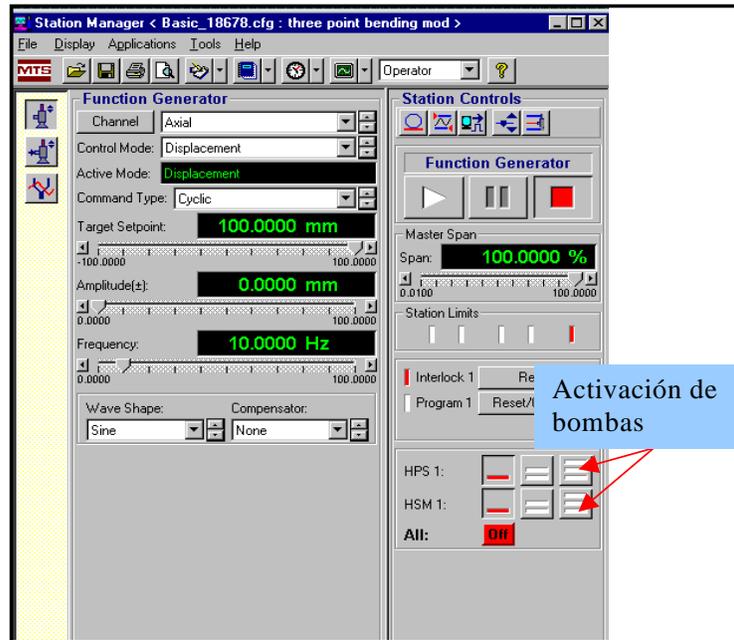


Figura 2.10 Generador de funciones.

El desplazamiento se realiza con el control girando la perilla y seleccionando el modo de desplazamiento activo como lo muestra la Figura 2.11.



Figura 2.11 a) Control alámbrico b) Comando Manual en modo de desplazamiento

2. Después de colocar la probeta (montaje) se accede a (Main menu> Applications> Multipurpose TestWare>MPT) y se activa una pantalla como se muestra en la Figura 2.12. Estando en MPT podemos crear un

procedimiento donde configuraremos, la carga mínima y máxima, la rampa de inicio, la frecuencia, la serie de ciclos.

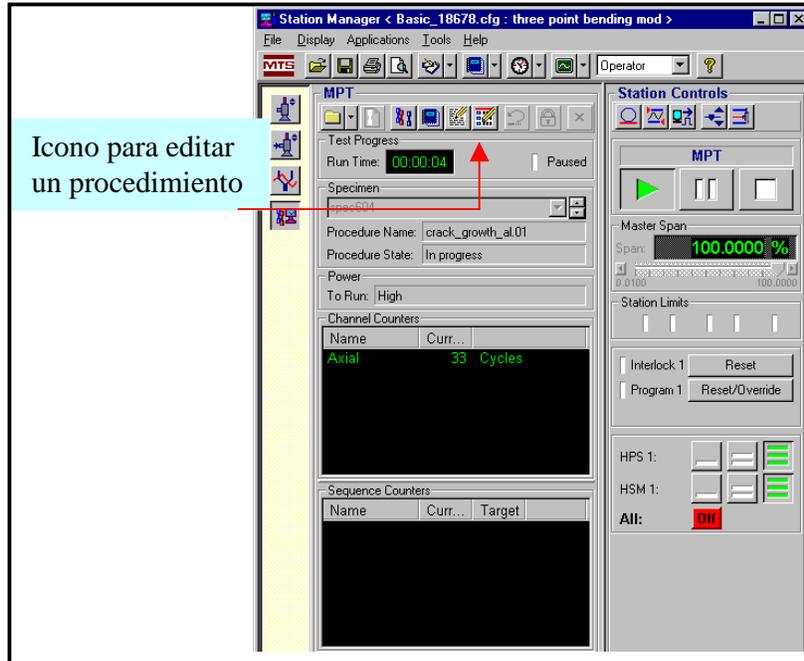


Figura 2.12 MPT para generar el procedimiento de la prueba de fatiga

Para generar un procedimiento se accede a (*Procedure editor>procedure*), se activará una pantalla como se muestra en la Figura 2.13. Se le indica que es uno nuevo y se le asigna un nombre. Primeramente se configura la rampa de inicio y se programa un tiempo de 2 segundos. Posteriormente se suma la carga mínima más la carga máxima y se divide entre dos.

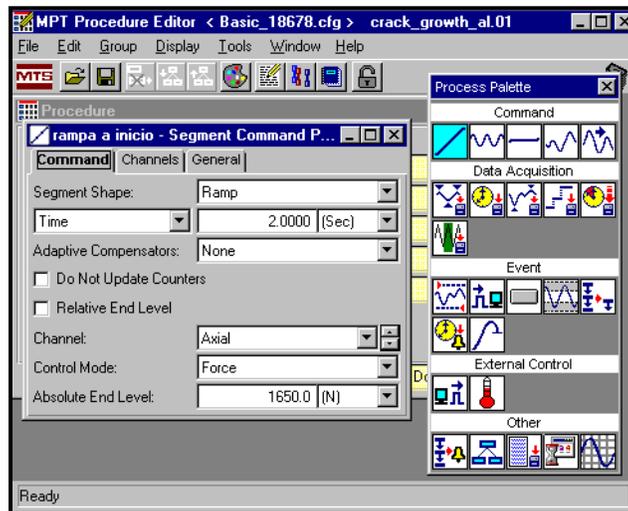


Figura 2.13 Cuadro de dialogo para crear un procedimiento y configurar la rampa de inicio

Para este caso se tiene una $P_{\min} = 390$ y $P_{\max} = 3050$ N, por lo tanto se tiene un nivel medio de carga de 1330N, esto quiere decir que en los primeros dos segundos se va aplicar una carga de 1330N y después va a oscilar entre un carga de 390N y 3050N hasta el número de ciclos que se programen.

Para configurar la frecuencia (20Hz), el número de ciclos (2000ciclos), la carga mínima (390N) y máxima (3050N) se activa la siguiente pantalla Figura 2.14

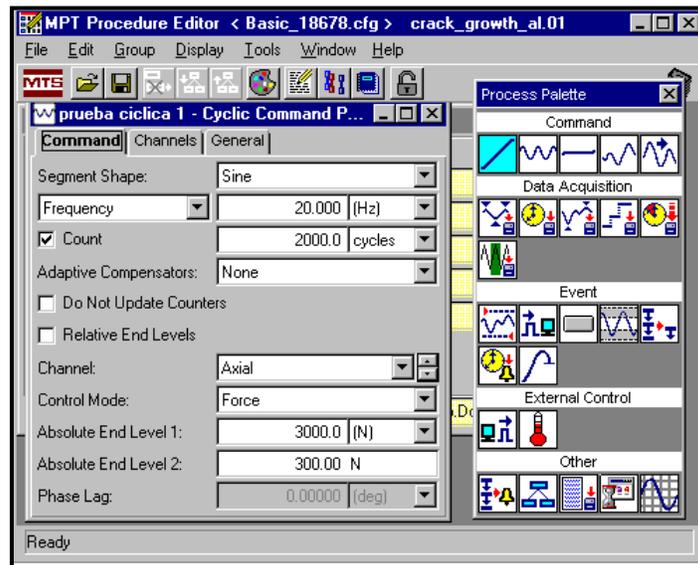


Figura 2.14 Cuadro de dialogo configurar los parámetros de carga, frecuencia y numero de ciclos en la prueba de crecimiento de grieta

Por último la rampa a cero se configura en la siguiente pantalla Figura 2.15 introduciendo el tiempo de dos segundos y 0 N de carga.

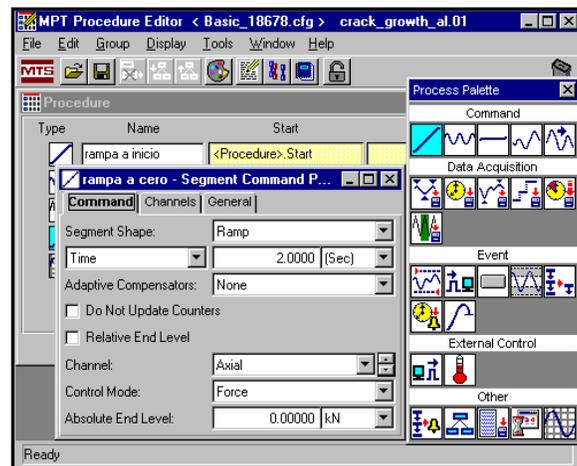


Figura 2.15 Cuadro de diálogo para configurar la rampa a cero en la prueba de crecimiento de grieta

3. Después de haber creado un procedimiento y asignarle un nombre, dentro de MPT se indica que es un nuevo espécimen, el procedimiento creado es abierto y se selecciona en este caso el que tiene el nombre de **crack_growth_al.01**. Posteriormente se activa el modo de fuerza en el control manual y se da inicio la prueba dando un pulso en el icono de *play*. Como lo muestran las siguientes Figuras 2.16 a) y 2.16 b)

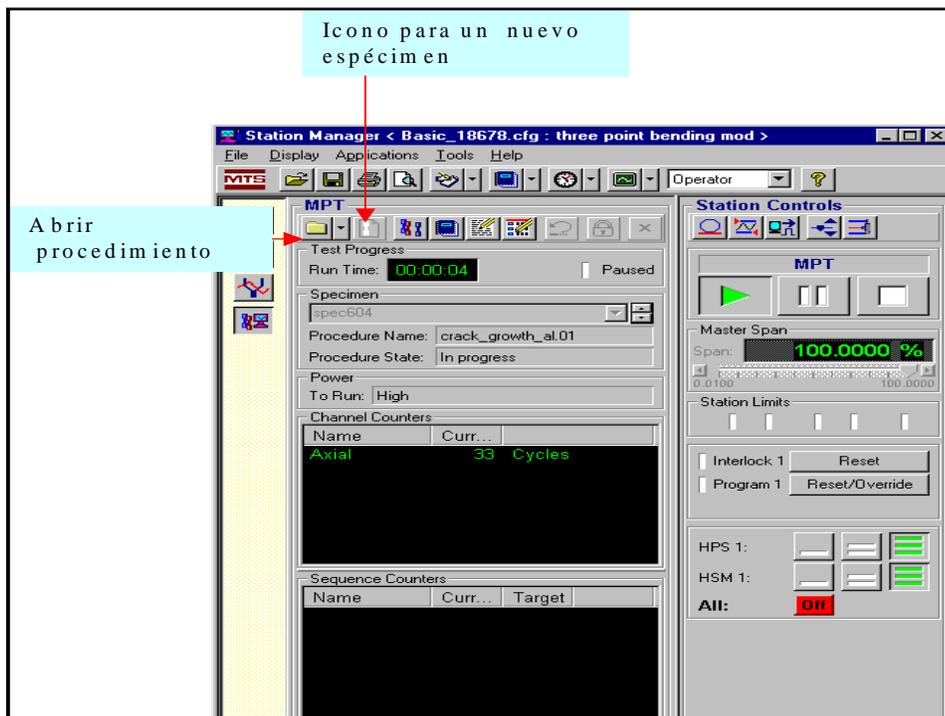


Figura 2.16 a) Cuadro de diálogo para especificar las acciones para dar inicio a la prueba.

Para la activación del modo de fuerza en comando manual. Primeramente estando en modo de control de desplazamiento se activa seleccionando en *Enable Manual Command* y se elige Fuerza, posteriormente se desactiva el *Enable Manual Command* Figura 2.16 b).

Nota: es importante seguir este procedimiento al activar el modo de control de fuerza de lo contrario el pistón se desplaza hacia abajo súbitamente y la probeta se desgarrar.



Figura 2.16 b) Comando manual en el modo de control de fuerza

Cuando se da inicio a la prueba, se aprecia una pantalla (Osciloscopio) donde se puede observar la carga configurada moviéndose cíclicamente, en color azul la carga configurada y en color rojo la carga real aplicada, es importante mantener una misma amplitud de onda, para mantener $R = 0.12$, como se observa en la Figura 2.17.

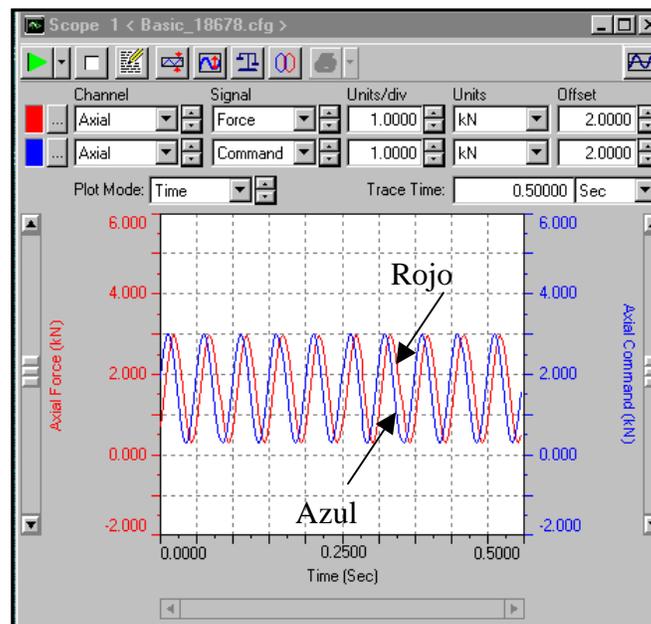


Figura 2.17 Muestra el osciloscopio en la que se aprecia la carga real aplicada y carga configurada.

2.4 “Resultados experimentales.”

El ensayo de crecimiento de grietas a fatiga se realizó sobre dos probetas que caracterizan el crecimiento de grietas a fatiga en dos direcciones perpendiculares. Por lo que para cada una de estas probetas finalmente se registra en el ensayo la magnitud de avance de la grieta (LG) contra número de ciclos aplicados. Estos resultados se tabulan a continuación debajo.

Tabla 2.3 Longitudes obtenidas de las mediciones realizadas a las grietas presentes en las probetas 1 y 2.

No. Ciclos	LG (mm),P1	a (mm), P1	LG(mm),P2	a (mm), P2
0	4	16	3.7	15.7
2000	4.5	16.5	3.8	15.8
4000	4.7	16.7	4	16
6000	5.2	17.2	4.3	16.3
8000	5.5	17.5	4.5	16.5
10000	6	18	5	17
12000	6.4	18.4	5.3	17.3
14000	6.9	18.9	5.8	17.8
16000	7.7	19.7	6	18
18000	8.5	20.5	6.5	18.5
20000	9.5	21.5	6.9	18.9
22000	10.1	22.1	7.3	19.3
24000	10.7	22.7	7.8	19.8
26000	11.5	23.5	8.3	20.3
28000	12.8	24.8	8.9	20.9
30000	13	25	9.3	21.3
30987	14.8	26.8	9.6	21.6
32000			9.9	21.9
34000			10.7	22.7
36000			11.8	23.8
38000			12.7	24.7
40000			14.8	26.8

Tabla 2.4 Razón de da/dN, valor de ΔK , log ΔK y log da/dN. Probeta 1

P1- da/dN (mm/ciclos)	P1- \bar{a} (mm)	P1- ΔK (MPa*m ^{1/2})	P1- log (ΔK)	P1- log (da/dN)
0.00025	16.25	345.0145019	2.53783735	3.602059991
1E-04	16.6	351.1718406	2.54551968	-4
0.00025	16.95	357.4331315	2.55319481	3.602059991
0.00015	17.35	364.724385	2.5619648	3.823908741
0.00025	17.75	372.1697834	2.57074111	-

				3.602059991
				-
0.0002	18.2	380.7433007	2.58063227	3.698970004
				-
0.00025	18.65	389.5412705	2.59055348	3.602059991
				-
0.0004	19.3	402.6803671	2.60496046	3.397940009
				-
0.0004	20.1	419.625537	2.62286191	3.397940009
				-
0.0005	21	439.8446907	2.64329935	3.301029996
				-
0.0003	21.8	458.9878414	2.66180118	3.522878745
				-
0.0003	22.4	474.1594518	2.67592441	3.522878745
				-
0.0004	23.1	492.8428994	2.6927085	3.397940009
				-
0.00065	24.15	523.112021	2.7185947	3.187086643
				-
0.000669568	25.8	577.1869958	2.76131654	3.174205227

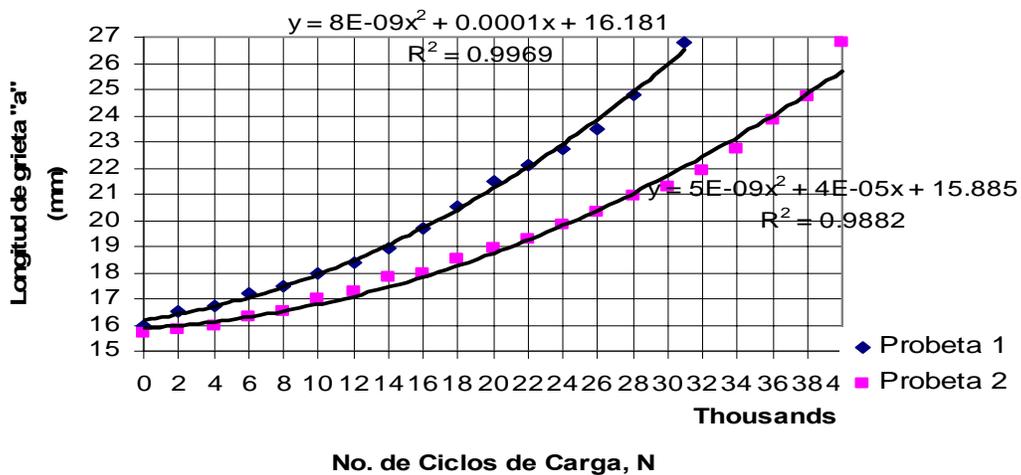
Tabla 2.5 Razón de da/dN, valor de ΔK , log ΔK y log da/dN. Probeta 2

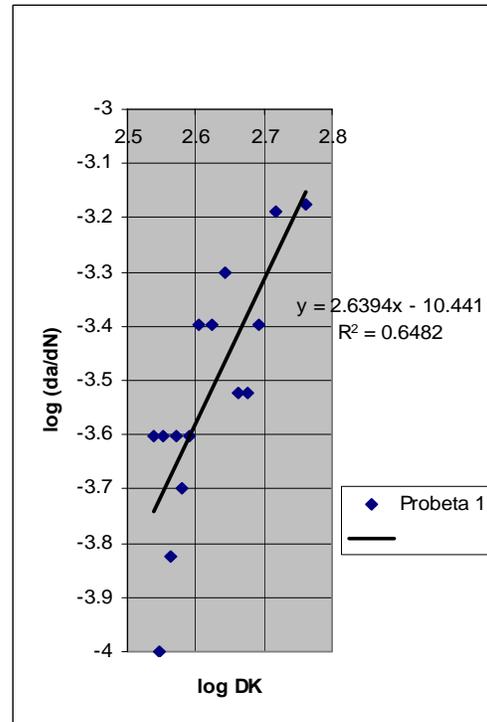
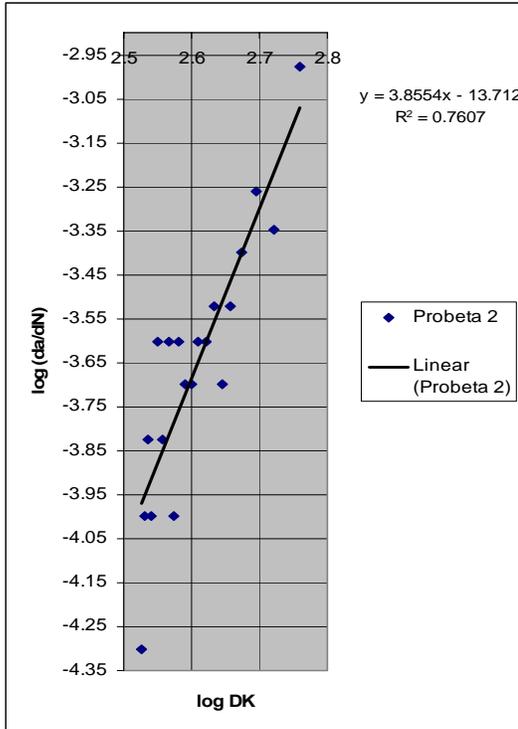
P2- da/dN (mm/ciclos)	P2- \bar{a} (mm)	P2- ΔK (MPa*m ^{1/2})	P2- log (ΔK)	P2- log (da/dN)
				-
5E-05	15.75	336.386605	2.52683869	4.301029996
1E-04	15.9	338.9550208	2.53014207	-4
				-
0.00015	16.15	343.2734957	2.53564027	3.823908741
1E-04	16.4	347.6410299	2.54113103	-4
				-
0.00025	16.75	353.8421567	2.54880957	3.602059991
				-
0.00015	17.15	361.0601291	2.55757953	3.823908741
				-
0.00025	17.55	368.4271685	2.56635165	3.602059991
1E-04	17.9	375.0036887	2.57403554	-4
				-
0.00025	18.25	381.7094674	2.58173293	3.602059991
				-
0.0002	18.7	390.5334051	2.59165819	3.698970004
				-
0.0002	19.1	398.5806723	2.60051624	3.698970004
				-
0.00025	19.55	407.8795838	2.61053197	3.602059991
				-
0.00025	20.05	418.5395399	2.62173649	3.602059991
				-
0.0003	20.6	430.6968458	2.63417169	3.522878745
				-
0.0002	21.1	442.1741887	2.64559339	3.698970004
				-
0.0003	21.6	454.0905249	2.65714244	3.522878745

0.0004	22.3	471.5790499	2.6735545	3.397940009
0.00055	23.25	496.9949268	2.69635196	3.259637311
0.00045	24.25	526.1492756	2.72110898	3.346787486
0.00105	25.75	575.4142921	2.75998064	2.978810701

En la Figura, se emplearon dos probetas con las mismas condiciones de carga, sin embargo, se puede observar que se necesitaron un mayor número de ciclos para alcanzar la misma longitud de grieta de 15 mm en la probeta 2 que en la 1.

Los gráficos que se muestran debajo fueron obtenidos a partir del procesamiento de los datos experimentales obtenidos utilizando una Hoja de Cálculo elaborada en Microsoft Excel que se muestra en el Anexo No. 2.





A partir de los resultados obtenidos por las ecuaciones que plantea la norma ASTM E 647 para realizar el experimento, se obtuvieron las graficas antes expuestas y de estas se tomaran los valores para confeccionar la ecuación de Paris que plantea lo siguiente:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

$$\log \frac{da}{dN} = \log [C (\Delta K)^m]$$

$$\log \frac{da}{dN} = \log C + m \log \Delta K$$

$$\log \frac{da}{dN} = m \log \Delta K + \log C$$

La ecuación de la recta plantea que: $y = mx + b$
 Donde:

$$y = \log \frac{da}{dN}$$

$$x = \log \Delta K$$

$$m = m$$

$$b = \log C \Rightarrow 10^b = C$$

Sustituyendo obtengo

Probeta 1

$$Y = 2.6394x - 10.441$$

$$R = 0.6482$$

$$M = 2.6482$$

$$C = 10^{-10.441}$$

Por lo que la ecuación de Paris que describe el comportamiento del crecimiento de grietas a fatiga para la probeta 1 queda:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-10.441} * (\Delta K)^{2.6394}$$

Probeta 2

$$y = 3.8554x - 13.712$$

$$R = 0.7607$$

$$m = 3.8554$$

$$C = 10^{-13.712}$$

Por lo que la ecuación de Paris que describe el comportamiento del crecimiento de grietas a fatiga para la probeta 2 queda:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-13.712} * (\Delta K)^{3.8554}$$

CONCLUSIONES

Conclusiones

1.- Se determinaron las ecuaciones de Paris que describen el crecimiento de grietas a fatiga para la aleación de aluminio 5454 H32 en el sentido del laminado y perpendicular a este.

2.- Se considera que el R del ajuste de estas ecuaciones es aceptable debido a la naturaleza compleja del fenómeno que se ensaya, influenciado por múltiples factores, como estructura del metal, distribución de fases y compuestos en la aleación, defectos internos de la red cristalina y del metal, etc.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones

- 1.- Aplicar estas ecuaciones de Paris al establecimiento de un periodo de inspección seguro que permita a CUPET la explotación segura de estos equipos, sin el peligro de una catástrofe.
- 2.- Realizar estas pruebas a un mayor número de probetas con el objetivo de obtener un mejor acercamiento en cuanto al periodo de inspección de los tanques CUPET

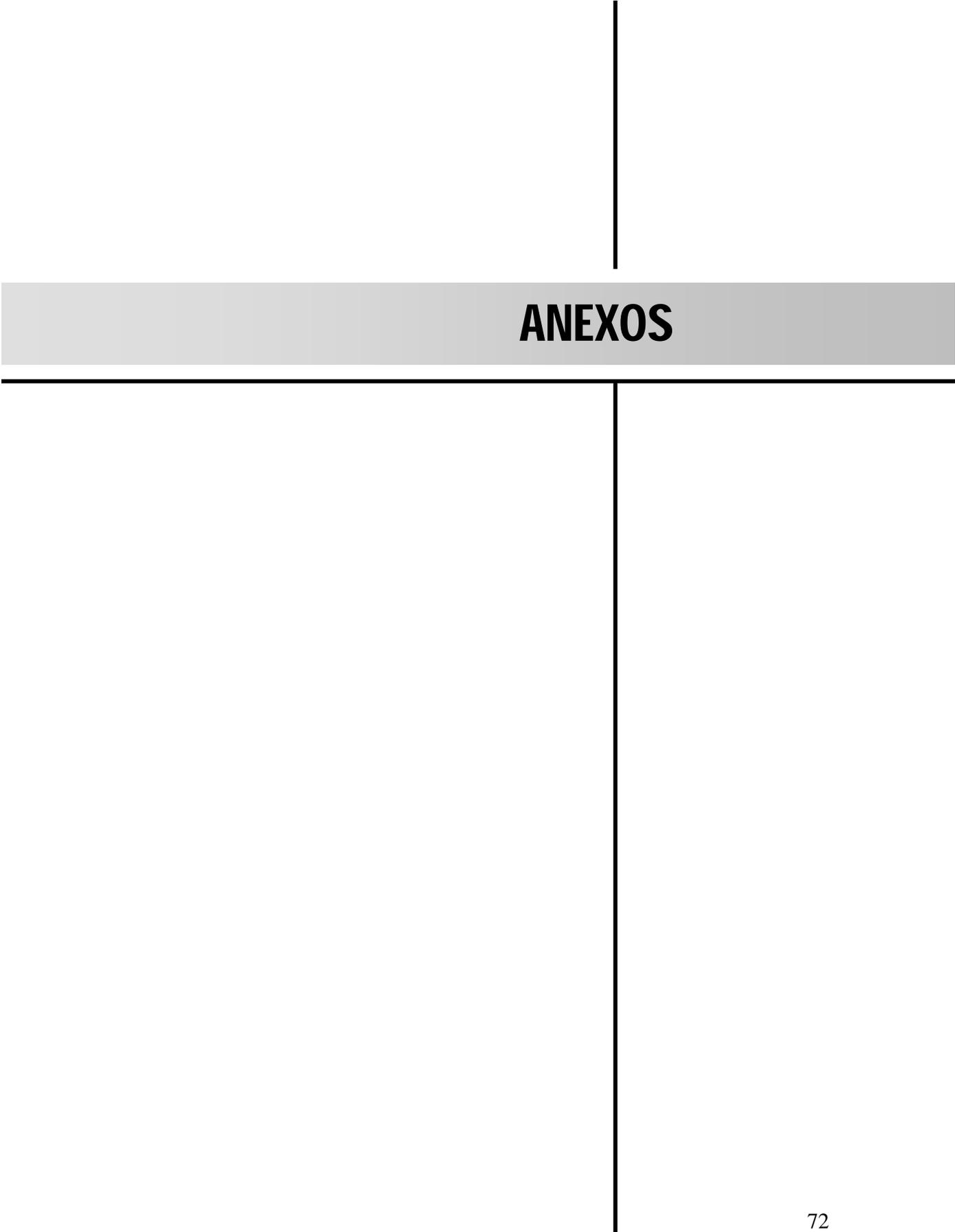


BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

- [1] ASTM Annual book of ASTM Standards, v.03.01 No. E616-82 Standard Terminology Relating to Fracture Testing 1986.
- [2] ASTM E 647. Standard Test Method for Measurement of fatigue Crack Growth Rates 1995.
- [3] ASTM Annual book of ASTM Standards, v.03.01 No. E399-90 Standard Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials 1997.
- [4] ASTM Annual book of ASTM Standards, v.03.06 No. E1251-94 Optical Emission Spectrometric Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by the Argon Atmosphere, point-to-plane, Unipolar Self-Initiating Capacitor Discharge 1999.
- [5] ASTM Annual book of ASTM Standards, v.03.01 No. E647-00 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack growth Rates 2002.
- [6] Fatigue crack propagation of D6AC laser welds.
- [7] Jorge L. González V. Apuntes de metalurgia mecánica, ed. Autor, 1998.
- [8] NOM-020-SCT2. Requerimiento general para el diseño y construcción de autotankes destinados al transporte de material y residuos peligrosos 1995.
- [9] Norman E. Dowling, Mechanical behavior of materials, Second Edition, Prentice Hall, 1999.
- [10] Paredes Guillen, Marco Antonio. El efecto de laser shock processing en el crecimiento de grieta por fatiga de la aleación de aluminio 6061-T6/ Marco Antonio Paredes Guillen; Dr. José Solís Romero, Dr. Carlos Rubio González – TGC; ITT; 2004-108 h.
- [11] William D. Callister, Jr. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, tercera edición, ed. Reverté, 1985.



ANEXOS

Anexo 1

